

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



**Comparación de Cinco Métodos para la Determinación del Contenido de
Humedad del Suelo**

Por:

Justino Gutiérrez Muñoz

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial
para Obtener el Título de:**

Ingeniero Agrónomo en Irrigación

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2001

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

TESIS

Comparación de Cinco Métodos para la Determinación del Contenido de
Humedad del Suelo

Por:

Justino Gutiérrez Muñoz

Que somete a consideración del H. Jurado Examinador
como Requisito Parcial para obtener el Título de:

Ingeniero Agrónomo en Irrigación

Aprobada:

Dr. Alejandro Zermeño González
Presidente

Dr. Juan P. Munguía López
Coasesor

Ing. Carlos Rojas Peña
Coasesor

Ing. Tomás Reyna Cepeda
Suplente

M. C. Jesús R. Valenzuela García
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México; Junio de 2001.

“De todas las ocupaciones de las que se deriva beneficio alguno, no hay ninguna tan amable, tan saludable y tan merecedora de la dignidad del hombre libre, como la “AGRICULTURA”.

CICERON

AGRADECIMIENTOS

A MI ALMA TERRA MATER que le debo tanto por permitirme la formación en sus instalaciones como profesional y por ser como un segundo hogar.

A mis Asesores

Dr. Juan P. Munguía López
Dr. Alejandro Zermeño González
M.C. Luis Edmundo Ramírez Ramos
Ing. Carlos Rojas Peña
Ing. Tomás Reyna Cepeda
Ing. Felipe Hernández Castillo

Por su valiosa colaboración, apoyo y asesoría para la realización del presente trabajo de investigación.

Al Centro de Investigación en Química Aplicada (C.I.Q.A.), por permitirme realizar este trabajo de investigación dentro del proyecto “Aplicación de derivados de algas marinas y labranza de conservación en cultivos de relevos maíz, frijol y trigo para lograr el mejor aprovechamiento de los recursos suelo - agua”, financiado por Sireyes.

A mis Profesores. A todos y cada uno de ellos, que compartieron conmigo sus conocimientos y sus sabios consejos, y lograron formar un profesionista más que les estará siempre agradecido.

A mis Mejores Amigos. Rosa Isela Caso Vega, Francisco Cruz Gtz., M^a Guadalupe Gdz. Rguez, Joaquín Mendoza Estrada, José I. Maas Dzib, Vidal T. Perea Cruz, Job Adán Rguez. Rivera, Héctor L. Rodríguez, Abelina Roldán Maqueda, Valentín Santiago Cruz y Juana G. Couoh Cab. Gracias por su Amistad.

A mis Amigos y Compañeros. Lidia Y. Buendía R., Alexsi de los Santos C., Felipe Hdz. Mtz., Juan Jiménez A., Juan R. Mtz. Campos, Rosa A. Mejía Ortiz, Arturo Meza Flores, Omar Moreno A., Jorge Elí Muñoz Ramírez, Javier Pacheco Díaz, Wilber O. Pérez Miguel, Joaquín Sánchez Gtz., Miguel Santiago López, Aristeo Vásquez Mtz., Jesús P. Zamudio A., con quienes compartí muchos momentos agradables y felices que siempre recordaré.

DEDICATORIAS

A **DIOS**, a esa gran inteligencia que no deja nada al azar, de todo corazón por darme la oportunidad de vivir y conocer este maravilloso mundo y su gente. GRACIAS.

A MIS PADRES

Ramiro Gutiérrez Cerón.

Irma Muñoz Martínez.

Con mucho cariño y respeto ya que siempre han sido un ejemplo a seguir y me han apoyado durante toda mi vida y han respetado mis decisiones, a ellos les dedico éste triunfo, el cual no habría sido posible sin su ayuda. Se los agradezco de todo corazón.

A MIS HERMANOS

Luis Alberto

Yazmín

Geovanni Azael

Kenia Jatziri

Gracias por el apoyo y los mejores momentos de mi vida, por su amistad incondicional y su cariño.

A **la Familia Ramírez Andrade** por todo el apoyo y la amistad que me ofrecieron durante el tiempo que estuve estudiando.

INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
INDICE DE CUADROS	x
INDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Humedad del Suelo.....	4
Términos sobre el Contenido de Agua en el Suelo.....	5
Saturación.....	5
Capacidad de Campo.....	5
Punto de Marchitamiento Permanente.....	6
Capacidad de Retención de Agua.....	6
Agua Disponible.....	7
Efecto de la Textura del Suelo sobre el Almacenamiento de Humedad.....	8
Determinación de la Humedad del Suelo.....	8
Métodos para Determinar la Humedad del Suelo.....	9
Métodos Directos.....	9
Método al Tacto.....	9
Método Gravimétrico.....	11
Principales Ventajas.....	12
Principales Desventajas.....	12
Métodos Indirectos.....	13
Tensiómetros.....	13

Preparación de los Tensiómetros para su Instalación.....	14
Elección del Lugar Adecuado para la Instalación.....	16
Instalación.....	17
Bomba Manual de Vacío.....	19
Interpretación de Lecturas.....	19
Principales Ventajas.....	20
Principales Desventajas.....	21
Bloques de Yeso o de Resistencia Eléctrica.....	21
Instalación.....	23
Principales Ventajas.....	24
Principales Desventajas.....	25
Aspersor de Neutrones.....	25
Conteo Estándar.....	28
Calibración.....	29
Material de los Tubos de Acceso.....	30
Instalación de los Tubos de Acceso.....	31
Principales Ventajas.....	31
Principales Desventajas.....	32
Medidor Rápido de Humedad Speedy.....	33
Time Domain Reflectometry (TDR).....	33
Evolución de la Tecnología TDR.....	33
El Amplio Rango de Aplicación del TDR.....	35
Descripción.....	35
Rango de Operación.....	36
Contenido de Materia Orgánica y Arcilla en el Suelo.....	37
Longitud del Cable.....	37
Instalación.....	37
Problemas Potenciales por una Instalación Inapropiada.....	37

Trabajos de Investigación.....	38
Efectos de la Temperatura Sobre el Conteo Estándar.....	38
Precisión del Dispensor de Neutrones y Sonda de Capacitancia para la Determinación del Contenido de Humedad del Suelo a partir de la Calibración en Campo.....	40
MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
Características del Sitio Experimental.....	42
Localización Geográfica.....	42
Suelo.....	42
Descripción de los Métodos.....	44
Método Gravimétrico.....	45
Tensiómetros.....	46
Bloques de Resistencia Eléctrica.....	47
Aspersor de Neutrones.....	48
Especificaciones del Aspersor de Neutrones.....	49
Time Domain Reflectometry (TDR).....	50
Descripción.....	50
Especificaciones.....	50
Dimensiones.....	50
Peso.....	51
Eléctrico.....	51
Especificaciones de Funcionamiento.....	51
Precisión.....	51
Resolución.....	51
Rango de Operación.....	52
Longitud del Cable.....	52
Temperatura.....	52
Instalación.....	53
Orientación.....	53
Ajustes.....	54
General.....	54

Calibración para un Suelo Específico.....	55
Curva de Retención de Humedad.....	55
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
CONCLUSIONES.....	91
LITERATURA CITADA.....	92

INDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 2.1 Guía para la interpretación de la humedad del suelo.....	10
Cuadro 2.2 Capacidades usables de las humedad del suelo.....	11
Cuadro 2.3 Profundidades recomendadas para la instalación de los tensiómetros.....	16
Cuadro 2.4 Interpretación de lecturas de tensiómetros.....	20
Cuadro 2.5 Profundidades recomendadas para la instalación de los bloques de resistencia eléctrica.....	24
Cuadro 3.1 Resultado del análisis físico del suelo.....	43
Cuadro 3.2 Lecturas de la estandarización de los tensiómetros.....	46
Cuadro 3.3 Valores de conductividad eléctrica y fórmula de calibración para el reflectómetro CS615.....	55
Cuadro 4.1 Comparación de Pw obtenidos en base a tensiómetros y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 00-20.....	76
Cuadro 4.2 Comparación de Pw obtenidos en base a tensiómetros y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 20-40.....	77
Cuadro 4.3 Comparación de Pw obtenidos en base a tensiómetros y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 40-60.....	78
Cuadro 4.4 Comparación de Pw obtenidos en base a bloques de resistencia y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 00-20.....	81

Cuadro 4.5	Comparación de Pw obtenidos en base a bloques de resistencia y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 20-40.....	82
Cuadro 4.6	Comparación de Pw obtenidos en base a bloques de resistencia y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 40-60.....	83
Cuadro 4.7	Comparación de Pw obtenidos en base a TDR para el estrato 00-20.....	86
Cuadro 4.8	Comparación de Pw obtenidos en base a TDR para el estrato 20-40.....	87
Cuadro 4.9	Comparación de Pw obtenidos en base a TDR para el estrato 40-60.....	88

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Tensiómetros.....	14
Figura 2.2 Bloques de yeso o de resistencia eléctrica.....	22
Figura 2.3 Aspensor de neutrones.....	28
Figura 2.4 Conteo estándar para la sonda de neutrones (modelo 503DR, Campbell Pacific Nuclear International, Martínez, CA) y la correspondiente temperatura ambiente del aire en Maraná, Arizona, USA, 1985.....	39
Figura 3.1 Vista de perfil del cajete mostrando los sensores a las diferentes profundidades.....	43
Figura 3.2 Vista superior mostrando la ubicación espacial de los sensores dentro del cajete.....	44
Figura 3.3 Curvas características de retención de humedad.....	57
Figura 4.1 Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con el método gravimétrico.....	60
Figura 4.2 Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con aspensor de neutrones.....	60
Figura 4.3 Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con tensiómetro.....	61
Figura 4.4 Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con bloques de resistencia.....	61
Figura 4.5 Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con sensor TDR.....	62

Figura 4.6	Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con el método gravimétrico (Pw Grav), aspersionador de neutrones (Pw Rc), tensiómetros (Pw Tensióm.), bloques de resistencia (Pw Bloq.) y TDR (Pw TDR).....	62
Figura 4.7	Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con el método gravimétrico.....	65
Figura 4.8	Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con aspersionador de neutrones.....	65
Figura 4.9	Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con tensiómetro.....	66
Figura 4.10	Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con bloques de resistencia.....	66
Figura 4.11	Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con sensor TDR.....	67
Figura 4.12	Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con el método gravimétrico (Pw Grav), aspersionador de neutrones (Pw Rc), tensiómetros (Pw Tensióm.), bloques de resistencia (Pw Bloq.) y TDR (Pw TDR).....	67
Figura 4.13	Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con el método gravimétrico.....	69
Figura 4.14	Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con aspersionador de neutrones.....	69
Figura 4.15	Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con tensiómetro.....	70
Figura 4.16	Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con bloques de resistencia.....	70
Figura 4.17	Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con sensor TDR.....	71

Figura 4.18	Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con el método gravimétrico (Pw Grav), aspersion de neutrones (Pw Rc), tensiómetros (Pw Tensióm.), bloques de resistencia (Pw Bloq.) y TDR (Pw TDR).....	71
Figura 4.19	Contenido de humedad para el estrato 60-80 cm con el método gravimétrico.....	73
Figura 4.20	Contenido de humedad para el estrato 60-80 cm con aspersion de neutrones.....	73
Figura 4.21	Contenido de humedad para el estrato 60-80 cm con sensor TDR.....	74
Figura 4.22	Contenido de humedad para el estrato 60-80 cm con el método gravimétrico (Pw Grav), aspersion de neutrones (Pw Rc), tensiómetros (Pw Tensióm.), bloques de resistencia (Pw Bloq.) y TDR (Pw TDR).....	74
Figura 4.23	Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 00-20 medido con tensiómetros.....	79
Figura 4.24	Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 20-40 medido con tensiómetros.....	79
Figura 4.25	Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 40-60 medido con tensiómetros.....	80
Figura 4.26	Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 00-20 medido con bloques de resistencia.....	84
Figura 4.27	Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 20-40 medido con bloques de resistencia.....	84
Figura 4.28	Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 40-60 medido con bloques de resistencia.....	85
Figura 4.29	Relación entre contenido volumétrico de humedad en el suelo y Pw para el estrato 00-20 medido con TDR.....	89
Figura 4.30	Relación entre contenido volumétrico de humedad en el suelo y Pw para el estrato 20-40 medido con TDR.....	89

Figura 4.31 Relación entre contenido volumétrico de humedad en el
suelo y Pw para el estrato 40-60 medido con TDR..... 90

INTRODUCCIÓN

El agua es fundamental para la vida de todos los que habitamos la Tierra: plantas, animales y seres humanos. Pero, como siempre disponemos de ella, pocas veces nos damos cuenta de la importancia que encierra.

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). Cuando el suelo posee buenas condiciones físicas permite un adecuado suministro de agua y aire, facilita la absorción de nutrimentos por las plantas y constituye un medio que garantiza el desarrollo de las raíces. Sin embargo, cuando sus condiciones son inadecuadas se presenta como un impedimento mecánico que se resiste a la penetración de las raíces, con baja macroporosidad que conlleva a excesos de humedad y déficit de oxígeno, que afectan al desarrollo y producción de cultivos (Claudharry *et al.*, 1985).

El contenido de humedad de los suelos es un importante factor que afecta al crecimiento y desarrollo de las raíces de los cultivos, así Viets (1967), indicó que las raíces de las plantas se ven incapaces de absorber suficientes nutrimentos en suelos secos, debido a la poca actividad radical y a las bajas

tasas de difusión de iones y del movimiento de agua. También los excesos de humedad ocasionan un efecto negativo al desarrollo de las raíces ya que el aire del espacio poroso es desplazado (Benett y Doss, 1960). Cuando se mejora la densidad aparente, la porosidad, el tamaño de agregados y el contenido de humedad del suelo, al usar implementos de labranza profunda (Subsolador), las plantas pueden desarrollar un mayor sistema radical, peso seco de la planta y producción (Ohep, 1987).

La escasez de los recursos hídricos y las características climáticas, convierten al agua, sin ningún género de dudas, en el factor más limitante de la productividad agrícola. Un elevado porcentaje de la superficie regada se encuentra sometida a riegos por tandas que impiden la deseable programación del mismo en función de las necesidades actuales del cultivo.

La aplicación de volúmenes de riego calculados con base a datos climáticos (radiación, evaporación, viento, humedad, etc.) y propios del cultivo (coeficientes de cultivo) pueden suponer una mayor eficacia del riego (kilos de cosecha / unidad de agua aplicada) así como la posibilidad de ahorro de agua. Este último aspecto que para su logro debe de basarse igualmente en la adecuada nivelación de parcelas, revestimiento de canales, cálculo y diseño de las instalaciones de riego, y otros para la estimación y determinación del contenido de humedad.

El instrumental existente (sonda de neutrones, tensiómetros, bloques de yeso, cámara de presión, porómetro, termómetro de infrarrojos, etc.), permite el exhaustivo control tanto del suelo como de la planta, aunque la utilización de la mayoría de estos aparatos se restringe a fines de investigación en ensayos de riego, que en general resultan de larga duración.

En el caso de programar el riego basándose en bancos de datos agroclimáticos, el control del estado hídrico del suelo o la planta puede permitir

la adecuación a la realidad específica de cada momento de las dosis de riego calculadas.

No obstante la racionalización de los aportes hídricos a la vista de la situación del sistema suelo - planta - ambiente, puede evitar situaciones claramente limitantes de la producción, esencialmente en los momentos críticos del cultivo, tales como los de inducción floral, los de floración cuaje, primeros desarrollos del fruto, etc.

Por esto es de suma importancia la determinación de la humedad existente en el suelo, al respecto existen varios métodos para realizar esta cuantificación de la manera más exacta y más conveniente de acuerdo a las necesidades de los cultivos.

OBJETIVO

Comparar diferentes métodos para estimar el contenido de humedad y determinar su grado de precisión y confiabilidad.

REVISION DE LITERATURA

Humedad del Suelo

Uno de los conocimientos empíricos más antiguos del hombre es la influencia de la humedad del suelo en el desarrollo de las plantas. Ésto lo motivo a tratar de entender y clasificar al agua del suelo. En 1897, Briggs y Shantz propusieron la primera clasificación fundamentada, en la que consideraron tres categorías:

- a) Agua gravitacional, es decir, la fracción del agua que al ser aplicada al suelo drena libremente.
- b) Agua capilar, constituida por la fracción en los poros del suelo.
- c) Agua higroscópica, el agua en estrecho contacto con la fase sólida.

En 1928, Lebedeff añadió a esta clasificación una categoría más: el vapor de agua del suelo.

Sin embargo, esta clasificación pronto dejó de usarse debido a la imposibilidad para determinar en forma cuantitativa y precisa la cantidad de agua que corresponde a cada categoría y a la poca relación que tienen con el desarrollo de las plantas.

Términos sobre el Contenido de Agua en el Suelo

Citamos los términos relacionados con la parte cuantitativa del agua presente en el suelo, siendo los siguientes:

Saturación

Se define como el punto en el cual, el agua ocupa todo el espacio de poros del suelo.

Capacidad de Campo

El término Capacidad de Campo (CC) fue introducido por Veihmeyer y Hendrickson en 1931, quienes lo definieron como la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener en contra de la fuerza de gravedad; expresado de otra forma, es el contenido de humedad que permanece en el suelo después de un riego pesado o de una lluvia fuerte, cuando cesa prácticamente el movimiento descendente del agua.

El valor de capacidad de campo se puede estimar por el equivalente de humedad, con base en el método de las columnas de suelo Colman o, para algunos suelos, dividiendo entre dos el contenido de humedad en pasta de saturación.

El equivalente de humedad es el contenido de agua que conserva una muestra de suelo que, después de saturada, es sometida a una fuerza centrífuga equivalente a 1000 veces la gravedad durante 30 minutos. Los laboratorios de suelos la expresan generalmente como una medición efectuada a $\frac{1}{3}$ de bar de tensión (0.3 bar) aproximada. La capacidad de campo también

se le ha llamado capacidad de conducción de campo, capacidad de humedad normal y capacidad capilar.

Punto de Marchitamiento Permanente

El concepto de Punto de Marchitamiento Permanente (PMP) fue propuesto en 1911 por Briggs y Shantz, y se define como el contenido de humedad existente en un suelo cuando una planta indicadora (girasol o jitomate con 4 ó 5 hojas) recién marchita no es capaz de recobrar su turgencia ni en una atmósfera saturada de humedad.

Es el nivel más bajo de humedad aprovechable, y generalmente se determina a 1.5 MPa de presión. El término PMP es característico del perfil, que incluye no solamente la cantidad de agua en el suelo a varias profundidades, sino también la velocidad con que el agua se moviliza a las raíces de la planta. Considera no solo la superficie del suelo, si no todo el suelo en el que crecen raíces de plantas.

Para estimar el valor de PMP puede utilizarse el coeficiente de marchitamiento que resulta de dividir el equivalente de humedad entre 1.84. El contenido de humedad de una muestra de suelo sujeta a una tensión de 1.5 MPa es otro buen estimador del PMP.

Capacidad de Retención de Agua

Un perfil de suelo tiene la aptitud de retener cantidades variables de agua dependiendo de características como la textura, estructura, contenido de materia orgánica, porosidad, etc. Sin embargo, no toda el agua está a disposición de las plantas; los conceptos de capacidad de campo y punto de

marchitamiento permanente así lo demuestran. Por lo tanto la capacidad de retención de agua es la cantidad de agua que el perfil puede retener cuando esta seco.

Agua Disponible

La cantidad de agua retenida por el suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente, abarca ese porcentaje de agua del suelo que puede ser extraído por las plantas. Esta es el agua disponible y el 75 por ciento de la misma se denomina humedad fácilmente disponible (Gavande (1982), Buckman y Brady (1977), Agricultura de las Américas (1982)).

El agua de riego se debe aplicar en la época y en la cantidad correcta para producciones constantemente altas. La aplicación excesiva de agua reduce la producción llevando los nitratos a profundidades por debajo de la penetración de la raíz, y desplazando el aire del suelo por demasiado tiempo, causando una carencia de oxígeno a las raíces. La escasez del agua también reduce los rendimientos.

La cantidad de agua que puede ser almacenada varía entre los suelos dependiendo sobre todo del número y tamaño de los espacios porosos que contienen, y la profundidad de las capas del suelo dificultan la penetración del agua. El número y tamaño de los espacios porosos de un suelo dependen sobre todo de su textura, contenido de materia orgánica y estructura.

Gavande (1982), menciona que hay dos objetivos en la medición del agua del suelo, siendo los siguientes:

- a) Determinar el contenido de humedad de un suelo. Esta información es necesaria para calcular el agua que se necesita para restaurar la humedad del suelo y llevarlo a la capacidad de campo.
- b) Determinar la magnitud del potencial del agua del suelo, que es la cantidad de trabajo necesaria para remover una cantidad equivalente a una unidad de agua retenida más flojamente.

Efecto de la Textura del Suelo sobre el Almacenamiento de Humedad

La textura del suelo se refiere al tamaño y cantidad de partículas de arena cuyo tamaño oscila en un rango que va desde 0.02 hasta 1 mm, limo de 0.002 hasta 0.05 mm y la arcilla con tamaño menor de 0.002 mm. Las proporciones de arena, limo y arcilla determinan la textura de un suelo.

Gavande (1982), menciona que el espacio poroso está constituido por todo el volumen aparente no ocupado por los sólidos. Los suelos de textura fina, como las arcillas, tienen más espacio poroso total que los de textura gruesa. Aunque los poros individuales son, generalmente, más pequeños, hay muchos más poros y el resultado neto es una porosidad total mayor en los suelos finos. Por lo tanto, en el estado de saturación, los suelos de textura fina contienen mayor cantidad de agua que los suelos de textura gruesa.

Determinación de la Humedad del Suelo

No toda la precipitación anual es almacenada en el suelo y está disponible para las plantas. La precipitación puede ser almacenada en la zona radicular, drenada a zonas más bajas que la zona de raíces, usada por malezas y plantas

oportunistas, evaporarse desde la superficie del suelo, caer como nieve o perderse como escurrimientos.

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

1. Métodos Directos
 - a) Al Tacto.
 - b) Gravimétrico.
 - c) Lisimétrico.

2. Métodos Indirectos
 - a) Tensiómetros.
 - b) Resistencia Eléctrica.
 - c) Aspensor de Neutrones.
 - d) Medidor Rápido de Humedad Speedy.
 - e) Time Domain Reflectometry (TDR).

Métodos para Estimar la Humedad del Suelo

Métodos Directos

Método al Tacto

Miles, 1998. La sensación y el aspecto del suelo indican el estado de la humedad. Se puede utilizar un tubo, un taladro o una pala espada para hacer un muestreo de suelos y poder determinar el contenido de humedad. Tome las muestras del suelo en estratos a lo largo de la profundidad de la zona activa de

la raíz. Haga una estimación del estado de la humedad del suelo exprimiendo firmemente un puñado de suelo y comparando resultados con el Cuadro 2.1.

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

Deficiencia de humedad del suelo	Textura gruesa	Textura media	Textura fina
0% (Cap. Campo)	Cuando se comprime no sale agua del suelo, pero el contorno de la bola deja una huella húmeda en la mano. *		
0-25%	La forma de la bola es débil, se rompe fácilmente cuando se hace saltar sobre la mano. *	Se forma la bola, es muy flexible, se resbala fácilmente. *	Fácilmente se hacen cintas hacia fuera entre el pulgar y el índice cuando se le amasa. *
25-50%	Se formará la bola, pero no suele mantenerse compacta. *	Forma la bola, es resbalosa bajo presión. *	Forma la bola, se forman cintas hacia fuera entre el pulgar y el índice. *
50-75%	Aparece seco, no formará la bola con la presión. *	Desmenuzable, se mantiene junta debido a la presión. *	Algo flexible, se formará la bola bajo presión. *
75-100%	Seco, flojo, se disgrega entre los dedos.	Polvoriento, se desmenuza fácilmente.	Duro, difícil de romperse al oprimirla.
* Lo bola se forma cuando se amasa con fuerza una muestra de tierra húmeda.			

