



EVALUACIÓN DE UN EQUIPO DE MEDIDA CONTINUA DE HUMEDAD BASADO EN LA REFLECTOMETRÍA EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS EN UN SUELO ENARENADO

FERNÁNDEZ, M.D.
BONACHELA, S.
CONTRERAS, A.
GONZÁLEZ, A.M.

Se autoriza la reproducción íntegra o parcial
citando su procedencia: Estación Experimental de
Cajamar 'Las Palmerillas'

XXII Congreso Nacional de Riegos. La Rioja.
15 – 17 Junio 2004.

EVALUACIÓN DE UN EQUIPO DE MEDIDA CONTINUA DE HUMEDAD BASADO EN LA REFLECTOMETRÍA EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS EN UN SUELO ENARENADO

Fernández Fernández M^a D.¹ (P), Bonachela Castaño S.², Contreras Sánchez A.³, González Céspedes A. M^a¹

¹ Dra. Ingeniero Agrónomo. Estación Experimental de Cajamar "Las Palmerillas". Autovía del Mediterráneo, km 416,7. 04710 El Ejido (Almería). E-mail: laspalmerillas@cajamar.es. www.laspalmerillas.cajamar.es

² Dr. Ingeniero Agrónomo. Profesor Titular de la Universidad de Almería, Departamento de Producción Vegetal. La Cañada de San Urbano s/n. Almería.

³ Ingeniero Técnico Agrícola. Wageningen University and Research Centre, Horticultural Production Chains group, Marijkeweg 22 (building number 527) 6709 PG Wageningen, The Netherlands.

ABSTRACT

Continuous monitoring of volumetric soil water content (VSWC) has recently been introduced for irrigation scheduling of greenhouse horticultural crops in South-East Spain. This work assessed the behaviour of a capacitance sensor (FDR, EnviroScanTM) for measuring the VSWC in two greenhouse horticultural crops grown in an enarenado soil. Simultaneously, the VSWC was measured with a Time Domain Reflectometry (TDR) sensor.

VSWC measurements carried out in the enarenado soil by capacitance sensors (default calibration) were firstly compared with those obtained gravimetrically. Water content values were clearly higher with capacitance sensors (47% y 57 % higher in the imported and natural soil layer, respectively) and, then, a specific calibration curve was determined. By contrast, the enarenado VSWC was correctly measured by the TDR (default calibration).

Later, the VSWC dynamic for an autumn-spring cycle of tomato and a spring cycle of green beans was simultaneously monitored with capacitance and TDR sensors. In the whole tomato cycle, VSWC values from the capacitance sensors (specific enarenado calibration) were clearly lower than those from the TDR. This fact can, at least partially, be attributed to the capacitance probe installation method. In the green bean cycle, where a new method for installing the capacitance probes was used, VSWC values of both sensors were closer, despite of the capacitance sensors did not show a clear SWC fall during crop flowering as registered by TDR and tensiometers measurements.

RESUMEN

Este trabajo evaluó el comportamiento de un equipo de medida continua de humedad del suelo basado en la Reflectometría en el Dominio de Frecuencias (FDR, EnviroScanTM) en dos cultivos hortícolas en invernadero y en un suelo enarenado de textura franca, comparándolo con otros equipos de medición discreta.

Primero se compararon medidas de humedad del FDR usando la calibración por defecto con medidas obtenidas por gravimetría. El FDR sobreestimó claramente la humedad del suelo enarenado (47% y 57 % en la capa aportada y en la capa original, respectivamente), por lo que se realizó una calibración específica para este

tipo de suelo. El equipo TDR, en cambio, estimó correctamente la humedad volumétrica del suelo enarenado usando su calibración por defecto.

Posteriormente, se monitorizó la humedad volumétrica del suelo en un ciclo largo de tomate y un ciclo de judía de primavera de forma continua con el FDR y de forma discreta con el TDR. En todo el ciclo de cultivo de tomate, la humedad del suelo fue claramente inferior en las medidas realizadas con sondas de capacitancia (FDR, con la calibración específica para el suelo enarenado) que con TDR. Este comportamiento tan diferente entre equipos pudo deberse al método usado para instalar los tubos de acceso del FDR. En cambio, en el cultivo de judía, donde se uso un nuevo método de instalación del FDR, los valores absolutos del contenido de humedad del suelo presentaron mayor similitud en ambos equipos de medida, aunque el FDR no recogió una fuerte caída de humedad durante la floración del cultivo, que si fue medida con el TDR y con los tensiómetros.

