



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

**Trabajo Final presentado para optar al Grado de
Ingeniero Agrónomo**

Modalidad: PROYECTO

**CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UNA SONDA DE
CAPACITANCIA FDR PARA LA MEDICIÓN DEL
CONTENIDO HÍDRICO EN SUELOS**

Nombre del Alumno: Juan Ignacio Ortolani.

DNI: 34342359

Director: Américo Degioanni

Co-Director: Federico D. Morla

Río Cuarto - Córdoba

Diciembre de 2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final: calibración y validación de una sonda de capacitancia FDR para la medición del contenido hídrico en suelos

Autor: Ortolani Juan Ignacio.

DNI: 34.342.359

Director: Américo Degioanni.

Co-Director: Federico Morla.

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la
Comisión Evaluadora:

Manuel Cisneros _____

Jorge González _____

Américo Degioanni _____

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Secretario Académico _____

AGRADECIMIENTOS

Quería agradecer a todos los que me han ayudado a lo largo de la carrera:

- En primer lugar a mis padres, mi ejemplo a seguir. Su sacrificio diario nos permitieron junto a mis hermanos poder estudiar una carrera universitaria.
- A mis hermanos y mi novia que tanto me han ayudado todos estos años.
- También quería agradecer a todos los profesores de la Universidad Nacional de Río Cuarto que han contribuido a mi formación académica.
- A mis compañeros de curso, hoy en día mis amigos.

ÍNDICE

INTRODUCCION.....	1
1.1 MARCO TEÓRICO.....	2
1.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO.....	3
1.3 ANTECEDENTES.....	6
1.4 OBJETIVOS.....	8
MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL INDIVIDUO SUELO.....	9
2.2 CURVAS DE RETENCIÓN HÍDRICA.....	10
2.4 CALIBRACIÓN LOCAL DEL EQUIPO FDR.....	11
2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO TEST DE COMPARACIÓN DE MEDIAS.....	12
2.6 VALIDACIÓN	12
RESULTADOS Y DISCUSION	14
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL PERFIL TÍPICO	14
3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO	15
3.2.1 Materia orgánica y densidad aparente	15
3.2.2 Capacidad hídrica	16
3.3 CURVAS Y ECUACIONES DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DIVINER 2000	17
3.2 PARÁMETROS OBTENIDOS PARA LAS DIFERENTES PROFUNDIDADES EVALUADAS	22
3.3 VALIDACIÓN	25
PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE LA SONDA DIVINER 2000.....	30

INDICE DE FOTOS

Foto 1. Equipo Richards (1947) “olla a presión”. Placas de 0,3 bares, 5 bares y 15 bares.	10
Foto 2. Perfil del suelo, horizontes y profundidades.	14
Foto 3. Tubo de lectura instalado con sus tapas correspondientes.	31
Foto 4. Elementos utilizados para la realización del orificio de instalación.	31
Foto 5. Imágenes en secuencia para la instalación de un tubo de acceso.	32
Foto 6. Procedimiento de instalación de tubo de acceso (Mestas Valero, 2011).	33
Foto 7. Tubo de lectura con anillo de lata clavado al suelo.	33
Foto 8. Tubo de lectura y agregado de agua.	34
Foto 9. Pantalla de estado.	35
Foto 10. Modo configuración.	35
Foto 11. Sonda Diviner 2000 en posición de lectura.	36
Foto 12. Determinación de densidad aparente en inmediaciones al tubo de acceso.	38
Foto 13. Determinación de densidad aparente en diferentes profundidades.	38

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 0-10 cm.	17
Figura 2. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 30-40 cm.	18
Figura 3. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 10-20 cm.	18
Figura 4. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 20-30 cm.	19
Figura 5. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 40-50 cm.	19
Figura 6. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 50-60 cm.	20
Figura 7. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 60-70 cm.	20
Figura 8. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 70-80 cm.	21
Figura 9. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 80-90 cm.	21
Figura 10. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 90-100 cm.	22
Figura 11. Test de comparación de pendientes.	24
Figura 12. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para todas las profundidades analizadas.	25
Figura 13. Validación para el tubo instalado bajo condición seca.	27
Figura 14. Validación para el tubo instalado bajo condición de riego.	27

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los diferentes métodos para medir el contenido hídrico del suelo (Florentino, 2011).	3
Cuadro 2. Caracterización del perfil.	14
Cuadro 3. Porcentaje de materia orgánica en cada uno de los horizontes.....	15
Cuadro 4. Contenido hídrico según potencial mátrico (0,3-5-15 bares) a diferentes profundidades.....	16
Cuadro 5. Parámetros de la ecuación $\Theta = a*FN^b$, coeficiente de ajuste R^2 y número de muestras (n).....	23
Cuadro 6. Parámetros obtenidos para una única calibración ($\Theta = a*FN^b$), se observan los parámetros a y b con su coeficiente de determinación R^2 y número de muestras (n).....	25
Cuadro 7. Tubo N° 1: condición seco.....	26
Cuadro 8. Tubo N° 2: condición bajo riego.....	26
Cuadro 9. Tabla utilizada a campo para el registro de datos.	37

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UNA SONDA DE CAPACITANCIA FDR PARA LA MEDICIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO EN SUELOS

RESUMEN

Conocer el agua almacenada en el suelo es una información clave para una gestión eficiente de la producción agrícola. Por consiguiente, disponer de instrumentos de medición rápidos, confiables y precisos contribuye -en buena medida, a obtener dicha información. Uno de estos instrumentos es la sonda Diviner 2000 (FDR). Este equipo requiere la calibración y validación del procedimiento de medida en diferentes suelos, tarea que fue el objetivo de este trabajo. El procedimiento experimental fue realizado en suelos *Haplustol típico* ubicados en el Departamento Rio Cuarto (Córdoba). Se instalaron tubos de acceso de la sonda en el suelo para medir bajo condición de suelo seco, húmedo y saturado. Se realizaron tres lecturas de frecuencia con la sonda en cada tubo de acceso en las condiciones de humedad definidas. Las lecturas se realizaron cada 10 cm hasta el metro de profundidad. En cada lectura se extrajeron muestras de suelos a las mismas profundidades para determinar la humedad gravimétrica. Se describió el perfil del suelo, se midió la DAp y las constantes hídricas. Con los datos medidos se estableció la ecuación de calibración que surge de la relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo versus la frecuencia a escala medida por la sonda. Se obtuvieron dos ecuaciones de calibración: una para todo el perfil y otra individual por cada 10 cm de profundidad. En ambos casos el ajuste logrado medido como R^2 fue superior a 0,8. Las calibraciones individuales cada 10 cm de profundidad no presentaron diferencia estadística significativa frente a una única calibración para el perfil entero, según el test de comparación de pendientes. La validación del procedimiento de medida arrojó valores de error de hasta el 16% entre el contenido hídrico medido con la sonda y el determinado en el laboratorio.

Palabras claves:

FDR, DIVINER 2000, CONTENIDO HÍDRICO.

SUMMARY

Knowing the water stored in the soil is key information for efficient management of agricultural production. Therefore, instruments have fast reliable and accurate measurement contributes largely to obtain such information. One such instrument is the Diviner 2000 (FDR) probe. This equipment requires calibration and validation of the measurement procedure in different soils, a task that was the aim of this work. The experimental procedure was performed in two soils typical Haplustolls located in Rio Cuarto Department. Access tubes were installed probe to measure condition of dry, wet and saturated soil. Frequency three readings were performed with the probe in each access tube in defined humidity conditions. Readings were taken every 10 cm to a meter deep. In each soil sample reading to the very depths they were extracted to determine the gravimetric moisture. The soil profile is described, DAP and constant water was measured. The measured data with the calibration equation arising from the relationship between the volumetric water content in soil scale versus frequency measured by the probe was established. One for all and a single profile for each 10 cm deep, two calibration equations were obtained. In both cases the adjustment achieved R^2 was measured as greater than 0.8. Individual calibrations each 10 cm depth showed no significant statistical difference from a single calibration for the entire profile, according to the comparison test pending. The validation of the measurement procedure casts error values up to 16% between the measured probe and determined water content in the laboratory.

Keywords:

FDR, DIVINER 2000, WATER CONTENT.

INTRODUCCION

El agua es un recurso natural finito y renovable. La disponibilidad en cantidad y calidad para cualquier persona constituye un derecho humano: nadie debe tener acceso restringido o faltarle este recurso (Parra y Degioanni, 2014).

El incremento de la población a escala mundial, demanda cada vez más agua dulce y alimentos de alto valor nutritivo y sanos. La agricultura como proveedora de alimentos humanos es la actividad que más agua utiliza, seguida por la actividad industrial y la doméstica. Como promedio, la agricultura consume cerca del 70 % del agua dulce y alcanza niveles del 90 % en países en desarrollo y con clima árido (De Santa Olalla Mañas *et al.*, 2004). Orozco (2010) demostró una sobre explotación del acuífero Cuauhtémoc en México. Este acuífero presenta un volumen promedio de extracción de $360 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$, y una recarga de $87 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$, dando un déficit medio anual de 273 Mm^3 siendo la principal extracción para la agricultura (92 %).

Por otra parte, la erosión hídrica y lixiviación de nitratos son dos procesos vinculados a la agricultura y que generan contaminación del agua dulce tanto superficial como subterránea. La salinización del agua también es otro proceso que genera contaminación del agua dulce. En este contexto el panorama a futuro es preocupante y un verdadero desafío para los ingenieros agrónomos en la gestión de este recurso. Se debe ser cada vez más responsable en el uso y manejo del agua, caso contrario contribuirá a hacer que este recurso sea cada vez más escaso (De Santa Olalla Mañas *et al.*, 2004).

Una gestión más integrada del agua entre las fuentes, almacenamiento, consumo y pérdidas es uno de los ejes del desarrollo sustentable (Cantero *et al.*, 2004). Para hacer un uso eficiente en cantidad (relación consumo de agua/producto obtenido) y calidad (relación consumo de agua/grado de contaminación) se requiere entender la dinámica del agua en la naturaleza y donde el suelo juega un factor clave como “acumulador ecosistémico”. El suelo es un “receptor, captador y entregador” de agua a los cultivos. Por tanto, conocer los cambios de humedad en el perfil del suelo resulta un dato fundamental a la hora de determinar el consumo y la disponibilidad de agua para los cultivos entre otros aspectos. En la agricultura de regadío, medir el agua almacenada permite responder a las preguntas: ¿cuándo regar? y ¿cuánto regar?. En el caso de la agricultura de secano ayuda a determinar la fecha de siembra correcta y ubicar el momento más propicio de ocurrencia del periodo crítico para un determinado cultivo entre otros aspectos (Ferrer *et al.*, 2008). En consecuencia, medir es importante para la gestión del recurso. Para ello es necesario entender cómo se comporta el agua en el sistema suelo.

1.1 Marco teórico

Las fuentes de agua o ingresos al sistema suelo pueden ser: las precipitaciones, el riego, la napa freática, escorrentía desde sectores más altos; las salidas o egresos se producen por: la evaporación de la superficie del suelo, la transpiración del cultivo, la escorrentía a sectores más bajos y el drenaje por debajo de la zona explorada por raíces. La diferencia entre ingresos y egresos constituyen el balance hídrico; si el mismo resulta positivo, quiere decir, que los ingresos son mayores que los egresos, y que toda o parte del agua puede acumularse en el perfil del suelo explorado por las raíces (Satorre *et al.*, 2003).

En el suelo bajo condiciones de presión atmosférica y temperaturas normales, el agua se comporta como líquida y esta puede ser absorbida (relacionado a fuerzas capilares) y/o adsorbida (actividad electrostática) por los materiales sólidos. En el sistema suelo estos sólidos lo constituyen las fracciones mineral (inorgánica) y coloidal (orgánica y mineral). La capacidad de adsorción se debe principalmente a materiales plasmáticos, mientras que la capacidad de absorción a la geometría porosa, la cual se encuentra influenciada por la textura y el grado de agregación del suelo. Estas fuerzas capilares, y también otras de tipo osmóticas, producen pérdida de la energía libre del agua, energía que se encuentra relacionada con su capacidad de realizar trabajo. Esta capacidad se expresa como potencial agua del suelo, siendo sus componentes los potenciales: mátrico, gravitatorio, de presión hidrostática y osmótico (Bricchi y Degioanni, 2006).

Existen diferentes formas de expresar la humedad del suelo, entre ellas se encuentra el contenido hídrico y la capacidad hídrica. El contenido hídrico del suelo, es un parámetro que se refiere a la cantidad de agua en un individuo suelo (pedón, horizonte, ped, muestra) en un momento dado. Se lo puede expresar como humedad gravimétrica (gr agua/100 gr suelo) o volumétrica (cm^3 de agua/100 cm^3 de suelo). La capacidad hídrica del suelo relaciona la cantidad de agua que contiene un individuo suelo, en relación al potencial hídrico que posee el agua en un momento determinado. Sobre esta definición surgen las constantes hídricas capacidad de campo y punto de marchites permanente (Bricchi y Degioanni, 2006).