Utilizando el Cuadro 2.2 para determinar la cantidad de agua requerida para rellenar la zona de la raíz basado en el porcentaje de deficiencia de la humedad del suelo. Por ejemplo, puede ser estimado que un suelo arcilloso 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 la raíz.

Cuadro 2.2. Capacidades usables de la humedad del suelo.

Textura	Humedad Aprovechable cm/30 cm
Fina y Muy Fina (arcilla, arcilla limosa, arcilla arenosa, franco arcilla limosa, franco arcillosa)	4.064 – 6.35
Media (franco limosa, franco arcillo arenosa, franco, franco arenosa muy fina)	3.556 – 6.096
Moderadamente grueso (franco arenosa fina, franco arenosa)	2.54 – 4.064

Método Gravimétrico

El principio de este método se basa en la determinación de la masa de 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 el contenido de humedad del suelo, el cual se calcula por medio de la fórmula.

$$P_w = \frac{m_w}{m_s} * 100 = \left(\frac{PSH - PSS}{PSS} \right) * 100$$

El porcentaje gravimétrico de agua (P_w) indica los gramos de masa de agua (m_w) que existen en un suelo por cada 100 g de masa de sólidos (m_s). Se determina al pesar una muestra de suelo húmedo (PSH); luego, se seca en la estufa a 105 - 110°C, se enfría y su peso de suelo seco (PSS) 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 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 la humedad

por evaporación, para evitar esto se depositan en latas o frascos y se cierran 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 abolladuras o 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 la mano de obra.

Principales Desventajas:

- El método es lento; normalmente se requieren más de 24 horas para obtener la información.
- 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 punto de observación y promediar los valores después de descartar las observaciones que se consideren erróneas.

- 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.

Métodos Indirectos

Tensiómetros

Es una técnica sencilla que se emplea para determinar total o parcialmente el estado energético del agua del suelo, inventado por Richards y Gardner en 1936.

El tensiómetro es un aparato que mide la fuerza con que es retenida el agua en el suelo. Su comportamiento se puede comparar al de una “raíz mecánica”, indicando en una escala graduada de 0 a 0.1 MPa, el esfuerzo que les cuesta a las plantas extraer el agua, éste registra las fluctuaciones de tensión cuando ésta no excede de aproximadamente 0.08 MPa. La punta cerámica es permeable a los solutos y al agua, pero no al suelo y al aire, y por lo tanto no se detecta el potencial de solutos.

El uso de los tensiómetros a diversas profundidades, puede suministrar una idea tanto del contenido de humedad en el perfil del suelo como el flujo del

agua. Estos aparatos pueden ser muy convenientes en riego localizado, donde el cálculo del riego debe realizarse para períodos cortos de tiempo (una semana), y los tensiómetros deben indicar una constancia en el nivel de humedad del suelo (0.02 MPa).



Figura 2.1. Tensiómetros.

Aunque existen varios tipos de tensiómetros de diferentes materiales y manómetros de varias clases, el principio fundamental es el mismo. El principio es lograr un equilibrio energético entre la humedad del suelo y el agua contenida en el tensiómetro.

Preparación de los Tensiómetros para su Instalación. Es necesario preparar los tensiómetros para su instalación, siguiendo los pasos que se indican a continuación.

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, de 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, para esto se puede utilizar el martillo – punzón o un tubo de ½” de diámetro.
4. Quite la tapa con rosca y llene el aparato, incluyendo el depósito, con la 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).

Dé unos golpecitos al vacuómetro, para que salga el aire, girándolo lentamente de lado a lado. Desconecte la bomba con cuidado para evitar dañar el 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 ¼ de vuelta. No se aprieta excesivamente, porque 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 de agua en el mantenimiento de las lecturas.

Elección del Lugar Adecuado para la Instalación. La elección del lugar adecuado para la instalación es de suma importancia, tanto para los tensiómetros, como para cualquier otro método de medida de la humedad del suelo. Para elegir correctamente los lugares donde hemos de colocar las distintas estaciones, comenzamos por efectuar una clasificación de los diferentes grupos agrológicos que existen en la zona a regar y dentro de cada uno de ellos colocaremos un mayor o menor número de estaciones, según sus características particulares de extensión, topografía, capacidad de retención, etc. Si encontrásemos un terreno muy bien nivelado, con suelo y subsuelo muy uniformes y donde la distribución del agua se haga con gran uniformidad (riego por aspersión), entonces colocaremos un menor número de estaciones, pero en disposición regular (en marco real, tresbolillo, etc.).

Se intenta colocar los sensores en áreas donde la textura del suelo es más fina, porque estos suelos tienden a secarse más rápidamente (Miles, 1998).

Cuadro 2.3. Profundidades recomendadas para la instalación de los tensiómetros.

Cultivo	Sensor superficial	Sensor profundo
Alfalfa Maíz Sorgo Remolachas Tomates	45 cm	90 cm
Habas de campo Papas Grano pequeño	30 cm	60 cm
Pasto	30 cm	45 cm

En el riego a pie, por surcos o bancales, como norma general, debemos colocar los tensiómetros al final del surco o en la parte más baja del bancel, pero si los surcos o bancales son demasiado largos, es necesario colocar otra estación al principio o en algún punto intermedio. En una plantación frondosa en que las plantas o árboles sean lo suficientemente grandes, como para

proporcionar buena sombra al suelo, es conveniente colocar los tensiómetros en la parte más soleada, donde la evaporación en la superficie del suelo es mayor. Conviene así mismo, colocar los aparatos en la zona radicular de una planta o árbol vigoroso.

Si la profundidad de las raíces rebasase los 45 cm hemos de colocar dos tensiómetros por estación, a diferentes profundidades, uno al 25 por ciento del total de las raíces y otro al 75 por ciento de dicha profundidad, no obstante, no es aconsejable instalar los tensiómetros a más de 120 cm de profundidad, aunque los cultivos tengan raíces más profundas.

Instalación. Para obtener medidas exactas, es imprescindible que la instalación se haga con cuidado, de tal manera que exista un contacto perfecto entre el tensiómetro y la tierra, ya que si el orificio de colocación fuese de mayor diámetro que el aparato, penetraría aire o agua en el espacio libre, proporcionando falsas lecturas por exceso o por defecto respectivamente.

En suelos muy ligeros, se pueden colocar los tensiómetros cortos, empujándolos simplemente con la mano cuando el suelo esta húmedo, con lo cual obtendremos un buen contacto con el suelo y no se estropeará la estructura de éste ni la del sistema radicular de las plantas.

Sin embargo, en la mayor parte de los casos, es necesario hacer primero un agujero, siendo recomendable perforarlo cuando el suelo este algo húmedo. Una vez introducido el aparato en el agujero se debe amontonar tierra y compactarla hasta una profundidad de unos 8 cm ó 10 cm alrededor del tubo, para asegurar el buen contacto necesario entre tierra y aparato y evitar que el agua de riego o lluvia pueda formar un pequeño charco por causa de su instalación.

Para la colocación hemos de tener en cuenta que debemos dejar un espacio, entre la parte baja del vacuómetro y el suelo, de unos 2 ó 3 cm como mínimo y de 15 cm como máximo, siendo éste necesario para el caso de riego por superficie. En el caso de su colocación en ángulo, este debe ser de 45° o mayor.

La frecuencia con que debemos tomar las lecturas, depende en cada caso de las características del suelo y del clima. En suelos arenosos y climas cálidos, debemos tomarlas dos o tres veces por semana. En cambio, en suelos arcillosos y climas moderados, será suficiente una vez por semana o incluso menos si el clima es algo húmedo.

Cuando el suelo pierde humedad, el líquido del aparato tiende a salir de éste a través de la punta porosa de cerámica, con lo cual desciende el nivel en el interior y se produce un vacío relativo en la parte superior del tensiómetro. Por el contrario, cuando la humedad del terreno aumenta, éste vacío hace que entre agua dentro del tubo, a través de la misma punta, con lo cual se establece de nuevo el equilibrio.

No obstante cada vez que ocurre esto, entra un poco de aire y se deposita en la parte superior del tubo provocando que la respuesta del aparato a las variaciones de humedad, sea lenta y que las lecturas no sean tan precisas como debieran ser. Para evitar esto se realizan las operaciones de mantenimiento, cuya finalidad es eliminar el aire que se haya acumulado en el interior del tensiómetro.

La finalidad de los gráficos de los tensiómetros es la de facilitar la labor de toma de datos a lo largo de la campaña, que permite hacer las anotaciones directamente en el campo, sin que luego haya que hacer trabajo alguno de oficina.

La frecuencia con que se deben hacer las lecturas, depende en cada caso de las características del suelo y del clima. En zonas donde haya una gran variación diurna de la temperatura, las lecturas deben realizarse por la mañana temprano siendo aconsejable antes de tomarlas dar unos golpecitos muy suaves en la esfera del vacuómetro para que la aguja se mueva un poquito, con lo cual sabemos si el suelo se esta secando o absorbiendo humedad.

Bomba Manual de Vacío. La bomba posee una ventosa de aspiración universal, que se adapta a todos los modelos de tensiómetros. Cinco o seis emboladas rápidas darán una lectura del vacuómetro de 80 cb a 85 cb, que es el vacío máximo. En estas condiciones la bomba quedará adherida al instrumento sin necesidad de sujetarla. Al romper el vacío se procederá siempre con lentitud para evitar choques o retrocesos bruscos de la aguja del vacuómetro.

Interpretación de lecturas. Los riegos son realizados de acuerdo a las lecturas que se obtienen en los tensiómetros y comenzados en una cierta lectura predeterminada (Véase Cuadro 2.4).

La mayor ventaja del uso de los sensores de humedad es obtenida solamente registrando y, preferiblemente, trazando lecturas en una carta. Esta información permite al irrigador considerar los errores en irrigaciones anteriores y de esta manera predecir la irrigación futura.

Por las mañanas en la época de crecimiento del cultivo el riego se detiene cuando la lectura para el sensor más superficial indica que el suelo está en capacidad de campo. Más adelante en esta estación, si las lecturas del sensor más profundo indican que las raíces han extraído una humedad considerable y el riego es necesario, los campos pueden ser irrigados hasta que las lecturas del sensor más profundo registren lecturas cercanas a capacidad de campo (Miles, 1998).

Cuadro 2.4. Interpretación de lecturas de tensiómetros.

Tensión de la humedad del suelo (MPa) *	Textura del suelo	Estatus de la humedad	Comentarios
0 - 0.005 0 - 0.01 0 - 0.02	grueso moderado fino	Cercano a Saturación	Puede ocurrir para un día o dos después del riego en suelos de textura moderada y fina. Peligro de aireación pobre del suelo si persiste la lectura.
0.01 0.02 0.03 - 0.04	grueso moderado fino	Capacidad de Campo	Suspenda el riego cuando el tensiómetro alcanza lecturas superiores a este rango para prevenir la filtración profunda a menos que las medidas de humedad indiquen que el riego anterior no pudo rellenar la zona de la raíz.
0.03 - 0.05 0.04 - 0.08 0.05 - 0.15	grueso moderado fino	Rango del Riego	Rango generalmente para el comienzo de los riegos. Comenzando irrigaciones en este rango asegura la aireación del suelo y mantener la humedad fácilmente disponible del suelo siempre.
* Para los tensiómetros, los Mega Pascales (MPa) de tensión son multiplicadas por 1000 para obtener lecturas correspondientes del tensiómetro. No deben ser utilizados donde las tensiones son mayores de 0.07 MPa. Estos rangos se deben a las variaciones en los suelos y la respuesta del cultivo.			

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 este 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 posibles daños.
- El agua liberada por el tensiómetro a través de su capa porosa afecta al Esfuerzo de Humedad del Suelo del suelo que lo rodea y las lecturas se subestiman parcialmente.
- En muchos casos, el costo de los tensiómetros representa una inversión inicial considerable.

Bloques de Yeso o de Resistencia Eléctrica

El método de la Resistencia Eléctrica está 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 París, 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,

cuanto más mojado está un bloque, más baja es la resistencia medida a través de los dos electrodos. Desgraciadamente, cualquier cambio en la conductividad del suelo no relacionada con la humedad (tal como adición del fertilizante) también será detectado.

Este tipo de sensores satisface a varias aplicaciones de la irrigación donde solamente se requiere reponer la falta de humedad. Para un trabajo más exigente, los bloques de yeso no tienen el rango, la sensibilidad o la reacción al tiempo requerido. Con una alta sequedad, pueden desacoplarse con la solución del suelo.



Figura 2.2. Bloque de yeso o de resistencia eléctrica.

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

1. El contacto entre los dos electrodos y el suelo no era total.
2. La resistencia, y desde luego la conductividad, depende de la humedad y además, de la concentración de sales, trayendo como consecuencia que en los suelos salinos se reportaron resultados erróneos. De aquí que posteriormente Bouyoucos y Mick citados por De la Peña (1977), hayan instalado los electrodos dentro del bloque de yeso para evitar los efectos de las sales sobre la resistencia y la conductividad eléctrica.

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 (Taner *et al*, 1948).

En los suelos salinos, el material de los bloques de yeso se destruye rápidamente, dando resultados poco precisos, dado que el yeso es sensible a las sales del suelo, por lo que también se fabrican en nylon y fibra de vidrio.

Mientras el suelo está húmedo, los poros en el yeso se llenan de agua que disuelven algo de éste, lo suficiente para hacer una solución saturada de sulfato del calcio, y el agua conduzca corriente eléctrica de una manera independiente de salinidad del agua del suelo, excepto en niveles extremos de salinidad (Richards y Campbell, 1950).

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.

Instalación. La instalación de los bloques de resistencia debe hacerse en pares localizándolos dependiendo de la zona radicular del cultivo. Para la irrigación superficial, localice un par de estos sensores de humedad cerca del extremo superior del campo y otro par cerca del extremo más inferior. Intente colocar los sensores en áreas donde la textura del suelo es más fina, porque estos suelos tienden a secarse más rápidamente. Coloque los sensores en las profundidades mostradas en el Cuadro 2.5.

Remoje las extremidades de los bloques de resistencia en agua y después sumerja en una mezcla de fango antes de la instalación. Utilice un tubo o una sonda para hacer un agujero levemente más profundo que el bloque de resistencia que será instalado. Coloque un puñado de suelo pulverizado en el agujero y siga con cerca de una mitad de taza de agua. El bloque se quita de la mezcla y se presiona abajo al nivel deseado en el agujero. Llene el agujero de suelo, haciendo un montón leve de modo que el agua superficial no entre.

Cuadro 2.5. Profundidades recomendadas para la instalación de los bloques de resistencia eléctrica.

Cultivo	Sensor superficial	Sensor profundo
Alfalfa Maíz Sorgo Remolachas Tomates	45 cm	90 cm
Habas de campo Papas Grano pequeño	30 cm	60 cm
Pasto	30 cm	45 cm

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 mas del 80 por ciento de la humedad aprovechable.
- No se 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 aspensor 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 a total sequedad).
- La calibración entre unidades comerciales es variable.
- En lugares lluviosos y suelos de alta velocidad de infiltración, los bloques operan correctamente sólo durante pocas semanas.
- El yeso fue un intento por amortiguar los cambios de salinidad del suelo en el cual 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 ésto 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 en 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 regresaran 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 (Gardner y Kirkham, 1952). Stone *et al.* (1955), fueron los primeros en desarrollar un equipo portátil para medir la humedad del suelo basado en la interacción neutrónica, con átomos de hidrógeno del agua contenida en el suelo. Las mediciones han mejorado desde entonces en portabilidad, programabilidad, peso y tamaño. El advenimiento de detectores más eficientes dio lugar al uso de fuentes radiactivas 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 $< 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, Van Bavel *et al.*, 1956; Gardner, 1986). Sin embargo, las regulaciones de seguridad requieren autorización y entrenamiento de los usuarios, y causa considerable papeleo y sigue siendo costoso y difícil o imposible de utilizar en algunas situaciones, particularmente cuando hay falta de vigilancia. El almacenaje y la disposición de mediciones son también cada vez más costosos.

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 tanto el 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 se 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:
 - a) Una fuente de neutrones rápidos, generalmente mezclas de materiales radioactivos.
 - b) Un sensor o detector de los impactos de los neutrones, y
 - c) Un amplificador de señal.
3. Tubos de acceso al suelo, preferentemente de aluminio, de colocación mas o menos permanente, que permita 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 el sitio deseado y se obtiene el valor de la 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.

$$R = \frac{cpm}{cpm \text{ estándar}}$$

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).



Figura 2.3. Aspensor de neutrones.

Conteo Estándar. El conteo estándar es una medición del hidrógeno en el blindaje. Tomando estos exactamente de igual manera, esto proporciona dos medios para comprobar la validez de la función de conteo.

1. Comparándolo con el conteo estándar anterior para ver si no ha cambiado en una cantidad considerable, esto es una indicación de una aceptable sensibilidad de los electrónicos. El Americium-241 tiene una vida media de 458 años.
2. Tomando esto como una serie de conteos cortos en ves de un conteo largo y verificándolo como una distribución estadística normal, este es un medio de comprobar que la propagación no es influenciada por el conteo.

Calibración. En cada suelo, cada aparato debe tener una curva de calibración, la cual puede ser de la forma de la ecuación de una recta; por ejemplo:

$$\theta = 0.421 R - 0.106$$

La calibración del instrumento de medición es usualmente hecha para obtener las lecturas del instrumento para un rango de valores determinados independientemente de los parámetros que van a ser medidos. La relación entre las lecturas y los valores proporcionan la curva de calibración. Cuando la respuesta depende de los valores del parámetro que está siendo medido la calibración del instrumento es un simple procedimiento. Pero cuando la respuesta depende en un grado significativo de otras propiedades del medio, la calibración será mucho más difícil. Para el medidor de neutrones nosotros usualmente requerimos de una ecuación de calibración de la forma $\theta = bn + a$, donde θ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) es el contenido de humedad del suelo en base a volumen (agua liberada al secar a 105°C), n es el radio de la razón de conteo en el suelo a la razón de conteo estándar en algunos, b es el coeficiente de calibración y a es la constante de intercepción (Holmes 1956). La relación de conteo depende mucho de θ , pero ésta es también afectada por otras propiedades del suelo, a saber la densidad aparente del suelo seco, el contenido volumétrico de hidrógeno constitucional, comúnmente expresado como equivalente de agua, y varios otros componentes químicos del suelo y la solución del suelo.

Normalmente para un instrumento e instalación en particular se pueden esperar largas diferencias en coeficiente de calibración para diferentes suelos.

La utilidad del aspersor de neutrones para mediciones de contenido de agua en el suelo depende de la sensibilidad de la respuesta de los neutrones a la concentración de átomos de hidrógeno en el medio. Desgraciadamente los suelos contienen otros átomos de hidrógeno aparte de los del agua libre, como hidrógeno constitucional en las arcillas minerales y en la materia orgánica. Se

ha demostrado que este hidrógeno afecta la respuesta de los neutrones esencialmente en alguna forma como el agua libre del suelo, y esto es comúnmente expresado como equivalente de agua θ_e ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Material de los tubos de acceso. La decisión sobre el tamaño y el tipo de material para los tubos de acceso es determinada por el diámetro de la sonda que se está utilizando, el costo y la disponibilidad de los tubos, y la presencia de sustancias corrosivas en el suelo.

Los tubos de aluminio son los que generalmente se prefieren debido a que son virtualmente transparentes a los neutrones y no afectan su sensibilidad. Estos, sin embargo, se corroen en suelos que contienen cloruro de sodio y en muchos suelos ácidos o alcalinos y en muchos casos requieren ser reemplazados durante un experimento de término largo. El uso de aluminio anodizado puede prolongar la vida del tubo en suelos corrosivos.

Otros materiales que pueden ser utilizados incluyen el acero (tanto templado como inoxidable), polietileno, latón, y acetato de butirato. El acero templado se corroe, pero tiene un periodo de vida cercano a tres años en la mayoría de los suelos. El contador y la sensibilidad a los neutrones del instrumento disminuye cuando se utilizan tubos de acero y latón a diferencia de los de aluminio debido a la absorción de neutrones lentos por el acero y el cobre (Bell y McCulloch, 1966).

El polietileno y otros materiales plásticos que contienen hidrógeno provocan un aumento en la relación de conteo comparado con el aluminio. La densidad y el espesor de la pared del tubo de polietileno puede variar, dando lugar a un error en la relación de conteo (Holmes y Jenkinson, 1959). A causa de esta variación en calidad de las lecturas es difícil asegurar que el tubo de polietileno con las mismas propiedades sea usado tanto para las instalaciones

en campo como para la calibración; un requerimiento que no puede ser forzado con demasiada firmeza.

El cloruro de polivinilo (PVC) debe ser evitado debido a la composición variable y la presencia de cloro el cual tiene una gran absorción de neutrones lentos en su sección transversal comparado con el aluminio lo cual da como resultado una reducción de la relación de conteo y la sensibilidad. Stolzy y Cahoon (1957) encontraron una reducción de hasta 15 por ciento en las lecturas de relación de conteo para una sonda en un tubo de PVC comparado con uno de aluminio.

Instalación de los Tubos de Acceso. La instalación cuidadosa es esencial para evitar un error permanente en las mediciones de contenido de humedad que puede ser introducido debido a una mala instalación de los tubos. Existen varios métodos de instalación; la elección de la técnica depende de varios factores como el tipo de suelo, el equipo que se tenga disponible, las características del sitio y del acceso, y la longitud de los tubos de acceso.

Principales Ventajas:

- Se obtiene rápidamente el valor de contenido de humedad en base volumen (θ).
- Se requiere poco trabajo.
- Se obtiene el valor de θ en todo el perfil de suelo y se pueden verificar rápida y fácilmente los valores dudosos.
- La muestra utilizada en la determinación es relativamente grande (esfera de 15 cm de radio), comparado con el método gravimétrico.

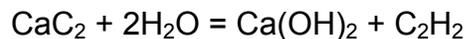
- Se cubre un amplio rango de humedad del suelo.
- Las lecturas en diferentes tiempos en un punto dado siempre se referirán a una misma muestra.
- No se necesita hacer hoyos en cada muestreo y un aparato puede cubrir unas 5,000 ha.

Principales Desventajas:

- El costo del aparato es muy elevado.
- La materia orgánica y el Boro afectan las lecturas.
- No se deben usar tubos de acceso fabricados con material plástico.
- Se requiere una perfecta instalación de los tubos de acceso.
- Es necesario tomar muy cuidadosamente las lecturas estándar del aparato, pues los malos estándares producen errores sistemáticos.
- Las lecturas cerca de la superficie del suelo no son correctas.
- La aplicación de este método en cultivos de tubérculos, raíces carnosas u otros órganos vegetales subterráneos puede ser poco precisa, debido a la cantidad de agua que se almacenan en ellos.
- Se requiere una curva de calibración para cada aparato y suelo y debe revisarse cada 2 ó 3 años.
- Se requiere personal calificado en el uso de éste aparato.