1. INTRODUCCION

Los sensores de humedad del suelo pueden emplearse como método único o en combinación con el método de la FAO para el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1977), con sensores de planta, o incluso como un complemento a una estrategia del manejo del riego basada en la experiencia. Su uso para el seguimiento del estado hídrico del suelo ofrece la posibilidad de regar de acuerdo a las características individuales de invernaderos y cultivos. Además, estos sensores pueden ayudar a conocer los patrones de humedecimiento y extracción de agua por las raíces, identificar problemas en el manejo del riego, tales como intervalos excesivos entre riegos, dosis de riego insuficientes, riegos muy frecuentes, drenajes, etc.

Los avances en el campo de la electrónica y la tecnología de la información han conducido a importantes avances en el desarrollo, disponibilidad y aplicación de sensores para su uso en la programación del riego. En la actualidad existe una amplia variedad, tanto en coste como en complejidad, de sensores de suelo.

En los últimos años, se han desarrollado sensores basados en medidas de capacitancia, que permiten el registro continuo de la humedad del suelo a varias profundidades. Este método, basado en la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR), mide la constante dieléctrica del suelo según la capacitancia del mismo, considerando al suelo como parte de un capacitor, en el cual los dipolos del agua del dielectro son alineados por un campo eléctrico y se polarizan (Paltineanu y Starr, 1997).

El sensor de humedad de suelo ideal para los cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado debe responder rápidamente y con precisión a cambios dentro del rango medio a alto de humedad y a condiciones variables de salinidad. Por ello es necesario conocer el comportamiento de los nuevos equipos de medida de la humedad del suelo disponibles comercialmente.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el uso en dos cultivos hortícolas en invernadero y en suelo enarenado de un equipo de medida continua del contenido de humedad del suelo basado en la técnica FDR (Reflectometría en el Dominio de Frecuencias) comparándolo con otros métodos de caracterización del estado del agua en el suelo de medidas discretas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Localización

Los trabajos experimentales se realizaron en dos invernaderos de plástico tipo “Parral” de clima pasivo, localizados en la Estación Experimental de Cajamar (Caja Rural Intermediterránea) “Las Palmerillas”, situada en El Ejido, Almería (36° 48' N, 2° 3' W). El invernadero 1 tenía 54 m de longitud y 24 m de ancho (1296 m²), cubierta simétrica a dos aguas con el eje longitudinal en sentido este-oeste, 3,5 m de altura máxima en la cumbre y una pendiente de 7,2°. El invernadero 2, tipo INACRAL, de cubierta asimétrica a dos aguas con el eje longitudinal en sentido este-oeste y pendientes de 27° en su cara norte y 15,8° en su cara sur, tenía 28 m de largo y 22,5 m de ancho (630 m²),.

El suelo de los dos invernaderos era un enarenado típico. Sobre el suelo original de textura franca se aportó primero una capa de 0,20 m (invernadero 2) y de 0,25 m (invernadero 1) de suelo de textura franca (suelo aportado), encima otra capa de 0,02 m de estiércol y, finalmente, una capa superficial de 0,10 m de arena de playa como acolchado. La densidad aparente y la humedad gravimétrica a capacidad de campo y punto de marchitez permanente del suelo de cada invernadero, determinados en condiciones de laboratorio, se muestran en el Cuadro 1.

El invernadero 1 disponía de seis lisímetros de drenaje. Cada lisímetro tenía una superficie de 4 × 2 m² y una profundidad de 0,6 m en los bordes que aumentaba linealmente hasta 0,7 m en su parte central. Las distintas capas de suelo del lisímetro se colocaron por orden tratando de mantener la densidad original de cada una de ellas.

El agua se aportó con un sistema de riego por goteo con ramales portagoteros separados 1 m en el invernadero 1 y 1,5 m en el invernadero 2. Los goteros, colocados a una distancia de 0,5 m entre sí tenían un caudal unitario de descarga de 2 l h⁻¹ a una presión de 1 Kg cm⁻². El coeficiente de uniformidad del sistema de riego, evaluado con anterioridad a cada ciclo de cultivo, fue superior al 90%.

