

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA
MEMORIA DE TÍTULO

**MANEJO DEL RIEGO MEDIANTE UN MONITOREO HÍDRICO EN TIEMPO
REAL DETERMINADO CON LA TÉCNICA FREQUENCY DOMAIN
REFLECTOMETRY**

CARLOS LUIS ZÚÑIGA ESPINOZA

Santiago, Chile. 2004

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

MANEJO DEL RIEGO MEDIANTE UN MONITOREO HÍDRICO EN TIEMPO REAL
DETERMINADO CON LA TÉCNICA FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY

Memoria para optar al Título Profesional
de Ingeniero Agrónomo
Mención: Manejo de Suelos y Aguas

CARLOS LUIS ZÚÑIGA ESPINOZA

PROFESOR GUÍA	Calificaciones
Sr. Julio Haberland A. Ingeniero Agrónomo, PhD.	7,0
PROFESORES CONSEJEROS	
Sr. Rodrigo Callejas R. Ingeniero Agrónomo, Dr. sc. agr	6,7
Sr. Víctor García de Cortázar G. de C. Ingeniero Agrónomo, Dr. Ing.	6,8

Santiago, Chile. 2004

*A mis padres Luis y Adriana
a mi hermano Eduardo y mi tío Ismael.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todos los que de alguna forma ayudaron no solo en la realización de esta memoria, sino también a los que me han apoyado durante toda la carrera.

- * En primer lugar quisiera agradecer a mis padres y a mi hermano, especialmente a mi madre, por acompañarme siempre desde la distancia y por todos los esfuerzos que han realizado por mí.
- * A Agrícola San Clemente por permitarnos llevar a cabo esta memoria, especialmente a Don José Manuel Silva que siempre confió en mí y en mi trabajo.
- * A mi profesor guía Julio Haberland A., por quien siento una gran admiración, sus consejos y su ayuda han sido siempre de gran valor para mí.
- * A mis profesores consejeros Víctor García de Cortázar y Rodrigo Callejas por su ayuda y consejos.
- * A la Universidad de Chile, una institución de la que me enorgullezco ser parte y de la que siempre estaré agradecido.
- * A Víctor Rojas por su ayuda en las interminables lecturas con el equipo.
- * A Camilo Sagredo y Armando López por su ayuda con los análisis de laboratorio.
- * A Ismael, mi tío, quien siempre quiso que fuera astrónomo y aunque opté por quedarme en la Tierra, siempre ha sido para mí un amigo y un consejero.
- * Agradezco a mis amigos Gilbert, Leandro y Pablo Pavez, no solo por haber estado conmigo en los buenos momentos, sobre todo les agradezco haber estado en los malos.

TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
1. RESUMEN.....	1
Summary	3
2. INTRODUCCIÓN	5
Objetivos	6
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
El estado del agua en el suelo	7
Monitoreo hídrico en el suelo	8
Sistemas para determinar el contenido de agua del suelo.....	10
Frequency Domain Reflectometry	10
Calibración de un equipo FDR.....	13
4. MATERIALES Y MÉTODO	14
Lugar de estudio.....	14
Materiales.....	14
Método	14
5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	22
Calibración del equipo	22
Comparación entre el contenido de agua real y las lecturas entregadas por el equipo	24
Comparación de las lecturas de contenido de agua a cada profundidad medida.....	25
Comparación de las lecturas de contenido de agua en el perfil	26
Comparación de las lecturas de contenido de agua a distintos niveles de ésta en el suelo	27
Monitoreo del contenido de agua del suelo a través de la temporada.....	29
6. CONCLUSIONES	34
7. LITERATURA CITADA	35

Apéndice I	Ecuaciones de calibración equipo Diviner 2000	37
Apéndice II	Resultados de contenido de agua real y estimado por las opciones de calibración, por profundidad y para el perfil completo en los tubos de acceso usados en la calibración	39
Apéndice III	Curvas características de retención de agua en el suelo de la fase 2 de la serie Pudahuel	41

1. RESUMEN

Desde el 17 de diciembre del 2003 al 17 de marzo del 2004, se llevó a cabo un estudio tendiente a obtener las ecuaciones de calibración del equipo Diviner 2000 (FDR) y mostrar la evolución del contenido de agua del suelo, a través de lecturas periódicas obtenidas en tiempo real por el equipo. Todo esto para un suelo de la serie Pudahuel cultivado con uva de mesa var. Thompson Seedless, cuyo manejo del riego se basó en la reposición de la evapotranspiración y la revisión de calicatas.

Para alcanzar los objetivos planteados, se determinaron periódicamente las lecturas de frecuencia en tres tubos de acceso ubicados en el suelo en cuestión, paralelamente se calibró el equipo para las condiciones particulares del suelo. Para la calibración se ubicaron tres pares de tubos de acceso a distintos contenidos de agua cada par, se tomaron las frecuencias con el equipo en cada tubo de acceso, cada 0,10 m hasta los 0,60 m de profundidad y luego a través de un foso se tomaron muestras de suelo, para determinar el contenido de agua a cada profundidad leída. La ecuación de la curva de contenido de agua v/s frecuencia normalizada (relación entre la frecuencia leída en el tubo de acceso en el suelo y la leída por el equipo al aire y al agua), corresponde a la ecuación de calibración para la profundidad en cuestión.

Se obtuvo las ecuaciones de calibración para los 0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,50, y 0,60 m de profundidad ($R^2=0,9255$, $RMSE=0,0177$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,9143$, $RMSE=0,0429$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,9619$, $RMSE=0,0320$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,939$, $RMSE=0,0401$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,7342$ $RMSE=0,0642$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,5882$ $RMSE=0,0780$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)). Se obtuvo además una ecuación de calibración para el perfil completo, que resultó de la relación contenido de agua v/s frecuencia de todos los datos de todos los tubos de acceso ($R^2=0,8125$, $RMSE=0,0467$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)). Luego de obtenidas las ecuaciones de calibración, se hicieron análisis tendientes a establecer la ecuación más precisa en determinar el contenido de agua real. Las comparaciones se realizaron empleando: la ecuación de

calibración de fábrica, las ecuaciones de calibración por profundidad y la ecuación de calibración para el perfil. Los resultados mostraron a las ecuaciones por profundidad como las más precisas. Se reemplazaron los valores de las frecuencias leídas periódicamente durante la temporada, en las ecuaciones de calibración por profundidad y se obtuvo la evolución del contenido de agua del suelo durante el período de estudio. Es así que el tubo instalado en la parte alta del relieve, la mayoría de las veces medidas (53,97%) presentó déficit en el contenido de agua, el tubo ubicado en la parte media la mayor parte del tiempo estuvo con un contenido en exceso (el 46,77 % de las veces medidas) y en tanto el tubo de la parte baja prácticamente todas las veces estuvo con un contenido excesivo de agua (96,83%). Este estudio demuestra la factibilidad y conveniencia del uso del equipo Diviner 2000 en la determinación y monitoreo, en tiempo real, del contenido de agua del suelo.

Palabras clave

Monitoreo hídrico, capacitancia, FDR, calibración Diviner 2000, movimiento del agua en el suelo.

Summary

During the 2003-2004 growing season, a study was performed in order to obtain the Diviner 2000 customized calibration equations on a Vitrandic Durixerolls (Mollisol) in the central area of Chile. In addition the evolution of the soil water content was monitored with the Diviner 2000, checking the irrigation management based on pan evaporation and soil pit evaluation.

Three sets of access tubes were installed and kept at different water content condition (wet, moist and dry). These readings allowed generating a calibration curve, since the water content read by the sensor was compared to the real water content measured on soil samples taken right next to the access tube. The instrument readings were taken in depth with increments of 0,1 m from starting at 0,1 m down to 0,6 m. The soil samples were taken at the same depths.

A calibration curve relating frequency readings and water content was generated, for individual horizons and the whole profile. Calibrations equations at 0,1, 0,20, 0,30, 0,40, 0,50, 0,60 m were obtained with ($R^2=0,9255$, $RMSE=0,0177$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,9143$, $RMSE=0,0429$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,9619$, $RMSE=0,0320$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,939$, $RMSE=0,0401$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,7342$ $RMSE=0,0642$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $R^2=0,5882$ $RMSE=0,0780$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)) respectively. Moreover a soil profile calibration equation was obtained using all soil water content data versus frequency readings of all access tubes ($R^2=0,8125$, $RMSE=0,0467$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)).

After the calibrations equations were obtained, the resulting values were analyzed to define the most accurate equation to determine the real soil water content. The equation comparisons were realized using: the default calibration equations, adding individual depth calibration equations and the complete profile calibration equation. The results showed that

the addition of individual depth calibrations equations were the most accurate ones to determine the real soil water content.

In addition three locations in the field were monitored along the season. The soil of all location was similar differing in topographic position, therefore in soil water balance. The sensor was able to show clearly this differences, so the access tube located in the highest point showed 53,97 % of measured times, water deficit, the one located in the middle showed water excess 46,77 % of the measured times, and the one in the lowest point 96,83 % of the times indicated water excess as well. This study demonstrated the feasibility and convenience of the use of the Diviner 2000 sensor in the determination and monitoring of real time soil water content.

Key words

Hidric monitoring, capacitance, FDR, Diviner 2000 calibration, water movement in the soil.

2. INTRODUCCIÓN

El agua juega un papel clave en toda producción agrícola. A través de su correcta utilización se pueden crear las condiciones óptimas para el crecimiento de los cultivos. Para utilizar el agua correctamente, se debe planificar el riego a través de una estrategia de manejo adecuada, en la que se considere la demanda del cultivo, la disponibilidad del recurso y la existencia de características ambientales similares. Una estrategia de manejo que considera estos tres aspectos es el monitoreo hídrico. A través del monitoreo hídrico se determinan cambios en el contenido de agua del suelo, producto de las diferencias entre las entradas, salidas y almacenamiento de agua que se produce en éste. Para la utilización del monitoreo hídrico, es necesario definir estados de déficit, equilibrio o superávit de agua en el suelo, respecto a un estado de referencia previamente establecido.