Desde el punto de vista físico la capacidad de campo se refiere al contenido hídrico a un potencial mátrico de 0,3 bar y punto de marchites permanente al contenido hídrico a un potencial mátrico de 15 bar. El agua retenida en ese rango de potenciales es lo que se define como agua útil o agua disponible para la mayoría de los cultivos, y se encuentra comprendida en una porosidad de entre 8,73 micras y 0,20 micras (Bricchi y Degioanni, 2006).

La determinación del contenido hídrico en el suelo se ha convertido en los últimos años en un desafío tecnológico importante, por lo que el desarrollo de sensores de uso agrícola es tema de investigación permanente a nivel internacional (Serman *et al.*, 2005) como es el caso de las sondas FDR. Ferrer *et al.* (2008) con 26 sondas FDR para el seguimiento de la humedad del suelo en 2000 ha bajo riego, concluyeron que gracias al seguimiento y corrección del contenido

hídrico del suelo aumentaron la eficiencia de uso del agua, redujeron la posible contaminación del acuífero y lograron mejores rentabilidad de los cultivos. Por su parte, Orozco (2010), en un predio de 540 ha con 680 tubos de acceso midieron el contenido hídrico con una sonda FDR portátil, no solo aumentaron la eficiencia en el uso del agua de irrigación sino que también redujeron o eliminaron las pérdidas por irrigación y escurrimiento. Los resultados que obtuvieron indican ahorros significativos de agua de riego del 45 % (7000 m³ ha⁻¹ y 4 Mm³ en 570 ha.). Así mismo, obtuvo un ahorro de energía eléctrica para la extracción profunda de agua, del 42 %. Si esta eficiencia se expandiera a 30000 ha de cultivo significaría un ahorro de 209 Mm³ anuales para el acuífero, impactando favorablemente sobre el déficit de recarga existente, minimizando los impactos ambientales negativos e incrementando las expectativas de vida del acuífero.

1.2 Métodos de medición del contenido hídrico

Los métodos para la determinación de la humedad en el suelo, se los clasifica en métodos directos e indirectos. Dentro de los primeros se encuentra el método gravimétrico y permite medir directamente el contenido de agua en el suelo. Dentro de los métodos indirectos se encuentran las sondas de neutrones, instrumentos electromagnéticos, tensiómetros, psycrómetros, entre los más relevantes (Serman *et al.*, 2005). Estos se fundamentan en la medida de alguna propiedad física del suelo dependiente del contenido de agua. Calculan la humedad mediante una calibración entre ésta y una propiedad del suelo que es más fácil de medir, por ejemplo: la constante dieléctrica del suelo.

Por lo general, la mayoría de los métodos que son indirectos son también no destructivos de la organización del suelo. En este tipo de métodos lo importante es lograr tener altos coeficientes de correlación entre el contenido hídrico y el parámetro físico de suelo, siendo trascendental la calidad, estabilidad y consistencia de la calibración (Florentino, 2011). En el cuadro 1 se presentan los métodos más usados para la determinación del contenido hídrico con sus principios, ventajas y desventajas.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los diferentes métodos para medir el contenido hídrico del suelo (Florentino, 2011).

Método: gravimétrico	
Principio: El contenido de agua se determina a través de la cantidad de agua que es removida del suelo al colocarlo en estufa a una T° de 105 ° C hasta obtener peso constante.	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es económico. • Es sencillo. • Requiere de equipos comunes y poco 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un procedimiento destructivo que requiere esfuerzo, sobre todo cuando se desea conocer la humedad a mayor profundidad en el perfil. • No se puede repetir la misma observación en el mismo punto; cada vez que se necesita muestrear hay que hacerlo en sitios diferentes aunque

costosos. <ul style="list-style-type: none"> • No necesita calibración. • No implica riesgos. • Es el método de referencia para la calibración de otros métodos y equipos. 	cercanos al anterior. <ul style="list-style-type: none"> • Requiere relativamente de mucho tiempo para obtener los resultados, mínimo 24 horas. • Si se quiere expresar en fracción volumétrica, se requiere la determinación de la densidad aparente
Método: sonda de neutrones	
Principio: Este instrumento tiene una fuente radiactiva que emite neutrones rápidos (de alta energía cinética), éstos al chocar con partículas del suelo y H^+ , pierden energía y se transforman en neutrones lentos (de baja energía) que son registrados por un detector. Como el agua es la principal fuente de H^+ , en la mayoría de los suelos, a medida que aumenta la cantidad de agua también aumenta la densidad de neutrones lentos alrededor de la sonda, y que son medidos por el equipo. El H^+ , es el elemento más eficiente para reducir la energía de los neutrones. El dispositivo registrador mide en unidades de conteo por unidad de tiempo (siendo los más utilizados conteos por minuto cpm, o conteo por segundo cps.)	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es rápido, se pueden obtener rápidamente los resultados cuando ya se dispone de la curva de calibración. • Es no destructivo, las mediciones se hacen directamente en campo en el mismo sitio y a la misma profundidad, lo cual permite determinar con mayor precisión los cambios de humedad en el suelo a través del tiempo y espacio. • Es muy sensible a cambios de humedad en el suelo. • Considera un mayor volumen de suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • El equipo es costoso; requiere de una inversión inicial importante en al comprar la sonda y sus accesorios (tubos de acceso, bloques de parafina, barrenos, etc.). • El operador está en contacto con una fuente radiactiva. Por lo tanto requiere de un técnico entrenado especialmente para su uso. • El equipo requiere supervisión y mantenimiento permanente por entes oficiales responsables del control de técnicas nucleares. • Necesita calibración para cada suelo en particular, para lo cual se toma, generalmente, como referencia el método termo-gravimétrico o termo-volumétrico. Esto implica mucho trabajo sobre todo a gran profundidad en el perfil. • Puede ser afectado por la densidad aparente del suelo, por altos contenidos de H^+ en otros constituyentes del suelo (arcillas y otros minerales). • No se puede medir en los primeros 10-15 cm de suelo (con la sonda de profundidad).
Método: de atenuación de rayos gamma	
Principio: Consiste en una sonda que contiene una fuente de rayos gamma, estos rayos son absorbidos por el suelo. El haz de rayos gamma emitido pasa a través del suelo, en el otro extremo se encuentra un detector que determina cuantos rayos gamma consiguieron atravesarlo. Esta técnica se basa en que el coeficiente de absorción de los elementos, por lo tanto un cambio en la absorción se deberá a una variación en el contenido de humedad del suelo.	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es no destructivo. • Es preciso. • Es rápido y se pueden hacer mediciones continuas en el mismo sitio. • Es sensible a cambios rápidos de humedad y de densidad aparente del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza fuente radiactiva de alta peligrosidad. • Es costoso. • Requiere de técnicos especializados. • Requiere de supervisión por parte de entes oficiales. • Su adquisición debe ser especialmente autorizada. • Es muy sensible a variaciones de densidad aparente del suelo. • Necesita calibración.

Método: de resistencia eléctrica	
<p>Principio: El contenido de agua en el suelo puede ser medido utilizando las propiedades de las ondas electromagnéticas. La velocidad de propagación de un pulso electromagnético es una función de la “constante dieléctrica” del medio en el cual éste se propaga. Son métodos basados en principios de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), en el dominio de la frecuencia (FDR) ó en el dominio de la amplitud (ADR), que determina la velocidad de un pulso u onda electromagnética a través del suelo. Tanto el TDR, FDR, ADR como las sondas de capacitancia hacen uso de la marcada diferencia en permitividad que existe entre el agua (con una constante dieléctrica de 81), la fase mineral (entre 2-5) y gaseosa (1) del suelo. Estos métodos, al igual que los otros métodos indirectos, necesitan de una curva de calibración que relaciona el contenido volumétrico de agua en el suelo y la permitividad.</p>	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Son no destructivos. • Permiten medidas continuas y automatizadas. • Mayor grado de precisión. • Se puede medir a cualquier profundidad en el perfil. • Los equipos TDR permiten medir la salinidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicabilidad potencialmente limitada en suelos altamente salinos o en suelos muy arcillosos. • Requieren calibración específica • Considera un pequeño volumen de suelo (alrededor del largo de las varillas). <ul style="list-style-type: none"> • Para cada profundidad de medición se necesita insertar varillas metálicas, ya que por diferencia se va a obtener la humedad correspondiente a cada capa o espesor de suelo. • Los equipos FDR y ADR requieren de una instalación cuidadosa para evitar bolsas de aire entre las varillas o tubo de acceso y el suelo.

Como ya se mencionó previamente, uno de los instrumentos de resistencia eléctrica es la sonda de capacitancia FDR (*Reflectometría de Dominios Magnéticos de Frecuencia*). Este sistema consiste en una varilla de metal con un casquete de sonda, un sensor en la parte inferior y un cable de conexión a la unidad de visualización que se encuentra en la parte superior de la varilla. Su funcionamiento se basa en la relación existente entre el contenido volumétrico de humedad del suelo y la constante dieléctrica aparente del medio. La determinación de ésta constante dieléctrica la realiza mediante electrodos, que junto con el suelo constituyen un condensador que se conecta a un circuito oscilador. Al variar la humedad del suelo, cambia la capacitancia o permitividad y por lo tanto la frecuencia (Valero, 2011). Este tipo de instrumento trabaja a baja frecuencia, por lo que la estimación de la constante dieléctrica está muy influenciada por la conductividad eléctrica, la densidad aparente y el contenido de arcillas. Por ello, no genera datos exactos del contenido hídrico para todos los tipos de suelo. En consecuencia es necesario realizar una curva de ajuste potencial, que consiste en una relación matemática entre las lecturas de frecuencia a escala (SF) Diviner 2000 y el contenido volumétrico real de agua del suelo, este último determinado por el método gravimétrico y por la densidad aparente (Sentek, 2003).

La calibración puede realizarse utilizando los valores de fábrica suministrada por Sentek Pty Ltd o realizando su propia ecuación personalizada. La primera calibración proporciona

datos relativos (útiles en situaciones donde se quiere conocer la dinámica del agua en el suelo) mientras que la segunda proporciona datos absolutos (se requiere realizar el muestreo gravimétrico para calibrar Diviner 2000 para cada profundidad de suelo bajo estudio) (Sentek, 2003).

Calibrada la sonda, además de otorgar valores confiables también demandaría menor tiempo en su ejecución y se podrá a futuro realizar un seguimiento del contenido hídrico del suelo a lo largo del tiempo. El uso de esta herramienta permitiría la optimización de las dosis de riego, mejorando los sistemas de detección de las reservas de agua en la zona no saturada del suelo, de esta manera los ajustes del balance hídrico se realizarían en tiempo real. Es decir, se podrá realizar un seguimiento y corrección de contenido hídrico real de suelo, resultante de las lluvias y de los riegos; de esta forma se evitarían posibles pérdidas o faltas de agua en ciertos periodos. Se estaría ajustando la aplicación de agua en función de lo que la planta demande en cada momento, y así definir el momento oportuno de riego para el manejo racional del agua, ya que el contenido hídrico es la medida más utilizada para esta decisión (Ferrer *et al.*, 2008).

Los departamentos de Ecología Agraria y Producción Vegetal de la FAV han adquirido una sonda FDR Diviner 2000 destinada a tareas de investigación, por lo que resulta de imprescindible necesidad realizar la calibración correspondiente. En consecuencia, esta es la situación problema que motiva el desarrollo del presente trabajo.

1.3 Antecedentes

Existen pocos estudios en el ámbito nacional donde realizaron calibraciones correspondientes para una sonda de capacitancia FDR (Marano *et al.*, 2012). Uno de estos trabajos fue realizado sobre suelos Argiudoles típicos, en el área central de la provincia de Bs. As. (Weinzettel *et al.* 2003). En esta investigación se muestra la metodología utilizada para la calibración a campo, con diferentes curvas de ajuste y además, se comparan con las curvas provistas por el fabricante. Se instalaron dos tubos de acceso para cada una de las tres condiciones de humedad de referencia (seco, húmedo y saturado). Las mediciones de SF (escala de frecuencias) y muestras de suelo se efectuaron cada 10 cm de profundidad. Se obtuvo una regresión lineal (entre la SF en función del contenido hídrico volumétrico) cuyo ajuste medido como R^2 alcanzaron un valor promedio de 0,801. También analizaron los datos a través del error cuadrático medio, dentro de las tres situaciones analizadas obteniendo valores de R^2 de 0,912 a 0,766.

En otra experiencia en la provincia de San Juan también evaluaron el comportamiento pero de prototipos de sensores tipo FDR (Serman *et al.*, 2005). Se analizó, en laboratorio la relación frente a diferentes contenidos hídricos y bajo diferentes texturas de suelo (arenoso, franco y franco limoso) con muestras disturbadas y sin disturbar. Evaluaron el contenido de humedad volumétrica con el valor entregado por el sensor (escala de frecuencias) y ajustaron

una función para cada tipo de textura. Los resultados que lograron indicaron que hay relación lineal entre la humedad volumétrica y los valores entregados por el sensor. Para la textura franco arcillo limosa obtuvieron un R^2 de 0,95; para la franca de 0,909 y para la textura arenosa un R^2 de 0,9627. Este trabajo indica que los coeficientes de correlación son levemente inferiores para las texturas más finas que tienen mayor porcentaje de arcilla. Además notaron que el suelo sin disturbar mejoró el ajuste sin modificar la pendiente en la recta de ajuste.