Calibración del FDR (EnviroScan™)

Se evaluó el comportamiento del equipo de medida de humedad del suelo EnviroScan™ (Sentek Pty. Ltd., South Australia) basado en la Reflectometría en el Dominio de Frecuencias (FDR). Antes de instalar los sensores se llevó a cabo su normalización, realizando medidas de frecuencia de cada sensor dentro del tubo de PVC, primero expuesto el tubo al aire (F_a) y, posteriormente, sumergiéndolo en un baño de agua (F_w). Con estas medidas se determinó la frecuencia normalizada (FN) mediante la ecuación 1:

$$FN = \frac{(F_a - F_s)}{(F_a - F_w)} \quad (1)$$

F_s era la frecuencia medida en el tubo de acceso una vez instalado en el suelo.

Se instalaron 12 tubos de acceso de PVC en el invernadero 1. Cada tubo de acceso contenía cuatro sensores de capacitancia FDR, pero solo se usaron dos sensores en la calibración, centrados en la capa de suelo aportado y en la capa de suelo original, respectivamente (sus centros quedaron a 0,1 m y 0,3 m bajo la capa

de arena). Para instalar los tubos de acceso se hicieron agujeros de diámetro ligeramente mayor con una barrena, se rellenaron parcialmente con una mezcla del suelo aportado y agua y, finalmente, se introdujeron los tubos de PVC haciendo rebosar la mezcla para asegurar un buen contacto entre tubos y suelo (Thompson y col., 2003).

La humedad del suelo se midió seis veces a lo largo de un período de 90 días durante la primavera del 2003. En cada tubo de PVC se midió la humedad volumétrica del suelo en los dos sensores de capacitancia y, simultáneamente y a la misma profundidad, se tomaron dos muestras gravimétricas a unos 5 cm del tubo. Asimismo, se midió la humedad volumétrica del suelo aportado, a unos 5 cm de dos lados opuestos de cada tubo, con un equipo Time Domain Reflectometry (TDR modelo TRASE 6005x1, Soil Moisture Equipment Corp, Santa Barbara, CA) con varillas de acero inoxidable de 15 cm de longitud insertadas formando un ángulo de 45° en el suelo. Las muestras gravimétricas del primer muestreo se tomaron con un toma-muestras cilíndrico (modelo 0200, Soilmoisture equipment Corp. Santa Barbara, CA., USA) y las siguientes muestras gravimétricas con un toma-muestras (modelo 0215, Soilmoisture equipment Corp. Santa Barbara, CA., USA). Las muestras fueron pesadas y secadas en estufa a 105 °C hasta peso constante, con lo que se determinó la humedad gravimétrica, la densidad aparente (Cuadro 1) y la humedad volumétrica. También se tomaron muestras del suelo aportado cerca de cada tubo para medir la conductividad eléctrica del extracto saturado (C.E.).

Dinámica del agua en el suelo en dos cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado

Se estudió la dinámica del agua en el suelo con sensores FDR y TDR en un cultivo de tomate en ciclo largo (campaña 1999/00) y en un cultivo de judía de primavera (campaña 2001/2002). Se aplicaron las técnicas culturales habituales en la zona en los dos cultivos. El Cuadro 2 muestra la fecha de siembra/transplante y final de ciclo, duración del mismo y marco de plantación utilizado en cada cultivo.

La dosis de riego se determinaron a partir de estimaciones diarias de la evapotranspiración del cultivo (ETc) utilizando datos diarios de radiación solar exterior y temperatura de dentro de invernadero, medios de una serie histórica de datos obtenida en la E.E. de Cajamar “Las Palmerillas” (Fernández y col., 2001). El riego se aplicó cuando el potencial matricial del agua en el suelo, medido a 0,12 m de profundidad por debajo de la capa de arena y a 0,08 m de la planta, estuvo en torno a -25 kPa, en medidas realizadas al inicio de la mañana.