Existen diversas herramientas que permiten realizar estos monitoreos, sin embargo uno de los de más reciente desarrollo es la técnica Frequency Domain Reflectometry o FDR. Los instrumentos que utilizan esta técnica combinan precisión y prontitud en la entrega de datos, lo que permite tomar las decisiones poco tiempo después de la ocurrencia de los eventos en terreno.

Este estudio tiene por objetivos: calibrar en terreno un equipo Frequency Domain Reflectometry para las condiciones del área en estudio. Comparar las lecturas de contenido de agua obtenidas con la calibración de fábrica y las del equipo calibrado. Realizar un monitoreo hídrico en tiempo real, hecho con los datos entregados por el sistema Frequency Domain Reflectometry, en un predio de la localidad de San José de Marchigüe, comuna de Pichidegua, VI Región.

Objetivos

- Calibrar en terreno un equipo Frequency Domain Reflectometry para las condiciones del área en estudio.
- Comparar las lecturas de contenido de agua, obtenidas con la calibración de fábrica y la calibración de terreno.
- Programar el manejo del riego mediante monitoreos hídricos en tiempo real, realizados con los datos entregados por el sistema Frequency Domain Reflectometry.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El estado del agua en el suelo

Todo elemento en la naturaleza se mueve desde donde la energía potencial es alta hacia otro donde es baja, el agua del suelo también sigue esta tendencia, moviéndose constantemente en la dirección de disminuir su energía potencial (Hillel, 1971).

El potencial del agua del suelo, expresa la energía potencial específica de ésta respecto a un estado de referencia estándar. El estado de referencia estándar usado es el de un reservorio hipotético de agua pura y libre, a presión atmosférica, a la misma temperatura de la del suelo (o a cualquier otra temperatura específica) y a una altura dada y constante. Puesto que la elevación del reservorio de referencia puede ser definida a voluntad, el potencial determinado por comparación con este estándar no es absoluto, consecuentemente a través del empleo de un criterio arbitrario se puede determinar la magnitud relativa de la energía potencial específica del agua en diferentes lugares o tiempos dentro del suelo (Hillel, 1971).

El agua en el suelo está sujeta a numerosas fuerzas, las que hacen que su potencial difiera del potencial de agua pura y libre. Algunas de las fuerzas que reducen el potencial del agua son: la atracción de la matriz sólida por el agua, la presencia de solutos, la acción de presión de gas externa y la gravedad. De acuerdo a esto el potencial total de agua del suelo puede ser definido como la suma de las contribuciones por separado de esos varios factores (Hillel, 1971):

$$\phi_t = \phi_g + \phi_m + \phi_n + \phi_o \quad (\text{ec. 1})$$

ϕ_t = Potencial total del agua del suelo, se define como la cantidad de trabajo por unidad de masa que se debe realizar para transportar una cantidad infinitesimal de agua

desde un reservorio de agua pura, ubicado a una altura determinada y a presión atmosférica, a un punto específico del suelo (Hillel, 1971).

ϕ_g = Potencial gravitacional, es la cantidad de trabajo por unidad de masa que se debe realizar, para transportar una cantidad infinitesimal de agua, idéntica en composición a la del suelo, desde un reservorio ubicado a una altura determinada y a presión atmosférica, a una fuente similar pero a la altura de un punto específico del suelo.

ϕ_n = Se refiere al efecto de una presión de gas externa, que difiere de la presión atmosférica, sobre el estado energético del agua.

ϕ_o = Potencial osmótico, es la cantidad de trabajo que se debe realizar para transportar una cantidad infinitesimal de agua desde un reservorio de agua pura, ubicado a una altura específica y a presión atmosférica, a otro reservorio idéntico en composición al del agua del suelo del punto en consideración, pero igual al del punto de referencia en todos los otros aspectos (altura y presión) (Canadian soil information system, 2001).

ϕ_m = Potencial mátrico, corresponde al efecto de la fase sólida sobre el estado energético del agua en los sistemas suelo-agua y cuantifica la energía de retención del agua por la matriz porosa (Benavides, 1994).

Monitoreo hídrico en el suelo

El monitoreo hídrico consiste en la determinación de un cambio en el contenido de agua (ΔW) producto de las entradas, salidas y almacenamiento que se producen en un volumen específico de suelo durante un lapso determinado de tiempo.

La cantidad de agua que ingresa a un sistema agrícola cultivado, está representada por la precipitación (P), el riego (I), o ambas, además del ascenso capilar (CR), generalmente expresados en altura de agua o unidades de caudal.

Por otro lado, el agua puede salir del suelo por percolación profunda (D_p), evapotranspiración ($E+T$), procesos de escurrimiento superficial (ΔE_s), y por flujos subsuperficiales (ΔSF), aunque estos dos últimos parámetros pueden ser considerados también como una ganancia si es que los aportes son mayores que las salidas (Figura 1). Así, se puede expresar el balance total de agua en el suelo a través de la siguiente ecuación:

$$\Delta W = P + I + CR \pm \Delta SF - D_p \pm \Delta E_s - (E+T) \quad (\text{ec. 2})$$

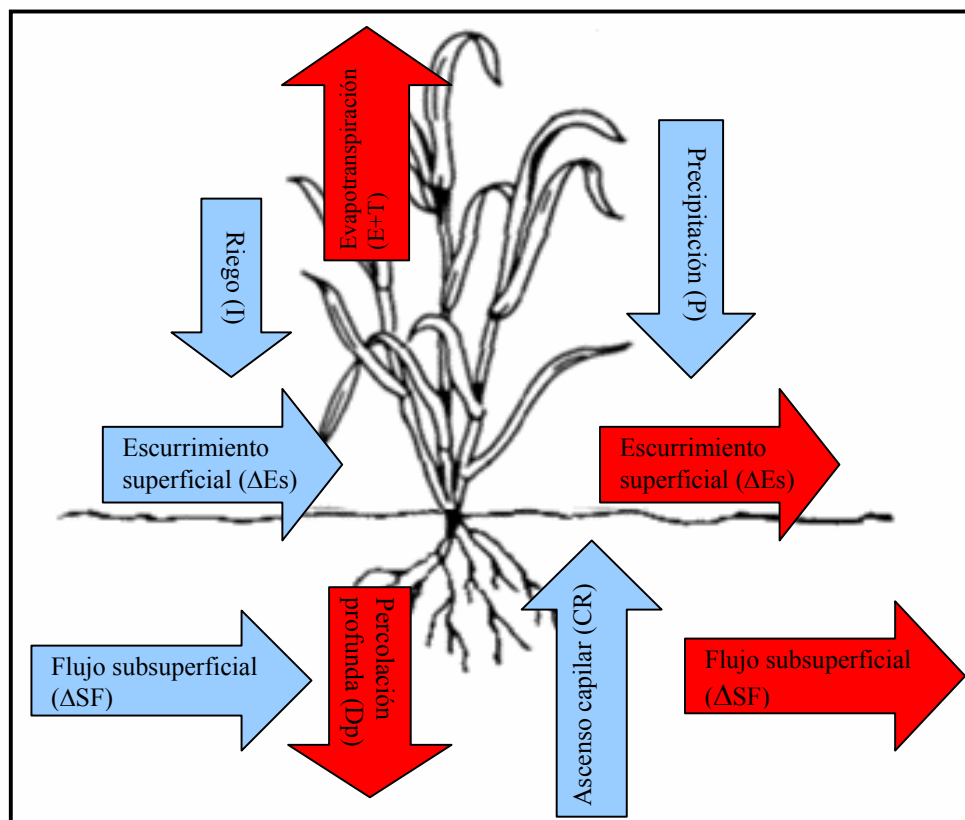


Figura 1. Componentes de un balance hídrico en el suelo.

Para los sistemas de riego tecnificado es fácil determinar la cantidad de agua que ingresa por riego tan solo multiplicando la cantidad de emisores por el caudal entregado en cada uno de estos. El agua que sale del sistema por percolación profunda se puede determinar como la diferencia entre el agua aportada por riego y la capacidad de retención

del suelo. La cantidad de agua que escurre por la superficie del suelo, en sistemas de riego por goteo, se considera despreciable, ya que representa un valor menor en comparación con los otros componentes del balance. La evapotranspiración, al igual que el agua que ingresa por precipitación, se puede determinar a través de una estación meteorológica. Por otra parte los cambios en el contenido de agua del suelo, se pueden determinar a través de diversos sistemas, siendo los más usados: el sistema de Aspersion de Neutrones, el sistema Time Domain Reflectometry (TDR) o más recientemente el sistema Frequency Domain Reflectometry (FDR) (Hillel, 1971; Castillo y Castellví, 1996; FAO, 1998).

De los sistemas antes mencionados, el de más reciente desarrollo es Frequency Domain Reflectometry, a continuación se presenta una descripción detallada de este equipo.

Sistemas para determinar el contenido de agua del suelo

Frequency Domain Reflectometry

Frequency Domain Reflectometry (FDR), o también llamada técnica de capacitancia. Este se basa en la medición de la constante dieléctrica para determinar el contenido de agua del suelo, midiendo el tiempo de carga de un condensador que utiliza el suelo como medio dieléctrico (Wacker, 2002).

Para entender mejor lo anterior es necesario definir lo que es capacitancia: cuando se conectan a las terminales de una fuente de alimentación dos elementos metálicos paralelos, una cantidad de las cargas de la alimentación se desplazará a estos elementos. Si la alimentación es desconectada, una pequeña cantidad de energía eléctrica quedará almacenada en el arreglo y se irá liberando poco a poco según sea el material de las placas y las condiciones de aislación entre éstas.

La capacitancia es por consiguiente la medida de la capacidad de almacenamiento de la carga eléctrica y está definida como la cantidad de carga almacenada por unidad de diferencia de potencial aplicada, matemáticamente:

$$C = Q \cdot V^{-1} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde Q es la cantidad de carga almacenada, V el voltaje o diferencia de potencial aplicado y C la capacitancia medida en Faraday (Tripod, 2000).

