

## EFFECTO DE LA SALINIDAD EN LA MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO CON UN SENSOR DE CAPACITANCIA

R. B. Thompson<sup>1</sup>, M.D. Fernández<sup>2</sup>, C. Martínez-Gaitán<sup>1</sup>, M. Gallardo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dpto. Producción Vegetal, Universidad de Almería, La Cañada, 04120 Almería, Email: rodney@ual.es

<sup>2</sup>Estación experimental de la Fundación Cajamar, Apdo. 250, 04080 Almería, Email: mdfernandez@cajamar.es

<sup>1</sup>Dpto. Producción Vegetal, Universidad de Almería, La Cañada, 04120 Almería, Email: cmgaitan@ual.es

<sup>1</sup>Dpto. Producción Vegetal, Universidad de Almería, La Cañada, 04120 Almería, Email: mgallard@ual.es

**RESUMEN.** En este trabajo se evaluó el efecto de la salinidad del suelo en las medidas de la humedad volumétrica del suelo (HVS) realizadas con un sensor de capacitancia (SC). El trabajo se realizó en un suelo arcilloso, en un invernadero de plástico con un cultivo de tomate. Se dispuso de un sistema de riego por goteo y fertirrigación aplicándose en todos los riegos una solución nutritiva completa. En este trabajo se evaluó (i) la respuesta de medidas de HVS a cambios en la salinidad del suelo y (ii) si al normalizar los sensores con soluciones salinas se reducía el efecto de la salinidad sobre las medidas de HVS. Además de medir de forma continua la HVS cada 30 minutos, se midió dos veces/semana la conductividad eléctrica de la solución del suelo ( $CE_{ss}$ ) y diariamente el potencial mátrico del suelo ( $\Psi_m$ ). La HVS se midió a 5-15 cm y la  $CE_{ss}$  y el  $\Psi_m$  a 10 cm de profundidad. Cada parámetro se midió en tres repeticiones. Se aplicaron tres tratamientos; en dos se aplicó una solución nutritiva de  $CE_{ns}$  de 5 dS m<sup>-1</sup>, uno normalizado con esa misma solución (Salino-N5) y el otro con una solución de 2 dS m<sup>-1</sup> (Salino-N2) y el tratamiento control se regó con una solución nutritiva de 2 dS m<sup>-1</sup> normalizándose a 2 dS m<sup>-1</sup>. El manejo del riego fue idéntico en los tres tratamientos. En Salino-N5 y Salino-N2, la HVS (5–15 cm) aumentó aproximadamente un 10% al aumentar la  $CE_{ss}$  (10 cm) desde 2.2 a 4.9 dS m<sup>-1</sup>. En el control, la HVS (5–15 cm) permaneció relativamente constante. El  $\Psi_m$  (10 cm) fue similar en los tres tratamientos. La normalización de la SC a 5 o 2 dS m<sup>-1</sup> no tuvo efecto sobre la respuesta a la salinidad. La aplicación posterior de grandes volúmenes de agua no salina para lavar las sales provocó una clara reducción de los valores medidos de HVS en los tres tratamientos. Los resultados demuestran que las medidas de HVS con SC estuvieron influenciadas por el aumento o el descenso de la salinidad del suelo para un rango de  $CE_{ss}$  de 2-5 dS m<sup>-1</sup>.

**ABSTRACT.** This work evaluated the effect of soil salinity on measurement of the volumetric soil water content (SWC) made with a capacitance sensor (CS). The work was conducted in an unrestricted clay soil, in a plastic greenhouse, that was cropped with tomato. High frequency drip irrigation was used and complete nutrient solutions were applied in most irrigations. This work assessed (i) the response of SWC measurements to changes in soil solution salinity and (ii) whether normalising the individual sensors in higher salinity solution reduced salinity effects on SWC.