Se instaló un tubo de acceso para los sensores de capacitancia (FDR) en cuatro repeticiones del cultivo de tomate, a 0,10 m del gotero. En cada tubo se instalaron 4 sensores, cuyas partes centrales estuvieron situadas a 0,07 m, 0,17 m, 0,27 m y 0,37 m por debajo de la capa de arena. Debido a la elevada presencia de elementos gruesos en el suelo original, la instalación de los tubos de acceso no se realizó siguiendo las recomendaciones del fabricante. Para la instalación de los tubos se realizaron agujeros de unos 20 cm de diámetro, los tubos se colocaron en la parte central y se fue aportando el suelo en el mismo orden que fue retirado, posteriormente se compactó para conseguir un buen contacto entre tubo y suelo. En cambio, en el cultivo de judía los tubos de acceso del FDR se instalaron como se ha indicado en el apartado de calibración del FDR, y siguiendo las recomendaciones de Thompson y col. (2003). Se instaló un tubo de acceso en dos repeticiones, dentro de

dos lisímetros de drenaje, a 0,1 m del gotero, con sensores a 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m y 0,4 m de profundidad bajo la capa de arena.

El contenido de agua en el suelo también se midió con un equipo basado en la Reflectometría en el Dominio del Tiempo, TDR (modelo Trase 6005x1, Soil Moisture Equipment Corp, Santa Barbara, CA), cada 15 días antes de regar. Para ello se instalaron sondas de dos vías, de 0,45 m de longitud sin incluir la capa de arena, localizadas a 0,10 m de distancia al gotero, en tres y dos repeticiones en tomate y judía, respectivamente. En el cultivo de judía las sondas TDR se instalaron en los mismos lisímetros.

Los tensiómetros (Copersa, modelo Irrrometer, Barcelona, España) se colocaron a 0,12 m y 0,27 m de profundidad en el cultivo de judía, mientras que en tomate se instalaron a 0,10 m y a 0,20 m de profundidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración de equipos de medida del contenido de agua en un suelo enarenado

La Figura 1 muestra la humedad volumétrica del suelo medida con la sonda FDR (usando la calibración por defecto del fabricante) versus la humedad volumétrica obtenida a partir de muestras gravimétricas, tanto en el suelo aportado como en el suelo original del enarenado. Hubo una clara relación lineal entre ambas variables en las dos capas de suelo consideradas, pero en ambas las rectas de regresión difirieron claramente de la línea 1:1. El equipo FDR con la calibración por defecto sobreestimó claramente la humedad del suelo un 47% y un 57 % en la capa de suelo aportado y en la capa de suelo original, respectivamente. Por lo que se consideró conveniente realizar una calibración del equipo específica para este suelo enarenado.

Numerosos trabajos recientes (Leib y Matthews, 1999; Hanson y Peters, 2000; Moreno, 2003) han concluido que las sondas de capacitancia (FDR) sobreestiman claramente el contenido de agua del suelo y requieren calibraciones específicas. Las razones de la sobreestimación no están claras, aunque parecen estar implicados diversos factores como el tipo de arcilla y la salinidad del suelo (Hanson y Peters, 2000), y la temperatura y la estructura del suelo (Braumhardt y col., 2000). En nuestro trabajo la sobreestimación observada no parece deberse a la salinidad del suelo ya que las medidas de conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo enarenado dieron valores en torno a $2,5 \text{ dS m}^{-1}$, claramente por debajo de los valores ($4 \text{ a } 5 \text{ dS m}^{-1}$) a partir de los cuales se ha observado que la salinidad afecta a las medidas de la sonda FDR (Mead y col., 1996).

La Figura 2 muestra, para las dos capas de suelo consideradas, la relación entre la humedad volumétrica medida a partir de muestras gravimétricas y la frecuencia normalizada (FN) medida con el equipo FDR. En la capa de suelo aportado, el modelo lineal presentó el mejor ajuste a los datos medidos, mientras que en la capa de suelo original el modelo recíproco se ajustó mejor (Figura 2). En ambos casos, la regresión fue estadísticamente significativa ($P < 0,01$) y la ordenada en el origen difirió significativamente de cero. El error absoluto medio fue de $0,012$ y $0,010 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para el suelo aportado y suelo original, respectivamente. También se consideró la posibilidad de usar una única ecuación de calibración para el suelo enarenado sin diferenciar por capas (Cuadro 3), pero la precisión del ajuste fue menor y el error absoluto medio aumentó claramente (Cuadro 3).