Para un condensador de placa paralela, la capacitancia es una función de la constante dieléctrica del medio entre las placas y se puede calcular a través de:

$$C = K \cdot A \cdot S^{-1} \quad (\text{ec. 4})$$

Donde A es el área de las placas y S es la separación entre las placas. Dado que A y S son valores fijos, el tiempo de carga del condensador es una función lineal (idealmente) de la constante dieléctrica del medio (K) que lo rodea y ésta presenta una relación directa con el contenido de agua del suelo (Wacker, 2002). La constante dieléctrica del agua pura a 20°C y a presión atmosférica es de 80,4, la de los sólidos del suelo es de 3 a 7 y la del aire es 1 (Paltineanu y Starr, 1997). Topp *et al* (1980) a través de experimentos de laboratorio determinaron de manera empírica la relación entre la constante dieléctrica del suelo y su contenido volumétrico de agua.

Con frecuencia los sensores de capacitancia o FDR son confundidos con los sistemas Time Domain Reflectometry o TDR, ya que ambos miden la constante dieléctrica del suelo, pero la forma de hacerlo es distinta. Como se señaló anteriormente, el sistema FDR mide el tiempo de carga de un condensador y esto es función de la constante dieléctrica del suelo que rodea al condensador, en cambio, el sistema TDR determina la constante dieléctrica de un medio, midiendo el tiempo que demora una onda electromagnética en propagarse por una línea de transmisión, el tiempo que demora es función de la constante dieléctrica del medio que rodea la línea de transmisión. La

frecuencia a la que trabajan los equipos FDR es entre 1 MHz y 100 MHz y los TDR a frecuencias mayores, entre 1 MHz y 1 GHz, lo que hace a estos últimos menos sensibles a la salinidad. Otras diferencias son: El tiempo requerido por los FDR para tomar una lectura es mucho menor que el necesitado por el equipo TDR, las mediciones en los equipos FDR son realizadas fácilmente con circuitos estándar. Todo esto hace que los sensores FDR sean mucho más baratos y simples de usar que los equipos TDR. Dado que los primeros son algo más sensibles a la salinidad y la temperatura, en suelos con alta conductividad eléctrica se requiere una calibración especial del equipo (Wacker, 2002). En la Figura 2 se muestra un esquema de un equipo FDR.

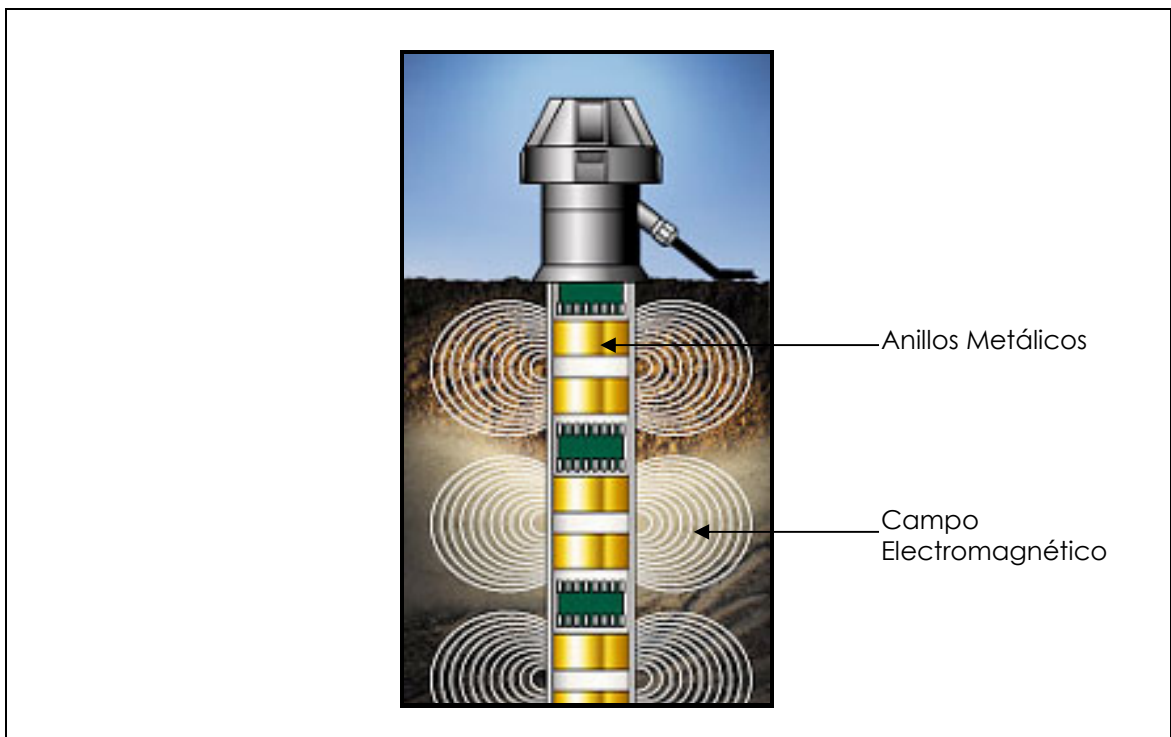


Figura 2. Esquema de un sistema Frequency Domain Reflectometry. (Fuente: Lindsay, 2000)

Calibración de un equipo FDR

La calibración de un instrumento de medición de contenido de agua, se hace alineando las mediciones del instrumento con aquellas que están establecidas como método estándar para determinar ese mismo valor. Cuando esas mediciones son contrastadas en un gráfico, forman una relación descrita a través de una ecuación matemática. De esta forma, los niveles de agua medidos por el instrumento, se relacionan directamente a valores reales medidos en el suelo.

Los instrumentos de medición, no entregan automáticamente valores absolutos de contenido de agua para todos los suelos. Para medir valores absolutos de contenido de agua del suelo de un lugar, es necesario generar una calibración específica para ese lugar. Sin embargo una calibración específica, no se puede extender a otros sitios para generar valores absolutos, ya que solo es representativa de un área con las mismas propiedades del suelo para el que se obtuvo la calibración (Sentek, 2001).

4. MATERIALES Y MÉTODO

Lugar de estudio

La investigación se llevó a cabo en un sector de riego de 5 ha, de un predio propiedad de Agrícola San Clemente, ubicado en San José de Marchigüe, comuna de Pichidegua, VI Región. El sector pertenece a la serie de suelos Pudahuel¹, cultivado con uva de mesa cv. Thompson Seedless, y posee un sistema de riego con doble línea de goteo, con goteros distanciados a un metro.

Materiales

- Un sistema Frequency Domain Reflectometry, Diviner 2000.
- 9 tubos de acceso de 0,051 m de diámetro interno y 0,60 m de largo.
- Complementos de los tubos de acceso (tapones, tapas, anillos de corte, etc.).
- Equipo de instalación de tubos de acceso.
- Estación meteorológica Watch Dog.
- Cápsulas y estufa para el secado de muestras de suelo.
- Estudio agrológico agrícola San Clemente.¹
- Curvas de retención de agua.¹

Método

El equipo FDR Diviner 2000 consiste en una barra que en uno de sus extremos posee una sonda, la que al ser introducida y retirada del tubo de acceso a examinar, mide la frecuencia del campo electromagnético que se genera en el suelo. Dada la relación que existe entre esta frecuencia y la constante dieléctrica del suelo, a través de la capacitancia,

¹ Julio Haberland A., Ing. Agrónomo PhD, 2003. (Comunicación personal)

el equipo determina el contenido de agua del suelo cada 0,10 m, poseyendo un radio de acción de igual longitud.

Para calibrar el Diviner 2000, se siguió el procedimiento de calibración recomendado por la empresa que fabrica el equipo (Sentek, 2001), como se detalla a continuación:

1.- Se seleccionó una superficie, dentro del sector de riego a estudiar, de 14 m de ancho por 6 m de largo, donde se ubicaron 6 tubos en la sobrehilera, que se dividieron en tres mediciones distintas y dos repeticiones para cada medición:

- En la medición 1 (M1) se ubicaron dos tubos en suelo seco.
- En la medición 2 (M2) se ubicaron también dos tubos pero en suelo con un contenido de agua intermedio respecto de la medición 1 y 3.
- En la medición 3 (M3) dos tubos en un suelo con un contenido alto de agua.

Las mediciones se separaron siete metros una de otra. Las repeticiones se distanciaron por tres metros. Todas las mediciones fueron ubicadas en la serie de suelos Pudahuel.

Para lograr llegar a los estados de contenido de agua necesarios, a los tubos de la medición 1 se les quitó el aporte de agua de las laterales de riego, a la medición 2 se le quitó una de las laterales de riego y a la medición 3 además de tener las dos laterales se le hizo un aporte extra de agua, que fue vaciada en una piscina construida alrededor del tubo de manera de saturar el perfil, después de esto se esperaron 24 horas para dejar drenar el exceso de agua.

El ubicar los tubos en suelos con distintos contenidos de agua, tiene por finalidad cubrir la mayor parte del rango de contenidos de agua posibles de encontrar en el suelo.

2.- Establecidas las mediciones y repeticiones, y una vez alcanzados los contenidos de agua proyectados, se procedió a tomar lecturas de las frecuencias en las dos repeticiones de cada medición, se tomaron dos lecturas cada 0,10 m.

3.- Las lecturas de frecuencia que entrega el sistema, fueron convertidas a lecturas de frecuencias normalizadas (SF) según la siguiente ecuación:

$$SF = (F_A - F_S) / (F_A - F_W) \quad (\text{ec. 5})$$

Donde:

F_A = Lectura realizada por el Diviner 2000 en un tubo de PVC al aire (159391 kHz).

F_W = Lectura realizada por el Diviner 2000 en un tubo de PVC sumergido en agua (119269 kHz).

F_S = Lectura en un tubo de PVC en el suelo a cada profundidad en particular.