Medidor Rápido de Humedad Speedy

Este es un método químico, en el que se utiliza Carburo de Calcio. El principio en que se basa este método, es que una cantidad dada de humedad reaccionará con el Carburo de Calcio, para producir un volumen específico de gas (acetileno). La reacción que se forma es la siguiente:



La presión del gas generado, se lee en el manómetro situado en un extremo del recipiente a presión, el cual ha sido calibrado para que se lea en porcentaje de humedad referida al peso de la muestra en húmedo, Anaya (1977). También es posible calibrarlo respecto a peso de suelo seco.

El medidor de humedad es un recipiente hueco de aluminio que consta de un manómetro en un extremo y de una cámara vacía en el otro, la cual se cubre con un casquete o capuchón de aluminio sujeto por una abrazadera. Consta además de una caja para su transporte, una balanza tarada de 6 gr, para pesar la muestra que se va a probar, una pequeña cuchara de mano para medir el carburo de calcio y una tabla de conversión de lecturas a porcentaje de humedad en base a peso de suelo seco.

Time Domain Reflectometry (TDR)

Evolución de la Tecnología TDR. Ya en 1939, geólogos y otros reconocieron una relación entre las propiedades dieléctricas del suelo, roca y otros materiales, y su contenido de humedad. Sin embargo, les faltó la instrumentación necesaria para hacer un uso total de él. Esencialmente el TDR es un radar a lo largo de un cable coaxial que pueda permitir la vigilancia de grandes volúmenes con un solo instrumento. Las distancias a los reflectores a

lo largo del cable se calculan por el tiempo de vuelo, 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 ésta manera el monitoreo con TDR puede reemplazar 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.

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. Los métodos de aplicación empíricos iniciales en geomateriales han madurado con la calibración científica y la mejora de los generadores de impulsos, cables, y sensores.

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 ésta manera, se define la localización de la sonda y el tiempo de colocación. Las medidas de la humedad (contenido de agua) se hacen en el suelo para la investigación y el control de la irrigación, las cubiertas del suelo para los terraplenes, los cimientos de los pavimentos de la carretera, pilas de almacenamiento de minerales, y otros materiales granulares donde es importante el contenido de agua.

El Amplio Rango de Aplicación del TDR. En general, el TDR describe un amplio rango de sensores de medición eléctrica remota para determinar la localización y la naturaleza de varios reflectores. El TDR es similar en principio al radar que consiste en un transmisor de radiofrecuencia (el cual emite un pulso corto de energía electromagnética), una antena direccional, y un sensible receptor de la radiofrecuencia. Después de que el transmisor direccional haya irradiado el pulso, el receptor registra la generación de eco o la reflexión vuelta de un objeto distante tal como un aeroplano o una nave. Midiendo el tiempo entre la transmisión y el recibo de la reflexión y sabiendo la velocidad de la luz, la distancia al objeto puede ser calculada fácilmente. Los análisis detallados de la generación de eco pueden revelar detalles adicionales del objeto de reflejo, que ayudan en la identificación.

La detección de líquidos es una aplicación emergente del TDR. Los 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 del nivel de fluidos han conducido al uso del TDR para medir los niveles de agua para propósitos hidrológicos, así como para la medida de las presiones del agua debajo de las presas.

Descripción. El reflectómetro de contenido de humedad consiste en dos varillas de acero inoxidable conectados a una tarjeta de circuito impreso. Un cable protege cuatro hilos conductores que están conectados a la tarjeta de circuito y un suministro de energía, que activa la sonda, y monitorea el pulso de salida. La tarjeta de circuito esta encapsulada en epoxy.

La alta velocidad de los componentes electrónicos situados en la tarjeta de circuito es configurada como un multivibrador. La salida del multivibrador es conectada a las varillas de la sonda las cuales actúan como una guía para las

ondas. La frecuencia de oscilación del multivibrador es dependiente de la constante dieléctrica del medio que esta siendo medido. La constante dieléctrica es predominantemente dependiente del contenido de agua.

Rango de Operación. La calidad de las mediciones de contenido de humedad cuando se aplican campos electromagnéticos a las guías es afectada por la conductividad eléctrica del suelo. Los iones libres de la solución del suelo proporcionan una idea de la conductividad eléctrica la cual resulta en una atenuación de la señal aplicada a las varillas. Esta atenuación reduce la amplitud de la señal de oscilación. La atenuación reduce la frecuencia de oscilación con un contenido de agua dado debido a que toma mucho tiempo alcanzar el oscilador.

La conductividad eléctrica puede ser expresada por (Rhoades *et al*, 1976).

$$\sigma_{bulk} = \sigma_{solution} \theta_v T + \sigma_{solid}$$

Donde σ es la conductividad eléctrica del suelo, la solución del suelo, y los componentes del suelo, θ_v es el contenido volumétrico de agua y T un coeficiente de transmisión de un suelo específico propuesto para determinar la tortuosidad del flujo como el cambio en el contenido de agua. Esta ecuación es presentada para mostrar la relación entre la conductividad eléctrica de la solución del suelo y la conductividad eléctrica del suelo.

La conductividad eléctrica del suelo, $\sigma_{solución}$, puede determinarse en el laboratorio usando métodos de extracción. También puede ser medida usando métodos TDR. La mayor expresión de la conductividad eléctrica esta dada por términos de conductividad de solución.

Cuando los valores de la conductividad eléctrica de la solución del suelo exceden de 1 dS m^{-1} , la pendiente de la calibración comienza a cambiar. La

pendiente disminuye con el aumento de la conductividad eléctrica. La sonda a pesar de esto responde a los cambios de contenido de agua con buena estabilidad, pero la calibración tendrá que ser modificada. Los valores de conductividad eléctrica mayores a 5 dS m^{-1} pueden desestabilizar la sonda.

Contenido de Materia Orgánica y Arcilla en el Suelo. La cantidad de materia orgánica y arcilla en un suelo pueden alterar la respuesta a los cambios en contenido de humedad de los métodos que dependen de las propiedades eléctricas.

Longitud del Cable. La longitud del cable no es una limitación bajo aplicaciones comunes. Se ha demostrado en experimentos de laboratorio que no hay degradación en la calidad de las mediciones con longitudes de cable de hasta 100 m.

Instalación. Las varillas de la sonda pueden ser insertadas verticalmente en la superficie del suelo o enterradas cerca de la superficie. Una sonda insertada verticalmente en la superficie dará una indicación del contenido de agua en los 30 cm superiores del suelo. La sonda puede instalarse de forma horizontal a la superficie del suelo para detectar el paso de frentes húmedos u otros flujos verticales de agua. Una sonda instalada con un ángulo de 30 grados con la superficie dará una indicación del contenido de agua en los primeros 15 cm del suelo.

Problemas Potenciales con una Instalación Inapropiada. El método usado para la instalación puede afectar la precisión de las mediciones. Las varillas de la sonda deben estar lo mas paralelas posibles cuando se instalen para mantener la geometría de las guías. La sensibilidad de estas mediciones es mayor en las regiones cercanas a la superficie de las varillas. Las sondas que son insertadas de un modo que queden áreas con aire alrededor de las varillas reducirá la

precisión de las mediciones. En algunas aplicaciones, la instalación puede ser impropia debido al uso de guías de inserción o una herramienta piloto.

Trabajos de Investigación

Efectos de la Temperatura sobre el Conteo Estándar

La Figura 2.1 muestra datos medidos en 1985 usando un medidor Nuclear 503DR Campbell Pacific durante un calibración de campo hecha en Marana, Arizona. La calibración requirió el manual de instalación de los tubos de acceso y la extracción de muestras de suelo de varias profundidades a medida que la excavación se iba realizando. Justamente antes de tomar las lecturas de conteo a las diferentes profundidades en el tubo de acceso, se tomo un conteo estándar en el blindaje y el conteo medio, registrando el índice χ y el tiempo. La calibración fue hecha en el campo durante tiempo completo y fue equilibrado a la temperatura del aire mientras era posible. Una estación climática en el campo registró la temperatura del aire cada 15 minutos. Promedio de la temperatura del aire y el conteo estándar para el cual el índice χ estuvo por encima de 0.9 y por debajo de 1.1 siendo usado para construir el conjunto de datos que se muestran en la gráfica.

La regresión lineal (Fig. 2.4) mostró que la temperatura ambiente explica en un 79 por ciento la variación en el conteo estándar. La correlación fue negativa, con conteos estándar pequeños para altas temperaturas. Para un cambio de temperatura de 30°C, se pudo anticipar un cambio en el conteo estándar de 177. La ecuación de calibración para esta sonda tiene una pendiente de 3.59×10^{-5} . Multiplicando la pendiente por el cambio en el conteo estándar se obtiene un cambio en la medición de contenido de humedad de $0.006 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Ésto se

acerca bastante al 1 por ciento de variación en el contenido de humedad originando algunas preocupaciones.

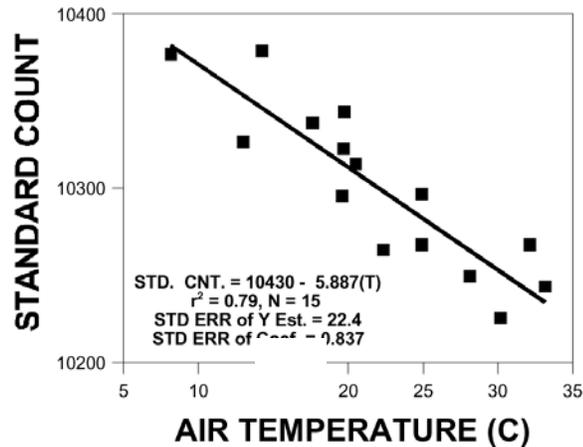


Figura 2.4. Conteo estándar para la sonda de neutrones (Modelo 503DR, Campbell Pacific Nuclear International, Martínez, CA) y la correspondiente temperatura ambiente del aire en Maraná, Arizona, USA, 1985.

Estas son algunas razones por las que la fuente primaria de temperatura es dependiente del tubo detector, el cual contiene gas de trifluoruro de boro. La presión del gas es considerablemente responsable de los cambios de temperatura y el proceso de detección puede ser influenciado por la presión del gas. El circuito de conteo también puede ser involucrado, particularmente el alto voltaje y los circuitos del detector, los cuales son algo análogos en naturaleza. El resto de los circuitos en la sonda son insensibles a la temperatura debido a que estos son básicamente digitales. Ciertamente los electrónicos del conjunto indicador de lecturas, donde el microcontrolador está alojado, son enteramente digitales a tal grado que el problema reside casi absolutamente en la sonda.

En el ambiente semiárido de Bushland, Texas, se pudo observar una variación de 17°C en la temperatura del aire durante el día laborable. Esto es poco potencial para la sonda que fue sometida incluso a amplias variaciones de temperatura debido a que esta es usada en el tubo de acceso, así como

también en el blindaje para los conteos estándar. No se tuvo idea de cual era la temperatura de la sonda mientras estaba en el tubo de acceso pero si nos aseguramos que ésta era variable. Mientras viaja de un tubo de acceso a otro la sonda era encerrada en el blindaje y se equilibraba con la temperatura ambiente. Antiguamente la sonda era bajada al fondo del tubo de acceso registrando un gran enfriamiento o calentamiento del ambiente dependiendo sobre todo de la temperatura del aire. La sonda entraba a otro régimen de temperatura cada vez que era movida a una nueva profundidad para una lectura.

Precisión del Dispensador de Neutrones y Sonda de Capacitancia para la Determinación del Contenido de Humedad del Suelo a partir de la Calibración en Campo

La determinación del contenido de humedad del suelo basado en el aspersor de neutrones (NS) ha sido una herramienta valiosa para las investigaciones del agua del suelo por cerca de 40 años. Sin embargo, los permisos, adiestramiento, y las regulaciones de seguridad que pertenecen a la fuente radiactiva en estos dispositivos hacen su uso costoso y evitar o prevenir su uso en algunas circunstancias tales como la falta de atención.

Una sonda de capacitancia (CP) tiene características que harían parecerlo ser un reemplazo ideal para las mediciones del NS.

Se determinó la precisión relativa de dos marcas de aspersor de neutrones (tres mediciones cada uno) y de una marca de sonda de capacitancia (cuatro mediciones) en un ejercicio de calibración de campo. Ambas marcas del NS fueron calibradas contra el contenido volumétrico de agua del suelo con coeficientes de determinación (r^2) que se extendían a partir de 0.97 a 0.99 y la raíz media del cuadrado del error ajustado (RMSE) $< 0.012 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de contenido

de agua. Las calibraciones para las mediciones de la CP dieron lugar a una r^2 que se extendía a partir de la 0.68 a 0.71 y un RMSE de $0.036 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de contenido de agua.

Los intervalos medios de confianza al 95 por ciento en las predicciones eran de tres a cinco veces más arriba para las mediciones de la CP que para las del NS, extendiéndose a partir de 0.153 a $0.161 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y 0.032 a $0.052 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Aunque estuvieron mal correlacionadas con el contenido de agua del suelo, las lecturas eran reproductivas entre las cuatro mediciones de la CP.

La correlación pobre para las mediciones de la CP puede ser debido a las variaciones en reducida escala del contenido de agua del suelo dentro del volumen de medición. Las mediciones del tipo NS proporcionan una precisión aceptable, pero la medición del CP tiene una precisión pobre y es inaceptable para las rutinarias mediciones del contenido de agua del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del Sitio Experimental

Localización Geográfica

El trabajo se realizó en el campo experimental del Departamento de Agroplásticos en las instalaciones del Centro de Investigación en Química Aplicada (C.I.Q.A.) ubicado al Noroeste de la ciudad de Saltillo, Coahuila, con coordenadas geográficas 25° 27' Latitud Norte y 101° 02' Longitud Oeste del Meridiano de Greenwich con una altitud media sobre el nivel del mar de 1610 m.

Suelo

Los análisis de suelo se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua y Rehabilitación de Suelos del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, los resultados obtenidos de dicho estudio se presentan en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Resultados del análisis físico del suelo.

Estrato	Ce dS/m	Arcilla %	Limo %	Arena %	Textura	CC %	PMP %
00 - 20	1.66	49.20	42.00	8.80	Arcillo Limoso	28.89	16.37
20 - 40	1.54	49.20	42.00	8.80	Arcillo Limoso	30.99	13.20
40 - 60	1.67	43.20	42.00	14.80	Arcillo Limoso	27.53	11.93
60 - 80	3.71	37.20	42.00	14.80	Mig. Arcillo Limoso	27.10	12.02

El trabajo se realizó en un cajete de 2.55 m de largo por cada lado, teniendo un área de 6.5025 m², donde se instalaron los sensores de humedad a ser evaluados durante la investigación siendo colocados a las profundidades medias de los estratos 00-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm y 60-80 cm. La Figura 3.1 y 3.2 muestran la distribución de los sensores a las diferentes profundidades de los estratos y su distribución espacial dentro del cajete respectivamente.

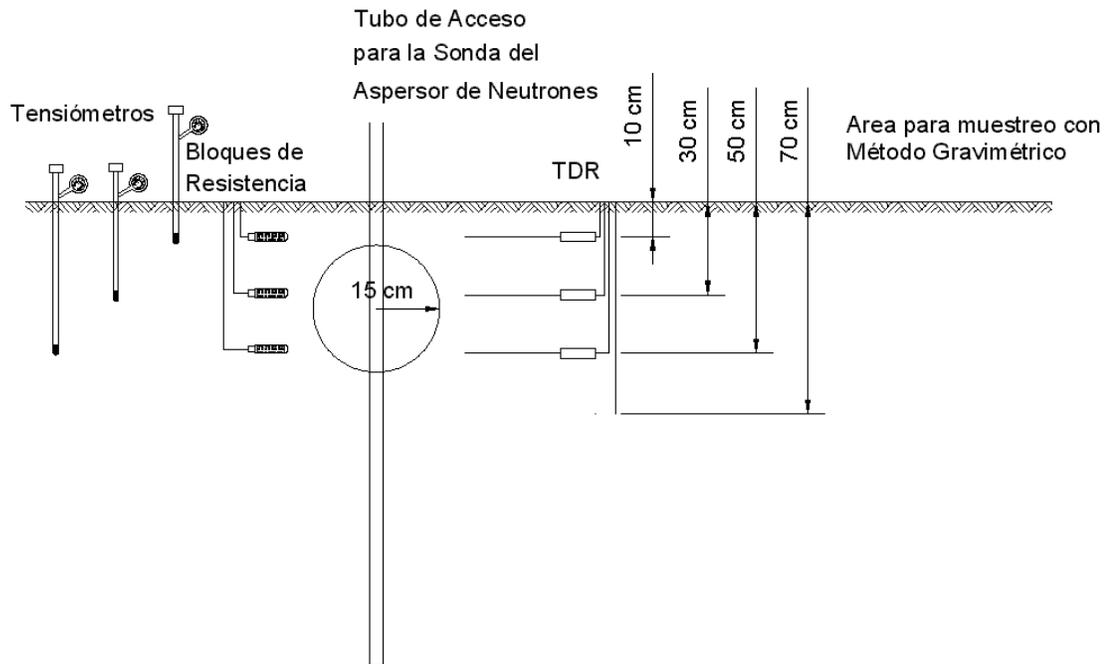


Figura 3.1. Vista de perfil del cajete mostrando los sensores a las diferentes profundidades.

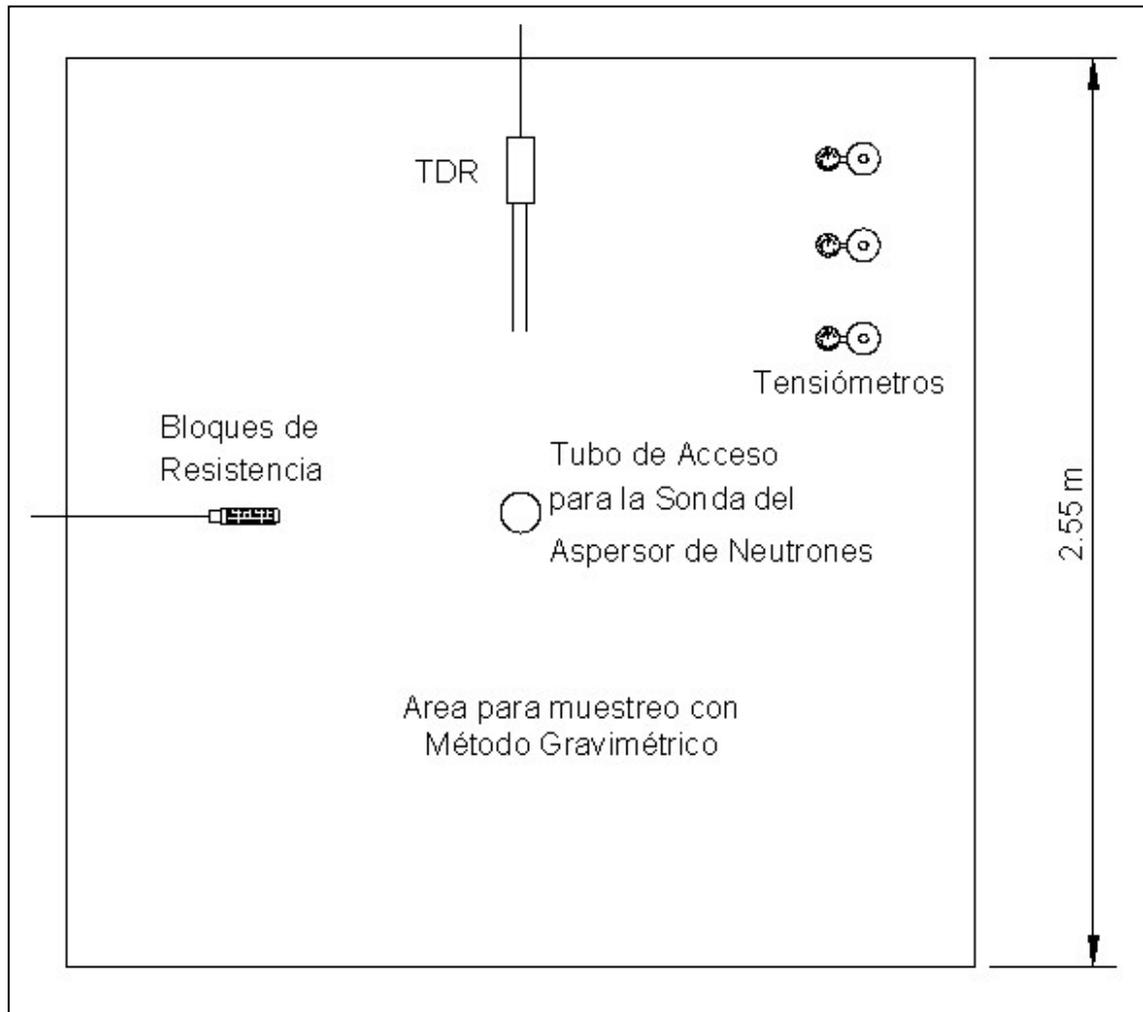


Figura 3.2. Vista superior mostrando la ubicación espacial de los sensores dentro del cajete.

Descripción de los Métodos.

Las lecturas de contenido de humedad con los diferentes sensores y el muestreo con la barrena fueron tomadas aproximadamente a la misma hora, las 11:00 AM, esto para evitar fluctuaciones entre las lecturas, debido a que si se tomaran a diferentes horas durante el día se vería que estas son diferentes teniendo un valor mayor de humedad durante la mañana y menor durante la tarde, para evitar la evaporación durante los muestreos, que se realizaban cada tercer día, por efecto de la intemperie se decidió cubrir la superficie del cajete

con un plástico, esto con el fin de que el contenido de humedad se estabilizara y obtener lecturas más constantes y precisas, después de esto el cajete se destapaba durante los fines de semana para que el contenido de humedad disminuyera y seguir con los muestreos la siguiente semana, y así sucesivamente durante el ciclo que duró la investigación.

A continuación se da una explicación de los procedimientos que se siguieron para la toma de lecturas de contenido de humedad con los diferentes sensores utilizados durante esta investigación.

Método Gravimétrico

Para la obtención de datos del contenido de humedad por el método gravimétrico se utilizó la barrena Veihmeyer y para el transporte de las muestras de campo se utilizaron botes de aluminio, previamente pesados y etiquetados para cada estrato, además de una estufa en la cual se colocaron las muestras para obtener el peso de suelo seco, sometiendo a éstas a una temperatura de 105°C - 110°C por un tiempo de 24 hrs.

El muestreo se realizó tres veces por semana teniendo especial cuidado al momento de sacar la muestra y colocándola de forma inmediata en el interior del bote de aluminio, así mismo se trató de que los botes una vez que tenían la muestra estuvieran protegidos de la acción de los rayos solares, con el fin de evitar una deshidratación de la muestra de suelo y de esta manera eliminar posible errores.

Una vez que la muestra era extraída, la perforación era rellenada con suelo previamente tamizado, se tuvo la precaución de poner una pequeña estaca en el lugar del muestreo; esto con el fin de no volver a hacer una perforación en el mismo sitio.

Tensiómetros

Se utilizaron tres tensiómetros de la marca Irrometer, dos de los cuales eran de una longitud de 30 cm y un tercero de 45 cm.

Antes de proceder a la instalación de los tensiómetros propiamente en el campo, estos fueron sometidos a una estandarización, en la cual las cápsulas porosas fueron saturadas en agua durante 24 horas, después de lo cual se llenó de agua el cuerpo del tensiómetro y el depósito, se pusieron a la intemperie a la acción del viento y la radiación solar para que al secarse la cápsula se produjera un vacío dentro del tensiómetro que fuera marcado en el vacuómetro, ésto se hizo con los tres tensiómetros para determinar si había una diferencia significativa entre las lecturas de estos y realizar correcciones de ser necesario. Las lecturas obtenidas se muestran en el Cuadro 3.2.