In addition to continuous monitoring of SWC (every 30 minutes), twice weekly measurements were made of electrical conductivity of the soil solution ( $EC_{ss}$ ) and daily measurements were made of soil matric potential ( $\Psi_m$ ). SWC was measured for 5-15 cm soil depth.  $EC_{ss}$  and  $\Psi_m$  were measured at 10 cm depth. Three replicate measurements were made for each parameter. Nutrient solution with an electrical conductivity ( $EC_{ns}$ ) of 5 dS m<sup>-1</sup> was applied to two treatments, one was normalised with the 5 dS m<sup>-1</sup> solution (SAL-N5), the other with a 2 dS m<sup>-1</sup> solution (SAL-N2); a control treatment received  $EC_{ns}$  of 2 dS m<sup>-1</sup> and was normalised at 2 dS m<sup>-1</sup>. The three treatments were irrigated equally. In SAL-N5 and SAL-N2, SWC (5–15 cm) increased by approximately 10% as  $EC_{ss}$  (10 cm) increased from 2.2 to 4.9 dS m<sup>-1</sup>. In the control, SWC (5–15 cm) remained relatively constant.  $\Psi_m$  (10 cm) was consistently very similar in the three treatments. Normalising the CS at 5 or 2 dS m<sup>-1</sup> had no effect on the response to salinity. The subsequent application of large volumes of non-saline water to leach salts from the soil caused a clear reduction in measured SWC in the three treatments. The results demonstrated that SWC measurement with the CS was influenced by both increases and decreases in soil salinity when background  $EC_{ss}$  values were 2-5 dS m<sup>-1</sup>.

### 1.- Introducción

Los equipos de capacitancia provistos de sensores múltiples, permiten medir la humedad volumétrica del suelo (HVS) a distintas profundidades, dando información detallada sobre el contenido de humedad del suelo y su dinámica en el perfil del mismo (Starr y Paltineanu, 2002; Fares y Polyakov, 2006). El equipo EnviroSCAN (Sentek Sensor Technologies, Stepney, South Australia, Australia) es un ejemplo de estos sistemas (Fares y Polyakov, 2006). Este equipo de capacitancia ha sido empleado en numerosos trabajos de investigación sobre la dinámica del agua en suelo, el uso del agua por los cultivos, y estimaciones del drenaje y la lixiviación de nitratos (por ej. Starr y Paltineanu, 1998; Fares y Alva 2000; Girona et al., 2002; Arregui y Quemada, 2006; Thompson et al., 2007a; Thompson et al., 2007b). Además, es uno de los sensores

de suelo más usados para la programación del riego a nivel de fincas comerciales (Fares y Polyakov, 2006). El sistema EnviroSCAN está formado por varios sensores cilíndricos instalados en una sonda vertical a distintas profundidades (Paltineanu y Starr, 1997) dentro de un tubo de acceso de PVC. Antes de la instalación, cada uno de los sensores ha de ser individualmente “normalizado”; para ello hay que determinar la frecuencia de oscilación en agua ( $F_w$ ) y en aire ( $F_a$ ) y posteriormente estos valores se relacionan con la frecuencia medida en el suelo ( $F_s$ ) calculándose la frecuencia normalizada ( $FN$ ) como  $FN = (F_a - F_s)/(F_a - F_w)$ ; finalmente mediante una ecuación de calibración la  $FN$  se usa para determinar la HVS (Paltineanu y Starr, 1997). El procedimiento de normalización permite que una misma ecuación de calibración pueda ser usada en todos los sensores y el intercambio de sensores entre posiciones de medida en campo (Starr y Paltineanu, 2002).

Existen trabajos realizados en laboratorio que muestran como las medidas realizadas con el EnviroSCAN están afectadas por un incremento de la salinidad (Mead et al., 1995; Baumhardt et al., 2000; Kelleners et al., 2004). Mead et al., (1995) señalaron que una conductividad eléctrica del extracto saturado ( $CE_e$ ) de  $3.4 \text{ dS m}^{-1}$  (después de aplicar una solución salina de  $5 \text{ dS m}^{-1}$ ) produjeron una sobrestimación del 10% en el contenido volumétrico del agua del suelo. En este trabajo se indica que la normalización de los sensores con la solución salina elimina o reduce la sobrestimación. Existen pocos trabajos que analicen el efecto de la salinidad sobre las sondas de capacitancia bajo condiciones de campo, habiéndose realizado la mayoría de los ensayos en cilindros de suelo en laboratorio.