4.- Los resultados se guardaron en tablas, clasificados según la medición, número de repetición y profundidad a la que se midió.

5.- Inmediatamente después de obtenidas las lecturas con el equipo, se construyó un foso al lado de cada tubo, a una distancia que no permitiera que el suelo a medir se disturie (0,30 m), este foso se construyó hasta la profundidad máxima que se pudo lograr enterrar los tubos de acceso, es decir, 0,60 m.

6.- A través de este foso, se tomaron dos muestras de suelo con cilindros metálicos de volumen conocido, en las dos repeticiones de cada tratamiento, a cada profundidad medida. Para ello se fue desenterrando el tubo construyendo una serie de plataformas, los cilindros se enterraron sobre estas plataformas tan cerca del tubo como fue posible, pero sin tocarlo, de manera tal que quede posicionado dentro del radio de influencia del sensor, es decir, 0,10 m. La mitad del cilindro quedó ubicado exactamente a la profundidad donde se midió, para ello se construyó la plataforma a una profundidad equivalente a aquella donde se midió menos la mitad del alto del cilindro.

7.- Se removieron los cilindros, el suelo contenido en ellos fue depositado en bolsas rotuladas según la medición, la repetición y la profundidad a la que se obtuvo la muestra, luego se sellaron con cinta adhesiva. En el laboratorio de riego de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, se determinó el contenido de agua de cada muestra de suelo por gravimetría. A una de las muestras colectadas, se determinó su densidad aparente. El resultado de densidad aparente multiplicado por el contenido gravimétrico de agua del suelo permitió obtener el contenido volumétrico de agua de las muestras.

8.- Los resultados, al igual que los de las lecturas determinadas con la sonda, fueron guardados en tablas, clasificados según la medición, número de repetición y profundidad a la que se midió.

9.- Con todos estos datos se hicieron pares, entre el contenido volumétrico de agua de las muestras, obtenidas en laboratorio, y sus respectivas lecturas de frecuencia normalizada. Luego se diseñó una gráfica, donde la variable independiente fue el contenido volumétrico de agua de las muestras, y la dependiente los valores de frecuencia normalizada, obtenida con las lecturas realizadas por el Diviner 2000.

10.- A través de esta gráfica se obtuvo una ecuación de calibración y mediante análisis de regresión se determinó el coeficiente de determinación (R^2).

La ecuación obtenida debe ser de la forma:

$$SF = A\theta^B \quad (\text{ec. 6})$$

Donde:

SF= Conteo de frecuencia normalizada

θ = Contenido de agua del suelo, expresado como porcentaje volumétrico

A= Constante

B= Constante

Despejando el contenido volumétrico, éste queda determinado por la siguiente ecuación:

$$\theta = (SF/A)^{1/B} \quad (\text{ec. 7})$$

A través de este procedimiento se obtuvieron los componentes A y B de la ecuación.

Además del coeficiente R^2 , para cada ecuación se determinó el error estándar de la estimación (RMSE) entre el contenido de agua real de las muestras y lo estimado a través de las ecuaciones de calibración, mediante la siguiente ecuación (Berenson y Levine, 1997):

$$\text{RMSE} = (\sum(y-\hat{y})^2/(n-2))^{1/2} \quad (\text{ec. 8})$$

Donde:

RMSE= Error estándar de la estimación de las lecturas.

y = Contenido de agua real de las muestras ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)

\hat{y} = Contenido de agua estimado al utilizar las ecuaciones de calibración

n = Número de muestras

En la práctica, la forma de ingresar los datos de calibración al equipo Diviner 2000 es por profundidad, es decir, a cada profundidad que mide el equipo se le debe ingresar los valores de la ecuación de calibración que se estime conveniente, este hecho entrega dos posibles formas de obtener ecuaciones de calibración:

- Conseguir una ecuación de calibración para cada profundidad a medir por el equipo. Cada una de estas ecuaciones se obtiene del análisis de regresión de los pares, entre el contenido volumétrico y su respectiva lectura de frecuencia normalizada, a una profundidad en particular. En este caso se debe ingresar a cada profundidad los valores de la ecuación de calibración que le corresponda.

- Conseguir solo una ecuación de calibración para todo el perfil. Esta se obtiene del análisis de regresión de todos los pares formados, entre el contenido volumétrico y su respectiva lectura de frecuencia normalizada, independiente de la profundidad a que corresponda. En este caso, nada más bastaría ingresar para cada profundidad los mismos componentes de la ecuación de calibración, obtenida por este expediente, de los datos de terreno.

En este estudio se realizaron las dos posibles formas de obtención de ecuaciones anteriormente descritas.

Resumiendo, existen al menos tres opciones a usar como calibración del equipo Diviner 2000:

- Usar la ecuación de calibración de fábrica.
- Usar una ecuación de calibración independiente para cada profundidad a medir, obtenida del proceso de calibración en terreno.
- Usar una misma ecuación de calibración para todo el perfil, obtenida también del proceso de calibración en terreno.

Es necesario entonces determinar cuál de estas opciones de calibración emplear. Es por eso que el segundo objetivo del estudio fue comparar lecturas de contenido real de agua, con lo estimado por las distintas opciones de calibración.

Ya que para la calibración del Diviner 2000, se determinaron los contenidos de agua real y para cada una se obtuvo la frecuencia que leyó el equipo, reemplazando las respectivas lecturas de frecuencia de cada muestra en las ecuaciones de calibración, se podía obtener lo estimado por el equipo como contenido de agua para esa muestra. Por lo tanto, empleando estos datos se compararon las lecturas de las tres opciones de calibración, en la estimación del contenido de agua del suelo. Los distintos análisis se detallan en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Análisis realizados y variables a obtener para determinar la opción de calibración más precisa en la obtención del contenido de agua del suelo.

Análisis	Variable a obtener
Se compararon las lecturas de las opciones de calibración en la determinación del contenido de agua a cada profundidad leída.	Error estándar de la estimación (RMSE) entre el contenido real de agua a cada profundidad medida y lo determinado por el equipo a través de cada opción de calibración.
Se compararon las lecturas de las opciones de calibración en la determinación del contenido de agua en el perfil de suelo.	Variación porcentual entre el contenido real de agua en el perfil y lo determinado por el equipo a través de cada opción de calibración.
Se compararon las lecturas de las opciones de calibración a distintos niveles de contenido de agua en el suelo, desde saturación a punto de marchitez permanente.*	Promedio de la variación (en valor absoluto), entre el contenido real de agua de las muestras y lo estimado por el equipo, para cada intervalo de retención.

* El criterio ocupado para agrupar las muestras en distintos niveles de contenido de agua fue a través de la retención de ésta en el suelo, para determinar este valor se recurrió a las curvas características de suelo del lugar de estudio. Los intervalos fueron: 0-10; 10-33; 33-300; 300-1500+ (kPa).

Luego de calibrado el equipo y habiendo establecido la ecuación más precisa en determinar el contenido de agua del suelo en cuestión, la investigación fue enfocada a alcanzar el tercer objetivo. Este consistió en realizar un monitoreo hídrico del suelo del lugar de estudio con el equipo Diviner 2000 calibrado, durante la temporada 2003-2004. En ese período, el lugar fue regado siguiendo la metodología habitual del predio, es decir, utilizar balances hídricos y revisión de calicatas. A través de este monitoreo, se determinó las veces en que el agua aplicada fue excesiva, adecuada o deficiente.

Para realizar el monitoreo, en el lugar se dispusieron en la sobrehilera tres tubos de acceso, uno de los tubos se ubicó en la parte alta del relieve, otro en la parte media y el tercero en la parte baja. Cada uno fue examinado con regularidad a partir del 17 de diciembre del 2003 al 17 de marzo del 2004.

Para el manejo se determinó como contenido de agua apropiado del suelo el rango entre capacidad de campo y umbral de riego. A partir de las curvas características de la serie, se determinaron los valores de contenido de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente y se fijó un umbral de riego de 30%.

Ya que las ecuaciones de calibración del equipo Diviner 2000, solo pudieron ser obtenidas al final de la temporada, el monitoreo consistió en determinar, a cada profundidad analizada, las frecuencias básicas que utiliza el sensor, para que una vez obtenidas las ecuaciones de calibración, reemplazar esas frecuencias en la ecuación más precisa y obtener el contenido de agua del suelo, tal como lo hubiera leído el equipo calibrado.

5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Calibración del equipo

La ecuación de calibración del equipo Diviner 2000, se obtiene del análisis de regresión entre el conteo de frecuencia normalizada del equipo (SF) y el contenido volumétrico de agua del suelo (Θ_v) a cada profundidad medida, determinado en laboratorio a través del secado y pesado de muestras. El proceso de calibración puede ser llevado a cabo en campo o en laboratorio, la investigación aquí realizada y analizada, corresponde a una calibración de campo. En el Cuadro 2 se resumen las ecuaciones y sus componentes obtenidos, para cada profundidad medida y para el perfil completo, además del coeficiente de determinación de cada curva (R^2) y el error estándar de la estimación (RMSE) de las mismas.

Cuadro 2. Ecuaciones de calibración para las distintas profundidades medidas y para el perfil de suelo.

Profundidad (m)	Constante A	Constante B	Ecuación de calibración	* R^2	RMSE ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
0,10	0,3130	0,3106	SF=0,3130 $\theta_v^{0,3106}$	0,9255	0,0177
0,20	0,3014	0,2988	SF=0,3014 $\theta_v^{0,2988}$	0,9143	0,0429
0,30	0,3477	0,2697	SF=0,3477 $\theta_v^{0,2697}$	0,9619	0,0320
0,40	0,4150	0,2168	SF=0,4150 $\theta_v^{0,2168}$	0,9390	0,0401
0,50	0,5294	0,1450	SF=0,5294 $\theta_v^{0,145}$	0,7342	0,0642
0,60	0,4884	0,1593	SF=0,4884 $\theta_v^{0,1593}$	0,5882	0,0780
Perfil	0,3734	0,2470	SF=0,3734 $\theta_v^{0,247}$	0,8125	0,0467

* Valor R^2 de ajuste de la curva de calibración a los datos medidos en terreno.