Cuadro3.2. Lecturas de la estandarización de los tensiómetros.

Hora	Lecturas de los Tensiómetros (centibares)		
	18" (50 cm)	12" (30 cm)	12" (10 cm)
Lec. Inicial			
10:50	2	2	2
11:00	14	14	12
11:05	20	20	18
11:40	37	41	33
12:40	40	45	42
01:54	41	45	46
03:20	41	45	46
04:00	44	41	38
04:30	44	41	37
05:00	44	40	37
Promedio	32.7	33.4	31.1

Se puede observar que las lecturas de los tensiómetros tomadas durante dicha estandarización no difieren mucho entre ellas, por lo cual no se realizaron correcciones a los tensiómetros.

Después de esta estandarización fueron colocados en el campo para los diferentes estratos en estudio, estos se colocaron de tal manera que la cápsula porosa quedara a la mitad de la distancia de cada estrato, en la parte media, es decir, que para el estrato de 00-20 cm la cápsula porosa del tensiómetro quedo a una profundidad de 10 cm por debajo de la superficie del suelo, se procedió de la misma manera para los estratos de 20-40 cm y 40-60 cm, en los cuales la cápsula porosa queda a una profundidad de 30 cm y 50 cm respectivamente (Ver Figura 3.1).

Bloques de Resistencia Eléctrica

Se utilizaron bloques de resistencia eléctrica de la compañía Irrrometer denominados watermark 200, los cuales proveen un conveniente método de estimación de potencial del agua entre 0 y 2 bars (suelos húmedos).

El block watermark consiste en dos electrodos concéntricos empotrados en una matriz de material de referencia. El material de la matriz esta rodeado por una membrana sintética para protección contra el deterioro y una capa amortiguadora de yeso interna contra los niveles de salinidad en suelos irrigados.

Estos tienen una calibración previa a la instalación que es recomendada por el fabricante, esta consiste en saturarlos y dejarlos secar unas tres veces, parecido al proceso de estandarización que se realiza con los tensiómetros.

Si las prácticas culturales lo permiten, el sensor se puede dejar en el suelo todo el año, eliminando la necesidad de remover el sensor durante los meses de invierno.

Para obtener mediciones representativas, se evitan lugares altos, cambios de pendiente, o depresiones en donde el agua se encharque. Comúnmente, el sensor debe ser colocado en el sistema de raíces del cultivo.

El ajuste en el suelo es muy importante. La carencia de un buen ajuste es el problema principal en la eficiencia del sensor. En suelos llenos de grava o arenosos, y teniendo un sensor muy profundo, es a veces muy difícil conseguir sacarlo sin dañar la membrana. El método ideal para hacer la excavación de acceso es teniendo una herramienta para hacer el acceso de un diámetro mayor en la parte superior y de un diámetro aproximadamente exacto al sensor en la parte inferior. En cualquier caso, la excavación debe ser cuidadosamente rellenada y apisonada para prevenir bolsas de aire que pueden permitir el paso del agua al sensor. Un tubo de PVC clase 315 de $\frac{1}{2}$ " de diámetro se ajusta sobre el collar del sensor y se puede utilizar para empujarlo.

Aspersor de Neutrones

Como acceso para la fuente radioactiva se utilizaron tubos de aluminio. Para realizar la instalación de los tubos de acceso se utilizó una barrena mecánica con diámetro exterior ligeramente más grande.

El aspersor de neutrones utilizado, tiene integrado en una sola unidad sus partes fundamentales, como lo son: la fuente radioactiva, el sistema electrónico y el sistema de baterías recargables.

Cabe señalar que durante el periodo de toma de datos la lectura estándar del aparato fue la misma.

Especificaciones del Aspersor de Neutrones.

Modelo:	503 DR Hidroprobe.
Función:	Medición de Humedad Sub-superficial.
Rango:	0 a 32 % Vol, 0.32 gm/cc, 20 pcf, 3.84 in/ft.
Precisión:	0.24% a 24% Vol a un minuto.
Tiempo de conteo:	1, 4, 16, 32, 64, y 256 segundos.
Temperatura:	Opera de 0 a 70°C.
Vida de la batería:	500 – 1000 ciclos de carga-descarga.
Consumo:	6.5 mA.
Visualización:	8 caracteres alfanuméricos en cristal liquido.
Almacenamiento de Datos:	3072 células de: conteos, identificadores, o entradas de valores auxiliares desde teclado.
Salida de Datos:	Puerto serial RS232C a impresora externa, computadora, CRT o conector.
Calibración:	8 programas de tipo lineal.
Unidades:	Selección de usuario: in/ft, pcf, gm/cc, % Vol, cm/30 cm, conteo e índice de conteo.
Fuente de neutrones:	50 mCi Americium-241/Be
Encapsulación:	Doble cápsula sellada, CPN-131
Protección:	Silicón basado en parafina para material radioactivo.
Construcción:	Aluminio con pintura epoxy o una fuerte anodización final.
Medidas:	6.8" W x 7.0" D x 14.0" H

Time Domain Reflectometry (TDR)

En el presente trabajo se utilizó un reflectómetro para determinar el contenido de humedad, basado en la tecnología TDR, de la compañía Campbell Scientific modelo CS615. Este proporciona una medición del contenido de humedad del suelo en base a volumen (cm^3/cm^3).

La información de contenido de agua es derivado del efecto del cambio de la constante dieléctrica de las ondas electromagnéticas propagadas a lo largo de la guía. La salida del reflectómetro es una onda cuadrática y fueron conectados a un datalogger Campbell Scientific 23X. Las mediciones pueden ser convertidas a contenido de humedad base volumen usando valores de calibración.

Descripción

La salida del reflectómetro es esencialmente una onda cuadrática con una amplitud de ± 2.5 VDC. El periodo de la onda cuadrática de salida tiene un rango que va desde 0.7 a 1.6 milisegundos y es usado para la calibración del contenido de agua.

Especificaciones

Dimensiones

Varillas:	30.0 cm de longitud.
	3.2 mm de diámetro.
	3.2 cm de separación.

Cabeza: 11.0 cm x 6.3 cm x 2.0 cm

Peso

Sonda: 280 g

Cable: 35 g m⁻¹

Eléctrico

Energía: 70 miliamperes @ 12 VDC cuando esta activa la sonda.

menos de 10 microamperes cuando esta en modo espera.

Suministro de voltaje: 9 VDC mínimo, 18 VDC máximo.

Voltaje de activación: Mínimo voltaje para activar la sonda de 1.3 VDC.

Especificaciones de Funcionamiento

Precisión. La precisión es ± 2 por ciento cuando se usa una calibración para un suelo específico. Cuando se usan calibraciones generales la precisión depende de la textura del suelo y la composición mineral.

Resolución. La resolución de las mediciones del contenido volumétrico del agua depende de la instrucción de datalogger que es usada. Cuando en el CR10X, CR10 o CR500 se utiliza la instrucción 27, periodo de medición, la resolución es del orden de $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Cuando se utiliza la instrucción 3, contador de pulsos, la resolución con un intervalo de ejecución de 1 segundo es $10^{-4} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ cuando el periodo del pulso es de 1.3 milisegundos. La resolución se mejora cuando el contenido de agua disminuye y el intervalo de ejecución

aumenta. Un intervalo de ejecución corto de 0.1 segundos produce una resolución de $10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a un mismo contenido de agua.

Rango de operación. La calidad de las mediciones de contenido de humedad cuando se aplican campos electromagnéticos a las guías es afectada por la conductividad eléctrica del suelo. La propagación de los campos electromagnéticos en la configuración del CS615 es predominantemente afectada por cambios en la constante dieléctrica debido a cambios en el contenido de agua, pero también es afectado por la conductividad eléctrica. Los iones libres de la solución del suelo proporcionan una idea de la conductividad eléctrica la cual resulta en una atenuación de la señal aplicada a las varillas. Esta atenuación reduce la amplitud de la señal de oscilación. La atenuación reduce la frecuencia de oscilación en un contenido de agua dado debido a que toma mucho tiempo alcanzar el oscilador.

Cuando los valores de la conductividad eléctrica de la solución del suelo exceden de 1 dS m^{-1} , la pendiente de la calibración comienza a cambiar. La pendiente disminuye con el aumento de la conductividad eléctrica. La sonda a pesar de esto responde a los cambios de contenido de agua con buena estabilidad, pero la calibración tendrá que ser modificada.

Longitud del Cable. La longitud del cable no es una limitación bajo aplicaciones comunes. En nuestro caso la longitud del cable no superó los 100 m, por lo que según la literatura las mediciones no se ven afectadas.

Temperatura. La salida del CS615 es sensible a la temperatura, y se aplica la compensación para aumentar el grado de precisión. La magnitud del coeficiente de temperatura varía con el contenido de agua. Mediciones en laboratorio se realizaron con varios contenidos de humedad y con un rango de temperaturas de 10°C a 30°C . La ecuación siguiente puede ser usada para interpolar el

coeficiente de temperatura para un rango de valores de contenido volumétrico de humedad.

$$Coef_{temperatura} = -3.46 * 10^{-4} + 0.019\theta_v - 0.045\theta_v^2$$

Para aplicar esta corrección se utiliza la siguiente ecuación.

$$\theta_{v\text{ corregido}} = \theta_{v\text{ no corregido}} - (T - 20) * Coef_{temperatura}$$

La aplicación de esta corrección produce una diferencia máxima entre el contenido de agua corregido y el no-corregido de aproximadamente 1.6 por ciento, considerando la precisión de las mediciones y la variabilidad potencial espacial de la temperatura del suelo y a lo largo de la longitud de las varillas de la sonda, la corrección no es necesaria en muchos casos.

Instalación

Orientación. Las varillas de la sonda pueden ser insertadas verticalmente en la superficie del suelo o enterradas cerca de la superficie. Una sonda insertada verticalmente en la superficie dará una indicación del contenido de agua en los 30 cm superiores del suelo. La sonda puede instalarse de forma horizontal a la superficie del suelo para detectar el paso de frentes húmedos u otros flujos verticales de agua.

En el presente trabajo la instalación de la sonda se realizó en forma horizontal para determinar de forma puntual la humedad del suelo. Estos sensores se instalaron a la mitad de la distancia de cada estrato, es decir, en el estrato 00-20 cm el sensor fue colocado a una profundidad de 10 cm, esto se realizó de la misma manera para los demás estratos, teniendo un total de 4 sensores TDR a las profundidades de 10 cm, 30 cm, 50 cm y 70 cm.

Ajustes

General. El CS615 provee una medición indirecta del contenido de agua usando el efecto de los cambios de la constante dieléctrica sobre la aplicación de ondas electromagnéticas. Las varillas de la sonda actúan como una guía de las ondas y el material que rodea las varillas (suelo) varía en su constitución dieléctrica con la cantidad de agua en el material.

La constante dieléctrica del suelo es una suma de las constantes dieléctricas de sus constituyentes. La constante dieléctrica del agua es significativamente más alta que la de los otros componentes. Los cambios en la constante dieléctrica del sistema suelo pueden atribuirse a cambios en el contenido de agua. Esta es la base para la técnica de medición.

Estas son dos de las propiedades del suelo que afectan la respuesta del CS615 a cambios en el contenido de agua. El alto contenido de arcillas (mayor del 30 por ciento) o la alta conductividad eléctrica (mayor de 1 dS m^{-1}) requerirá que la calibración sea ajustada o generada para un suelo en específico.

En valores de conductividad eléctrica de 1 dS m^{-1} y menores, la calibración mostrada para 0.8 dS m^{-1} trabaja bien para un amplio rango de texturas de suelo. Las curvas de calibración para conductividades eléctricas altas muestran que la pendiente disminuye con el aumento de la conductividad. La respuesta del CS615 a los cambios en el contenido de agua con valores de conductividad eléctrica altos funciona hasta aproximadamente 5 dS m^{-1} . La calibración puede aproximarse si la conductividad eléctrica de la solución del suelo es conocida o si las mediciones del suelo son hechas con el CS615 y el contenido de agua real es determinado de forma independiente. El alto contenido de arcillas tiene un efecto similar sobre la calibración pero la magnitud depende del tipo de arcilla.

Cuadro 3.3. Valores de conductividad eléctrica y fórmula de calibración para el reflectómetro CS615.

Conductividad Eléctrica (dS m⁻¹)	Calibración
≤ 1.0	$\theta_v(\tau) = -0.187 + 0.037 * \tau + 0.335 * \tau^2$
1.8	$\theta_v(\tau) = -0.207 + 0.097 * \tau + 0.288 * \tau^2$
3.0	$\theta_v(\tau) = -0.298 + 0.361 * \tau + 0.096 * \tau^2$

θ_v es el contenido volumétrico de agua en una fracción base, por ejemplo 0.20 es 20 por ciento de contenido volumétrico de agua.

τ es el periodo de salida del CS615 en milisegundos.

Calibración para un Suelo Especifico. Las relaciones de calibración entre el contenido volumétrico de humedad y el periodo de salida del CS615 para un suelo especifico puede necesitar ser establecido si el incremento de la precisión es necesario o si la composición del suelo se desvía de lo que se considera típico. La conductividad eléctrica alta, el alto contenido de arcillas, el alto contenido de cuarzo y el alto contenido de materia orgánica son condiciones que pueden afectar la respuesta de la sonda.

Curva de Retención de Humedad

Los datos que se obtuvieron de los tensiómetros y los bloques de resistencia eléctrica colocados en el lugar del experimento eran medidos en unidades de tensión (centibares), por lo que fue necesario realizar la determinación de las curvas características de retención de humedad del suelo a los diferentes estratos en los que se encontraban los sensores, para que una vez obtenida las curvas se procediera a convertir la tensión, leída en los tensiómetros y en los bloques de resistencia, a contenido de humedad.

Para la obtención de las muestras de suelo se utilizó una barrena de caja con la cual se perforó el suelo obteniendo las muestras a las diferentes profundidades, después se procedió a secarlas a temperatura ambiente y a molerlas para posteriormente llevarlos al Laboratorio de Relación Agua - Suelo - Planta de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en el que se llevó a cabo la determinación de las curvas de retención de humedad del suelo, el procedimiento que se utilizó fue el de las ollas de presión. Las curvas de retención, resultado de la determinación de laboratorio, se presentan en la Figura 3.3 con sus ecuaciones después de hacer el ajuste.

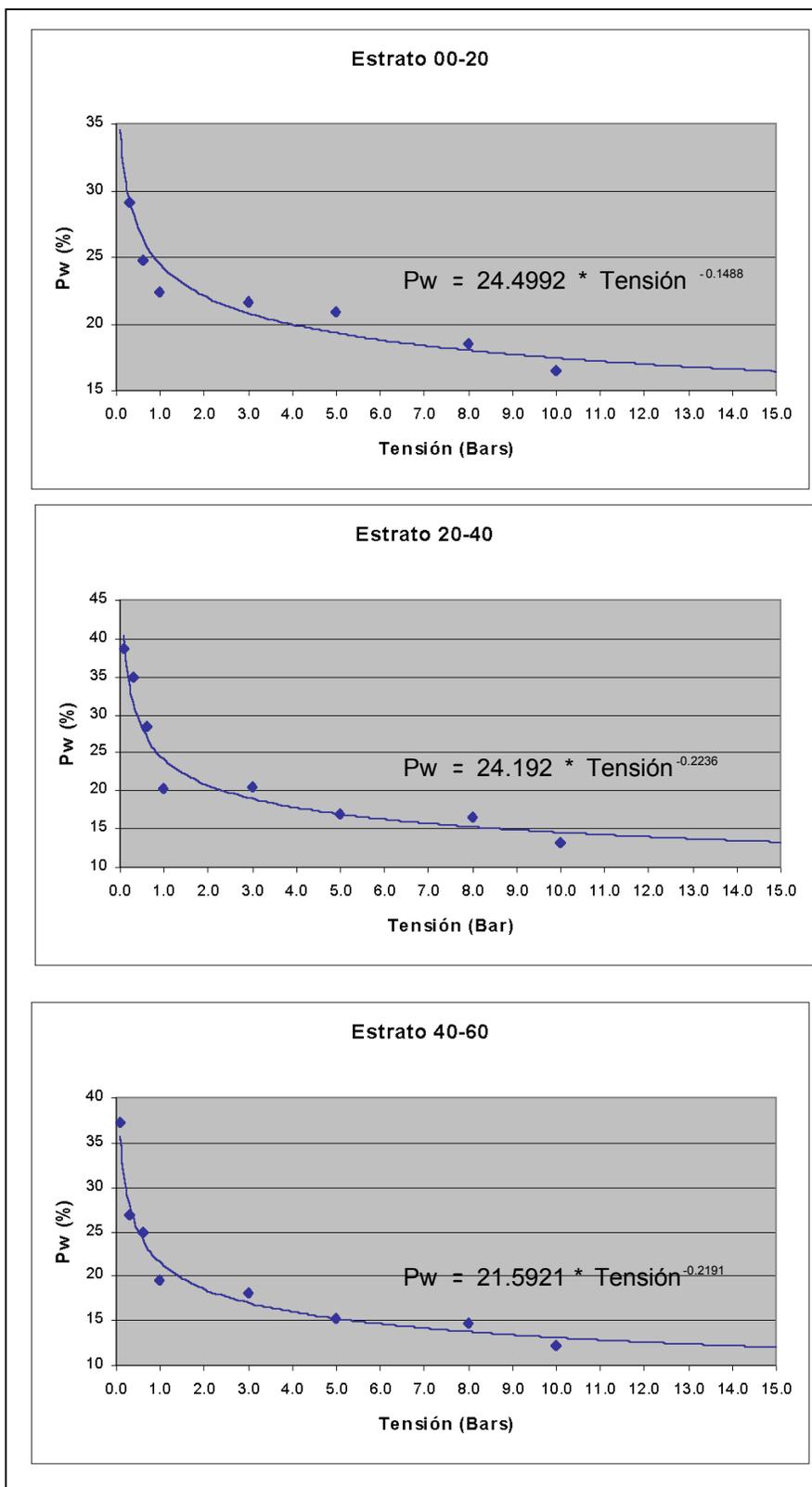


Figura 3.3. Curvas características de retención de humedad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se discutirán los datos obtenidos durante el desarrollo de la investigación, que comprende del día 14 de Febrero al 27 de Abril de 2001.

Se puede observar en las gráficas de contenido de humedad para el estrato 00-20 cm que durante la toma de las primeras lecturas antes de la aplicación de la lámina de agua, el método gravimétrico (Figura 4.1) cuantifica una humedad de 17.09 por ciento y el aspersor de neutrones (Figura 4.2) determina un 16.95 por ciento, al contrario de los tensiómetros (Figura 4.3), los bloques de resistencia (Figura 4.4) y los TDR (Figura 4.5) que obtienen una lectura de 28.76 por ciento, 34.66 por ciento y 40.96 por ciento respectivamente, haciendo notar desde un principio una sobre estimación del contenido de humedad en comparación con el método gravimétrico, el cual es utilizado como referencia para los demás (Figura 4.6).

Después de la aplicación de la primera lámina de agua que se utilizó para saturar el suelo, la cual fue de 14 cm, el método gravimétrico alcanza un valor de 25.37 por ciento de humedad, de la misma manera la determinación con el aspersor de neutrones alcanzó un valor de 25.82 por ciento que es aproximado al obtenido con el gravimétrico. Sin embargo las lecturas determinadas con los tensiómetros, los bloques de resistencia y los TDR fueron visiblemente mayores que las anteriores obteniendo un contenido de humedad con estos sensores de 33.59 por ciento, 35.00 por ciento y 36.32 por ciento respectivamente, volviéndose a presentar la sobreestimación del contenido de humedad por parte de estos sensores.

Se ve también en las gráficas que el contenido de humedad se dejaba abatir hasta un cierto punto para comparar la respuesta que tenían estos métodos en la determinación de la humedad, después de llegar a un abatimiento de la humedad determinado se volvía a aplicar una lámina de agua para reponer la que había sido consumida, esto se hacía generalmente cuando el tensiómetro más superficial, el situado a los 10 cm de profundidad, marcaba una tensión de más de 70 cb, que es cuando el cuerpo del tensiómetro comienza a quedar vacío y se corre el riesgo de que se rompa la columna de agua y deje de funcionar debido a la entrada de aire.

Sin embargo el método gravimétrico presenta sus desventajas, ya que después de realizar un riego o en este caso la aplicación de la lámina de agua no se puede entrar al terreno para hacer un muestreo con la barrena, y en caso de que se pueda realizar, estos datos son erróneos debido a que la muestra se queda adherida a las paredes de la barrena dificultando la obtención de esta y por lo tanto obteniendo contenidos de humedad erróneos. Sin embargo no ocurre lo mismo con los tensiómetros, bloques de resistencia y TDR debido a que en los primeros solo se necesita registrar las lecturas y en los otros esto se hace en forma automática, no siendo necesario que el usuario intervenga de manera directa en el registro de lecturas.

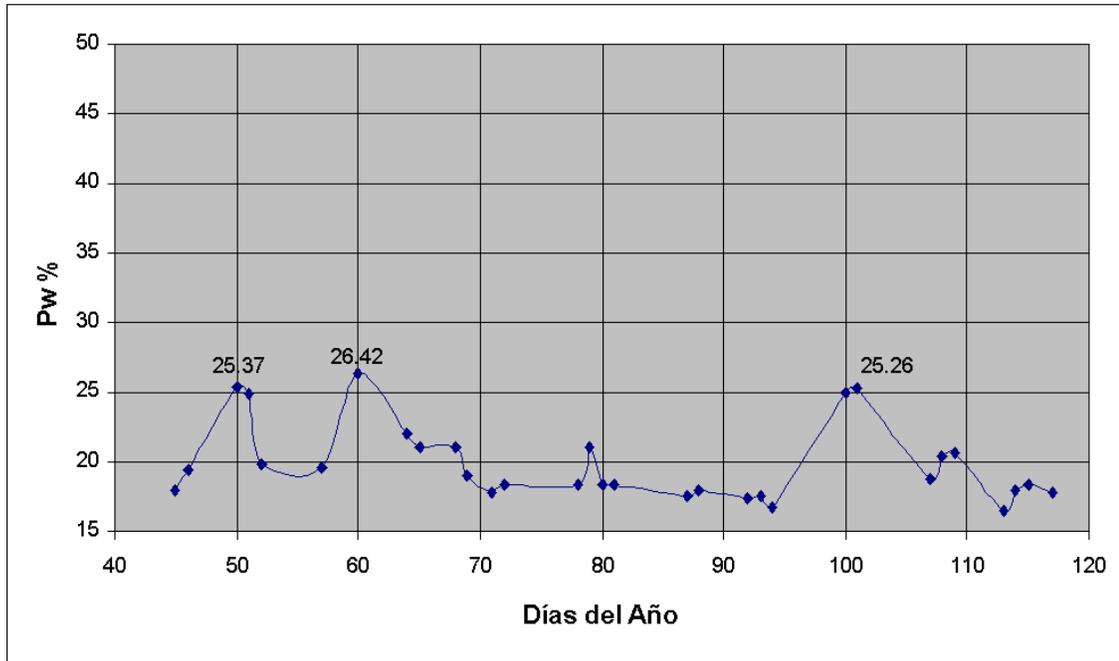


Figura 4.1. Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con el método gravimétrico.