Marano *et al.*, (2012) realizaron otra experiencia con el objetivo de obtener las ecuaciones de calibración en Molisoles e Inceptisoles y aplicarlas a condiciones de cultivo. La instalación de los tubos y las muestras se tomaron hasta el metro de profundidad. Con un procedimiento similar al realizado por (Weinzettel *et al.* 2003) obtuvieron las ecuaciones de calibración ($a \cdot FN^b$) para ambos tipos de suelo en tres profundidades diferentes 0-40 cm, 40-90 cm y 90-120 cm. Las tres ecuaciones obtenidas para el molisol fueron $\Theta=0,43 \cdot SF^{2,73}$; $\Theta=0,43 \cdot SF^{2,14}$; $\Theta=0,405 \cdot SF^{2,69}$; con raíz cuadrada del error medio (RCEM) de 0,052; 0,030 y 0,030 respectivamente. Las ecuaciones del Inceptisol fueron $\Theta=0,317 \cdot SF^{1,897}$; $\Theta=0,397 \cdot SF^{3,22}$; $\Theta=0,287 \cdot SF^{2,42}$; con raíz cuadrada del error medio (RCEM) de 0,042; 0,028 y 0,0316 respectivamente. Del mismo modo Da Silva *et al.*, (2012) demuestra la calibración de una sonda de capacitancia (Diviner 2000) con el procedimiento similar a Weinzettel *et al.* (2003) obtuvieron regresiones entre las lecturas SF y su correspondiente contenido de humedad volumétrico para todo el perfil con valores de ajuste de 0,93 ($\Theta=0,494 \cdot SF^{3,017}$). Los resultados obtenidos indicaron que la metodología fue la adecuada para obtener SF en una amplia rango de contenidos de agua del suelo, ya que indican los niveles de humedad que tenían los tubos a diferentes contenidos hídricos: 0,57 (seca), 0,65 (húmedo) y 0,74 (saturado). Encontraron además, que las calibraciones individuales por profundidad aumentan el coeficiente de correlación y disminuyen el error en comparación con una única calibración para todo el perfil (de 0 a 1 m). También destacan una subestimación con la calibración del fabricante de un 9,24 % en comparación con la calibración local.

Zuñiga (2004), calibró una sonda FDR en perfiles de suelo hasta los 0,60 m de profundidad. Obtuvieron ajustes variables según la profundidad que oscilaron entre: $R^2=0,9255$, $RMSE=0,0177$ ($cm^3 \cdot cm^3$) y $R^2=0,5882$ $RMSE=0,0780$ ($cm^3 \cdot cm^3$). La ecuación integrada para todo el perfil alcanzó un $R^2=0,8125$ y $RMSE=0,0467$ ($cm^3 \cdot cm^3$).

1.4 Objetivos

Objetivo general:

- Calibrar y validar el procedimiento de medición de un equipo FDR Diviner 2000 para un suelo representativo del Departamento Rio Cuarto (Córdoba).

Objetivos específicos:

- Caracterizar las condiciones experimentales del suelo.
- Diseñar un procedimiento experimental para generar diferentes condiciones de humedad del suelo.
- Determinar las ecuaciones de ajuste para la obtención de los parámetros de calibración.
- Validar el procedimiento de medición.

MATERIALES Y MÉTODOS

La instalación de los tubos de acceso fue realizada bajo dos suelos representativos del departamento Río Cuarto, ambos Haplustoles típicos. Un sitio experimental fue realizado en el Campo de Docencia y Experimentación de la UNRC y el otro a 25 km al sur de la localidad de Adelia María. Según el Atlas de Suelos de la Provincia de Córdoba (Jarsum et al, 2006) los Haplustoles ocupan el 50% de la superficie del Departamento Río Cuarto por lo que son uno de los grandes grupos representativos del mismo.

2.1 Caracterización del individuo suelo

Se realizó la descripción del perfil según: guía de reconocimientos de suelos, propuesta por Etchevehere (1998).

Las determinaciones de las propiedades del suelo realizadas fueron las siguientes: materia orgánica, densidad aparente, humedad gravimétrica y las curvas de retención hídrica del suelo.

Se tomaron muestras a distintas profundidades (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-70 y 70-100 cm). Antes de proceder a su análisis todas las muestras excepto las de densidad aparente fueron sometidas a un triturado con la finalidad de homogeneizar cada una de ellas; posteriormente se tamizaron, pasándolas por un tamiz de luz de malla de 0,2 mm. La materia orgánica fue determinada por el método de Walkley y Black (Nelson y Sommer, 1982).

La densidad aparente fue medida con el método del cilindro, el cual tiene un volumen de 67,69 cm³, las muestras fueron tomadas en inmediaciones a cada tubo de acceso. Con el peso seco de dicho volumen se procede al siguiente cálculo:

$$DAP = PS/V$$

Dónde:

DAP = densidad aparente de suelo (gr/cm³), PS = peso seco a 105 °C del suelo contenido dentro del cilindro (g), V = volumen del cilindro (cm³).

Para la determinación de la humedad gravimétrica y volumétrica, se tomaron las muestras de suelo en las profundidades mencionadas para la calibración. La humedad volumétrica se determino de la siguiente manera:

Pesaje de la muestra (Mt), secado en estufa a 105°C hasta peso constante, y pesado de la muestra seca (Ms).

$$\text{Masa de agua} = Mt - Ms$$

$$\text{Humedad gravimétrica (\%)} = ((\text{Masa de agua}) / \text{Masa suelo seco}) * 100.$$

$$\begin{aligned} \text{Humedad gravimétrica} * \text{Densidad aparente} &= \text{Humedad volumétrica} \\ (\text{gr}/100 \text{ gr suelo}) * (\text{gr}/\text{cm}^3) &= (\text{cm}^3/100 \text{ cm}^3 \text{ de suelo}) \end{aligned}$$

2.2 Curvas de retención hídrica

Para la determinación de los puntos de la curva se utilizó la membrana a presión desarrollada por Richards (1947). Este aparato está formado por una cámara a presión hermética de acero (ver foto 1) donde se colocan las muestras en anillos enumerados. En la base y antes de poner las muestras se coloca una placa de cerámica en función de los bares requeridos, la misma deja drenar el agua extraída de las muestras a través de un colector.

Este sistema inyecta aire comprimido a una presión equivalente al potencial matricial a determinar. Cuando las muestras han dejado de drenar agua, se pesan y luego se ponen a secar a estufa a 105°C durante 48 hs. De esta forma y por diferencia de pesos se determina el contenido hídrico gravimétrico de la muestra.



Foto 1. Equipo Richards (1947) “olla a presión”. Placas de 0,3 bares, 5 bares y 15 bares.

El procedimiento realizado en el laboratorio fue el siguiente:

Cabe destacar que a nivel de campo se tomaron las muestras de suelo correspondientes a las siguientes profundidades: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-70 cm, 70-100 cm.

1. Una vez en el laboratorio primero se las homogeneizó y tamizó, para ser colocadas en sus respectivos anillos rotulados dentro de las correspondientes ollas a presión. A la misma vez, se anotó a que N° de anillo le correspondía cada muestra. Para cada profundidad se realizaron 3 repeticiones para cada una de las presiones 0,3 bar - 5 bares 15 bares.

2. Colocada la placa correspondiente a la olla de succión con los anillos dentro, se procedió a saturarlas con el agregado de una lámina de agua logrando una elevación gradual dentro de la bandeja hasta alcanzar 2/3 la altura de los anillos que contienen las muestras.

3. Considerando los cuidados necesarios a la hora de trabajar con este equipo, se procedió a cerrar herméticamente y se determinó la presión para cada olla. Esta presión es registrada a través de los manómetros que están instalados en el sistema (como se observa en la

foto 1). El flujo de agua cesa, cuando la tensión con la que es retenida el agua en las muestras de suelo se iguala a la presión ejercida o aplicada.

4. Posteriormente se extrajeron las muestras cuidadosamente y se determinó el porcentaje de humedad a través del método gravimétrico.

2.4 Calibración local del equipo FDR

Para la calibración en terreno de un equipo FDR (Diviner 2000) en una primera instancia se instalaron los tubos de acceso tal como se detalla en el anexo del presente trabajo.

Luego se siguió el procedimiento recomendado por la empresa que fabrica el equipo (Sentek, 2003), tal como se detalla a continuación:

1. Una vez instalados los tubos de acceso y con la condición hídrica deseada, (dos tubos bajo la condición de suelo seco, dos en estado de saturación y dos a capacidad de campo), se procedió a tomar las mediciones correspondientes.

2. Por cada 10 cm de profundidad se tomaron lecturas con la sonda de: Frecuencias a escala, cómputo bruto y humedad volumétrica (sin calibración). Con el dato del cómputo bruto fue posible determinar la SF calculada con mayor nivel de decimales:

Se utilizó la siguiente ecuación:

$$SF = (F_a - F_s) / (F_a - F_w)$$

Dónde:

SF = escala de frecuencia. F_a = es la lectura de frecuencias en el tubo de lectura mientras se encuentra suspendido en el aire, F_s (Cómputo bruto) = el tubo se encuentra instalado en el suelo y la lectura se realiza a una profundidad específica, F_w = es la lectura en el tubo sumergido dentro de un balde con agua.

3. Los valores fueron anotados en tablas previamente preparadas con las siguientes entradas: tubo, condición de humedad, profundidad y repetición.

4. Inmediatamente después, se excavaron calicatas contra cada uno de los frentes de los tubos para poder determinar cada 10 cm de profundidad tres mediciones de densidad aparente. Con dichas muestras se obtuvo el valor de gravimetría que al multiplicarse por la densidad aparente se obtuvo la humedad volumétrica, 3 datos por cada 10 cm de profundidad hasta el metro.

5. Estas mediciones fueron tomadas en inmediaciones al tubo de acceso, dentro del diámetro de influencia del sensor.

6. Cada muestra fue guardada en su correspondiente bolsa rotulada con el nombre del tubo, profundidad y repetición perteneciente. Fueron cerradas firmemente con la menor cantidad posible de aire en su interior, se colocaron dentro de una conservadora para evitar la pérdida de humedad en el trayecto del campo al laboratorio.

7. En el laboratorio de cereales y oleaginosas se determino el contenido de agua de cada muestra y su densidad aparente. Todo el suelo que traían las bolsitas (proveniente del volumen del cilindro) fue pesado previo a estufa, por lo cual se pudieron realizar las dos determinaciones con la misma muestra.

8. Los resultados obtenidos fueron ordenados en tablas según tubo, condición de humedad, profundidad y repetición. Estos valores fueron apareados con los obtenidos con la sonda para igual medición de tubo y profundidad.

9. Con los datos anteriores se realizaron los gráficos por cada 10 cm de profundidad, los cuales presentaban como variable independiente al contenido hídrico volumétrico y como variable dependiente a las frecuencias a escala tomadas a la misma profundidad y en el mismo tubo obtenidas con la sonda Diviner 2000. Con la anterior grafica se obtuvo la ecuación de calibración con su coeficiente de determinación R^2 .

$$\Theta_v = (a*FNb)$$

Dónde:

SF: frecuencia a escala, (a y b) = coeficientes de calibración dependientes de tipo de suelo, Θ_v = contenido volumétrico.

2.5 Análisis estadístico test de comparación de medias

Para detectar si las curvas obtenidas a diferentes profundidades de suelo eran estadísticamente diferentes, las pendientes y la ordenada al origen de las rectas (del logaritmo de las variables analizadas) se compararon mediante el test de paralelismo propuesto por Zar (1984) mediante el programa Graphpad Prism v 5.00 for Windows (GraphPad Software, San Diego California USA).

2.6 Validación

Este procedimiento consiste en la comparación de las diferentes calibraciones posibles de utilizar. A partir de esto se determina cuál de las calibraciones arroja la mayor exactitud de medición en comparación con el método gravimétrico.

Las calibraciones a contrastar son las 3 siguientes vs el contenido real de agua que presente el suelo en ese momento, este ultimo determinado con el método considerado como estándar que es el método gravimétrico.

- La calibración de fábrica: sin ingresar al equipo los coeficientes de calibración, con la cual se obtienen valores relativos.

- Utilizar los coeficientes de calibración por profundidad, obtenidos en el proceso de calibración e ingresarlos al equipo.

- Utilizar los mismos coeficientes de calibración para todas las profundidades (única calibración para el perfil entero), datos obtenidos de todas las mediciones realizadas durante la calibración y también ingresarlos al equipo.

Para ello se instalaron dos tubos de acceso en el Campo Experimental de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto, ($33^{\circ}06'24''$ S y $64^{\circ}17'56''$ W), uno bajo condición de riego (tuvo 2) y uno bajo condición de secano (tuvo 1). Siguiendo la metodología de instalación descrita en el anexo del presente trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Caracterización del perfil típico

A continuación se observa el perfil del Haplustol típico (Adelia María) y su caracterización morfológica correspondiente:

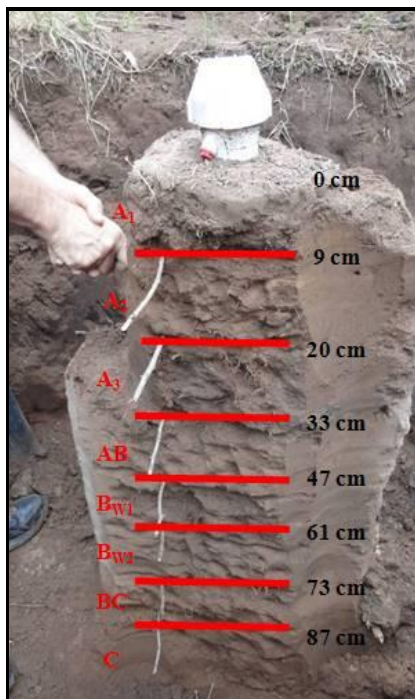


Foto 2. Perfil del suelo, horizontes y profundidades.