Como se puede apreciar en el Cuadro 2, del proceso de calibración se obtuvo dos tipos de ecuaciones: Una ecuación de calibración para cada profundidad medida y una ecuación de calibración para todo el perfil de suelo medido.

Respecto del ajuste de las ecuaciones de calibración a los datos medidos en terreno, se desprende una buena correlación ($R^2 > 0,91$) para los primeros 0,40 m de suelo, pero se aprecia una disminución de la correlación ($R^2 < 0,75$) más allá de esta profundidad. La ecuación de calibración para el perfil, presentó un comportamiento intermedio respecto de las ecuaciones de calibración por profundidad ($R^2 = 0,8125$).

Diversas investigaciones de los procesos de calibración de equipos FDR, sólo hacen mención de la obtención de una ecuación de calibración para el perfil, no a una ecuación individual para cada profundidad. Paltineanu y Starr (1997), a través de una calibración de laboratorio, con un equipo similar al Diviner 2000 (EnviroSCAN), obtuvieron una ecuación de calibración para el perfil cuyo R^2 fue de 0,992. Resultados similares obtuvieron Groves y Rose (2004), quienes con un equipo Diviner 2000, también en laboratorio, lograron ecuaciones de calibración para el perfil de seis suelos distintos, cuyos R^2 variaron entre 0,97 y 0,93. Como se puede apreciar, los valores de R^2 en ambas investigaciones son cercanos a los obtenidos por este estudio en las ecuaciones por profundidad hasta los 0,40 m, pero se alejan del alcanzado en la ecuación para el perfil y las ecuaciones de los 0,50 y 0,60 m de profundidad. Respecto del valor del RMSE, aparece citado sólo por los primeros, estableciéndolo en $0,009 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, valor que difiere de los encontrados en este estudio.

En contraposición Morgan *et al.* (1999), obtuvieron una ecuación de calibración para el perfil con un equipo igual al ocupado por Paltineanu y Starr (1997), pero a diferencia de ellos, su investigación corresponde a una calibración de campo. Los resultados indican que el valor R^2 obtenido fue de 0,831, similar al de la ecuación para el perfil obtenida a través de este estudio, y menor que el de las ecuaciones por profundidad hasta los 0,40 m.

La diferencia de los resultados respecto a otros investigadores, puede atribuirse a que en las calibraciones de laboratorio se hace más fácil obtener valores precisos de densidad aparente, que en las calibraciones de campo. Esto porque se trabaja con densidades uniformes en el perfil, diferente de lo que pasa en terreno donde la densidad aparente puede ser variable. El valor de densidad aparente es esencial en la obtención del contenido volumétrico de agua del suelo, antecedente básico en el proceso de calibración. Por otro lado en las dos investigaciones de laboratorio citadas, el número de datos es limitado en comparación a los que se utilizaron en este estudio para la obtención de la ecuación de calibración del perfil.

Comparación entre el contenido de agua real y las lecturas entregadas por el equipo

Obtenidas las ecuaciones de calibración, existen al menos tres opciones para ésta:

- a. Para cada profundidad medida, utilizar la ecuación de calibración de fábrica (calibración de fábrica).
- b. Para cada profundidad medida, utilizar la ecuación de calibración que le corresponde (calibración por profundidad).
- c. Para cada profundidad medida, utilizar la ecuación de calibración del perfil (calibración para el perfil).

Ya que se contaba con los contenidos de agua real de las muestras utilizadas en la calibración y sus respectivas lecturas de frecuencia, con estos datos se desarrollaron una serie de experiencias, cuyo fin fue seleccionar la opción de calibración más precisa en la determinación del contenido de agua del suelo, las experiencias fueron las siguientes:

- Se compararon las lecturas de las opciones de calibración en la determinación del contenido de agua del suelo, a cada profundidad medida.
- Se compararon las lecturas de las opciones de calibración en la determinación del contenido de agua del perfil de suelo.

- Se compararon las lecturas de las opciones de calibración en la determinación del contenido de agua a distintos niveles de ésta en el suelo.

Comparación de las lecturas de contenido de agua a cada profundidad medida

Como se señaló con anterioridad, una característica del equipo Diviner 2000 es que tiene la facultad de medir a intervalos de 0,10 m de profundidad, esta particularidad hizo necesario comparar las lecturas de las calibraciones propuestas a las distintas profundidades medidas en un mismo perfil. Con este fin se determinó para los perfiles usados en la calibración, el error estándar de la estimación entre el contenido de agua real a cada profundidad medida, y lo estimado por el equipo para esas mismas profundidades. Los resultados obtenidos aparecen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Resultados de el error estándar de la estimación entre el contenido de agua real y el obtenido con las opciones de calibración a las distintas profundidades medidas en cada tubo de acceso.

Tubo de acceso	Error estándar de la estimación con la calibración de fábrica ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Error estándar de la estimación con la calibración por profundidad ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Error estándar de la estimación con la calibración del perfil ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
1	0,064	0,013	0,029
2	0,071	0,036	0,055
3	0,051	0,049	0,058
4	0,063	0,095	0,069
5	0,053	0,050	0,043
6	0,076	0,059	0,054

Al comparar los resultados que aparecen en el Cuadro 3, no se aprecian diferencias notables en los errores obtenidos empleando las distintas opciones de calibración. Se puede

establecer que, salvo en el tubo 4, el error estándar de la estimación es menor empleando las calibraciones obtenidas en terreno que utilizando la calibración de fábrica. Comparando las dos calibraciones obtenidas en terreno es difícil determinar cual es más precisa, ya que ambas muestran variaciones similares en la determinación del contenido de agua por profundidad.

Comparación de las lecturas de contenido de agua en el perfil

Además de poder presentar los resultados por profundidad, el equipo también puede sumar todos los valores obtenidos para las distintas profundidades en un perfil, y desplegar el contenido total de agua en el perfil. Por lo tanto, se determinó el comportamiento del equipo utilizando esta propiedad. Para ello, se compararon el contenido de agua real, de cada perfil usado en la calibración, con lo determinado por el equipo utilizando las opciones de calibración (Cuadro 4).

Cuadro 4. Contenido de agua real de cada perfil usado en la calibración y lo estimado por el equipo con cada opción de calibración (cal.).

Tubo	Contenido de agua real en el perfil	Estimado cal. fábrica		Estimado cal. por profundidad		Estimado cal. perfil	
		h agua (mm)	Variación (%)	h agua (mm)	Variación (%)	h agua (mm)	Variación (%)
1	52,46	81,10	54,59	52,21	0,47	57,59	9,79
2	86,90	109,83	26,39	88,35	1,67	88,48	1,82
3	193,66	199,16	2,84	190,93	-1,41	190,71	-1,52
4	163,45	179,50	9,82	158,07	-3,29	167,03	2,19
5	169,36	177,50	4,80	166,34	-1,78	163,00	-3,76
6	134,04	162,20	21,00	151,02	12,67	144,67	7,93

En el Cuadro 4, se puede observar que las variaciones en la determinación del contenido de agua del perfil, son menores y más regulares en las calibraciones de terreno, que en la calibración de fábrica. Comparando las dos calibraciones de terreno, ambas se muestran precisas, pero las variaciones son menores, en la mayoría de los casos, en la calibración por profundidad.

Por último, en la calibración para el perfil las variaciones fueron siempre menores al 10 %, en el caso de la calibración por profundidad no superaron el 13% y en la calibración de fábrica superaron el 54%, estos datos evidencian las variaciones al utilizar una u otra opción de calibración. Sin embargo, el Cuadro 3 muestra que las variaciones de las lecturas por profundidad, de donde se derivan las lecturas del perfil, fueron similares al utilizar cualquier opción de calibración, esta incongruencia se explica porque la calibración de fábrica sobreestimó el contenido real de agua en casi todos los casos, por lo tanto las variaciones por profundidad fueron aditivas, no así en las calibraciones de terreno donde las variaciones se compensaron (Apéndice II).

Comparación de las lecturas de contenido de agua a distintos niveles de ésta en el suelo

Un último análisis consistió en comparar las lecturas de las opciones de calibración, a distintos contenidos de agua en el suelo, desde saturación a punto de marchitez permanente. El criterio ocupado para ello fue agrupar todos los resultados de las muestras usadas en la calibración, en distintos intervalos de retención de agua en el suelo. Los intervalos utilizados fueron: 0-10; 10-33; 33-300; 300-1500+ (kPa). Para ubicar las muestras en cada intervalo se recurrió a las curvas características del suelo en cuestión. Ubicados los resultados de las muestras, cada uno de estos se pareó con su respectiva lectura del equipo, determinándose la diferencia en valor absoluto, entre lo real y lo estimado, luego se determinó el promedio de esa diferencia en el intervalo. Son estos últimos, los resultados que aparecen en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Promedio de las diferencias, en valor absoluto y variación porcentual promedio, entre el contenido de agua real y el obtenido con el equipo, a distintos intervalos de retención de agua en el suelo.

Intervalo de retención (kPa)	Diferencia promedio usando calibración de fábrica (mm)	Var. (%)	Diferencia promedio usando calibración por profundidad (mm)	Var. (%)	Diferencia promedio usando calibración perfil (mm)	Var. (%)
0-10	4,91	18,54	4,76	17,57	4,82	17,39
10-33	6,30	34,82	1,83	10,08	2,89	16,09
33-300	5,76	57,83	1,51	13,67	3,01	29,33
300-1500+	2,71	31,94	1,48	18,16	2,41	25,48

En el rango de saturación (0-10 kPa), se puede observar que la variación respecto al real no difiere de manera sustancial al utilizar cualquiera de las opciones de calibración. Sin embargo, cuando el contenido de agua disminuye (10-33 kPa), la variación utilizando la calibración por profundidad, es menor que empleando la calibración para el perfil o la de fábrica. Si sigue disminuyendo el contenido de agua (33-300 kPa), se observa el mismo comportamiento anterior, es decir, una menor diferencia empleando la calibración por profundidad que las otras dos alternativas. Con un contenido aún más bajo (300-1500+ kPa), la calibración por profundidad todavía muestra una menor variación respecto al real.