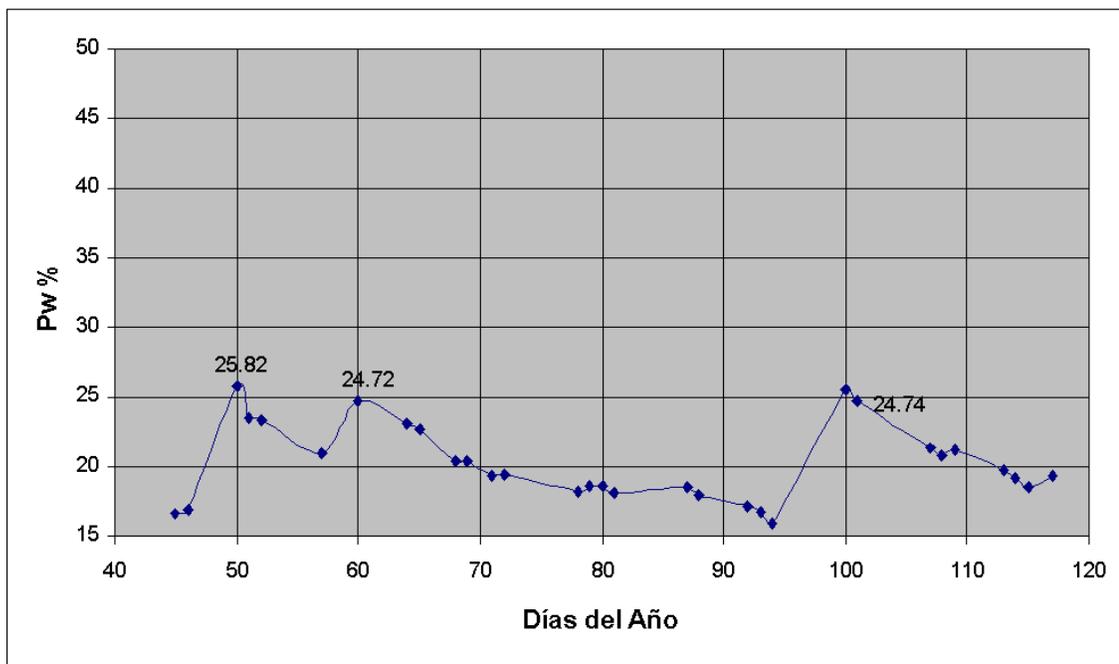


Figura 4.2. Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con aspersor de neutrones.

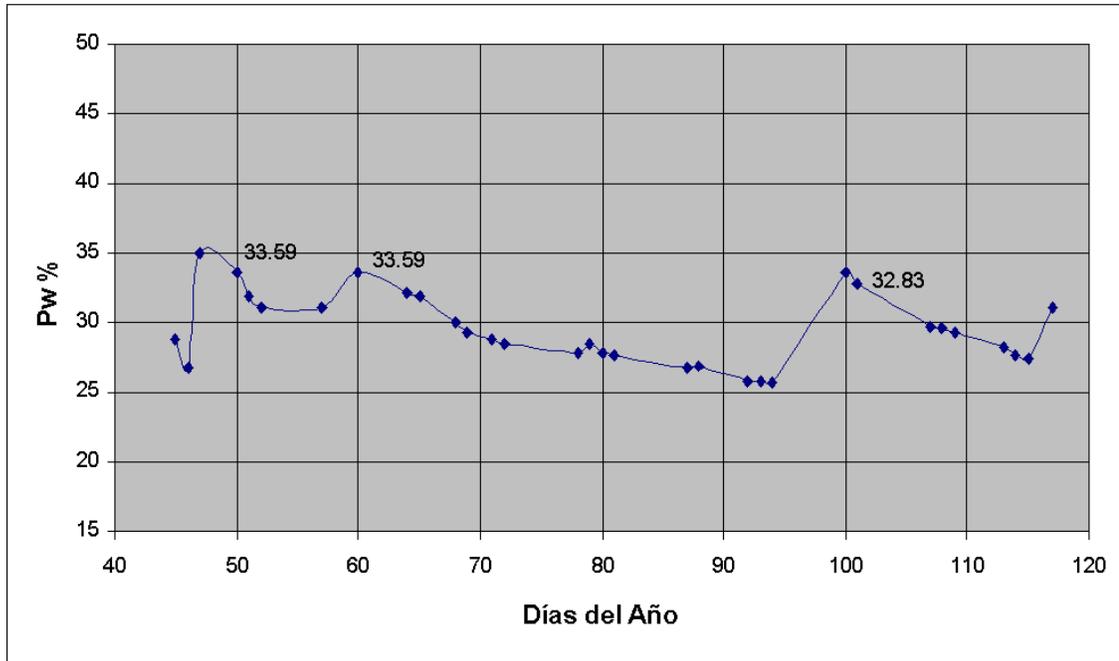


Figura 4.3. Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con tensiómetro.

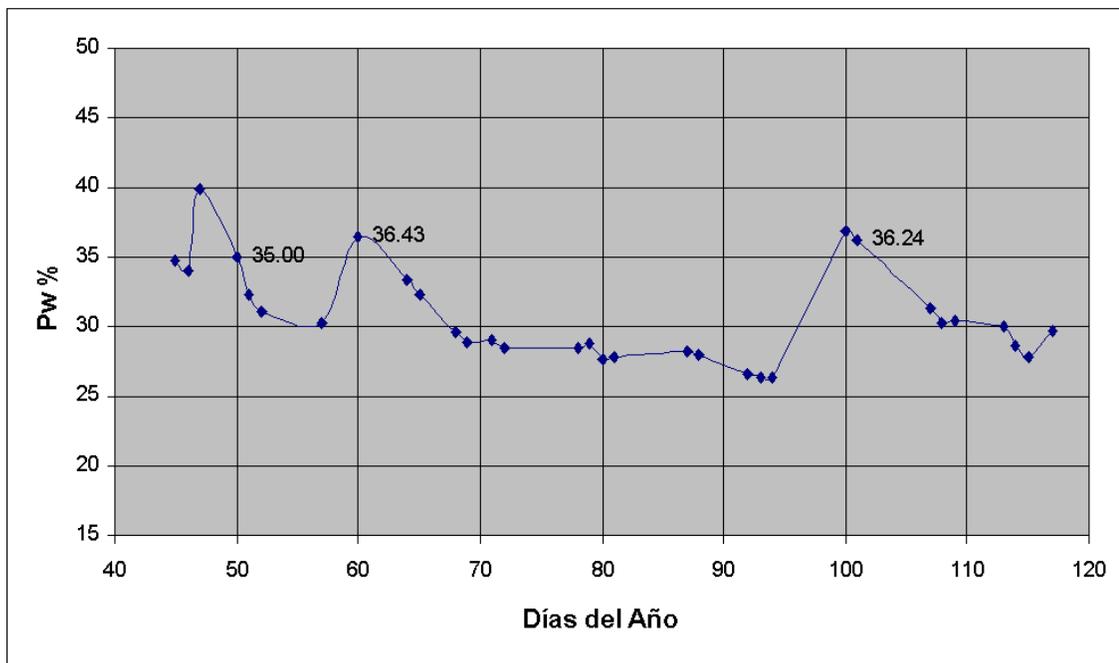


Figura 4.4. Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con bloques de resistencia.

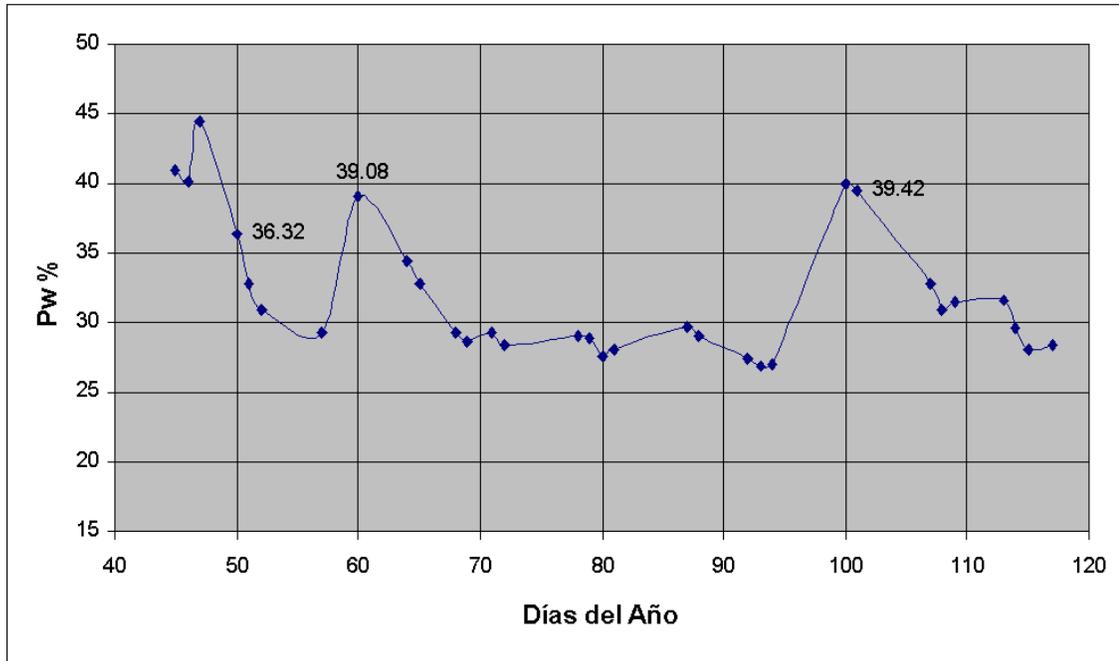


Figura 4.5. Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con sensor TDR.

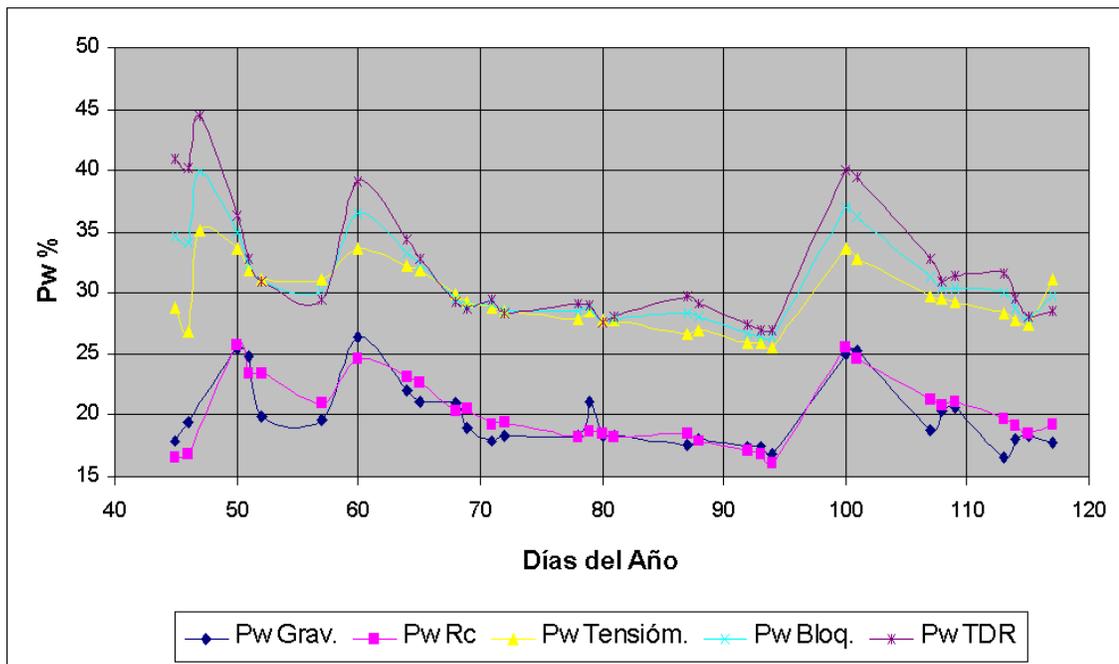


Figura 4.6. Contenido de humedad para el estrato 00-20 cm con el método gravimétrico (Pw Grav), aspersion de neutrones (Pw Rc), tensiómetros (Pw Tensióm.), bloques de resistencia (Pw Bloq.) y TDR (Pw TDR).

En las gráficas del estrato 20-40 cm se observa en las gráficas que el contenido de humedad antes de la aplicación de la lámina de agua se encuentra alrededor del 20 por ciento con el método gravimétrico (Figura 4.7) y el aspersor de neutrones (Figura 4.8), mientras que los tensiómetros (Figura 4.9), los bloques de resistencia (Figura 4.10) y los TDR (Figura 4.11) tienen lecturas de 31.66 por ciento, 38.76 y 40.96 por ciento respectivamente.

Después de haber aplicado la lámina de agua que se utilizó para saturar el suelo, el método gravimétrico registró un valor de 25.85 por ciento de humedad y el aspersor de neutrones determinó un valor de P_w de 25.54 por ciento el cual es muy aproximado al obtenido con el gravimétrico. Se puede observar también que las lecturas determinadas con los tensiómetros, los bloques de resistencia y los TDR fueron mayores que las anteriores obteniendo un contenido de humedad con estos sensores de 33.59 por ciento, 35.00 por ciento y 36.32 por ciento respectivamente, presentándose como ya se había visto anteriormente una sobreestimación del contenido de humedad con estos sensores.

Como ya se había dicho anteriormente el método gravimétrico presenta sus desventajas, ya que no se puede realizar un muestreo de manera efectiva después de que se ha aplicado una lámina de agua y el suelo está aún muy húmedo y esto da como consecuencia determinaciones erróneas de contenido de humedad, por esto en la lectura del día 50 el método gravimétrico presenta un contenido de humedad de 22.16 por ciento, que comparado con los demás sensores es menor, ya que las lecturas obtenidas con el aspersor de neutrones, los tensiómetros, los bloques de resistencia y el TDR son de 25.43 por ciento, 40.48 por ciento, 38.91 por ciento y 38.56 por ciento respectivamente.

Estas mismas tendencias de que las lecturas de contenido de humedad de los tensiómetros, bloques de resistencia y TDR sean mayores en las siguientes mediciones se pueden ver con mayor claridad en la Figura 4.12 en la cual se pueden observar las fluctuaciones de las lecturas a lo largo del periodo de

investigación, por ejemplo la lectura obtenida en la tercera aplicación de la lámina de agua por el método gravimétrico es de 26.45 por ciento y la del aspersor de neutrones de 25.30 por ciento siendo las lecturas de los demás sensores mayores a las obtenidas con el gravimétrico.

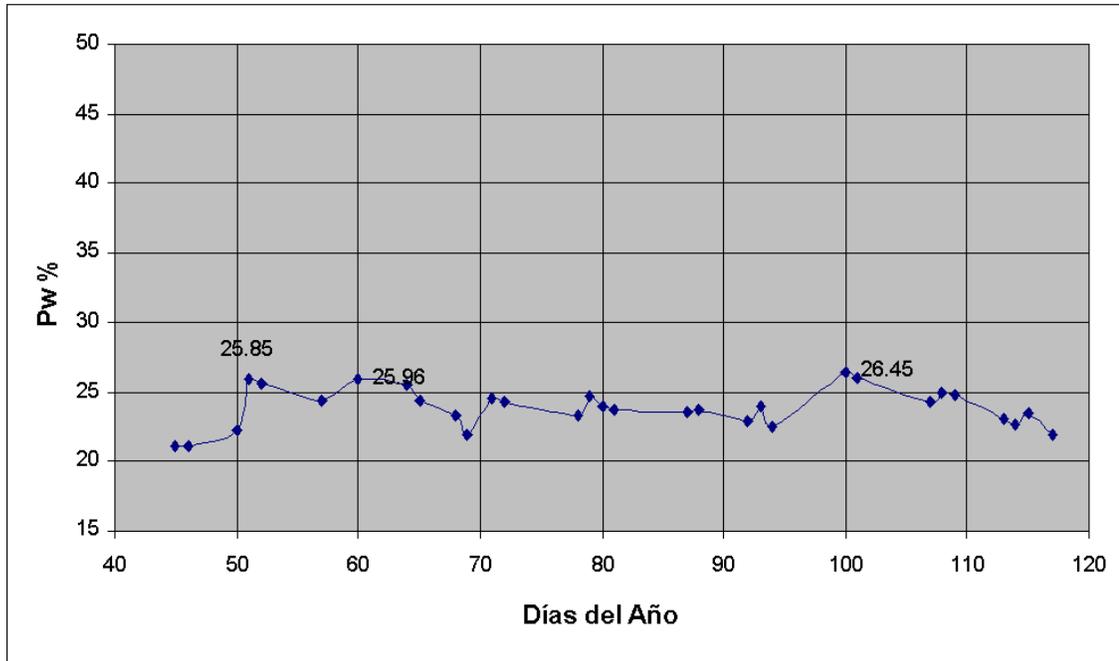


Figura 4.7. Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con el método gravimétrico.

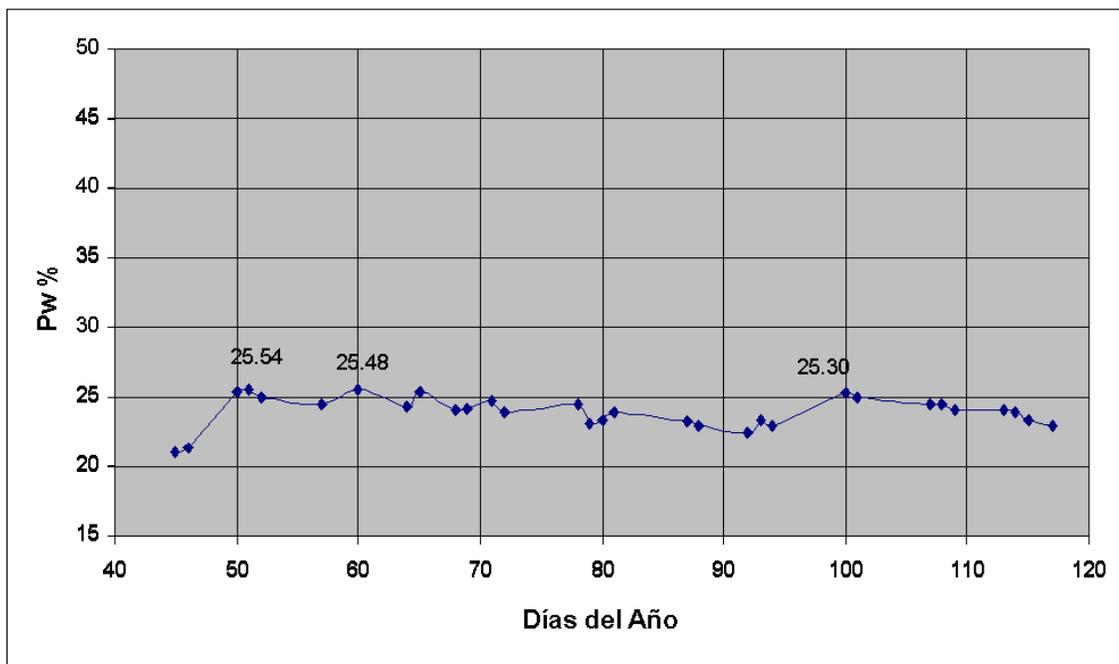


Figura 4.8. Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con aspersor de neutrones.

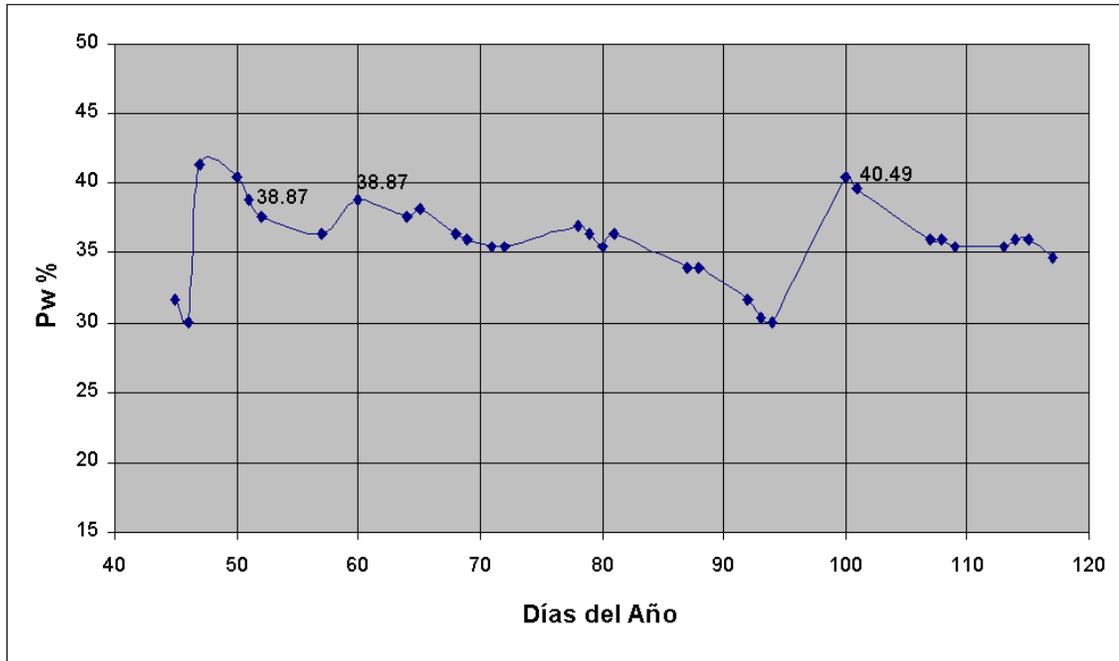


Figura 4.9. Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con tensiómetro.

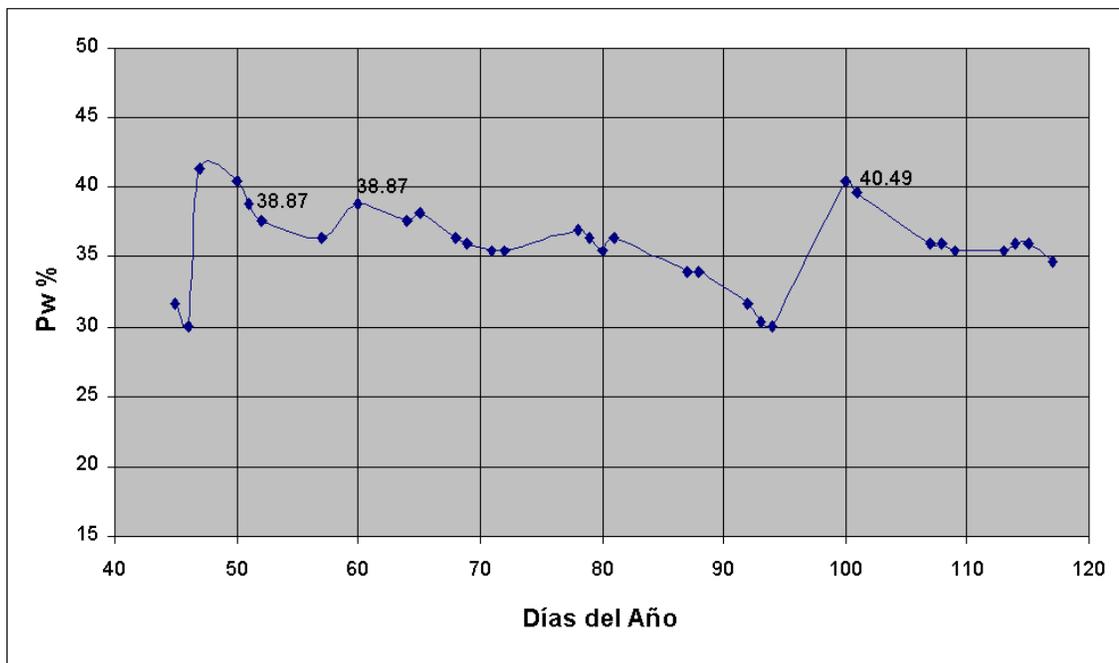


Figura 4.10. Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con bloques de resistencia.