Cuadro 2. Caracterización del perfil.

Horizonte:	Profundidad:	Descripción:
A ₁	0-9 cm	Color (10 YR 3/6) en húmedo; franco-arenoso; estructura en bloques sub-angulares finos moderados a débiles.; límite inferior claro suave.
A ₂	9-20 cm	Color (10 YR 3/6) en húmedo; franco-arenoso; estructura en bloques sub-angulares medios moderados; límite inferior claro suave.
A ₃	20-33 cm	Color (10 YR 3/4) en húmedo; franco-arenoso; estructura en bloques sub-angulares medios a gruesos moderados; límite inferior claro suave.
AB	33-47 cm	Color (10 YR 5/4) en húmedo; franco-arenoso; estructura en bloques sub-angulares medios a finos moderados; límite

inferior claro suave.

Bw ₁	47-61 cm	Color (10 YR 4/4) en húmedo; franco-arenoso; estructura en bloques sub-angulares medios a finos moderados; límite inferior claro suave.
Bw ₂	61-73 cm	Color (10 YR 4/6) en húmedo; franco-arenoso; estructura en bloques angulares medios moderados a fuerte; límite inferior gradual suave.
BC	73-87 cm	Color (10 YR 5/6) en húmedo; franco-arenoso; estructura en bloques sub-angulares medios a finos moderados a débil; límite inferior abrupto.
C	87 cm a +.	Color (10 YR 5/6) en húmedo; franco-arenoso; masivo.

3.2 Descripción de las propiedades del suelo

Las determinaciones realizadas fueron las siguientes: materia orgánica y las curvas de retención hídrica del suelo para las profundidades de 0-10,10-20, 20-30, 30-40, 40-70 y 70-100 cm.

3.2.1 Materia orgánica y densidad aparente

En la siguiente tabla se observan los valores de materia orgánica y los valores de densidad aparente, para el suelo en estudio. El mismo se asemeja a la condición de suelo virgen, y por eso era de esperar altos valores de materia orgánica, sobre todo en los horizontes superficiales. El cuadro 3 muestra los porcentajes de materia orgánica para los diferentes horizontes bajo estudio.

Cuadro 3. Porcentaje de materia orgánica en cada uno de los horizontes.

Horizonte	Profundidad (cm)	MO (%)	Densidad aparente (gr/cm ³)
A1	0-9	6,800	0,81
A2	9-20	2,85	1,13
A3	20-33	1,81	1,29
AB	33-47	1,40	1,31

BW1	47-61	0,29	1,32
BW2	61-73	1,40	1,4
BC	73-87	0,29	1,4
C	> 87	0,29	1,4

3.2.2 Capacidad hídrica

Para la determinación de los puntos de la curva se utilizó la membrana a presión desarrollada por Richards (1947). A continuación en el cuadro 4 se muestran los valores de capacidad de campo (que corresponden a una succión equivalente a 0,3 bares), valores de punto de marchites permanente (succión de 15 bares) y un valor intermedio entre ambos parámetros (succión de 5 bares).

Cuadro 4. Contenido hídrico según potencial mátrico (0,3-5-15 bares) a diferentes profundidades.

Profundidad (cm)	Potencial mátrico (bares)	Humedad Gravimétrica (%)	Humedad volumétrica (cm³/100cm³)
0-10 cm	0,3	19	15,39
0-10 cm	5	8,6	6,97
0-10 cm	15	8,4	6,80
10-20 cm	0,3	15,5	17,52
10-20 cm	5	6,7	7,57
10-20 cm	15	6,5	7,35
20-30 cm	0,3	13,5	17,42
20-30 cm	5	5,9	7,61
20-30 cm	15	5,9	7,61
30-40 cm	0,3	14,2	18,46
30-40 cm	5,0	5,5	7,15
30-40 cm	15,0	5,5	7,15
40-70 cm	0,3	10,3	13,60
40-70 cm	5	5,2	6,86
40-70 cm	15	4,7	6,20
70-100 cm	0,3	11	14,85
70-100 cm	5	6	8,10
70-100 cm	15	5	6,75

Tal y como se observa en el cuadro anterior, los valores de CC y PMP son superiores en los primeros horizontes, esto era de esperar debido a los mayores niveles de materia orgánica (Mestas Valero, 2011).

Los valores más altos de CC y PMP obtenidos, corresponden a las profundidades 0-10 cm (CC = 19,4 g g⁻¹, PMP = 6,5 g g⁻¹) y 40-70 cm (CC = 10,34 g g⁻¹, PMP = 4,6 g g⁻¹).

3.3 Curvas y ecuaciones de calibración del equipo Diviner 2000

A continuación se observan los gráficos con sus respectivas ecuaciones de calibración, que relacionan las frecuencias de escala (variable dependiente) en función el contenido hídrico volumétrico (variable independiente) para cada una de las profundidades medidas.

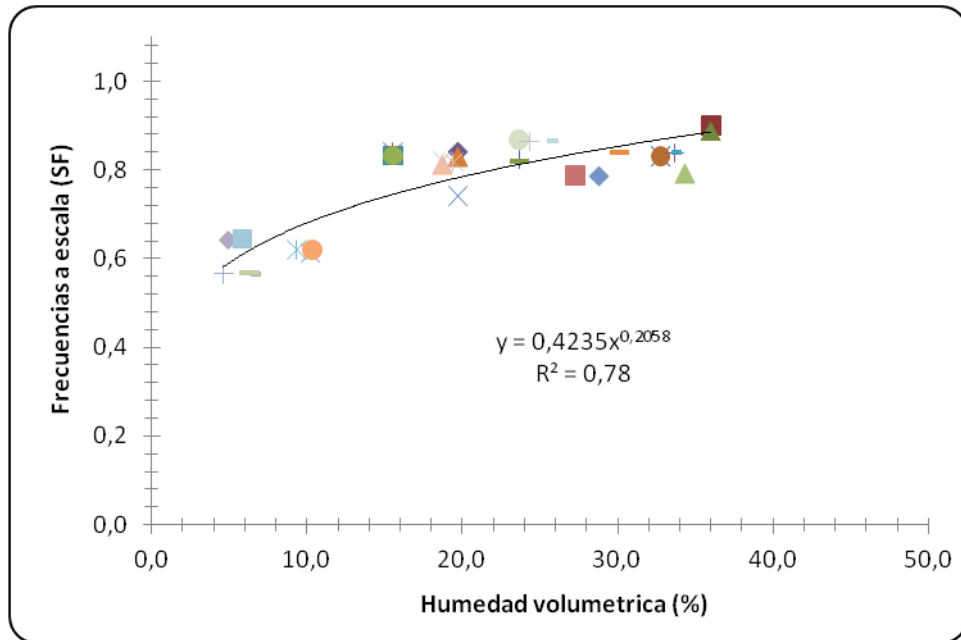


Figura 1. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 0-10 cm.

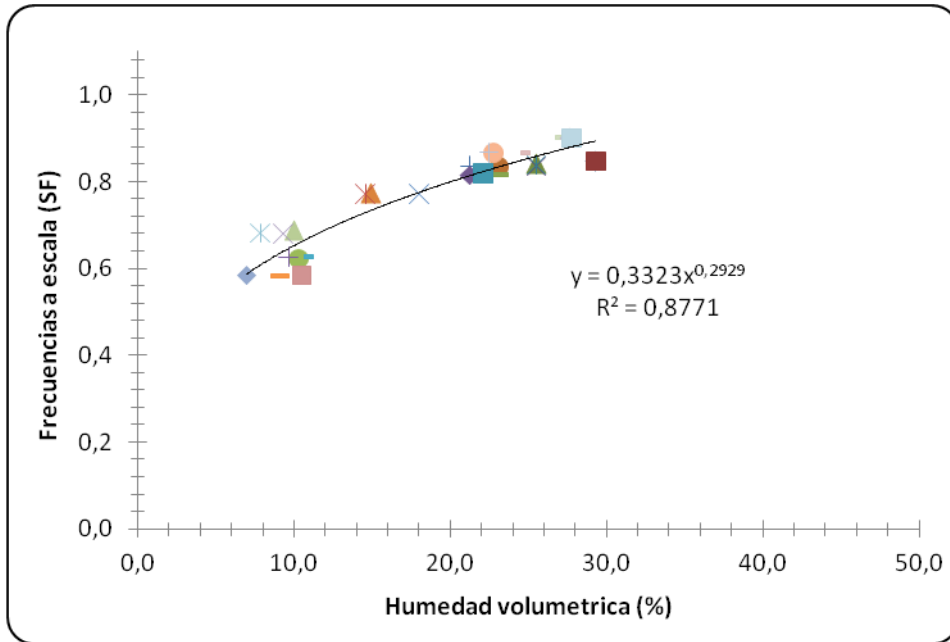


Figura 2. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 10-20 cm.

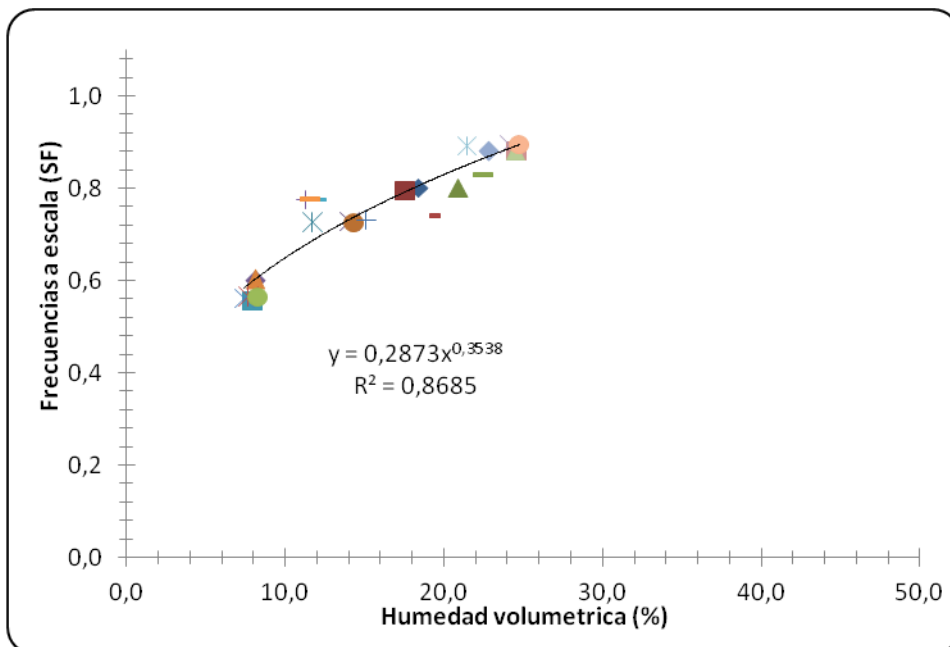


Figura 3. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 20-30 cm.

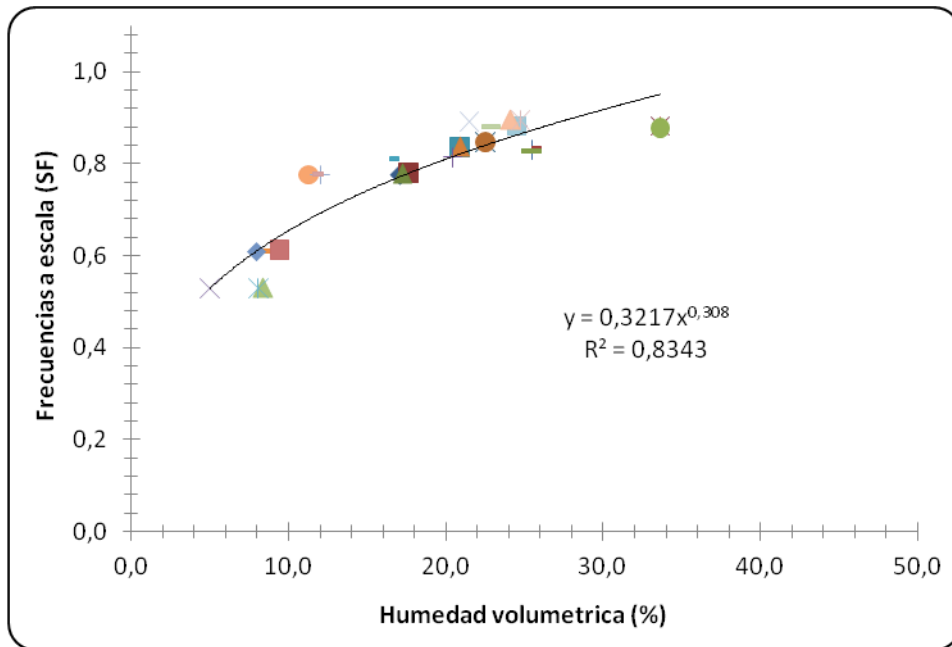


Figura 4. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 30-40 cm.