Se puede establecer que existe mayor imprecisión en el rango de saturación (0-10 kPa) en las tres opciones de calibración. Tomer y Anderson (1995), comparando un aspersor de neutrones y un sistema de capacitancia, establecieron que el sistema de capacitancia era menos preciso a menores contenidos de agua, la explicación de este comportamiento se basó en que la curva descrita por la ecuación de calibración de aquel equipo de capacitancia, disminuía su pendiente a medida que descendía el contenido de agua. En el Diviner 2000 pasa lo contrario, cuando el contenido de agua es alto, la pendiente de la curva de calibración disminuye, por lo tanto en esos rangos, el equipo es menos sensible a los cambios en el contenido de agua.

La calibración de fábrica presentó en todos los intervalos de retención, las mayores variaciones en la determinación del contenido de agua. La calibración por profundidad fue la alternativa más precisa en determinar el contenido de agua, a distintos niveles de ésta en el suelo.

Analizando las tres situaciones a las que se pusieron a prueba las opciones de calibración, la mayor precisión en la determinación del contenido de agua del suelo tanto a cada profundidad medida como en el perfil, se logró utilizando las calibraciones de terreno, presentando ambas un comportamiento similar en sus estimaciones. Sin embargo, ya que a distintos niveles de contenido de agua, la calibración por profundidad fue la más cercana al real, se seleccionó a ésta como la opción más precisa en la determinación del contenido de agua del suelo del lugar de estudio.

Monitoreo del contenido de agua del suelo a través de la temporada

El lugar de estudio fue regado según el criterio ocupado en el predio, a través de la revisión de calicatas y la reposición de parte de la evapotranspiración, en función del coeficiente de cultivo. Durante la temporada se monitorearon periódicamente con el Diviner 2000 en tres tubos de acceso, ubicados en la parte alta, media y baja del relieve, las frecuencias básicas que mide el equipo. Las lecturas fueron tomadas desde el 17 de diciembre del 2003 al 17 de marzo del 2004. Estas frecuencias se reemplazaron en la calibración por profundidad, ya que se seleccionó como la más precisa, y así se obtuvo la evolución del contenido de agua del suelo durante la temporada.

En el Cuadro 6 se muestra la profundidad y fase de serie de suelos donde se ubicaron los tubos de acceso, aparecen además los valores de capacidad de campo, umbral de riego y punto de marchitez permanente, para cada perfil de suelo asociado a los tubos de acceso.

Cuadro 6. Profundidad, fase de la serie de suelos donde se ubicaron los tubos de acceso y valores de capacidad de campo, umbral de riego y punto de marchitez permanente, para cada perfil asociado a los tubos de acceso.

Tubo de acceso	Profundidad (m)	Fase de la serie de suelo donde se ubicaron	Contenido de agua (mm)		
			Capacidad de campo	Umbral de riego (30%)	Punto de marchitez permanente
1	0,60	1	101,00	82,06	37,85
2	0,60	2	121,10	101,09	54,40
3	0,50	2	99,10	82,03	42,20

La serie Pudahuel presenta textura franco arenosa, lo que además de favorecer el movimiento de agua en el suelo, genera una baja capacidad de retención de agua en el mismo. Esta serie presenta en el predio tres fases, definidas principalmente por la ubicación topográfica y la profundidad a que se encuentra un duripán silícico. La fase 1 ocupa las partes más altas del relieve y la fase 2 sectores más bajos que la fase anterior, la fase 3 no estaba representada en el lugar de estudio pero ocupa sectores más bajos que la fase 1 y 2². En la Figura 3 se presenta un esquema de la ubicación de los tubos de acceso.

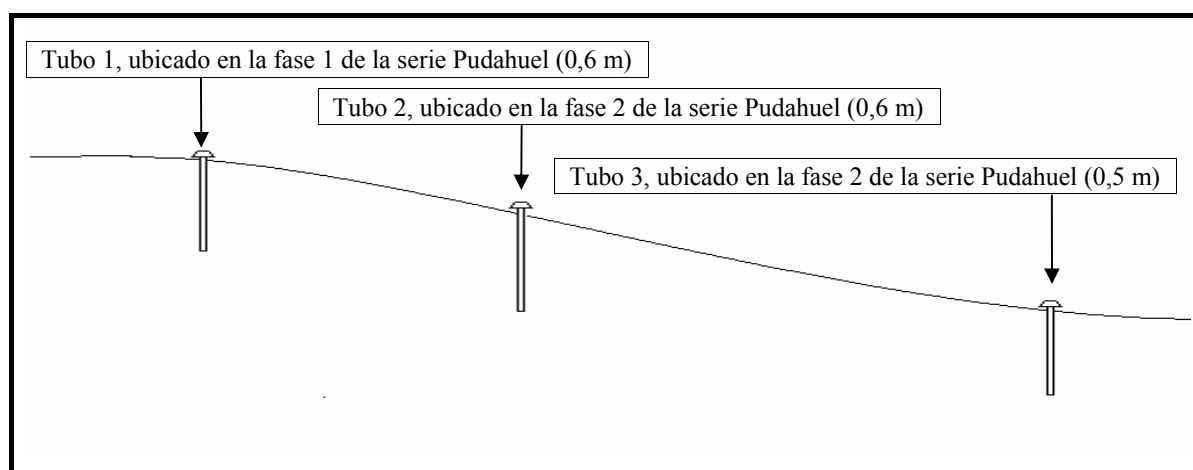


Figura 3. Esquema de la ubicación de los tubos de acceso en el lugar de estudio.

² Julio Haberland A., Ing. Agrónomo PhD, 2003. (Comunicación personal)

La Figura 4 muestra la evolución del contenido de agua del perfil de suelo (0,60 m) asociado al tubo de acceso 1. Este tubo ocupó la parte más alta del relieve del lugar de estudio.

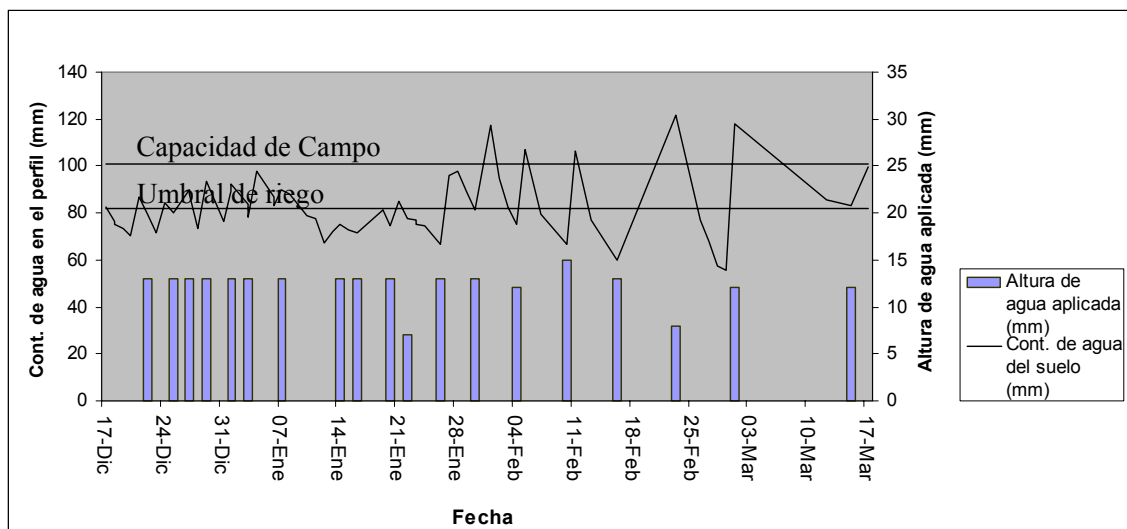


Figura 4. Evolución en el tiempo del contenido de agua del perfil de suelo en el tubo de acceso 1 monitoreado con el Diviner 2000 calibrado por profundidad.

Como se puede apreciar en la Figura 4, en el 53,97% de las lecturas el perfil asociado al tubo 1 presentó déficit en su contenido de agua, un 38,10% el suelo se encontró con un contenido de agua adecuado y en exceso un 7,94% de las veces. Este comportamiento se explica porque la fase 1, presenta texturas franco arenosas que se hacen más gruesas en profundidad y ocupa las partes más altas de los lomajes, estos dos factores contribuyeron a que el movimiento de agua se viera favorecido, drenando con facilidad los excesos hacia partes más bajas.

En la Figura 5 se muestra la evolución del contenido de agua del perfil de suelo (0,60 m) asociado al tubo 2. Este tubo ocupó la parte media del relieve del lugar de estudio.