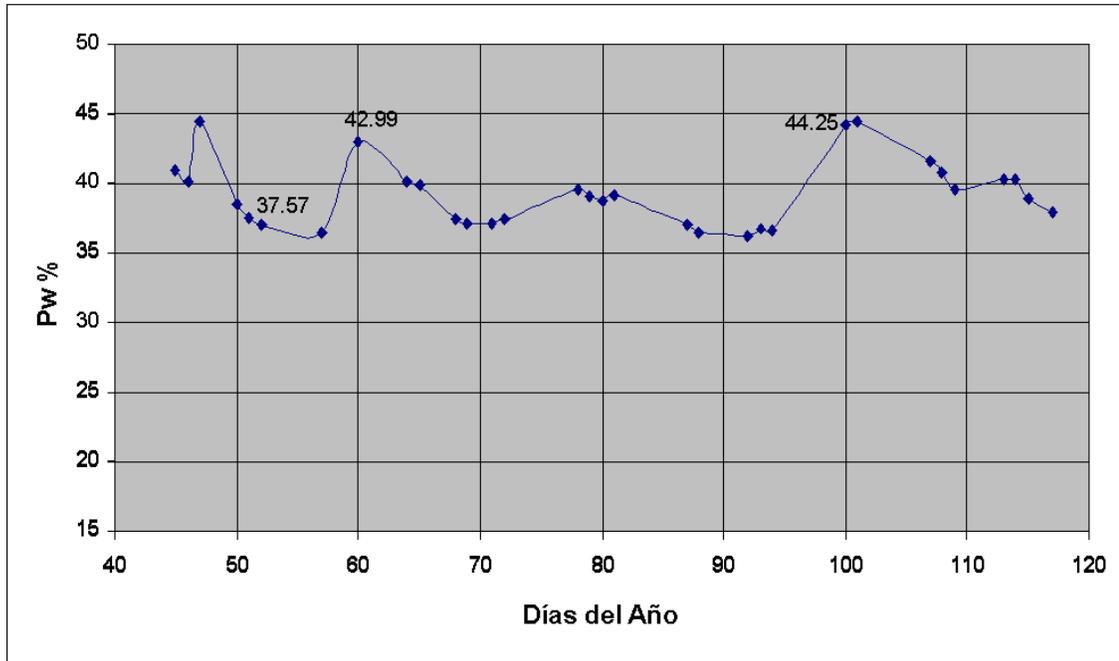


Figura 4.11. Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con sensor TDR.

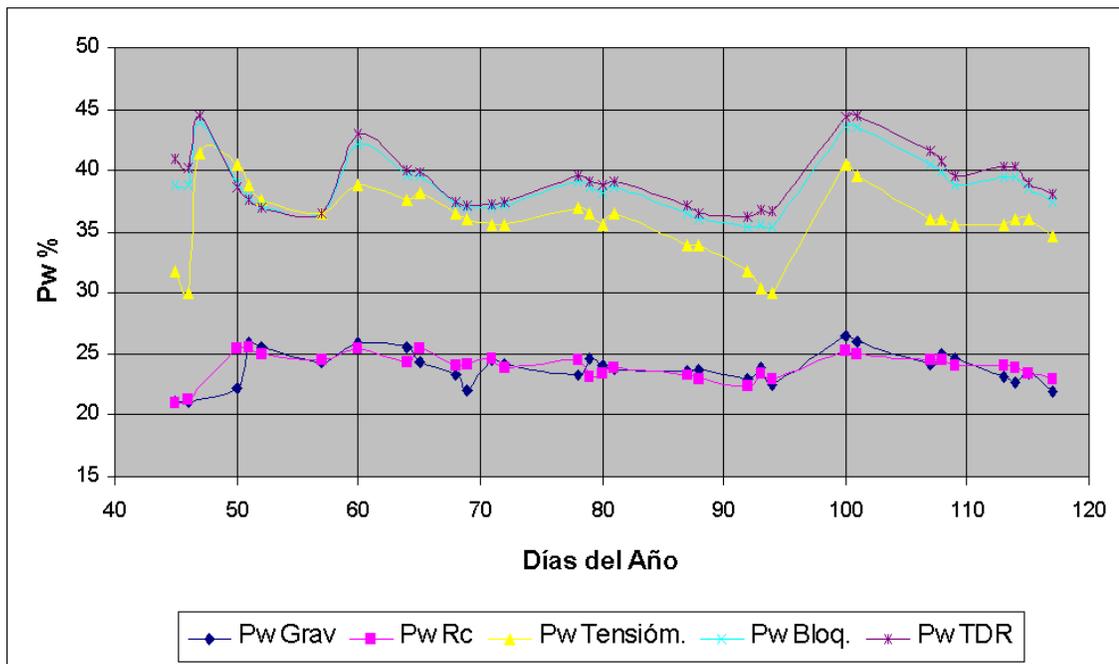


Figura 4.12. Contenido de humedad para el estrato 20-40 cm con el método gravimétrico (Pw Grav), aspersion de neutrones (Pw Rc), tensiómetros (Pw Tensióm.), bloques de resistencia (Pw Bloq.) y TDR (Pw TDR).

Para el estrato 40-60 cm se observa en las gráficas de contenido de humedad que en las primeras lecturas antes de la aplicación de la lámina de agua, el método gravimétrico (Figura 4.13) cuantifica una humedad de 21.27 por ciento y el aspersionador de neutrones (Figura 4.14) determina un 18.47 por ciento, al contrario de los tensiómetros (Figura 4.15), los bloques de resistencia (Figura 4.16) y los TDR (Figura 4.17) que obtienen una lectura de 27.01 por ciento, 30.01 por ciento y 48.93 por ciento respectivamente, haciendo notar como en los gráficos anteriores una sobre estimación del contenido de humedad en comparación con el método gravimétrico, esto se puede ver de manera más clara en la Figura 4.18.

Después de la aplicación de la primera lámina de agua el método gravimétrico alcanza un valor de 20.06 por ciento de humedad, alcanzando la máxima lectura en el día 50 con un valor de 28.27 por ciento esto debido a los inconvenientes de trabajar con la barrena cuando el suelo esta muy húmedo de la misma manera la determinación con el aspersionador de neutrones alcanzó un valor de 24.37 por ciento. pero a diferencias de estos las lecturas obtenidas con los tensiómetros, los bloques de resistencia y los TDR fueron al igual que en los anteriores estratos de un valor mayor, los cuales fueron de 33.22 por ciento, 33.35 por ciento y 34.62 por ciento respectivamente, volviéndose a presentar la sobreestimación del contenido de humedad por parte de estos sensores.

Sin embargo se muestra que en el día 80 hay un descenso en el contenido de humedad que es registrado en mayor grado con los tensiómetros y con los bloques de resistencia a diferencia incluso de los TDR que no se ve esta variación, aunque en el método gravimétrico y en el aspersionador de neutrones se alcanza a apreciar este descenso en realidad no es muy significativo.

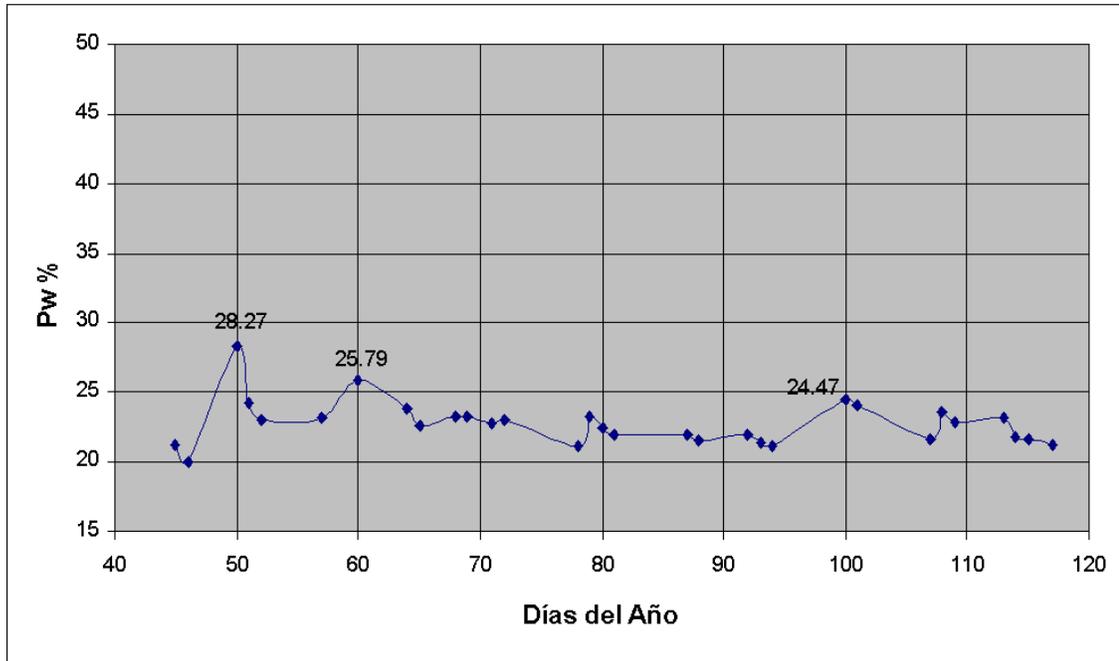


Figura 4.13. Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con el método gravimétrico.

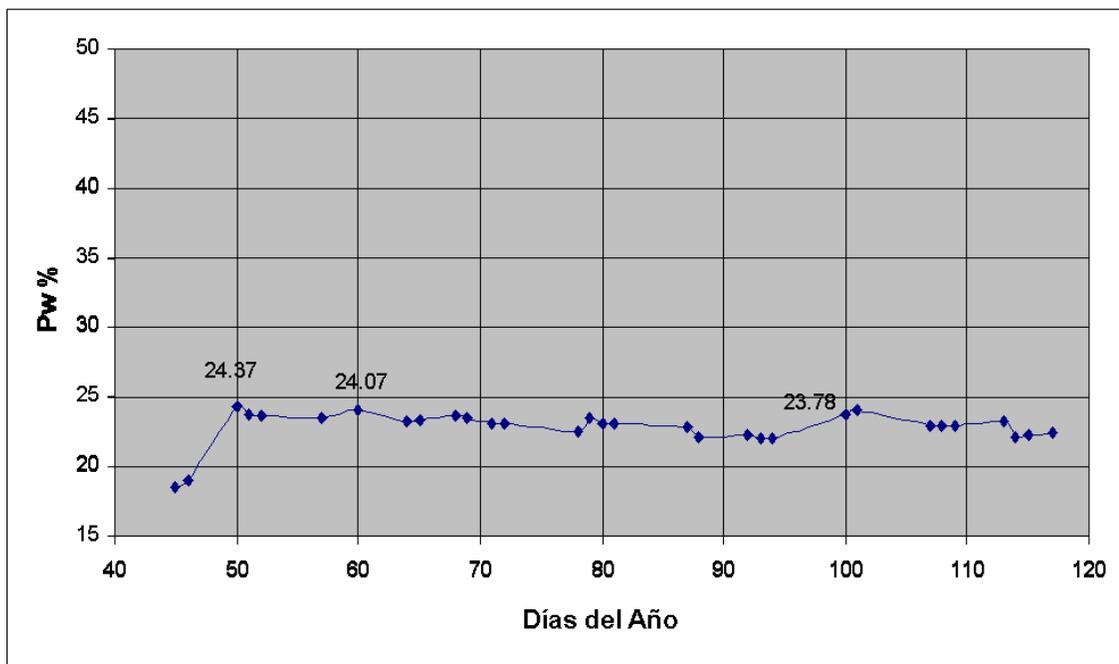


Figura 4.14. Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con aspersor de neutrones.

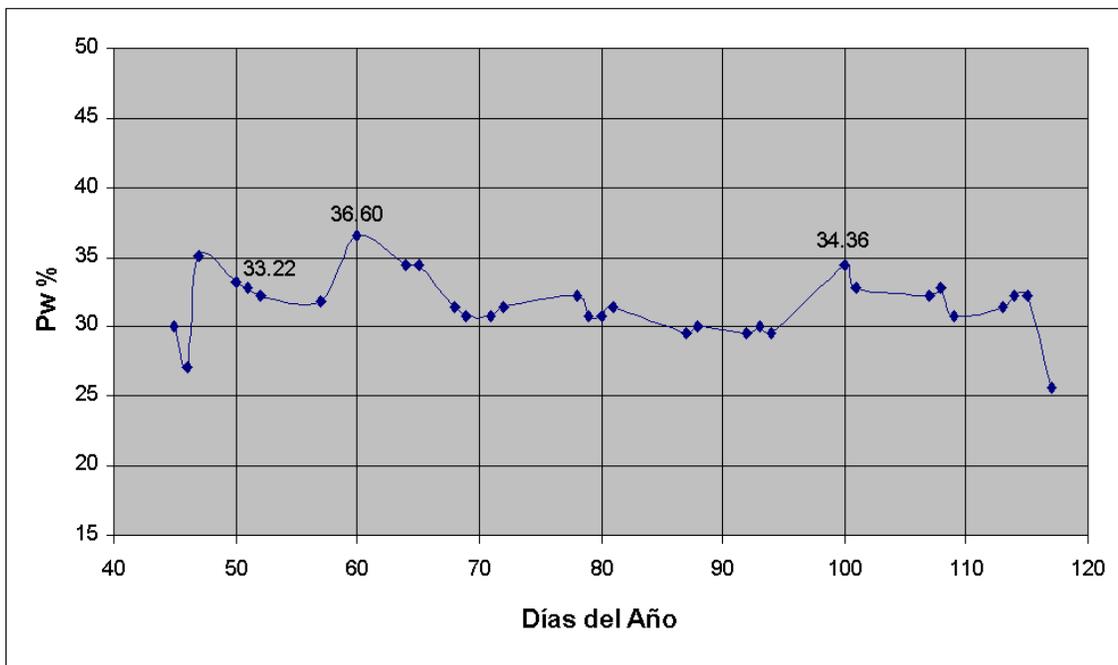


Figura 4.15. Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con tensiómetro.

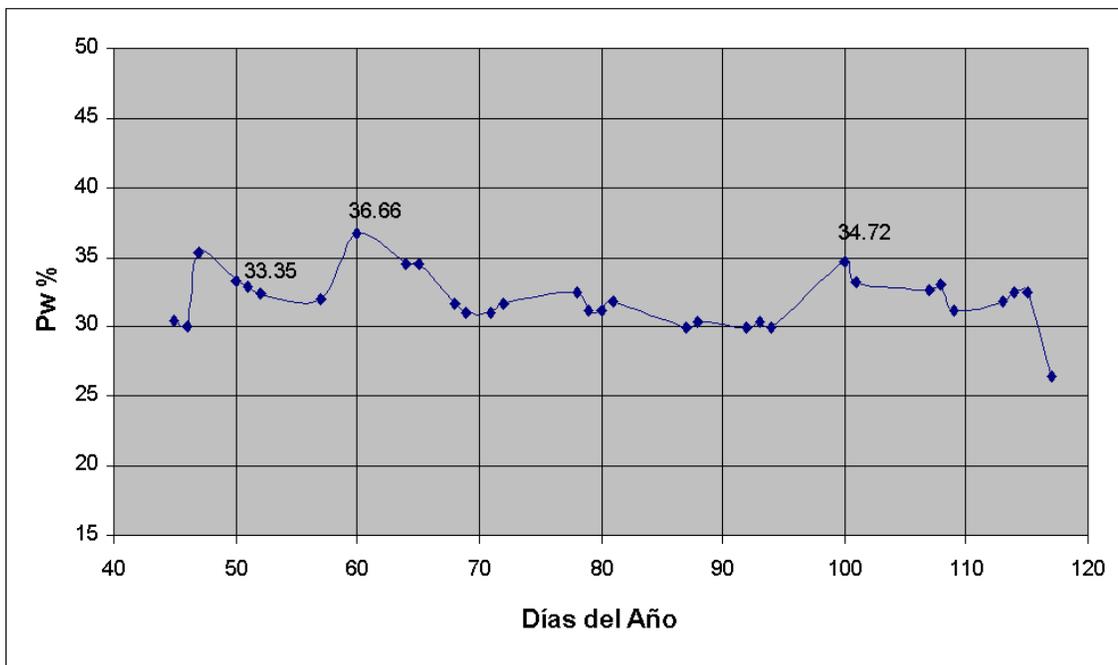


Figura 4.16. Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con bloques de resistencia.

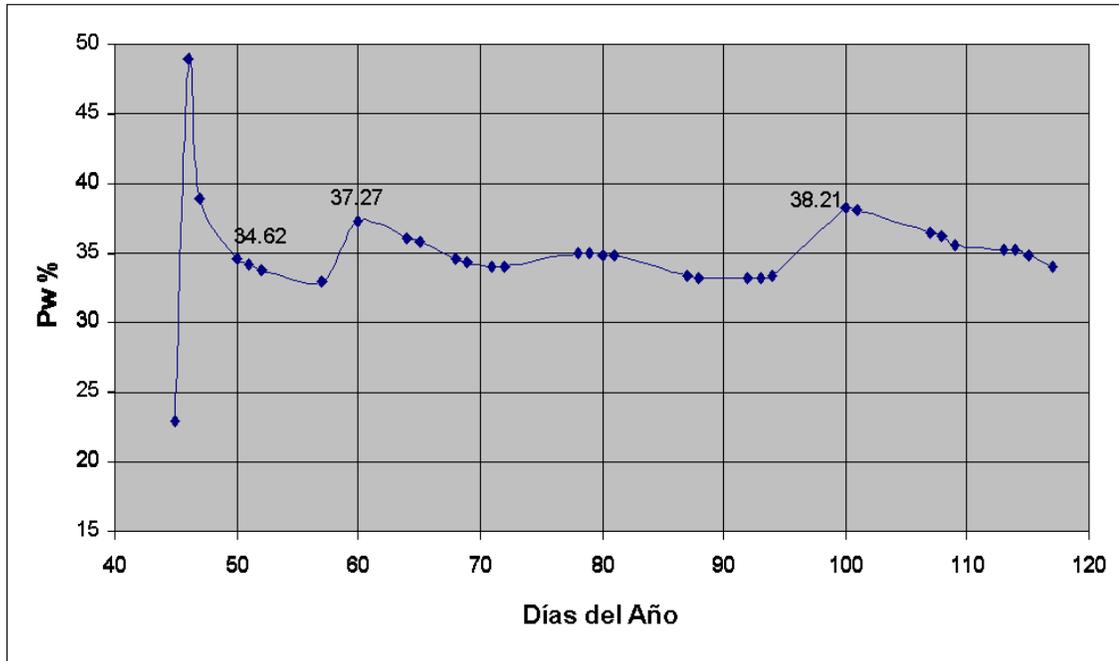


Figura 4.17. Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con sensor TDR.

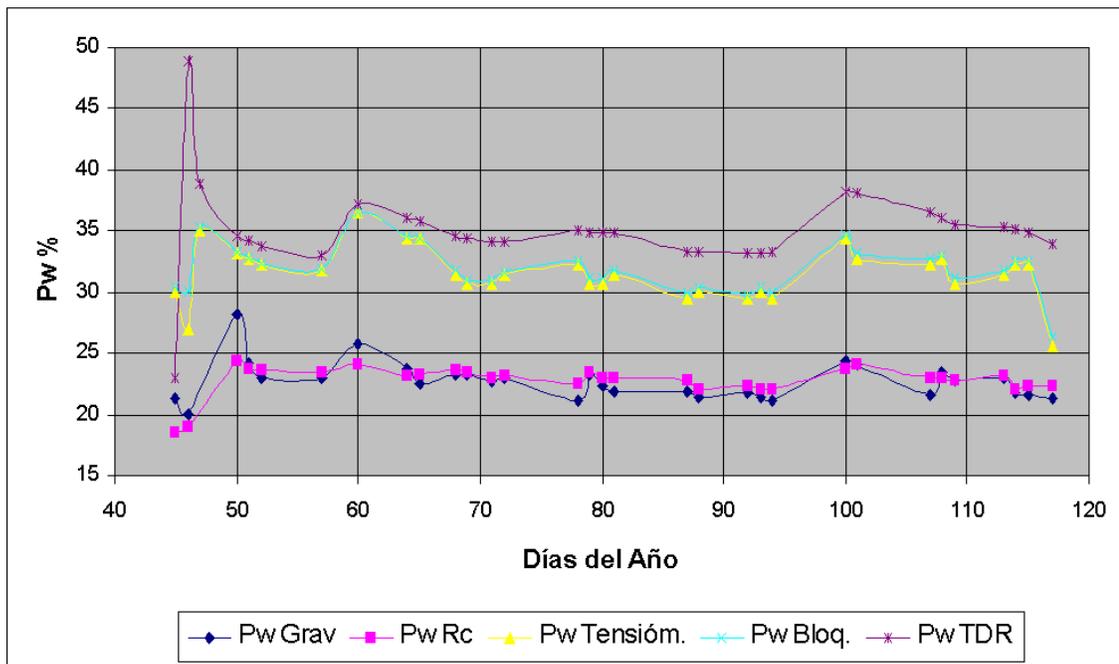


Figura 4.18. Contenido de humedad para el estrato 40-60 cm con el método gravimétrico (Pw Grav), aspersion de neutrones (Pw Rc), tensiómetros (Pw Tensióm.), bloques de resistencia (Pw Bloq.) y TDR (Pw TDR).

En el estrato 60-80 cm se observa que el contenido de humedad en las primeras lecturas, en el día 45, antes de la aplicación de la lámina de agua se encuentra en 21.62 por ciento para el método gravimétrico (Figura 4.19), con el aspersor de neutrones tiene un valor de 19.02 por ciento (Figura 4.20), con el sensor TDR se obtuvo un valor de 28.46 por ciento (Figura 4.21), en estas gráficas se puede observar que las fluctuaciones de contenido humedad registradas con los diferentes métodos presentan una variación menor comparada con los estratos más superficiales.

Después de que se aplicó la primera lámina de agua al cajete el método gravimétrico registro un valor de contenido de humedad de 26.80 por ciento, con el aspersor de neutrones un valor de 27.67 por ciento y con el sensor TDR un valor de 38.02 por ciento. el sensor TDR registro una variación de humedad que los otros métodos no hicieron. Aunque los valores obtenidos con el sensor TDR siguen sobreestimando los datos del método gravimétrico como se observa en la Figura 4.22.