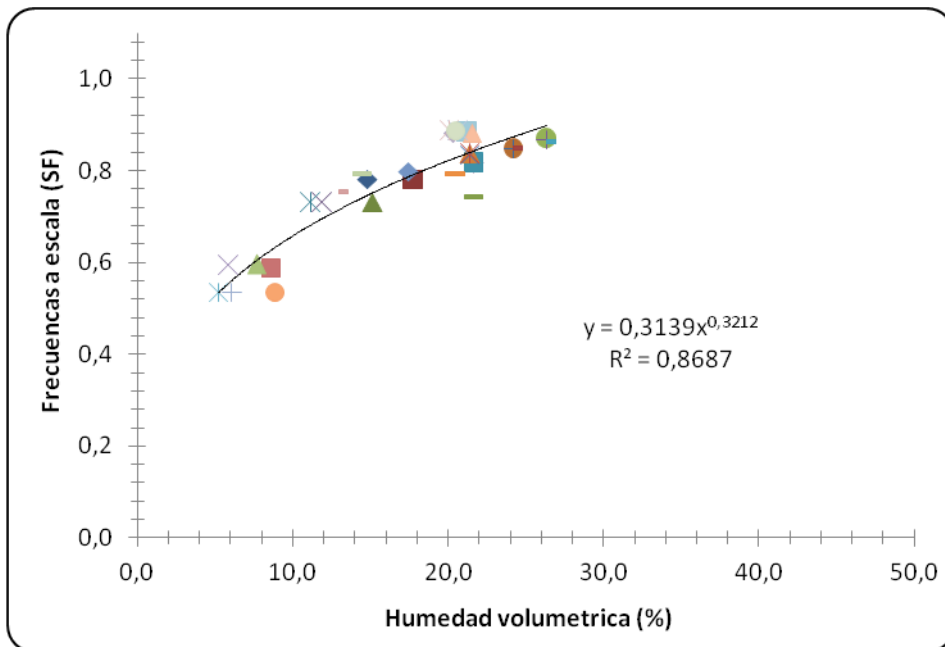


Figura 5. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 40-50 cm.

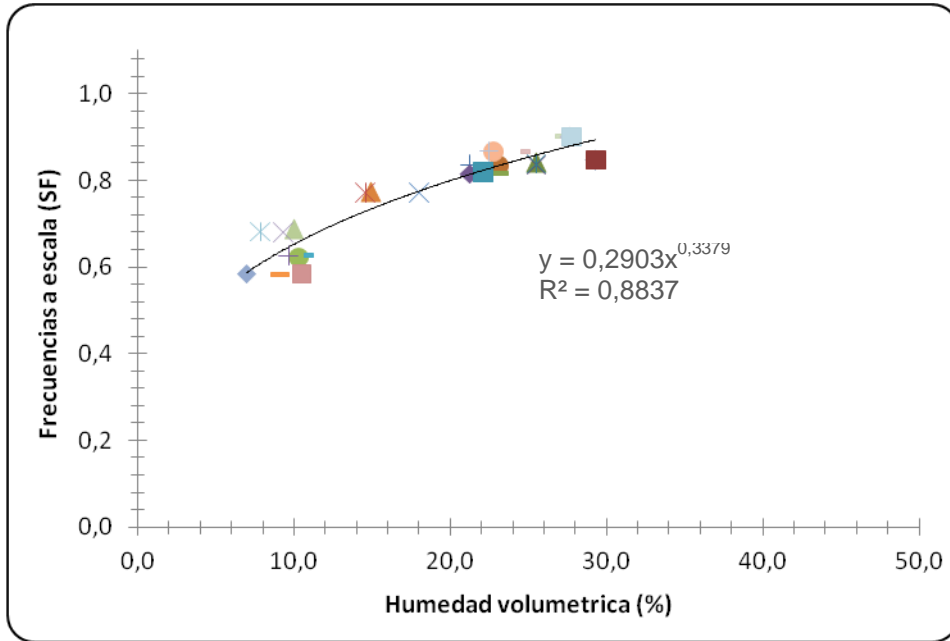


Figura 6. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 50-60 cm

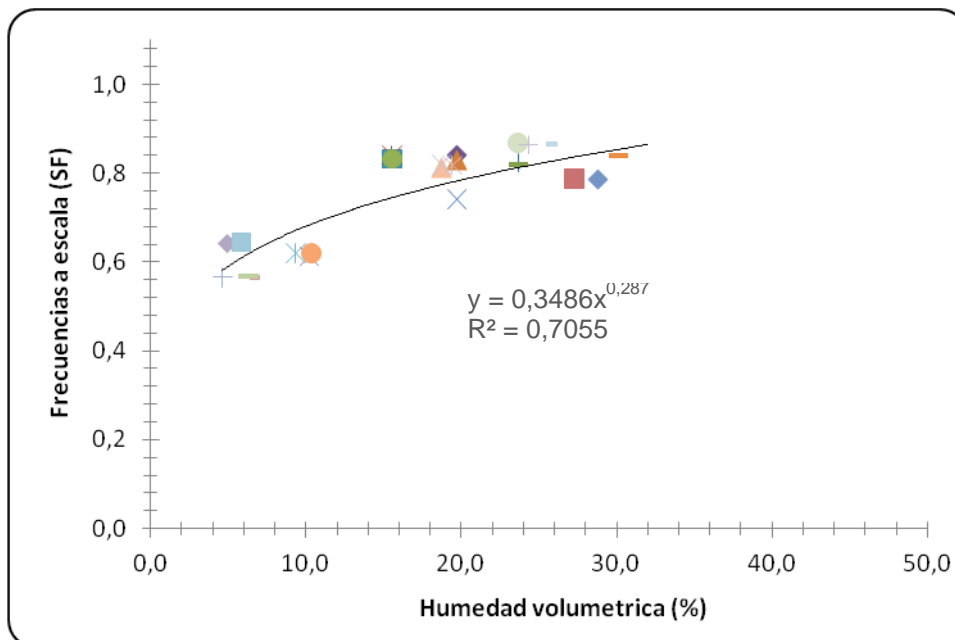


Figura 7. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 60-70 cm.

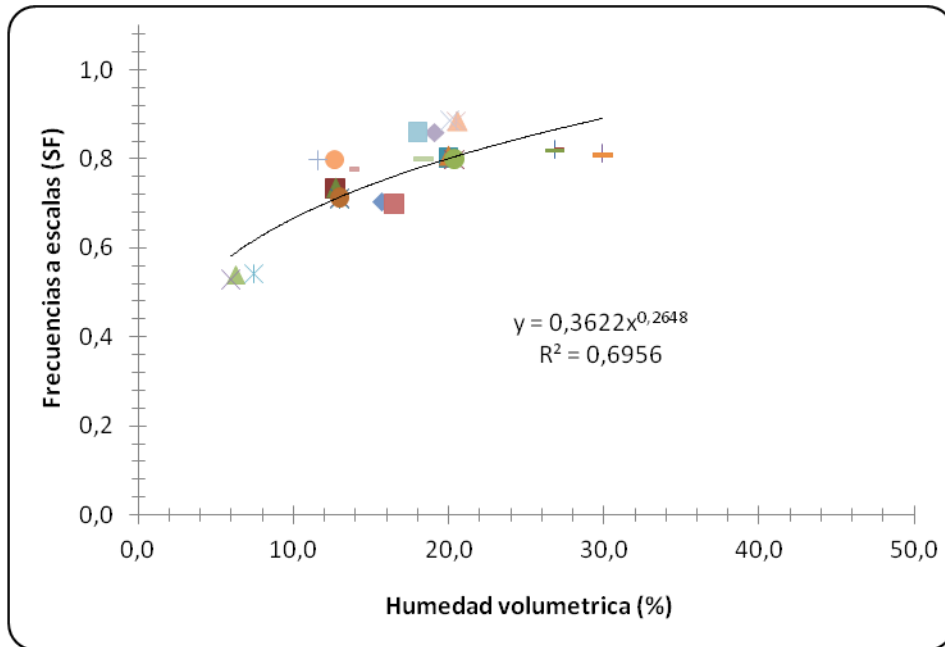


Figura 8. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 70-80 cm.

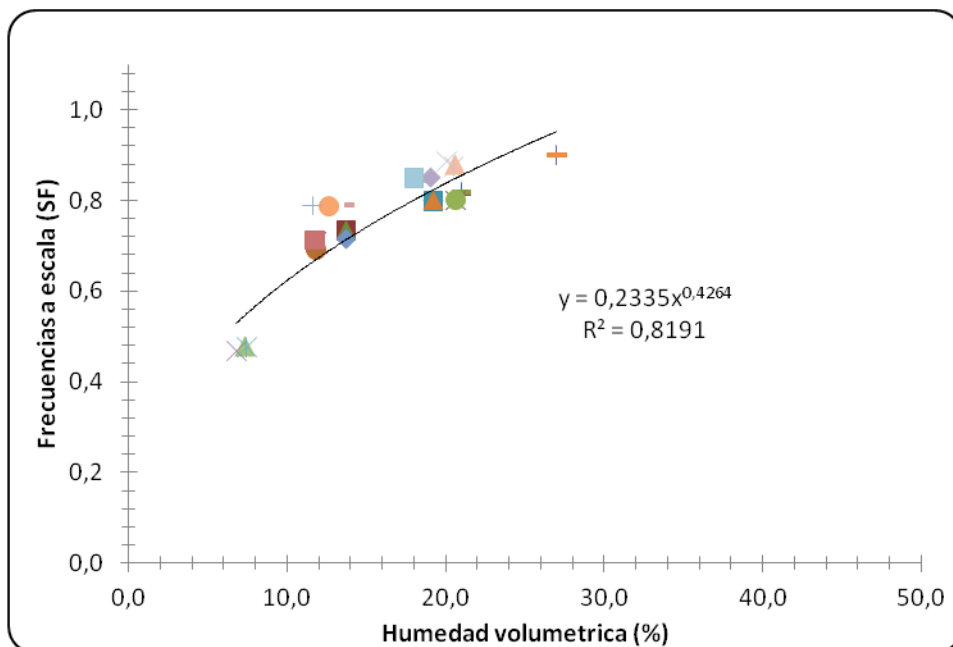


Figura 9. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 80-90 cm.

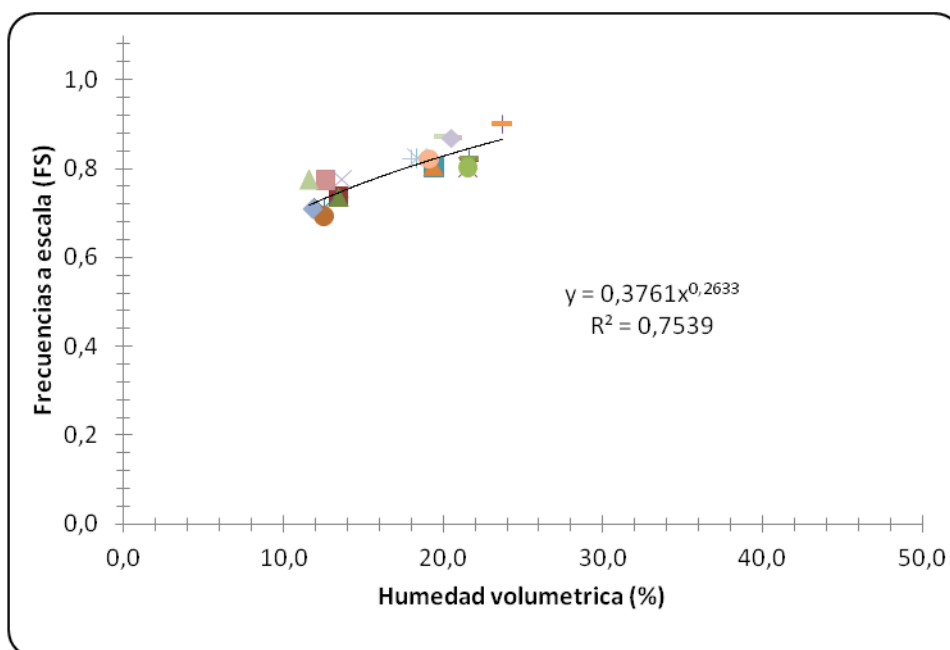


Figura 10. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para la profundidad 90-100 cm.

Al igual que Da Silva (2012) los valores de SF obtenidos en este estudio estuvieron acorde a la condición hídrica de suelo, es decir, fueron más altos a mayor contenido hídrico (saturado) y más bajos en la condición seca. Esto demuestra que la metodología utilizada abarcó un amplio rango de humedades. El valor más alto de contenido hídrico volumétrico fue de 36 $\text{cm}^3/100\text{cm}^3$ de suelo, que correspondió a una lectura de SF de 0,90; el valor más bajo (condición de suelo seco) fue de 4,6 $\text{cm}^3/100\text{cm}^3$ correspondiendo a un valor de SF de 0,56.