La Figura 3 muestra, para la capa aportada del suelo enarenado considerada anteriormente, la humedad volumétrica medida con el equipo TDR (usando la calibración por defecto del equipo) versus la humedad volumétrica medida a partir de muestras gravimétricas. Dicha figura también incluye medidas de TDR realizadas por Fernández (1993) en el mismo tipo de suelo enarenado, en arena y en un suelo natural de textura franca. Como la pendiente de las rectas de regresión de las medidas de TDR realizadas en 2003 y en 1993 no difirieron estadísticamente entre sí, se realizó una regresión conjunta para las medidas de TDR de ambos años (Figura 3). La ordenada en el origen y la pendiente de la recta que mejor se ajustó a los datos medidos no difirieron significativamente de 0 y de 1 (nivel de significación del 10%), respectivamente. Es decir, el equipo TDR (usando la calibración por defecto) estimó correctamente la humedad volumétrica del suelo enarenado, con un error absoluto medio de $0,010 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, y por tanto no requiere una calibración específica para este tipo de suelo enarenado.

Dinámica del agua en un suelo enarenado en dos cultivos hortícolas en invernadero

La Figura 4 muestra la dinámica estacional del contenido de agua en el suelo durante un ciclo de cultivo largo de tomate (Figura 4 a) y un ciclo de primavera de judía (Figura 4 b), medido con el equipo FDR (calibrado para un suelo enarenado y con la calibración del fabricante) y TDR. A lo largo del ciclo de cultivo de tomate, los valores absolutos de agua del suelo cercano a la planta (bulbo humedecido por el gotero) y su patrón estacional fueron claramente distintos en los dos equipos de medida usados (Figura 4 a), siendo menores en el equipo FDR durante todo el ciclo de cultivo. Este comportamiento tan diferente entre equipos pudo deberse al método de instalar los tubos de acceso del FDR. Se abrieron agujeros con diámetros mucho mayores que los tubos y, posteriormente, se reestablecieron las capas de suelo originales. Este proceso debió alterar significativamente las características físicas de las mismas. Por ejemplo, parece razonable pensar que la densidad aparente, no medida, alrededor de los tubos fuese menor que en el resto del suelo, lo que puede explicar los menores valores de contenido de agua del equipo FDR (Gardner y col., 1998). En cambio, los valores de humedad del suelo medidos con FDR con la calibración del fabricante fueron similares a los del TDR (Figura 4 a), a pesar de que anteriormente se puso de manifiesto que esta calibración sobreestima considerablemente la humedad del suelo.

En el cultivo de judía, en cambio, donde se empleó el método de instalación del equipo FDR recomendado por Thompson y col. (2003) para el suelo enarenado, tanto los valores absolutos como el patrón estacional del contenido de humedad del suelo presentaron mayor similitud en ambos equipos (Figura 4 b), excepto en el primer mes del ciclo de cultivo. La utilización de sondas de TDR 5 cm más largas que las sondas del FDR podría explicar los valores de humedad ligeramente mayores encontrados en el TDR, ya que se midió un perfil algo más grande con este equipo. Esto podría también explicar, en parte, las diferencias encontradas en el inicio del ciclo de cultivo. La ocurrencia de drenajes en este período (datos no presentados) indicaría un mayor contenido de agua en la parte inferior del lisímetro que pudo ser medido con las sondas TDR y no por las sondas FDR. Sin embargo hay que destacar que el FDR no recogió una clara caída de humedad ocurrida durante la floración del cultivo que sí fue medida con el TDR (Figura 4 b) y tensiómetros (datos no presentados).

Finalmente, la obtención de medidas fiables del contenido de humedad del suelo requiere conocer la precisión del equipo en función del número de repeticiones o equipos usados, ya que en los cultivos en suelo enarenado con riego por goteo presentan heterogeneidad en la distribución de la humedad. En el cultivo de tomate, donde se usaron cuatro y tres repeticiones de los equipos FDR y TDR, respectivamente, el coeficiente de variación medio para el conjunto del ciclo fue solo de un 5% y 8,7% para el FDR y TDR, respectivamente. En cambio, en el cultivo de judía, donde se usaron dos repeticiones por equipo, el coeficiente de variación medio aumentó hasta un 23,2% y 13,4% para el FDR y TDR, respectivamente. Por tanto, el uso de una sola sonda FDR para caracterizar la humedad del conjunto de un invernadero parece una opción arriesgada, sobre todo teniendo en cuenta la sensibilidad del equipo al método de instalar los tubos de acceso de las sondas FDR (Figura 4 a y b).