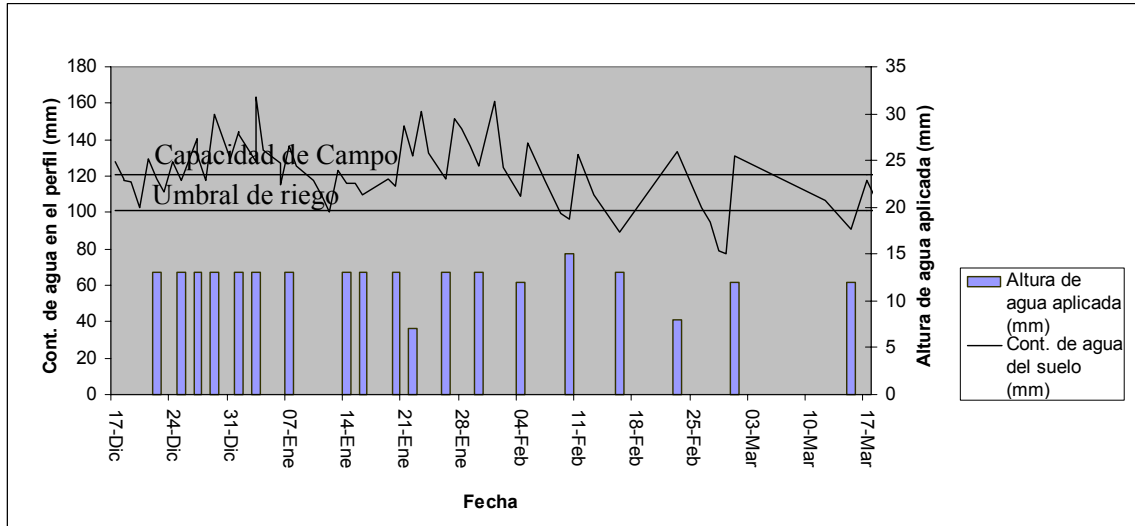


Figura 5. Evolución en el tiempo del contenido de agua del perfil de suelo en el tubo de acceso 2 monitoreado con el Diviner 2000 calibrado por profundidad.

En el perfil asociado al tubo 2 la condición de déficit se presenta el 14,52% de las lecturas medidas, la condición adecuada un 38,71% y la excesiva un 46,77%. La fase 2, al estar ubicada en un sector más bajo que la fase 1, recibe el agua que ésta drena. Por poseer un drenaje lateral limitado y presentar un duripán que restringe el drenaje en profundidad, la fase 2 no permite una rápida evacuación de los excesos de agua. Estas razones explican el mayor contenido de agua en el perfil de suelo, respecto al tubo 1.

En la Figura 6 se muestra la evolución del contenido de agua del perfil de suelo (0,50 m) asociado al tubo 3, este tubo ocupó la parte más baja del relieve del lugar de estudio, su menor profundidad implica el cambio en los valores de capacidad de campo y umbral de riego.

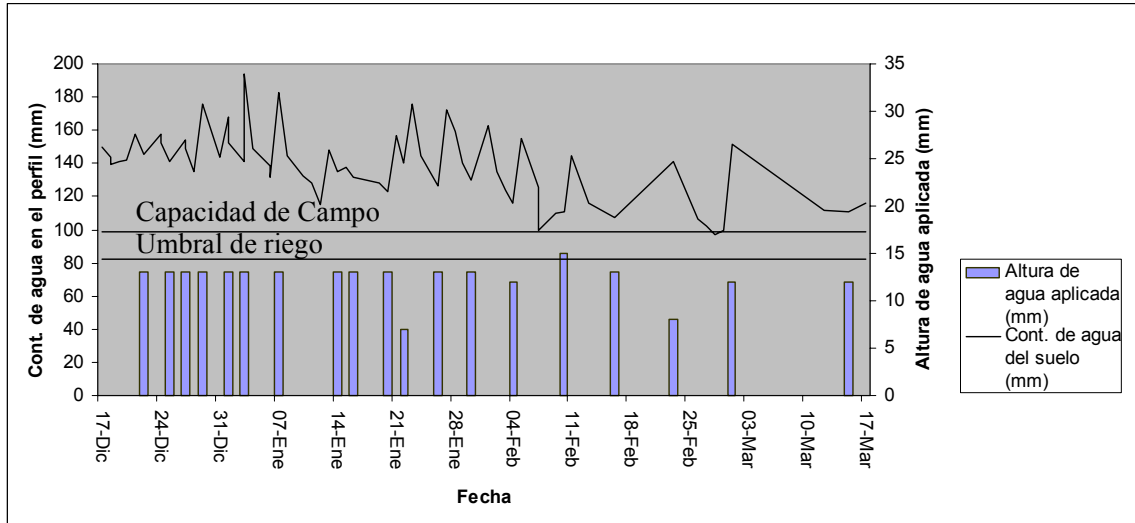


Figura 6. Evolución en el tiempo del contenido de agua del perfil de suelo en el tubo de acceso 3 monitoreado con el Diviner 2000 calibrado por profundidad.

El tubo de acceso 3, prácticamente todos los días presenta agua en exceso, solo 2 días (3,17% de las veces medidas) el contenido de agua estuvo dentro del rango correcto, ningún día el contenido de agua fue deficitario. Las razones que explican este comportamiento son las mismas que en el tubo 2, el tubo 3 se ubicó en la parte más baja del relieve y recibió el agua drenada de las partes más altas, ya que su drenaje es limitado por la presencia del duripán, su contenido de agua prácticamente siempre fue excesivo.

De los datos anteriormente expuestos, se desprende la necesidad de realizar un manejo diferenciado del riego, en el que se estime el contenido de agua del suelo y se considere los aportes por movimientos laterales de agua en el mismo, como se puede apreciar, el monitoreo hídrico a través del Diviner 2000 representa una alternativa que puede dimensionar estos factores.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo a las condiciones en que se realizaron los ensayos, las conclusiones son las siguientes:

- A través de una calibración de terreno, se obtuvo dos tipos de ecuaciones de calibración en el equipo Diviner 2000 (FDR), una ecuación de calibración para cada profundidad medida y una ecuación de calibración para el perfil de suelo, ambas para las condiciones particulares de un suelo de la serie Pudahuel.
- Las correlaciones obtenidas por las ecuaciones de calibración por profundidad, para los primeros 0,40 m fueron altas ($R^2 > 0,91$) en relación a las ecuaciones para los 0,50 y 0,60 m ($R^2 < 0,75$). La correlación de la ecuación de calibración para el perfil tuvo un comportamiento intermedio ($R^2 > 0,81$) respecto de las ecuaciones de calibración por profundidad.
- Las calibraciones de terreno resultaron más precisas que la calibración de fábrica, en la determinación del contenido de agua a cada profundidad medida y en el perfil.
- Las calibraciones de terreno y la calibración de fábrica, mostraron ser imprecisas en la determinación del contenido de agua del suelo, cuando éste es cercano a saturación (0-10 kPa). Sin embargo, la calibración por profundidad fue la más precisa de las alternativas, en la determinación del contenido de agua a distintos niveles de ésta en el suelo.
- El equipo calibrado demostró ser una confiable alternativa para monitorear y determinar en tiempo real el contenido de agua del suelo, además permite apreciar las diferencias de contenidos hídricos en el terreno cuando el drenaje es restringido.

7. LITERATURA CITADA

BENAVIDES, C. 1994. El suelo como sistema físico. En: Suelos una visión actualizada del recurso Segunda edición. Publicaciones misceláneas agrícolas N° 38.

BERENSON, M., LEVINE, D. 1996. Estadística básica en administración, conceptos y aplicaciones. Prentice Hall Hispanoamericana. 943 p.

CANADIAN SOIL INFORMATION SYSTEM. 2001. Water, soil. [en línea]. Disponible en el WWW: <http://sis.agr.gc.ca/cansis/glossary/water,_soil.html> (consulta: 02 Junio 2003).

CASTILLO, F., y CASTELLVÍ, F. 1996. Evapotranspiración. pp. 259-279. En: Agrometeorología. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España.

FAO. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. [en línea] Disponible en el WWW: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e06.jpg> (consulta: 4 Agosto 2003).

GROVES S. and ROSE S. 2004. Calibration equations for Diviner 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. Soil use and management. 20:96-97.

HILLEL, D. 1971. The state of water in the soil. En: Soil and Water: Physical principles and processes. New York Academic press. pp. 49-77.

LINDSAY. 2000. Soil moisture systems. [en línea] Disponible en el WWW: http://www.lindsaymanufacturing.com/growsmart/growsmart_gs_soilmoisture_main.asp (consulta: 28 Mayo 2003).

MORGAN K., PARSONS R., WHEATON T., PITTS D., OBREZA T. 1999. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. Soil Science Society of America Journal. 63:987-989

PALTINEANU I. and STARR J. L. 1997. Real time dynamics using multisensors capacitance probes: Laboratory calibration. Soil Science Society of America Journal. 61:1576-1585

SENTEK Pty Ltd. 2001. What is calibration?. En: Calibration of the Sentek Pty Ltd Soil Moisture Sensors. Sentek Pty Ltd. pp. 3-4.

TOMER, M. and ANDERSON J. 1995. Field evaluation of a soil capacitance probe in a fine sand. Soil Science. 159: 90-98.

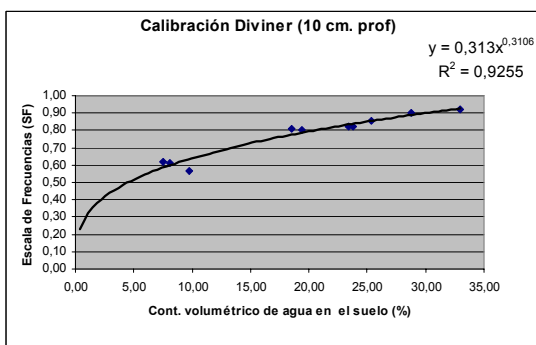
TOPP, G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmissions lines. Water Resources Research. 16: 574-582.

TRIPOD. 2000. Capacitancia. [en línea] Disponible en el WWW: <http://www.la-cantina.tripod.com/documentos/Capacitancia.doc> (consulta: 06 mayo 2003).

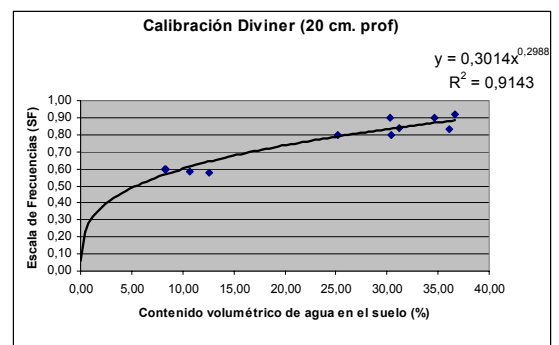
WACKER, B., 2002. What is TDR and FDR exactly?. [en línea] Disponible en el WWW: <http://www.sowacs.com/sensors/whatistdrfdr.html> (consulta: 06 mayo 2003).