3.2 Parámetros obtenidos para las diferentes profundidades evaluadas

En el siguiente cuadro se resumen las ecuaciones y sus constantes obtenidas para cada profundidad medida y su correspondiente coeficiente de determinación R^2 .

Parámetros A, B y coeficiente de determinación R^2 , obtenidos cada 10 cm de profundidad.

Cuadro 5. Parámetros de la ecuación $\Theta = a*FNb$, coeficiente de ajuste R^2 y numero de muestras (n).

Profundidad (cm)	Parámetro a	Parámetro b	R²	n.
0-10	0,4335	0,2058	0,7800	35
10-20	0,3323	0,2929	0,8771	29
20-30	0,2873	0,3538	0,8685	24
30-40	0,3217	0,308	0,8343	32
40-50	0,3139	0,3212	0,8687	33
50-60	0,2903	0,3379	0,8837	35
60-70	0,3486	0,287	0,7055	29
70-80	0,3622	0,2648	0,6956	32
80-90	0,2335	0,4264	0,8191	32
90-100	0,3761	0,2633	0,7539	28

Los parámetros obtenidos surgen de correlacionar la SF en función del contenido hídrico volumétrico. El ajuste más alto hallado fue de un R^2 de 0,8837 y el más bajo de 0,6956, que corresponden a las profundidades 50-60 y 70-80 cm respectivamente. Estos valores de correlación se encuentran dentro del rango obtenido por Zúñiga (2004) y por Da Silva *et al.*, (2012). Zúñiga (2004) halló un valor mínimo de 0,5882 para la profundidad de 50-60 cm y un valor máximo de 0,9619 para la profundidad 20-30 cm. Da Silva encontró valores de correlación de entre 0,56 y 0,99 para las profundidades 90-100 cm y 30-40 cm respectivamente.

En cuanto a los parámetros de las ecuaciones en las diferentes profundidades, se observa una variación para “A” de entre 0,2335-0,4335 y para “B” de 0,2058-0,4264. Zúñiga (2004) obtuvo valores extremos más altos para la constante A (0,5294) y más bajos para la constante B (0,1450). Así mismo Da Silva *et al.*, (2012), bajo un Paleudult ródico obtuvieron valores extremos más altos: parámetro A 0,742; parámetro B de 3,78 (ambos para la profundidad de 0-10 cm). Marano *et al.*, (2012) sobre molisoles, obtuvieron valores de B de entre 2,2130-2,739; y de A de 0,3970-0,431.

A diferencia de los anteriores autores mencionados Curto *et al.*, (2014) sobre un Argiudol típico generó curvas de calibración que ajustaban a una función lineal. Hallando ajustes consistentes para las profundidades superiores (R^2 superiores a 0,93). No realizaron una calibración única para todo el perfil, sino que realizaron calibraciones por profundidad (0,08-0,18-0,38-0,58-0,98 m).

En este trabajo, las calibraciones por profundidad mejoran el coeficiente de correlación en comparación con una única calibración para todo el perfil. Las excepciones fueron las profundidades: 60-70, 70-80 y 90-100 cm.

En la figura 11 se presenta el logaritmo de las frecuencias a escala en función del logaritmo de la humedad volumétrica para cada una de las profundidades evaluadas. Ésta transformación de los datos (linealización) es requerida para el análisis estadístico test de comparación de pendientes.

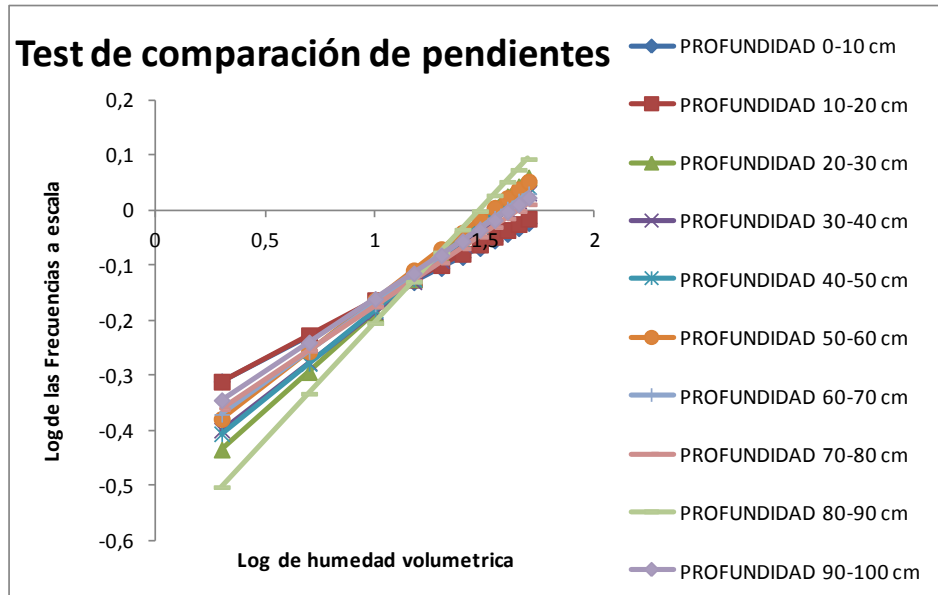


Figura 11. Test de comparación de pendientes.

No existió diferencia estadísticamente significativa entre las diferentes pendientes ($p > 0,99$), por lo cual se puede utilizar una única ecuación de calibración para todo el perfil analizado (hasta el metro de profundidad). En el gráfico 18, se observa la curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000, para el perfil completo.

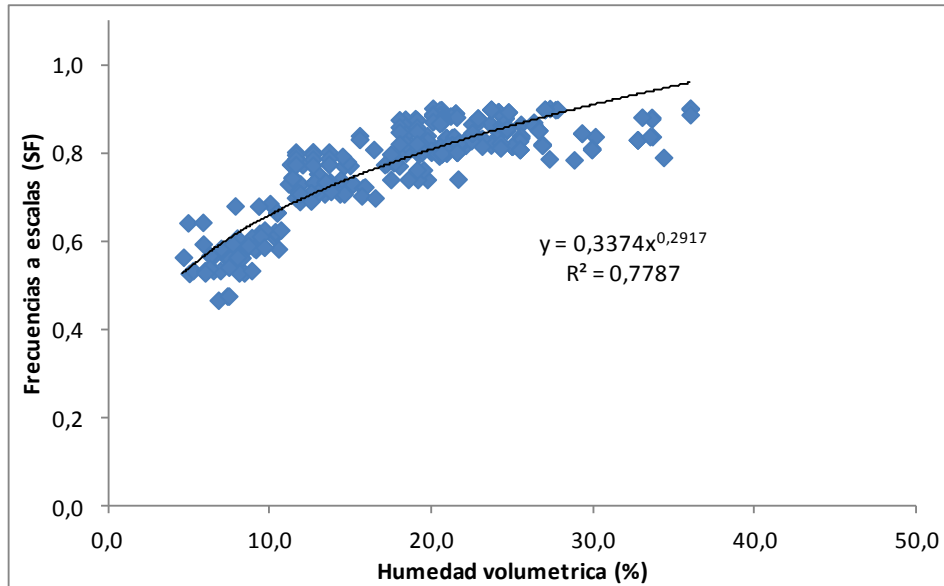


Figura 12. Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000 para todas las profundidades analizadas.

En el siguiente cuadro se pueden observar los parámetros obtenidos de la ecuación de calibración para el perfil entero.

Cuadro 6. Parámetros obtenidos para una única calibración ($\Theta = a \cdot FN^b$), se observan los parámetros a y b con su coeficiente de determinación R^2 y número de muestras (n).

Profundidad (cm)	Parámetro A	Parámetro B	R²	n.
0-100 (perfil completo)	0,3374	0,2917	0,7787	309

La ecuación de calibración para el perfil completo arrojó un nivel de ajuste alto R^2 de 0,7787, muy similar al obtenido por Zúñiga (2004) que fue de 0,8125. En cuanto a los parámetros de la ecuación, también presentaron similitudes, estos fueron diferentes solo en la componente centesimal. Los valores obtenidos por Zúñiga (2004) fueron de 0,3734 para el parámetro A y de 0,2470 para el parámetro B.

3.3 Validación

En el cuadro 8 y 9 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes calibraciones, contrastándose los valores con la humedad real del suelo.

Cuadro 7. Tubo N° 1: condición secano.

Profundidad	Humedad volumétrica real (A)	Humedad sin calibrar (B)		Humedad calibrada por profundidad (C)		Humedad calibrada para perfil entero (D)	
			Diferencia (A-B)		Diferencia (A-C)		Diferencia (A-D)
0-10 cm	16,28	21,9	-5,62	15,71	0,57	16,49	-0,21
10-20 cm	20,26	23,4	-3,14	18,44	1,82	17,72	2,54
20-30 cm	20,73	26,7	-5,97	19,07	1,66	20,60	0,13
30-40 cm	19,86	25,3	-5,44	19,31	0,55	19,35	0,51
40-50 cm	19,35	24,7	-5,35	18,00	1,35	18,82	0,53
50-60 cm	17,81	21,2	-3,39	16,94	0,87	15,84	1,97
60-70 cm	17,95	23,7	-5,75	16,81	1,14	17,96	-0,01
70-80 cm	16,82	25,2	-8,38	19,89	-3,07	19,26	-2,44
80-90 cm	16,40	25,4	-9	18,04	-1,64	19,43	-3,03
90-100 cm	16,38	27,5	-11,12	17,82	-1,44	19,53	-3,15

Cuadro 8. Tubo N° 2: condición bajo riego.

Profundidad	Humedad volumétrica real (A)	Humedad sin calibrar (B)		Humedad calibrada por profundidad (C)		Humedad calibrada para perfil entero (D)	
			Diferencia (A-B)		Diferencia (A-C)		Diferencia (A-D)
0-10 cm	22,21	21,0	1,21	15,06	7,15	16,01	6,2
10-20 cm	26,47	26,9	-0,43	21,62	4,85	20,78	5,69
20-30 cm	25,55	26,5	-0,95	18,95	6,6	20,43	5,12
30-40 cm	22,94	26,9	-3,96	20,66	2,28	20,78	2,16
40-50 cm	20,94	28,6	-7,66	20,97	-0,03	22,27	-1,33
50-60 cm	18,79	28,8	-10,01	22,91	-4,12	22,47	-3,68
60-70 cm	18,20	28,2	-10	20,55	-2,35	21,89	-3,69
70-80 cm	17,70	26,1	-8,4	21,86	-4,16	20,97	-3,27
80-90 cm	17,32	26,7	-9,38	18,78	-1,46	20,60	-3,28
90-100 cm	16,88	26,9	-10,02	19,09	-2,21	20,78	-3,9

Las tablas anteriores se grafican en los gráficos 19 y 20, se observa que para cada profundidad (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90, 90-100) le corresponde un valor de humedad determinado por las diferentes calibraciones.

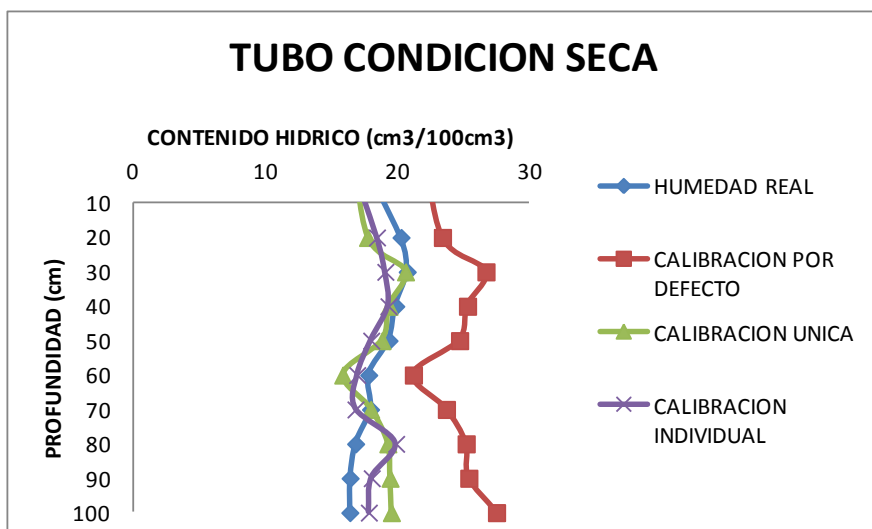


Figura 13. Validación para el tubo instalado bajo condición seca.

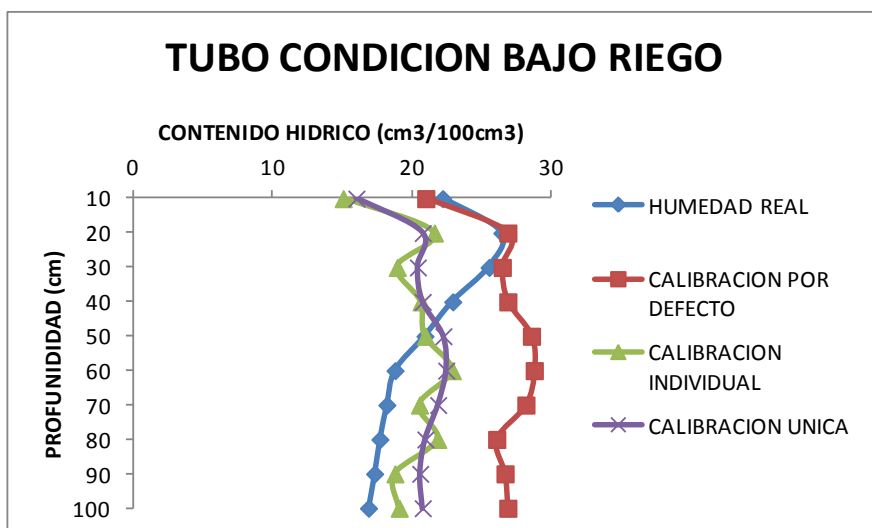


Figura 14. Validación para el tubo instalado bajo condición de riego.