A pesar de ello, la posibilidad de obtener con facilidad medidas continuas del contenido de agua en el suelo le da al equipo FDR un claro potencial como herramienta de investigación siempre y cuando se eliminen las limitaciones actualmente observadas. Por otro lado el uso por agricultores locales del equipo FDR para determinar la dinámica del agua en un suelo enarenado parece estar limitado por su coste, relativamente alto, y por su relativa compleja interpretación.

4. CONCLUSIONES

El equipo FDR (EnviroScan) de medida del contenido de agua en el suelo, basado en la técnica de Reflectometría en el Dominio de Frecuencias requiere una calibración específica para los suelos enarenados de Almería.

Los valores absolutos de contenido de agua medido con el equipo FDR calibrado para suelos enarenados no coincidieron con los valores medidos con un equipo TDR durante un ciclo de cultivo de tomate, en cambio presentaron mayor similitud en un cultivo de judía de primavera, aunque el equipo FDR no recogió una caída de humedad ocurrida durante la floración del cultivo que si fue medida con TDR y tensiómetros. El comportamiento tan diferente entre equipos observado en el ciclo de cultivo de tomate pudo deberse al método de instalar los tubos de acceso del FDR.

5. BIBLIOGRAFÍA

Braumhardt R.L., Lascano R.J., Evett S.R. 2000. Soil material, temperature and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. Soil Science Society of America 64: 1940-1946.

Doorenbos J., Pruitt W.O. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. FAO Riego y Drenaje Nº 24. FAO, Roma (Italia).

Fernández M^aD. 1993. Calibración y evaluación de métodos para la determinación de la evapotranspiración de referencia bajo condiciones de invernadero tipo parral de Almería. Trabajo Profesional Fin de Carrera. Universidad de Córdoba (España).

Fernández M^aD., Orgaz F., Fereres E., López J.C., Céspedes A., Pérez J., Bonachela S., Gallardo M. 2001. Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Cajamar. 78 p. Almería (España).

Gardner C.M.K., Dean T.J., Cooper J.D. 1998. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. Journal of Agricultural Engineering Research 71:395-403.

Hanson B.R., Peters D.W. 2000. Using dielectric soil moisture sensors for irrigation scheduling. Acta Horticulturae 537: 471-477.

Leib B., Matthews G. 1999. Relative accuracy of soil moisture sensors used in Washington State. ASAE/CSAE/SCGR Annual International Meeting, July 18-22, Toronto, Canada.

Mead R.M., Soppe R.W., Ayars J.E. 1996. Capacitance probe observations of daily soil moisture fluctuations. Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation, p: 916-923.

Moreno M.F. 2003. Contribuciones a las medidas del contenido de agua del suelo y a la evapotranspiración de los cultivos. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba, Córdoba (España), p 188.

Paltineanu I.C., Starr J.L. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. Soil Science Society of America 61: 1576-1585.

Thompson R.B., Gallardo M., Fernández M^aD. 2003. Irrigation scheduling of drip-irrigated vegetable crops in greenhouses using continuous soil moisture monitoring. Symposium on irrigation of horticultural crops, ISHS. 132. Davis, California (USA).

Cuadro 1. Valores de densidad aparente (ρ_a), humedad gravimétrica a capacidad de campo (CC) y humedad gravimétrica en el punto de marchitez permanente (PMP) de las capas de suelo aportado y de suelo original en los dos invernaderos.

	Aportado			Original		
	ρ_a (g cm ⁻³)	CC (%)	PMP (%)	ρ_a (g cm ⁻³)	CC (%)	PMP (%)
Nº 1	1,55	22,13	7,69	1,42	22,57	10,68
Nº 2	1,53	22,13	8,37	1,59	21,84	9,51

Cuadro 2. Cultivo, cultivar e invernadero usado, fecha de siembra (S) o transplante (T), fin de ciclo, duración del ciclo y marco de plantación aplicado.