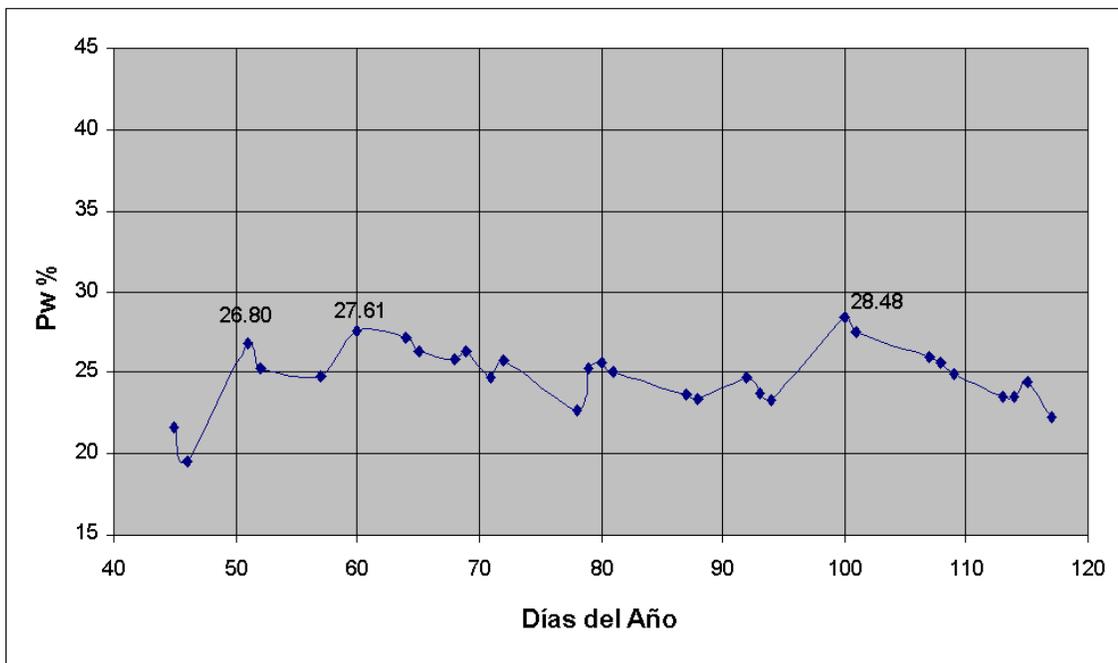


Figura 4.19. Contenido de humedad para el estrato 60-80 cm con el método gravimétrico.

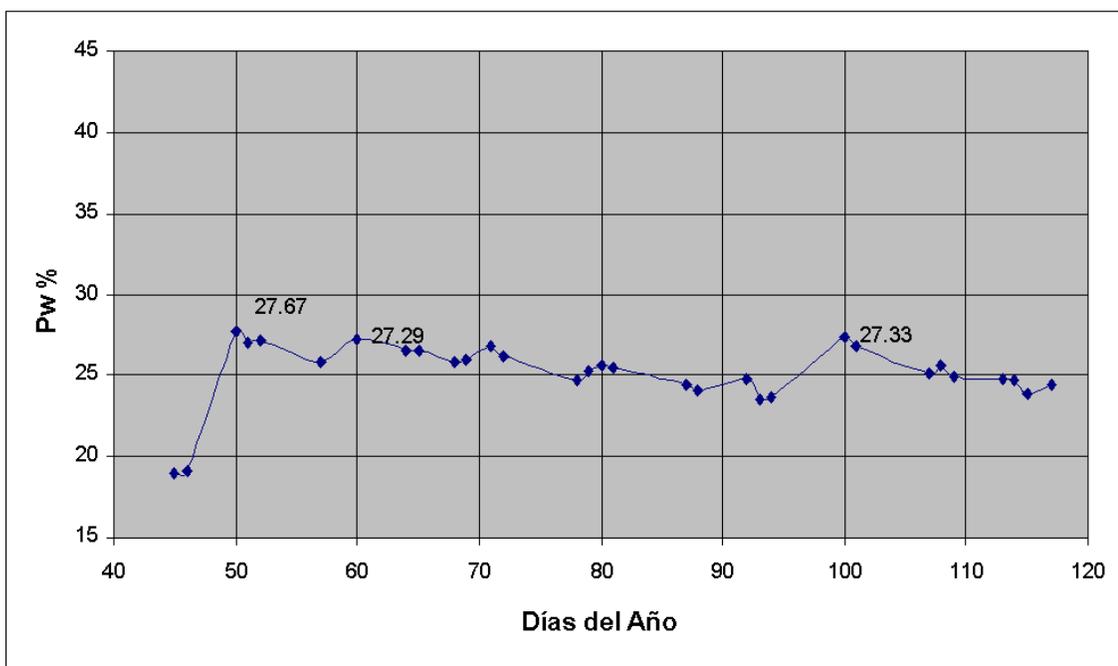


Figura 4.20. Contenido de humedad para el estrato 60-80 cm con aspersor de neutrones.

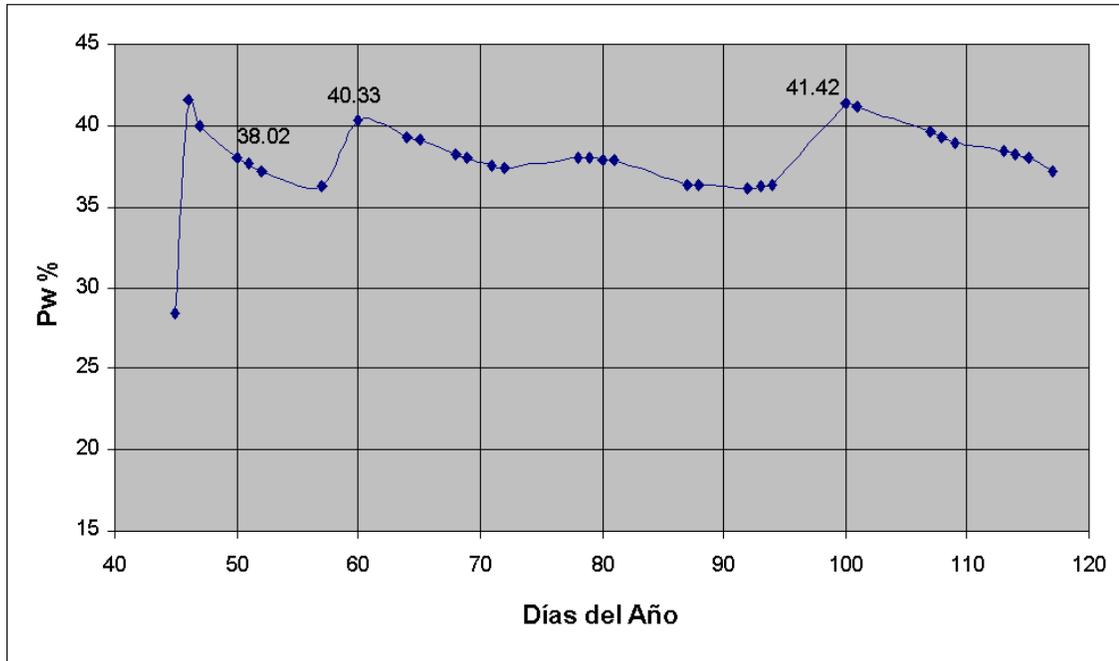


Figura 4.21. Contenido de humedad para el estrato 60-80 cm con sensor TDR.

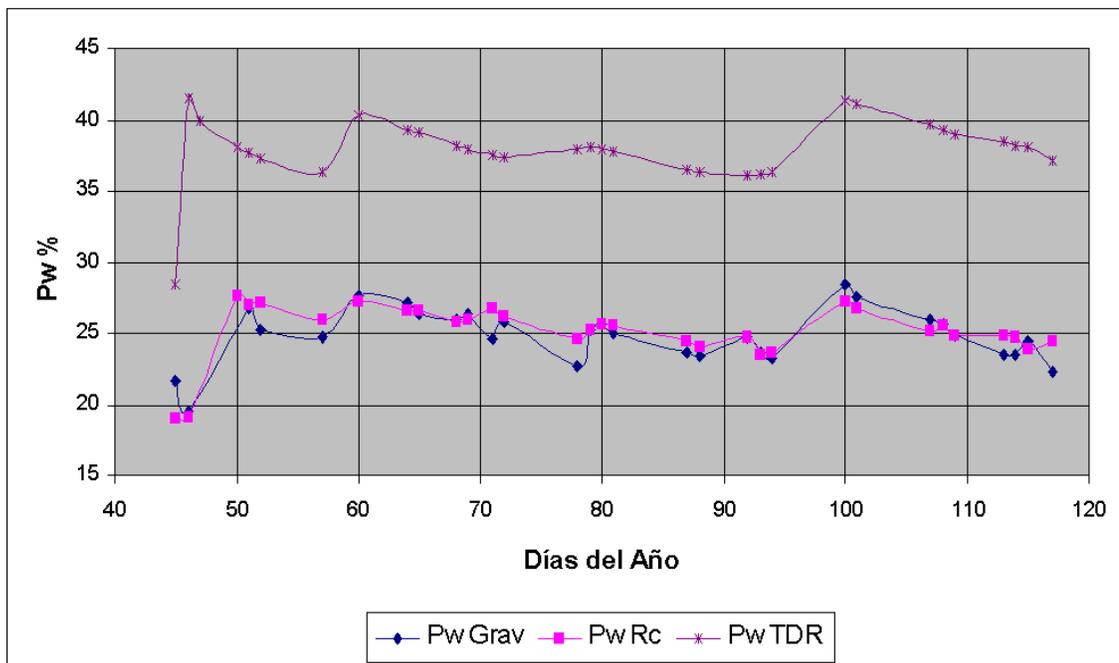


Figura 4.22. Contenido de humedad para el estrato 60-80 cm con el método gravimétrico (Pw Grav), aspensor de neutrones (Pw Rc) y TDR (Pw TDR).

Para obtener otras comparaciones de los métodos y corroborar su grado de exactitud se realizó un ajuste de lecturas del Pw de los tensiómetros en base al Pw obtenido con el método gravimétrico. Este ajuste (Figura 4.23) nos proporcionó unas lecturas de Pw de acuerdo a la tensión registrada en el aparato, estos datos de Pw al ser comparados con los obtenidos por medio de las curvas de retención de humedad (Cuadro 4.1) resultan ser menores, esto puede deberse a que para la obtención de dichas curvas, el suelo es alterado en su estructura ya que este es molido y tamizado, y esto le da un mayor volumen de espacio poroso y por lo tanto una mayor capacidad de retención de humedad, es por esto que los datos obtenidos de esta forma hacen una sobreestimación de la humedad existente en el suelo.

Sin embargo los tensiómetros al llegar a una lectura alta (74 cb) se obtiene un Pw de 16.47 por ciento, esto es erróneo según la literatura ya que éste valor de Pw está próximo a PMP de ese suelo, y para llegar a PMP es necesaria una tensión en el suelo de 15 bar. Estas lecturas equivocadas pueden deberse a que el tensiómetro al llegar a un cierto valor de tensión comienza a tener entradas de aire y deja de marcar correctamente las tensiones debido a que la columna de agua dentro del tensiómetro se rompe.

Este mismo comportamiento se puede observar en los demás estratos con las lecturas ajustadas y las obtenidas con la curva de retención de humedad (Cuadro 4.2 y 4.3; Figura 4.24 y 4.25).

Esto nos da una idea de que estos métodos indirectos son precisos porque siguen una tendencia igual según se consume la humedad del suelo pero no son exactos porque sus valores están fuera de la realidad.

Cuadro 4.1 Comparación de Pw obtenidos en base a tensiómetros y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 00-20.

Pw Grav.	Tensión (cb)	Pw Ajustado	Pw CRH
16.7688	74.0	16.4737	25.6218
17.3878	70.0	16.6740	25.8346
17.5105	70.0	16.6740	25.8346
17.5611	56.0	17.5030	26.7067
18.0121	53.0	17.7138	26.9264
18.3849	46.0	18.2680	27.5000
18.3153	44.0	18.4454	27.6825
18.0258	44.0	18.4454	27.6825
18.3947	43.0	18.5378	27.7773
18.3296	42.0	18.6329	27.8748
18.3280	36.0	19.2681	28.5215
19.0169	30.0	20.0474	29.3059
20.6498	30.0	20.0474	29.3059
20.3723	28.0	20.3504	29.6083
21.0365	26.0	20.6810	29.9366
19.9143	20.0	21.8952	31.1283
19.6294	20.0	21.8952	31.1283
24.8101	17.0	22.6829	31.8903
21.1229	17.0	22.6829	31.8903
22.0749	16.0	22.9839	32.1792
25.2648	14.0	23.6610	32.8250
25.3713	12.0	24.4676	33.5866
26.4155	12.0	24.4676	33.5866
25.0107	12.0	24.4676	33.5866

Cuadro 4.2 Comparación de Pw obtenidos en base a tensiómetros y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 20-40.

Pw Grav	Tensión (cb)	Pw Estimado	Pw CRH
21.1704	38.0	21.5935	30.0362
22.4731	38.0	21.5935	30.0362
21.0696	30.0	22.3707	31.6667
22.9578	30.0	22.3707	31.6667
23.5401	22.0	23.4330	33.9411
23.7319	22.0	23.4330	33.9411
24.4927	18.0	24.1470	35.4989
24.2105	18.0	24.1470	35.4989
24.0437	18.0	24.1470	35.4989
24.7461	18.0	24.1470	35.4989
24.2247	17.0	24.3544	35.9556
24.9141	17.0	24.3544	35.9556
23.4345	17.0	24.3544	35.9556
24.3336	16.0	24.5763	36.4464
24.6387	16.0	24.5763	36.4464
23.7050	16.0	24.5763	36.4464
25.6368	14.0	25.0721	37.5512
25.5444	14.0	25.0721	37.5512
24.3438	13.0	25.3516	38.1787
25.8521	12.0	25.6569	38.8682
25.9595	12.0	25.6569	38.8682
26.0287	11.0	25.9930	39.6319
26.4504	10.0	26.3663	40.4857

Cuadro 4.3 Comparación de Pw obtenidos en base a tensiómetros y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 40-60.

Pw Grav	Tensión (cb)	Pw Estimado	Pw CRH
21.2778	46.0	20.1969	25.5971
20.0649	36.0	20.9165	27.0095
21.9173	24.0	22.1634	29.5189
21.8549	24.0	22.1634	29.5189
22.7022	20.0	22.7480	30.7221
22.4031	20.0	22.7480	30.7221
22.8700	20.0	22.7480	30.7221
23.3361	18.0	23.0929	31.4396
23.0345	18.0	23.0929	31.4396
23.0752	18.0	23.0929	31.4396
23.0845	17.0	23.2821	31.8358
23.0702	16.0	23.4846	32.2616
24.2424	15.0	23.7020	32.7210
24.1424	15.0	23.7020	32.7210
23.5437	15.0	23.7020	32.7210
24.4693	12.0	24.4695	34.3607
25.7897	9.0	25.4958	36.5963

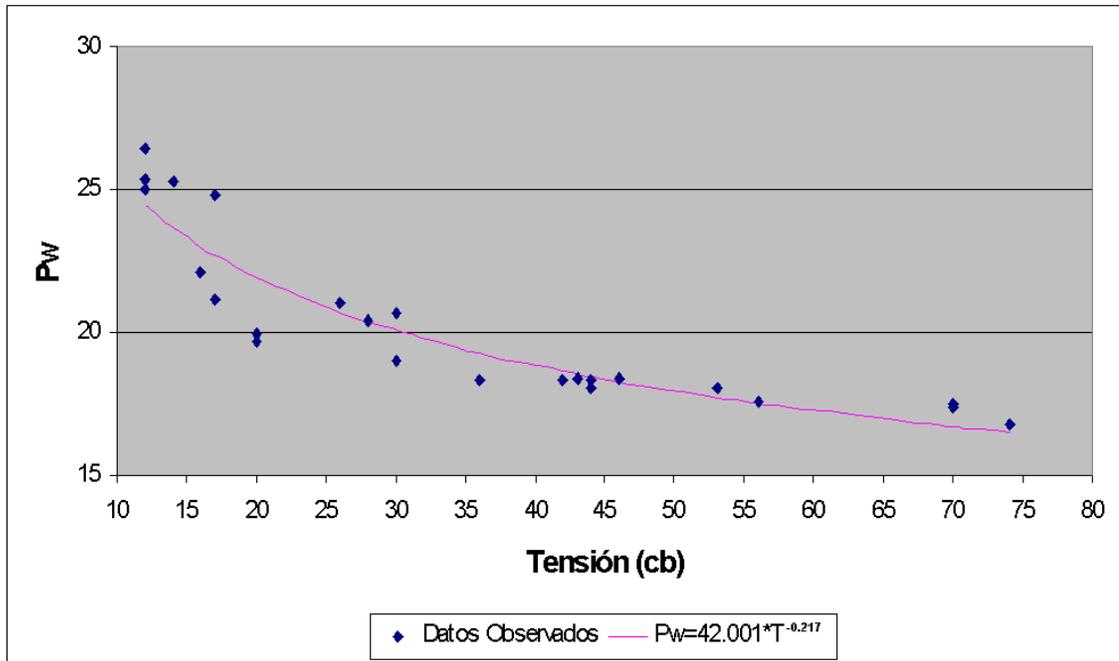


Figura 4.23 Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 00-20 medido con tensiómetro

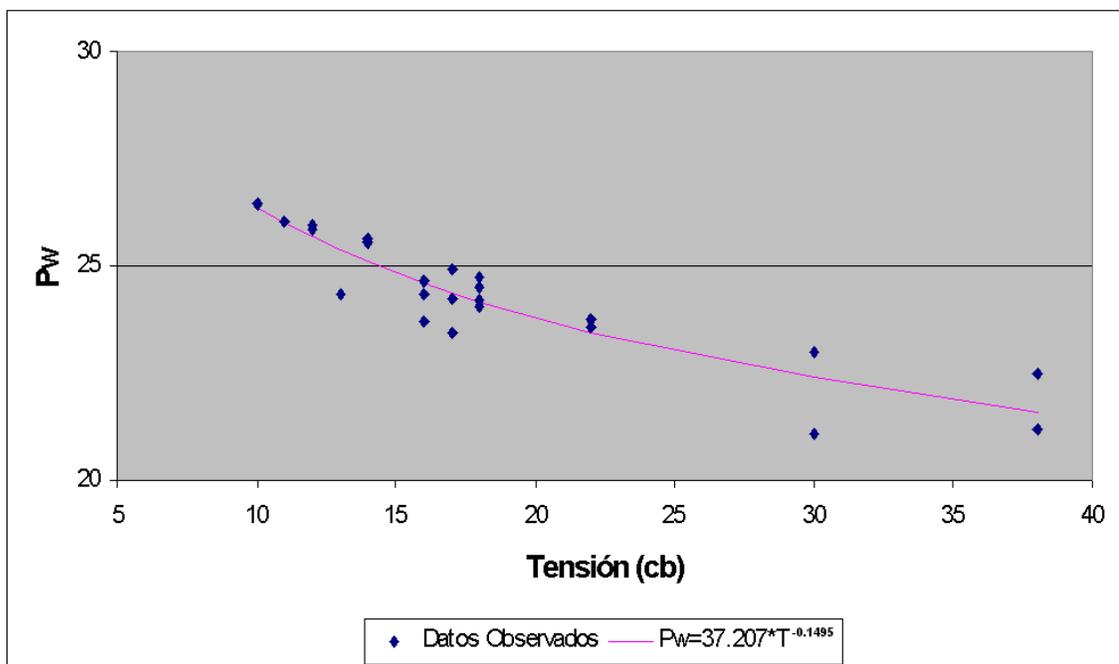


Figura 4.24 Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 20-40 medido con tensiómetros.

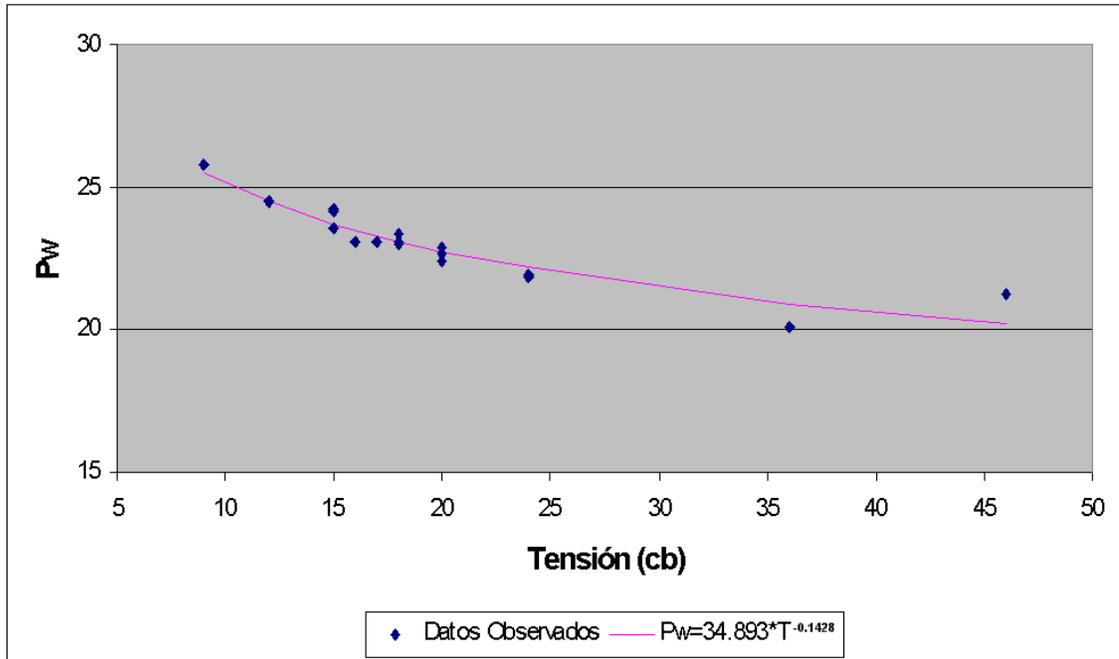


Figura 4.25 Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 40-60 medido con tensiómetros

Los bloques de resistencia muestran la misma tendencia que los tensiómetros a sobrestimar el contenido de humedad del suelo ya que las lecturas obtenidas con la curva de retención de humedad son mayores que las del ajuste que se realizó a partir del método gravimétrico (Cuadro 4.4, 4.5 y 4.6; Figura 4.26, 4.27 y 4.28).

Cuadro 4.4 Comparación de Pw obtenidos en base a bloques de resistencia y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 00-20.

Pw Grav.	Tensión (cb)	Pw Estimado	Pw CRH
16.7688	61.8671	16.9019	26.3137
17.5105	60.4712	16.9777	26.4032
17.3878	56.9759	17.1770	26.6382
18.3947	44.2898	18.0464	27.6555
18.3849	42.5573	18.1882	27.8201
18.3153	41.8911	18.2445	27.8855
18.0121	40.4292	18.3720	28.0333
17.5611	37.9750	18.5989	28.2958
18.3280	36.4627	18.7477	28.4674
18.3296	36.0598	18.7886	28.5145
18.0258	34.7132	18.9293	28.6764
19.0169	32.3150	19.1968	28.9835
21.0365	28.1371	19.7249	29.5867
20.3723	24.0952	20.3337	30.2774
20.6498	23.4356	20.4447	30.4027
21.1229	15.4545	22.1833	32.3458
24.8101	15.4386	22.1878	32.3507
25.3713	9.0966	24.6121	34.9999
25.2648	7.2049	25.7631	36.2353
26.4155	6.9535	25.9431	36.4274
25.0107	6.3676	26.3946	36.9076

Cuadro 4.5 Comparación de Pw obtenidos en base a bloques de resistencia y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 20-40.

Pw Grav	Tensión (cb)	Pw Estimado	Pw CRH
22.9578	18.3558	22.9952	35.3439
22.4731	18.0951	23.0430	35.4571
23.7319	16.8025	23.2922	36.0497
23.5401	15.8980	23.4799	36.4985
24.2105	14.8223	23.7199	37.0749
23.3595	14.5830	23.7759	37.2101
24.0437	12.9995	24.1758	38.1790
24.6387	12.3957	24.3433	38.5873
24.7461	12.0579	24.4411	38.8264
24.3438	11.1190	24.7302	39.5367
24.9141	10.6930	24.8708	39.8836
25.9595	8.2799	25.8112	42.2312
26.4504	7.2117	26.3338	43.5561
26.0287	7.1691	26.3564	43.6139

Cuadro 4.6 Comparación de Pw obtenidos en base a bloques de resistencia y en base a la curva de retención de humedad para el estrato 40-60.