En ambos tubos, al contrastar las tres calibraciones posibles de utilizar con la humedad volumétrica real del suelo, se puede observar que con la calibración provista por el fabricante (valores obtenidos de varios tipos de suelo) se obtienen las mayores diferencias. Estas diferencias son negativas lo que indica que sobreestima el contenido hídrico, siendo mayor a mayor profundidad.

En cuanto a las calibraciones locales (calibración por profundidad y calibración para el perfil entero) en general y como era de esperar, arrojaron valores más cercanos al contenido hídrico real que posee el suelo. También se muestra que a mayor profundidad las dos calibraciones locales sobreestiman (a partir de los 50 cm de profundidad en el tubo 2 y a partir

de los 60 en el tubo 1). Caso contrario sucede a menor profundidad, ya que, éstas subestiman el contenido hídrico a excepción de la profundidad 0-10 cm para la calibración única perteneciente al tubo 1. Sin embargo, en el tubo bajo riego las primeras 3 profundidades la calibración del fabricante fue la más precisa, presentando la menor diferencia con el contenido hídrico real determinado a través del método considerado como estándar. Estas diferencias en las capas superficiales del suelo han sido también descritas por otros autores (Zúñiga, 2004; Da Silva *et al.*, 2012), quienes señalan la variabilidad en el PEA como una de las principales fuentes de error.

Así, la raíz cuadrada del error medio (RCEM) fue de 7,04 mm para la calibración del fabricante, y de 3,12 y 3,19 mm para las calibraciones por profundidad y una única, respectivamente. Esto significa que se pudo disminuir el error de toma de datos desde un error del 36% en la calibración por defecto a uno del 16% en las calibraciones locales.

CONCLUSIONES

- Se diseñó un procedimiento experimental que permitió obtener dos ecuaciones con sus correspondientes parámetros de calibración de la sonda Diviner 2000 para suelos Haplustoles típicos, franco arenosos. Una ecuación corresponde a todas las mediciones del perfil y otra con las medidas correspondientes cada 10 cm de profundidad. Ambas correlaciones presentaron ajustes aceptables, superando valores de R^2 de 0,7.

- La comparación con el test de pendientes indicó que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los parámetros obtenidos en la ecuación de calibración con todos los datos del perfil versus los obtenidos a cada profundidad.

- La validación los parámetros obtenidos por las diferentes calibraciones y que más se aproximan al contenido hídrico real del suelo fueron las realizadas bajo las condiciones experimentales, mejorando la calibración por defecto que ofrece el equipo.

- El máximo error de lectura del contenido hídrico real del suelo y medido por la sonda no supero el 16% de error.

- La experiencia de este trabajo permitió diseñar un protocolo de calibración que es publicado en un manual práctico, que describe el procedimiento a seguir a la hora de realizar la calibración local de la sonda Diviner 2000.

ANEXO

PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE LA SONDA DIVINER 2000

El objetivo de este apartado es describir el procedimiento de calibración que requiere el equipo Diviner 2000, de manera tal que pueda ser adoptada fácilmente por cualquier usuario que lo necesite.

1 – Recomendaciones generales

- Es importante que el sitio seleccionado para proceder a la calibración sea representativo de los suelos donde se utilizará luego la sonda, principalmente en términos de posición en el relieve y textura.

- Es fundamental contar con una condición de *suelo seco* (*contenido hídrico a Punto de Marchitez Permanente*). Esta situación muchas veces es difícil de lograr. Para ello se puede evaluar la posibilidad de realizar la instalación de los tubos bajo algún tipo de protección artificial que impida el ingreso de agua por ejemplo, un tinglado. Sin embargo debe evaluarse previamente si el suelo no está excesivamente compactado.

- Asegúrese de que los sitios donde instale los tubos estén lo suficientemente distanciados, para que la humedad de uno no interfiera en la condición de otro.

- Antes de llevar a cabo la calibración, reúna todos los materiales necesarios.

2 - Materiales necesarios

- Barreno de incremento: Dimensiones: 5,5 cm de diámetro y de una longitud de 1,5 m. (deberá contar con su extensor).

- Suelo de un horizonte C de grano suelo y sin agregados estables al agua.

- Recipiente, volumen mínimo de 3 litros.

- Agua exenta de sales.

- Tubos y tapas correspondientes compatibles con el equipo. Dimensiones: longitud: 1,5 mm, Diámetro interno y externo: 51 mm y 56,5 mm.

- Anillos externos de chapa para clavar en el suelo de 50 cm de diámetro, 40 cm de alto.

- Tamiz.

- Bolsas rotuladas para el muestreo.

- Birome y anotador.

- Conservadora para guardar las muestras.

- Manual de calibración.

3 – Procedimiento para la instalación de los tubos de lectura

- 1) La ubicación de los tubos de lectura correcta, tendrá que tener un distanciamiento de 2 metros para igual condición de humedad y 5 metros entre diferente condición. (Sentek 2003)
- 2) Preparar los tubos de lectura: los tubos del equipo vienen con dos tapas. Una de ellas va fija pegada al tubo de PVC, la otra es móvil porque posee un sistema a rosca que cumple la función de destapar el tubo para introducir la barrilla de metal al momento de realizar cualquier medición. Para pegar la tapa fija, coloque el pegamento en el interior de la misma e introdúzcala en el tubo, y sosténgala con presión durante unos segundos. Asegúrese siempre, que los tubos queden bien tapados con la finalidad de impedir la entrada de agua y/o tierra en su interior que puedan alterar futuras mediciones.

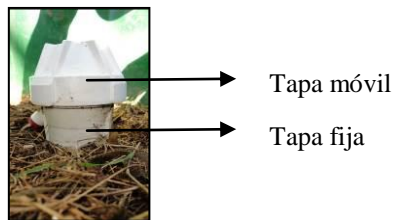


Foto 3. Tubo de lectura instalado con sus tapas correspondientes.

- 3) Para realizar el orificio en el suelo, utilice un barreno de incremento, tal como se observa en la foto 4. Su diámetro debe permitir la entrada del tubo de lectura lo más ajustado posible contra las paredes laterales del suelo. El diámetro recomendado es 5,5cm. La profundidad a excavar será igual a la longitud del tubo de lectura, por lo tanto asegúrese que el barreno cuente con el alargues y herramientas correspondientes para extenderlo. Cuando esté haciendo el orificio tenga la precaución de no pisar y ejercer fuerza en las inmediaciones al tubo, ya que esto podría causar compactaciones que podrían afectar futuras lecturas.



Foto 4. Barreno utilizado para la realización del orificio de instalación.

4) Para corroborar que el hoyo alcanzo la profundidad adecuada introduzca el tubo de lectura. Una vez introducido en el interior del orificio, éste deberá sobresalir 4 cm por encima de la superficie del suelo.

5) Se procede a preparar el lodo que permitirá un íntimo contacto entre el tubo de lectura y el suelo. El lodo se prepara en un recipiente de 3 litros, en donde se le agrega agua y tierra proveniente del horizonte C. Se revuelve hasta alcanzar una pasta homogénea. La pasta adquirirá una consistencia espesa pero no perderá demasiada fluidez, de esta manera al secarse no se formarían “burbujas de aire” entre la pared del tubo y el suelo lo que podrían alterar las mediciones.

6) Con el orificio terminado y sin el tubo de lectura adentro, ingrese el lodo. Inmediatamente después introduzca el tubo de lectura con la presión necesaria hasta que alcance el tope. Nótese que el barro empezará a rebalsar. En este momento presione durante unos 30 segundos el tubo para que éste no se levante y pueda quedar sellado a la profundidad definitiva.



Foto 5. Imágenes en secuencia para la instalación de un tubo de acceso.

Repetir este procedimiento hasta colocar los 6 tubos de lectura requeridos para la calibración.

Esquema representativo de los pasos a seguir para instalar los tubos de lectura:

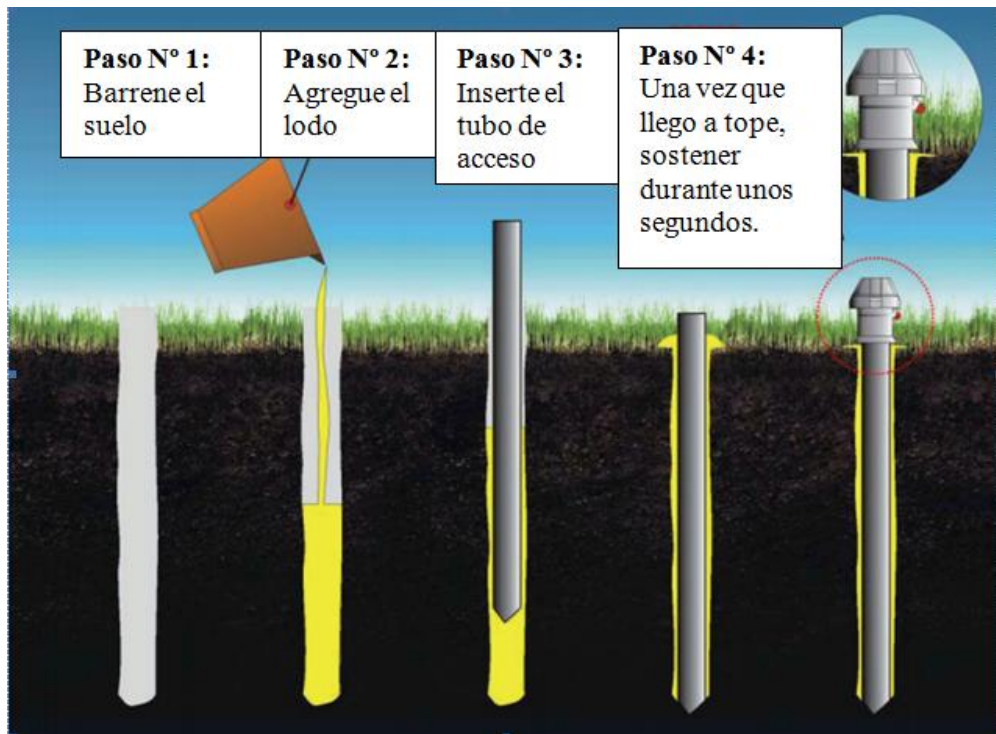


Foto 6. Procedimiento de instalación de tubo de acceso (Mestas Valero, 2011).

Una vez instalados, los tubos que serán sometidos a las diferentes condiciones de humedad, requerirán la instalación de una estructura que estanque el agua de manera uniforme sobre la superficie del suelo. Se puede usar un anillo de infiltrómetro de doble anillo (el de mayor diámetro). Puede ser cualquier anillo que pueda clavarse en el suelo.



Foto 7. Tubo de lectura con anillo de lata clavado al suelo.

Las condiciones de humedad por lo general son 3: *seco*, *húmedo* y *saturado*. Para los tubos bajo condición saturada se deberán agregar agua sin límite de manera tal de asegurar que todos los poros del suelo se llenen. Para los de condición húmeda se debe agregar una cantidad que depende del contenido de humedad del momento. Se recomienda tomar el contenido gravimétrico y aproximar la cantidad necesaria para llevar el suelo a Capacidad de Campo.



Foto 8. Tubo de lectura y agregado de agua.

Calcular la superficie de mojado.

Equivalencias: 1mm de precipitación = 10.000 lts / ha. = 1 lts / m²

Si el anillo externo posee un radio de 25cm, este tendrá un área de $(\pi * r^2) = 0,1963 \text{ m}^2$, Al agregar 1 litro en 1m² el agua profundiza 1 centímetro, en la superficie del anillo la misma profundizara 5 cm (sin contar con otros fenómenos que ocurren en el suelo como por ej la redistribución).

7) Una vez humedecido el suelo dejar reposar durante 15 días para realizar el muestreo, con el objetivo de mejorar el contacto suelo-tubo de lectura. Será necesario una semana antes del muestreo definitivo, tomar muestras de suelo para cada uno de los tubos y así determinar el contenido de humedad gravimétrico; de manera tal de saber con exactitud si el agua agregada para cada tratamiento fue la suficiente a fin de corregir errores con anticipación. Otra opción sería medir la humedad utilizando la sonda (datos relativos) para obtener así valores aproximados del contenido de humedad del suelo.

4 – Procedimiento para la lectura de humedad

8) Pasados los 15 días se procede a la lectura de humedad en cada tubo. Para ello se recomienda tomar 3 lecturas de cómputos brutos a cada profundidad para poder calcular la SF (frecuencias a escala). Tal como lo indica el manual de Sentek Pty Ltd Diviner 2000, Guía de Usuario Versión 1999-2003, estos serán los pasos a seguir a continuación:

9) Verifique que la batería del equipo Diviner 2000 se encuentre cargada, antes de ir al campo, luego de usarla vuelva a cargarla.