Apéndice I

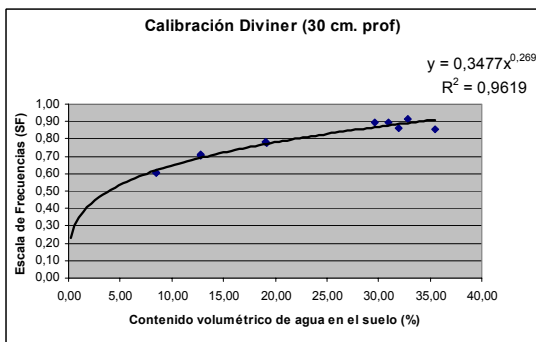
Ecuaciones de calibración equipo Diviner 2000



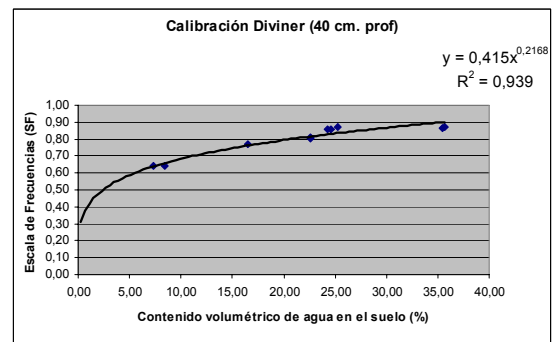
Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000, para los 0,10 m de profundidad, de la serie Pudahuel.



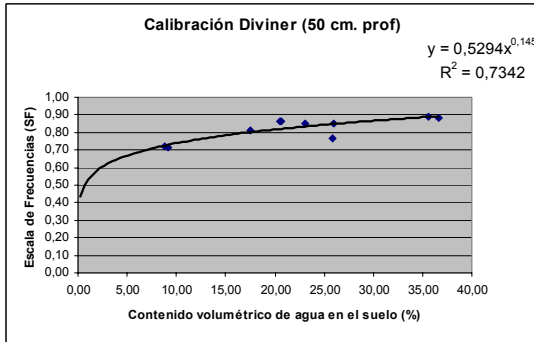
Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000, para los 0,20 m de profundidad, de la serie Pudahuel.



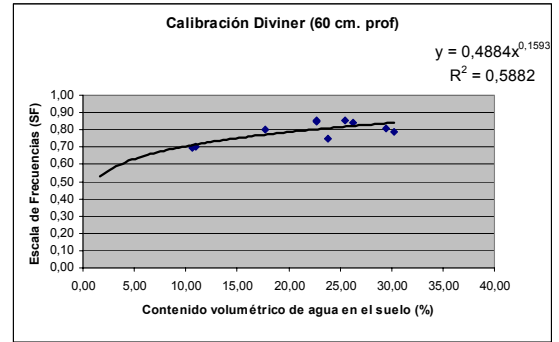
Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000, para los 0,30 m de profundidad, de la serie Pudahuel.



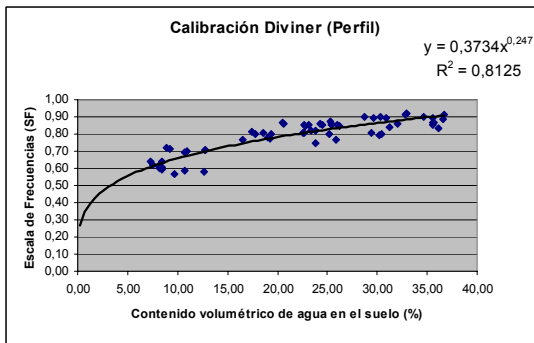
Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000, para los 0,40 m de profundidad, de la serie Pudahuel.



Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000, para los 0,50 m de profundidad, de la serie Pudahuel.



Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000, para los 0,60 m de profundidad, de la serie Pudahuel.



Curva y ecuación de calibración del equipo Diviner 2000, para el perfil de suelo de la serie Pudahuel.

Apéndice II

Resultados de contenido de agua real y estimado por las opciones de calibración, por profundidad y para el perfil completo en los tubos de acceso usados en la calibración

Tubo de acceso 1

Prof. (m)	Frecuencia kHz	SF	Densidad aparente (Mg·m ⁻³)	Cont. de agua real (mm)	Cont. de agua estimado cal. fábrica	Cont. de agua estimado cal. por prof.	Cont. de agua est. cal. perfil
0,10	134500	0,620	1,23	7,51	11,70	9,05	7,81
0,20	135300	0,600	1,31	8,20	10,60	10,04	6,84
0,30	135080	0,606	1,35	8,45	10,90	7,84	7,10
0,40	133710	0,640	1,26	8,46	12,80	7,38	8,86
0,50	130560	0,719	1,21	8,86	18,20	8,22	14,16
0,60	131260	0,701	1,30	10,97	16,90	9,68	12,82
Total Perfil				52,46	81,10	52,21	57,59

Tubo de acceso 2

Prof. (m)	Frecuencia kHz	SF	Densidad aparente (Mg·m ⁻³)	Cont. de agua real (mm)	Cont. de agua estimado cal. fábrica	Cont. de agua estimado cal. por prof.	Cont. de agua est. cal. perfil
0,10	136750	0,564	1,18	9,73	8,80	6,67	5,32
0,20	136160	0,579	1,18	12,61	9,53	8,89	5,91
0,30	131000	0,708	1,18	12,79	17,40	13,94	13,30
0,40	128550	0,769	1,35	16,55	22,30	17,17	18,60
0,50	126840	0,811	1,38	17,49	26,30	18,99	23,14
0,60	127170	0,803	1,38	17,73	25,50	22,69	22,21
Total Perfil				86,90	109,83	88,35	88,48

Tubo de acceso 3

Prof. (m)	Frecuencia kHz	SF	Densidad aparente (Mg·m ⁻³)	Cont. de agua real (mm)	Cont. de agua estimado cal. fábrica	Cont. de agua estimado cal. por prof.	Cont. de agua est. cal. perfil
0,10	123320	0,899	1,12	28,76	35,80	29,88	35,07
0,20	123410	0,897	1,15	34,60	35,50	38,44	34,72
0,30	123590	0,892	1,23	29,64	35,01	32,93	34,02
0,40	124530	0,869	1,52	35,63	32,30	30,21	30,55
0,50	123630	0,891	1,49	35,57	34,95	36,33	33,87
0,60	127070	0,806	1,34	29,45	25,60	23,13	22,49
Total Perfil				193,66	199,16	190,93	190,71

Tubo de acceso 4

Prof. (m)	Frecuencia kHz	SF	Densidad aparente (Mg·m ⁻³)	Cont. de agua real (mm)	Cont. de agua estimado cal. fábrica	Cont. de agua estimado cal. por prof.	Cont. de agua est. cal. perfil
0,10	124990	0,857	1,13	25,36	31,10	25,65	28,95
0,20	123410	0,897	1,15	30,35	35,50	38,44	34,72
0,30	122790	0,912	1,23	32,78	37,40	35,75	37,20
0,40	124400	0,872	1,52	25,25	32,70	30,74	31,01
0,50	128600	0,767	1,49	25,90	22,20	12,95	18,48
0,60	129370	0,748	1,34	23,80	20,60	14,55	16,68
Total Perfil				163,45	179,50	158,07	167,03

Tubo de acceso 5

Prof. (m)	Frecuencia kHz	SF	Densidad aparente (Mg·m ⁻³)	Cont. de agua real (mm)	Cont. de agua estimado cal. fábrica	Cont. de agua estimado cal. por prof.	Cont. de agua est. cal. perfil
0,10	126460	0,821	1,15	23,79	27,20	22,28	24,26
0,20	125900	0,835	1,16	36,10	28,60	30,24	25,97
0,30	125030	0,856	1,19	35,51	30,90	28,28	28,81
0,40	125030	0,856	1,34	24,64	30,90	28,27	28,81
0,50	125260	0,851	1,34	23,10	30,30	26,34	28,04
0,60	125540	0,844	1,47	26,22	29,60	30,93	27,12
Total Perfil				169,36	177,50	166,34	163,00

Tubo de acceso 6

Prof. (m)	Frecuencia kHz	SF	Densidad aparente (Mg·m ⁻³)	Cont. de agua real (mm)	Cont. de agua estimado cal. fábrica	Cont. de agua estimado cal. por prof.	Cont. de agua est. cal. perfil
0,10	127020	0,807	1,11	18,56	25,80	21,09	22,63
0,20	127400	0,797	1,16	30,47	24,90	25,94	21,57
0,30	128310	0,775	1,19	19,20	22,90	19,50	19,19
0,40	126930	0,809	1,34	22,60	26,10	21,74	22,88
0,50	124670	0,865	1,34	20,52	31,90	29,64	30,05
0,60	125170	0,853	1,42	22,69	30,60	33,11	28,34
Total Perfil				134,04	162,20	151,02	144,67

Apéndice III

Curvas características de retención de agua en el suelo de la fase 2 de la serie Pudahuel

Profundidad (m)	Retención de Agua (kPa)						Ecuación de línea de Tendencia	Coef. de determinación
	10	33	100	300	1000	1500		
0-0,30	19,5	14,2	12,9	9,3	7,6	7,7	$y = -0,0231 \ln(x) + 0,2352$	$R^2 = 0,9481$
0,30-0,50	15,7	11,2	8,2	7,3	3,4	2,4	$y = -0,0250 \ln(x) + 0,2070$	$R^2 = 0,9369$
0,50-1,10	14,6	13,2	10,8	8,5	7,6	7,3	$y = -0,0154 \ln(x) + 0,1810$	$R^2 = 0,9517$
1,10-1,20	12,5	11,0	9,8	6,8	6,3	6,2	$y = -0,0135 \ln(x) + 0,1560$	$R^2 = 0,8915$