Pw Grav	Tensión (cb)	Pw Estimado	Pw CRH
21.2778	39.9921	20.7482	26.3942
21.8549	22.7567	22.3337	29.8650
21.9173	22.6815	22.3434	29.8867
22.7022	19.0810	22.8536	31.0404
23.3002	19.0127	22.8643	31.0648
22.4031	18.8753	22.8859	31.1142
23.3013	18.8523	22.8896	31.1225
22.8700	18.6961	22.9145	31.1793
23.0345	17.3623	23.1371	31.6891
23.3361	17.2352	23.1593	31.7401
23.0752	17.0812	23.1864	31.8026
23.0845	16.7305	23.2493	31.9475
23.0702	15.6855	23.4460	32.4022
24.2424	14.7113	23.6432	32.8607
23.5437	14.3379	23.7227	33.0463
24.1424	13.9899	23.7990	33.2247
23.8403	11.7471	24.3483	34.5214
24.4693	11.4368	24.4336	34.7245
25.7897	8.9285	25.2367	36.6604

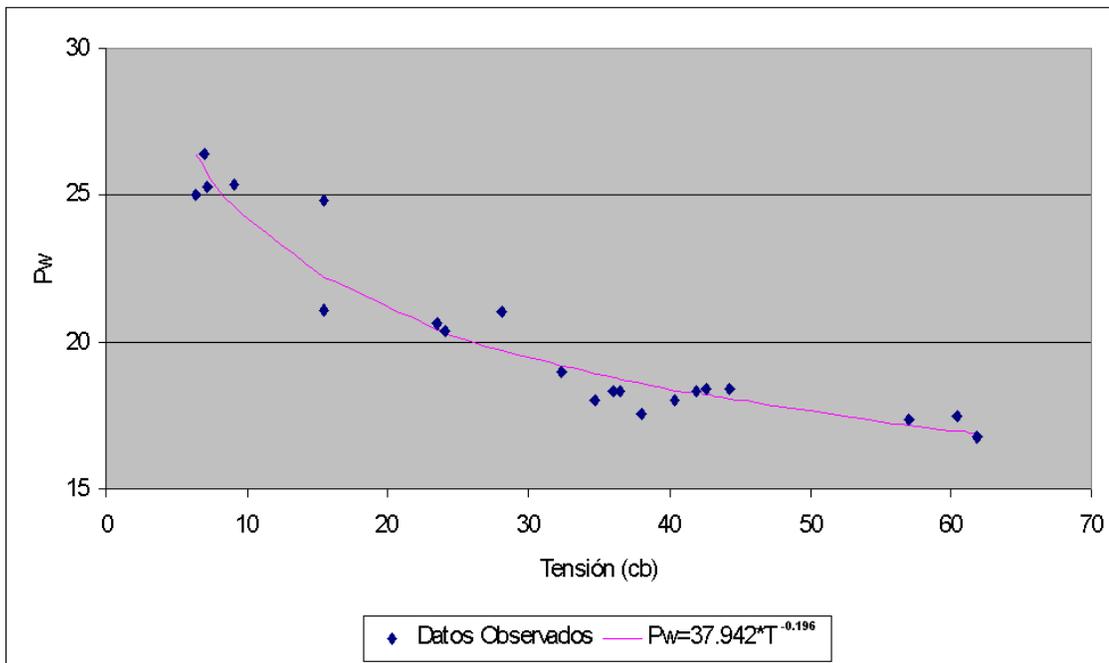


Figura 4.26 Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 00-20 medido con bloques de resistencia.

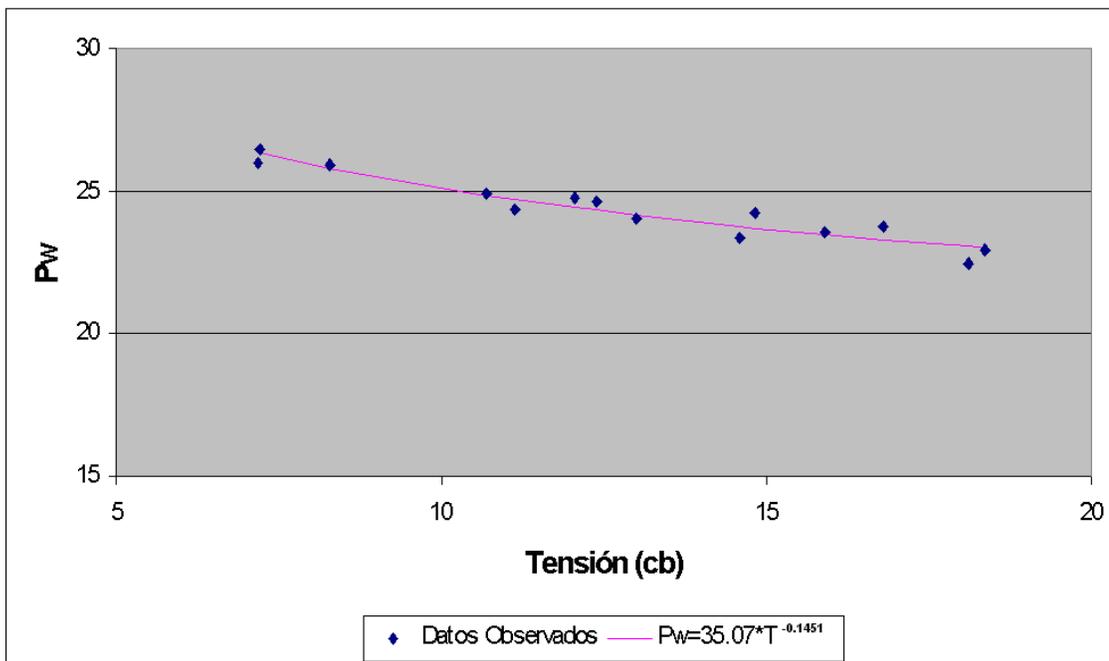


Figura 4.27 Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 20-40 medido con bloques de resistencia.

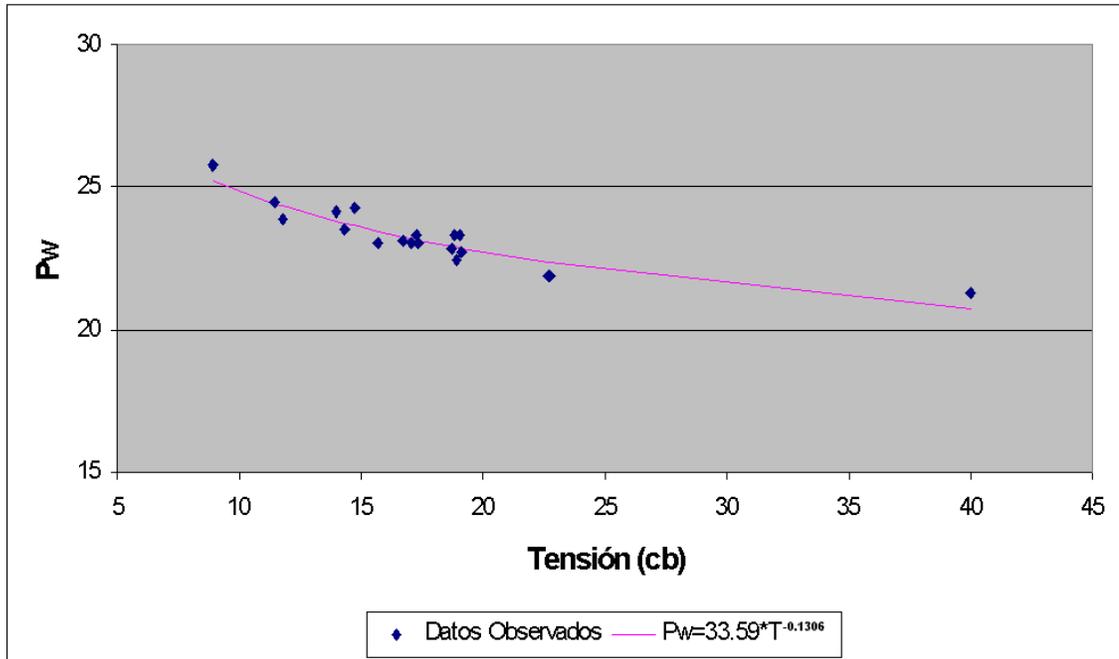


Figura 4.28 Relación entre tensión de humedad en el suelo y Pw para el estrato 40-60 medido con bloques de resistencia.

Los sensores TDR al igual que los tensiómetros y los bloques de resistencia hacen una sobreestimación del contenido de humedad existente en el suelo con respecto al registrado con el método gravimétrico (Cuadro 4.7, 4.8 y 4.9; Figura 4.29, 4.30 y 4.31), esta sobrestimación es más acentuada después de cada aplicación de una lámina de agua que puede ser debido a que el suelo es muy arcilloso y se agrieta cuando esta muy seco, y a través de esas grietas se puede colar el agua y rodear las varillas de la sonda y registrarse un Pw excesivamente alto, además de que este tipo de sensores es afectado por la cantidad de sales que hay disueltas en el suelo.

Cuadro 4.7 Comparación de Pw obtenidos en base a TDR para el estrato 00-20.

Pw Grav.	Pv TDR	Pw Estimado	Pw TDR
25.0107	0.5001	26.1828	40.0096
25.2648	0.4928	25.7705	39.4208
26.4155	0.4885	25.5326	39.0808
25.3713	0.4540	23.6065	36.3200
22.0749	0.4301	22.2763	34.4048
21.1229	0.4096	21.1459	32.7712
20.6498	0.3928	20.2188	31.4272
19.9143	0.3866	19.8773	30.9312
20.3723	0.3863	19.8575	30.9024
17.5611	0.3723	19.0864	29.7800
18.0258	0.3701	18.9662	29.6048
17.8514	0.3673	18.8153	29.3848
18.3296	0.3639	18.6284	29.1120
17.8076	0.3554	18.1646	28.4344
18.3280	0.3552	18.1525	28.4168
18.3849	0.3515	17.9491	28.1192
18.3153	0.3509	17.9190	28.0752
18.3947	0.3443	17.5546	27.5416
17.3878	0.3424	17.4504	27.3888
16.7688	0.3370	17.1581	26.9600
17.5105	0.3367	17.1406	26.9344

Cuadro 4.8 Comparación de Pw obtenidos en base a TDR para el estrato 20-40.

Pw Grav	Pv TDR	Pw Estimado	Pw TDR
26.0287	0.5564	26.3043	44.5080
26.4504	0.5531	26.2145	44.2456
25.9595	0.5373	25.7806	42.9864
24.9141	0.5096	25.0020	40.7656
24.3438	0.4980	24.6727	39.8416
24.7461	0.4947	24.5766	39.5736
24.6387	0.4884	24.3946	39.0680
24.0437	0.4848	24.2908	38.7808
24.2105	0.4679	23.7975	37.4288
23.3595	0.4673	23.7802	37.3816
23.5401	0.4634	23.6664	37.0728
23.9228	0.4595	23.5493	36.7560
23.7319	0.4565	23.4629	36.5232
22.9578	0.4521	23.3313	36.1696

Cuadro 4.9 Comparación de Pw obtenidos en base a TDR para el estrato 40-60.

Pw Grav	Pv TDR	Pw Estimado	Pw TDR
24.4693	0.4777	24.2866	38.2136
24.1424	0.4757	24.2257	38.0552
23.5437	0.4521	23.4906	36.1656
23.8403	0.4508	23.4503	36.0632
22.6144	0.4484	23.3741	35.8696
22.8700	0.4446	23.2534	35.5640
23.0752	0.4411	23.1425	35.2840
23.3013	0.4370	23.0146	34.9624
22.4031	0.4359	22.9796	34.8744
23.3361	0.4328	22.8790	34.6224
23.3002	0.4294	22.7704	34.3512
22.7022	0.4262	22.6666	34.0928
23.0345	0.4260	22.6621	34.0816
23.0702	0.4219	22.5289	33.7512
21.9173	0.4177	22.3923	33.4136
21.8549	0.4148	22.2991	33.1840

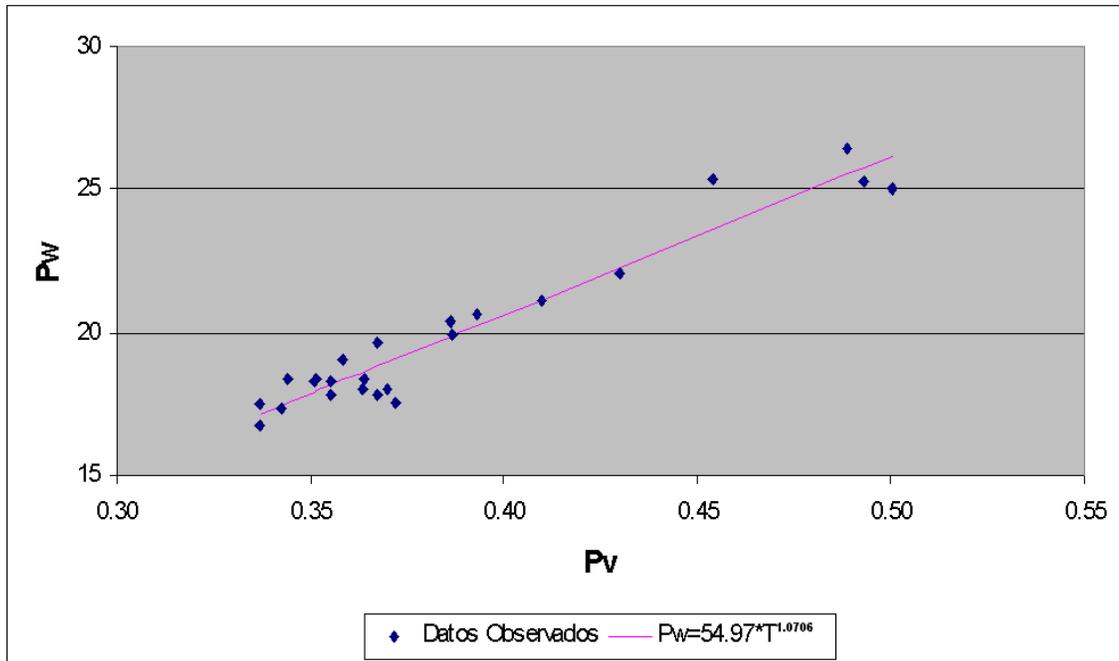


Figura 4.29 Relación entre contenido volumétrico de humedad en el suelo y P_w para el estrato 00-20 medido con TDR.

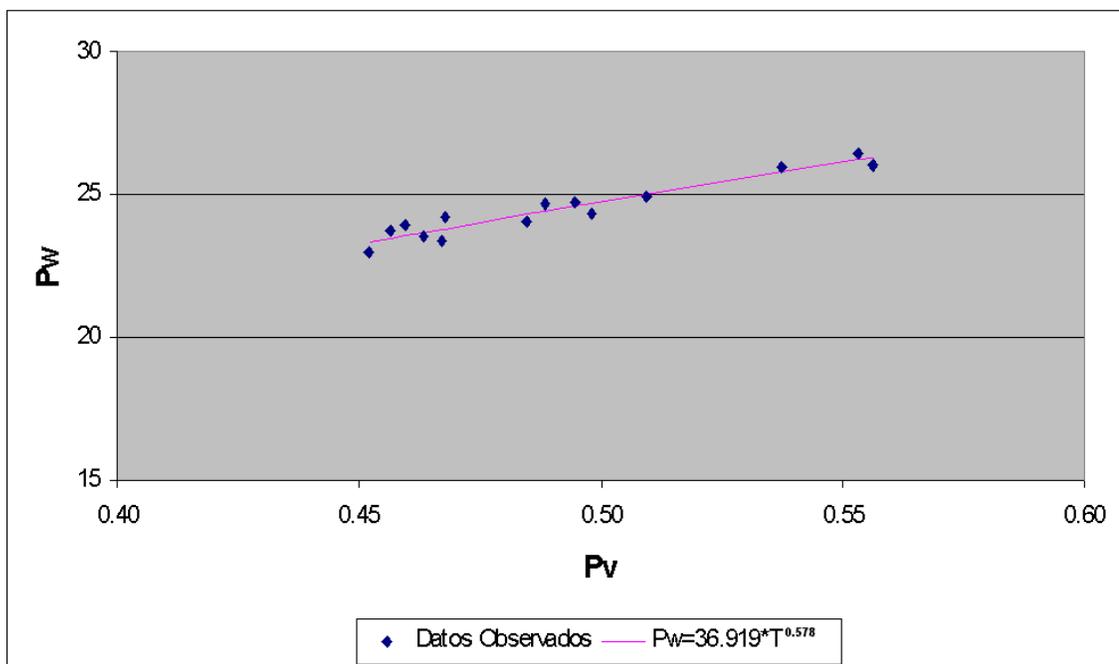


Figura 4.30 Relación entre contenido volumétrico de humedad en el suelo y P_w para el estrato 20-40 medido con TDR.

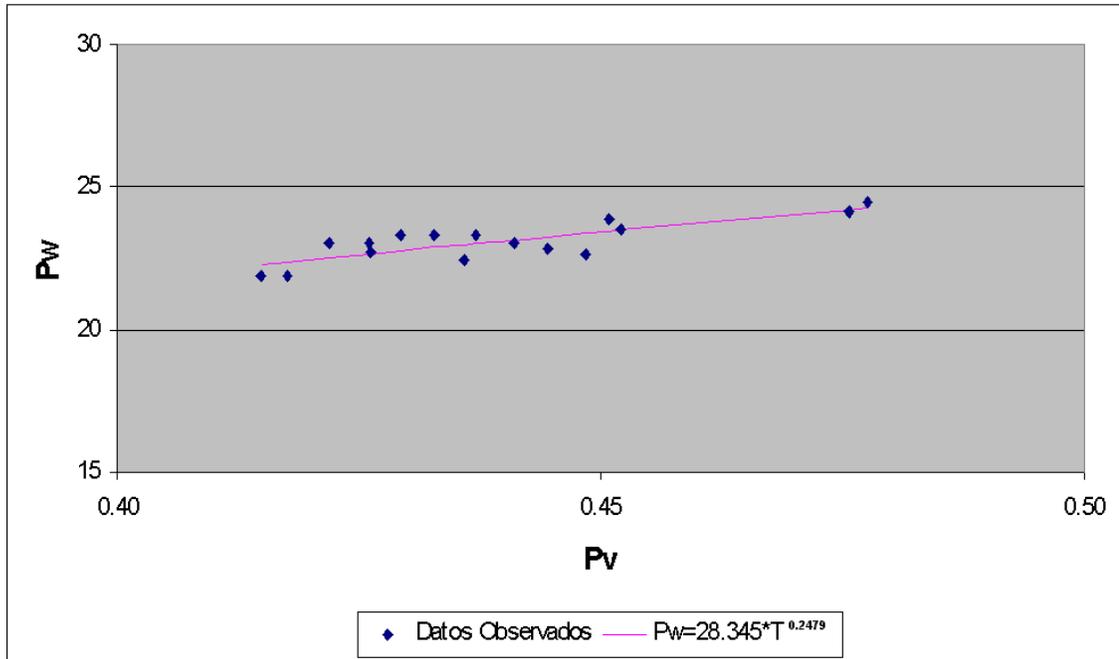


Figura 4.31 Relación entre contenido volumétrico de humedad en el suelo y Pw para el estrato 40-60 medido con TDR.

CONCLUSIONES

- Los métodos para determinar el contenido de humedad como los tensiómetros, los bloques de resistencia y los TDR tienden a hacer una sobreestimación de la humedad que existe en el suelo por lo que deben tener un ajuste previo basado en el método gravimétrico para corregir este error.
- El aspersor de neutrones no mostró una variación muy grande en las lecturas de contenido de humedad con respecto al método gravimétrico debido a que fue calibrado con las lecturas obtenidas de este, sin embargo, aún así muestra algunas desviaciones con respecto al método gravimétrico.
- De estos métodos los que presentan mayores ventajas son los tensiómetros, los bloques de resistencia y los TDR debido a que una vez que son instalados en el campo no es necesario llevar ningún otro instrumento para la toma de lecturas, además estos pueden ser automatizados siendo conectados a un datalogger y pueden dejarse en campo por tiempo indefinido llevando un control constante de las variaciones del contenido de humedad, aunque esto resulta muy caro y es solo recomendable con fines de investigación.

LITERATURA CITADA

- Aguilera Contreras, Mauricio (et al).** *Relaciones Agua - Suelo - Planta - Atmósfera*. Universidad Autónoma Chapingo. 4ª Edición. México. 1996.
- Carlos A. Ohep, Felipe Marcano L.** Departamento de Suelos, Decano de Agronomía, UCLA. Tarabana, Cabudare, Edo. Lara.
- Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT).** *La Tierra un Planeta de Agua*. Santiago – Chile.
- Evett S.R..** *Some Aspects of Time Domain Reflectometry (TDR), Neutron Scattering, and Capacitance Methods of Soil Water Content Measurements*. USDA-ARS. Bushland, Texas, USA.
- Evett S.R. y Steiner J.L.** *Precisión del Dispersor de Neutrones y Sonda de Capacitancia para la Determinación del Contenido de Humedad del Suelo a partir de la Calibración en Campo*.
- Gorres, Josef.** *Irrigation Water Management with Gypsum Blocks*. University of Rhode Island, College of Resource Development, Department of Natural Resources Science, Cooperative Extension. Abril de 1994.
- H. Dowding, Charles.** *Geotechnical Applications of Time Domain Reflectometry*. Northwestern University Department of Civil Engineering and Kevin O'Connor GeoTDR, Inc.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.** *Estado de la Humedad del suelo*. Colombia.

Irrrometer Company, Inc. *Manual de Funcionamiento e Instalación de Tensiómetros.*

Jasso Ibarra, Rodolfo. *Manual de Relación Agua - Suelo - Planta.*

Kramer, Paul J. *Relaciones Agua - Suelo - Planta: Una Síntesis Moderna.* McGraw-Hill Book Company. México. 1979.

Meléndez Tevillo, Israel. *Calibración de Campo de una Fuente Radioactiva para Estimar el Contenido de Humedad en el Suelo.* Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila, México. Noviembre de 1990.

Miles D.L. *Estimación de la Humedad del Suelo.* Ingeniero de la Extensión Cooperativa de Riego de la Universidad del Estado de Colorado. Septiembre de 1998.

Narro Farías, Eduardo. *Física de Suelos: Con Enfoque Agrícola.* 1ª edición. Edit. Trillas. México. Enero de 1994.

Northwestern University. *Time Domain Reflectometry.* 2001.

Programa de Asesoramiento en Riegos, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS), dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C). *Fichas Agronómicas: Control del Riego Mediante Tensiómetros en Cítricos y Frutales.* Murcia, España. 2000.

Programa de Asesoramiento en Riegos, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS), dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C). *Fichas Agronómicas: Uso Racional del Agua.* Murcia, España. 2000.

R. Andrews James. *Time Domain Reflectometry.* Publicado en Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications held at Northwestern University, Evanston, Illinois. Septiembre, 1994. Washington, DC. U.S. Picosecond Pulse Labs, Inc.

The Central Resource for Soil Moisture Measurement. *Gypsum Blocks/Electrical Resistence*. Abril del 2001.

The Central Resource for Soil Moisture Measurement. *Neutron Probes*. Febrero del 2001.

The Central Resource for Soil Moisture Measurement. *Tensiometers*. Diciembre de 1999.

Winter, E. J. *El Agua el Suelo y la Planta*. Edit. Diana. 3ª Impresión. México. Febrero de 1981.