10) Para activar la unidad de visualización pulse la tecla *ON/OFF/RESET* firmemente. Así se visualizará la pantalla de estado:

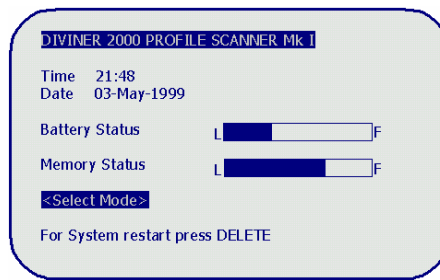


Foto 9. Pantalla de estado.

- 11) Conecte la sonda a la unidad de visualización.
- 12) Quite la tapa contra el polvo.
- 13) Alinee el conector de la sonda con el conector del panel (solo se enchufa de una sola forma, analice las formas para logra una conexión simple y optima)
- 14) Ahora la unidad de visualización ya está conectada a la sonda y podrá continuar con la configuración. Pulse la tecla *setup*, y a continuación:
 - Configure la fecha y la hora.
 - Registre los cómputos en bruto del aire y agua para la normalización de la sonda.
 - En la Foto N°: 12 se muestra la pantalla de setup o modo configuración:

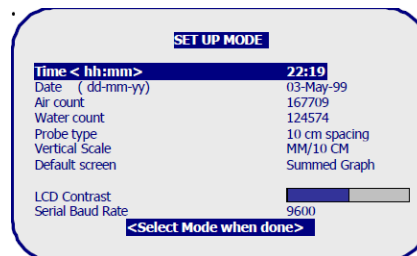


Foto 10. Modo configuración.

- 17) Se procede luego a la normalización del sensor. Para ello es necesario registrar los cómputos de la condición de aire y de agua. En caso de no haberlos registrados siga las siguientes indicaciones:
- 18) La puesta del cómputo del aire:
 - Con las flechas resalte la función *air count*.
 - Ponga la sonda dentro de un tubo, seco y sellado.
 - Mantea la sonda en el aire (durante 10 segundos) sin tocar ningún objeto solido.
 - Pulse *enter*.
 - Si la pantalla visualiza “*failed*” repita los pasos anteriores.
- 19) La puesta del cómputo agua:
 - Resalte la función *wáter count*.

- Pulse *enter*.
 - Inserte la sonda dentro del tubo de normalización.
 - Introduzca la sonda y el tubo dentro de un balde de 10 litros de agua lleno (debe existir 10 cm de agua por encima, debajo y a los laterales del sensor)
 - Espere 10 segundos, si en la pantalla aparece “*failed*” repita el procedimiento anterior.
- 20) Ajuste la escala vertical. Seleccione la configuración en centímetros o pulgadas
- 21) Pulse *enter* para guardar o con las flechas pase a la próxima opción. Para seleccionar si se desea las tablas separadas o sumadas, remarque *default screen*.



Foto 11. Sonda Diviner 2000 en posición de lectura.

Para tomar la medida de la frecuencia a escala (SF) siga el siguiente procedimiento:

- Desenrosque la tapa del tubo de lectura.
- Inserte la sonda.
- Atornille el casquete de sonda.
- Pulse *continuous*. (Este modo le permite tomar lecturas de manera continua pero la profundidad es seleccionada manualmente)
- Puse *continuous* nuevamente y visualizará el contenido de humedad del suelo a la profundidad que esté trabajando el sensor, además visualizará el cómputo bruto y la SF.
- Es preferible anotar el computo bruto de manera tal de poder calcular usted mismo la SF, así tendrá el dato anterior con todos los decimales posibles. Fórmula de cálculo:

$$SF = (F_a - F_s) / (F_a - F_w)$$

Donde: SF = escala de frecuencia. F_a = es la lectura de frecuencias en el tubo de lectura mientras se encuentra suspendido en el aire, F_s = es la lectura en el tubo de lectura en el suelo a un horizonte de profundidad específica F_w = es la lectura en el tubo de lectura en un balde de agua.

22) Tenga preparado las siguiente Tabla para registrar las lecturas SF, CB (cómputos brutos) y como dato complementario (humedad con la sonda sin calibración) por cada profundidad. No haga promedio de lecturas, regístrelas por separado. En el cuadro 10 se muestra el modelo utilizado en el presente trabajo:

Cuadro 9. Tabla utilizada a campo para el registro de datos.

Profundidad (cm)	Tubo N°:								
	SF	CB	HUM	SF	CB	HUM	SF	CB	HUM
0-10									
10-20									
20-30									
30-40									
40-50									
50-60									
60-70									
70-80									
80-90									
90-100									

23) Luego de haber completado las lecturas de SF (3 por profundidad y por tubo), excave las calicatas contra un frente del tubo para extraer muestras para densidad aparente cada 10 cm de profundidad. Se recomienda extraer 3 muestras por profundidad.

24) La ubicación correcta de muestreo es aquella que quede posicionada dentro del radio de influencia del sensor, es decir, dentro de un radio de 10 cm cercano al tubo de lectura (que la mitad del cilindro quede ubicado exactamente a la profundidad donde se midió el sensor), tal como se muestra en la foto N° 12.



Foto 12. Determinación de densidad aparente en inmediaciones al tubo de acceso.

- 25) Guarde las muestras de suelo en bolsas rotuladas en función del tubo y la profundidad a la que pertenece (ej.: tubo: seco-repetición 1-prof 0 a 10cm), retire el aire de su interior y cierre herméticamente. En caso de demorarse en el pesado de la muestra guárdelas en conservadoras o heladera hasta realizar el mismo y secado correspondiente.



Foto 13. Determinación de densidad aparente en diferentes profundidades.

- 26) Pesadas las muestras con su estado de humedad del momento de la lectura, someterlas a estufa a 105° C hasta que alcancen peso constante.
- 27) A continuación registre el peso seco. Ya estará en condiciones de calcular la densidad aparente y la humedad volumétrica.

4. Procedimiento para la obtención de parámetros de calibración y ajuste

- 28) Realice un grafico con la FS (frecuencia a escala) registrada en función de la humedad volumétrica para dicha profundidad. Tal como se muestra a continuación:

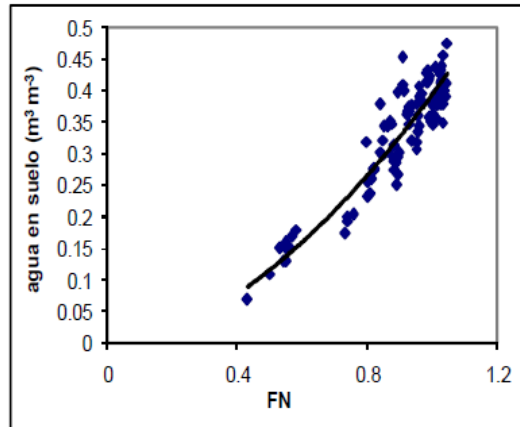


Figura 15. Curva de calibración (Marano *et al.*, 2012).

A través de la grafica se obtenga la ecuación de calibración y determine el coeficiente de regresión (R^2). La ecuación a obtener será la siguiente:

$$\Theta = a*FN^b$$

Donde:

SF: frecuencia a escala a, b = coeficientes de calibración dependientes de tipo de suelo, Θ_v = contenido volumétrico.

Mediante la obtención de los coeficientes de calibración, las futuras mediciones del nivel de agua en el perfil bajo estudio, se relacionan directamente a valores reales medidos en el suelo.

5. Procedimiento para validación

Debido a que existen 3 calibraciones posibles de utilizar, es necesario determinar cuál de ellas es la más acertada para poder ser empleada en su suelo de estudio.

Usted puede utilizar:

- La calibración de fábrica: sin ingresar al equipo los coeficientes de calibración, con la cual se obtienen valores relativos.
- Utilizar los coeficientes de calibración por profundidad, obtenidos en el proceso de calibración e ingresarlos al equipo.
- Utilizar los mismos coeficientes de calibración para todas las profundidades, obtenidos gracias a todas las mediciones realizadas durante la calibración y también ingresarlos al equipo.

Para saber cuál de estas tres calibraciones emplear, es necesario realizar la validación. Que consiste en la comparación de las tres calibraciones posibles con el contenido real de agua existente en el suelo en ese momento, este ultimo determinado con el método considerado como estándar que es el método gravimétrico.

BIBLIOGRAFIA

BRICCHI, E y A. DEGIOANNI. 2006. *Relaciones físicas entre el agua y el suelo*. En: Comp. Sistema suelo. Su origen y propiedades fundamentales. Universidad Nacional de Rio Cuarto. Córdoba, Argentina. 1ra Edición, Cap.13.p: 198.

CANTERO GUTIERREZ, A. y M. CISNEROS. 2004. *Documento de apoyo didáctico para el curso uso y manejo de suelos: Manejo del agua*. Universidad Nacional de Rio Cuarto. Córdoba, Argentina. Capitulo 3.

DA SILVA, R.C. 2012. *Calibração da sonda de capacitancia diviner 2000 em um argissolo*. En:

www.cpamn.embrapa.br/soloaguaclima/doc/Aderson/REs/CONBEA_2006/RE48.pdf.

Consultado: 28/02/15.

DE SANTA OLALLA MAÑAS, M. y F. LOPEZ. 2005. *Agua y agronomía*. 1ra ed. Ed. Printed in Spain, MADRID, ESPAÑA. 17 p.

ETCHEVEHERE, P. H. (1976). Normas de reconocimiento de suelos. Suelos. Publicacion-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (Argentina). no. 152.

FERRER, P. y SANZ E. 2008. *El uso de sondas capacitivas multisensor en sociedades de riego y el ahorro del agua en la comunidad valenciana*. En: www.coremagre.org/empresas/lanevera/Sondasyahorrodeagua_A17%ULTIMA%20VERSION.pdf. Consultado: 28/02/15.

FLORENTINO, A. 2011. *Métodos para medir el contenido de agua en el suelo*. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Estado Aragua, Venezuela. 48-70 p.

JARSUN, B., GORGAS, J. P, TASSILE Y OTROS. 2006. *Los suelos, Nivel de Reconocimiento 1:500000*. Agencia Córdoba Ambiente e INTA, EEA Manfredi.

MESTAS VALERO, R.M. 2011. *Régimen hídrico del suelo y evapotranspiración en áreas agrícolas y forestales*. Tesis doctoral. Universidad da Coruña, La Coruña, España. 203 p.

MARANO, R. P; CAMUSSI, G. 2012. *Uso de sondas FDR para balance de agua en suelo: calibración y aplicación*. En: www.riegoyferririego.com/VI_Jornadas/VI_JARF_TrabajosCompletos/Marano%20_34_pdf. Consultado: 14/03/15.

NELSON D. W. y L. E. SOMMERS. 1982. *Total carbón, organic carbon and Organic Matter* in A Klutte (ed.) *Methods of soil analysis Chemical and Microbiological Properties Part 2*. Ed Agron. Monogr. 9. ASA, Madison, WI. pp. 539-577.

OROZCO, A.L. 2009. *Uso eficiente del agua de riego mediante sondas de capacitancia*. En: www.unesco.org.uy/educacion/fileadmin/phi/aqualac/Orozco.pdf. Consultado: 17/02/15.

- RICHARDS, L. A., (1947). *Pressure membrane apparatus: construction and use*. Inglaterra. p 451-454.
- SATORRE, E.H, R.L.BENECH ARNOL, G.A.SLAFER, E.B. DE LA FUENTE, D.J. MIRALLES, M.E.OGUI Y R.SAVIN.2003. *Producción de grano: bases funcionales para su manejo*. 1ra Ed. FAUBA, Buenos Aires. 783p.
- SAXTON, K. E, y W. RAWLS. 2009. Soil wáter characteristics. *Hydraulic properties calculator*. En <http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>. Consultado 01/07/2015.
- SENTEK. 1999-2003. *Diviner 2000 guía de usuario*–versión 1.21. En: www.sentek.com.au/products/calibration.asp. Consultado: 21/02/15.
- SENTEK. 2001. *Diviner 2000, Calibration of the Sentek Pty Ltd Soil Moisture Sensors*. Australia. p: 54.
- SERMAN, V. F., y RODRIGUEZ S. 2005. *Evaluación del comportamiento de sensores de humedad de suelo de desarrollo local, en relación al contenido de agua y a la textura de suelo*. CONAGUA 2005. Mendoza Argentina.p:1-6.
- PARRA, B. y A. DEGIOANNI. 2014. *Agua en el suelo*. Documento preliminar de apoyo bibliográfico del Programa Curso Sistema Suelo. Universidad Nacional de Rio Cuarto. Facultad de agronomía y veterinaria. p 1-9.
- WEINZETTEL, P. y MARINERO, P. 2003. *Calibración de una sonda de una sonda de capacitancia en suelos Argiudoles de la zona central de la provincia de Bs. As. Argentina*. p: 165-170.
- ZAR, J.H., 1984. *Bioestatistical analysis*. Department of Biological Sciences, Northern Illinois University. EEUU. p 842.