Cultivo	Cultivar en Invernadero	Siembra o transplante	Fin de ciclo	Duración (días)	Marco plantación
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> L.)	Daniela (2)	20/09/1999 (T)	30/05/2000	254	1,5m x 0,5m
Judía (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Donna (1)	04/02/2002 (S)	28/05/2002	113	2m x 0,5m

Cuadro 3: Análisis de regresión entre la humedad volumétrica medida a partir de muestras gravimétricas y la frecuencia normalizada (FN). a es la ordenada en el origen; b la pendiente de la recta de regresión; R² es el coeficiente de determinación; EEE el error estándar de las estimación (cm³ cm⁻³); y EAM es el error absoluto medio (cm³ cm⁻³). Las ecuaciones de la capa de suelo aportado y perfil completo son del tipo Y = a+b*X, para la capa de suelo original es del tipo Y = 1/(a+b*X).

	a	b	R ²	EEE	EAM
Suelo aportado	-0,204	0,507	0,826	0,015	0,012
Suelo original	20,335	-17,771	0,772	0,017	0,010
Perfil completo	-0,202	0,485	0,671	0,022	0,018

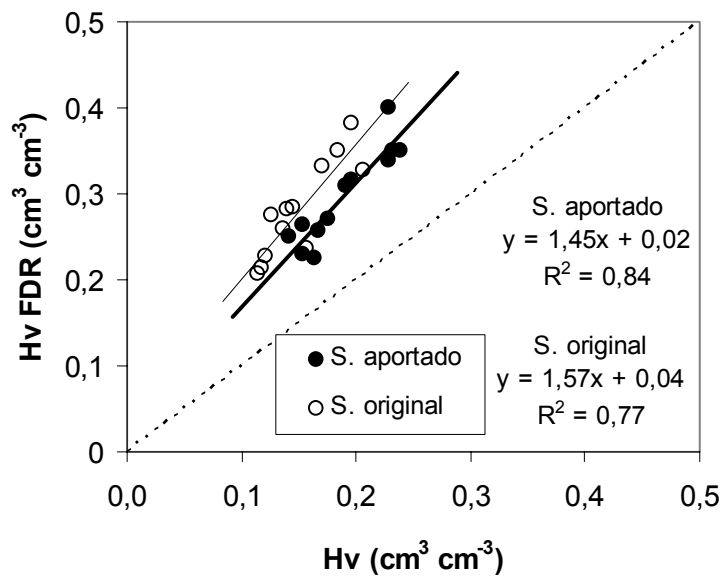


Figura 1. Humedad volumétrica del suelo medida con un equipo FDR versus medidas obtenidas de muestras gravimétricas en las capas de suelo aportado y original de un suelo enarenado. Las líneas continuas representan las rectas de regresión y la línea discontinua la recta 1:1.

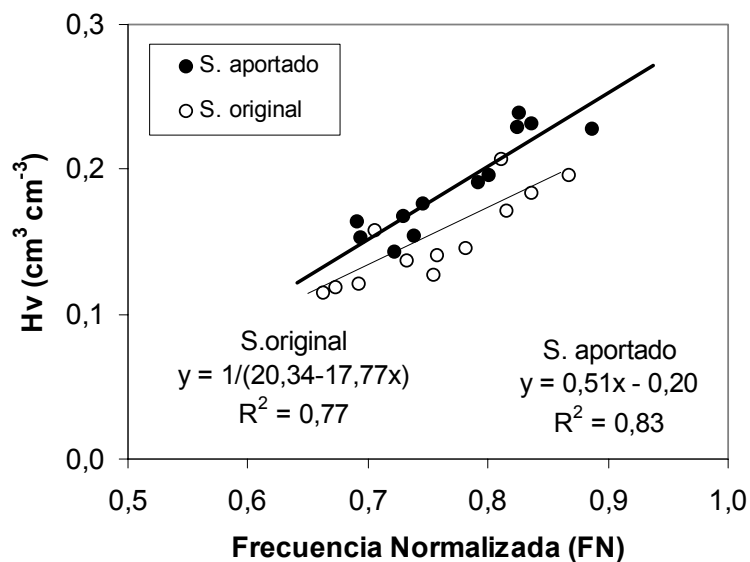


Figura 2. Relación entre la humedad volumétrica obtenida a partir de muestras gravimétricas y la Frecuencia Normalizada (FN) medida con sondas FDR para la capa de suelo aportado y suelo original.

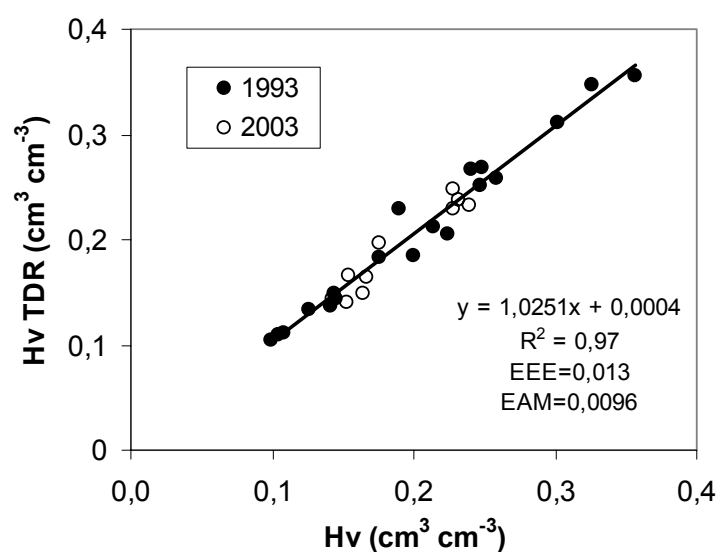


Figura 3. Comparación de la humedad volumétrica del suelo determinada a partir de muestras gravimétricas y con el equipo TDR. Medidas realizadas en un suelo enarenado en el año 2003 y en un suelo enarenado, en arena y en suelo natural de textura franca por Fernández (1993).

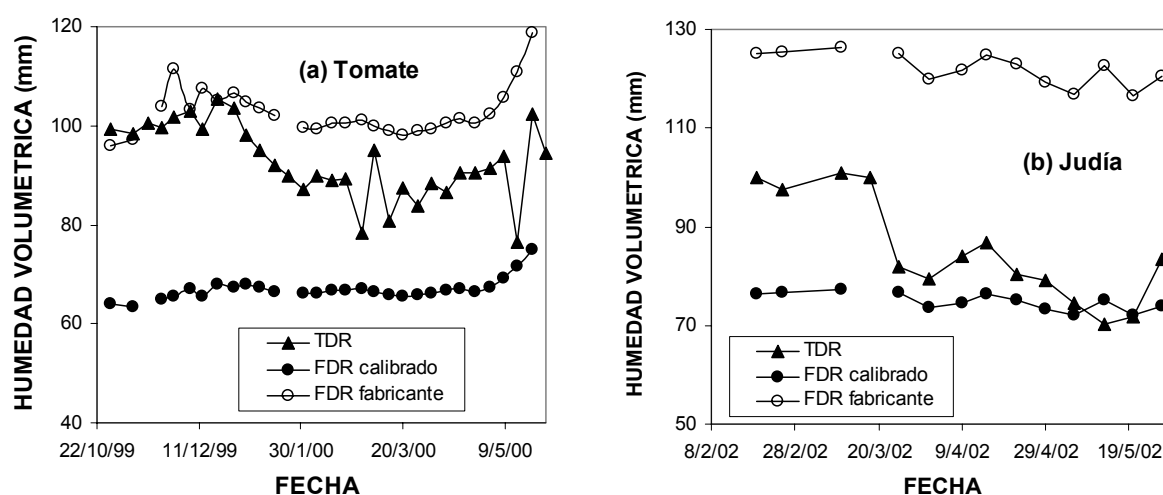


Figura 4. Evolución del contenido de agua a 10 cm del gotero en los primeros 40 cm del suelo según medidas realizadas con sondas FDR, aplicando la calibración del fabricante (FDR fabricante) y la calibración específica para el suelo enarenado (FDR calibrado), y en los primeros 45 cm del suelo según sondas TDR en un ciclo de cultivo de tomate (a) y de judía (b).