Es frecuente que durante un ciclo de cultivo ocurran cambios en la salinidad del suelo, particularmente en cultivos en los que se usa fertirrigación. Los aumentos en la salinidad suelen estar asociados a la aplicación de los riegos o tras aplicaciones de fertilizantes; a menudo en sistemas de producción hortícola intensiva se provocan intencionadamente aumentos de salinidad para asegurar un equilibrio entre crecimiento vegetativo y reproductivo o para aumentar el contenido de azúcar del fruto. Si los sensores EnviroSCAN, a partir de ahora denominados sensores de capacitancia (SC) fuesen sensibles a cambios en la salinidad del suelo, podría afectarse la estabilidad de la calibración durante un ciclo de cultivo.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar los efectos de los cambios en la salinidad del suelo en la medida de la humedad volumétrica con sensores de capacitancia (EnviroSCAN), y ii) evaluar si la normalización de estos sensores con una solución salina reduce los efectos de la salinidad sobre las medidas de la humedad volumétrica del suelo.

## 2.- Material y Métodos

Los ensayos se llevaron a cabo en un invernadero de plástico tipo parral de la Estación Experimental (“Las Palmerillas”) de la Fundación Cajamar, situada en El Ejido

(Almería). El invernadero, con una superficie útil de  $480 \text{ m}^2$ , era asimétrico con estructura de tubo galvanizado.

El suelo del invernadero era un suelo artificial “enarenado”, realizado en mayo de 1996. Sobre el suelo original (textura franco, con piedras) se aportó una capa de  $0,30 \text{ m}$  de tierra de cañada de textura franco-arcillosa. Sobre esta capa, se añadieron  $7 \text{ kg m}^{-2}$  de estiércol incorporados al suelo con una labor de fresadora y encima otros  $7 \text{ kg m}^{-2}$  de estiércol. Sobre el estiércol se aportó como acolchado una capa de arena de playa de  $0,1 \text{ m}$  de espesor. El riego se aplicó con un sistema de riego por goteo, con una distancia de  $1.5 \text{ m}$  entre ramales y  $0.5 \text{ m}$  entre goteros. Para el fertirriego de las parcelas se instalaron dos tanques, con una capacidad de  $200 \text{ L}$  cada uno, en los que se prepararon las dos soluciones de fertirriego, y una bomba, que estaba conectada a una red de riego independiente de la que abastece al resto del invernadero. El coeficiente de uniformidad (C.U.) del sistema de riego fue del  $95.4 \%$  y un caudal medio de  $2.5 \text{ L h}^{-1}$ . El agua de riego tenía una conductividad eléctrica (CE) de  $0.4 \text{ dS m}^{-1}$ . El cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) var. Raf fue transplantado el 2/09/05 y el ciclo se extendió hasta el 16/03/06 disponiéndose las plantas a  $8 \text{ cm}$  del gotero adyacente. El manejo del cultivo se realizó según las prácticas habituales en la zona.

### 2.1. Tratamientos

Los efectos de la salinidad sobre los SC, (modelo EnviroSCAN, Sentek Sensor, Technologies, Stepney, South Australia, Australia) se evaluaron utilizando dos soluciones de distinta conductividad eléctrica para el riego y la normalización de los SC. Antes de instalar los SC 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:

Donde  $F_s$  es la frecuencia medida en el tubo de acceso una vez instalado en el suelo. Se aplicó una calibración específica para este tipo de suelo (Thompson et al., en prensa).

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

Se aplicaron tres tratamientos:

1. Control: regado y normalizado con una solución de CE de  $2 \text{ dS m}^{-1}$ , que es una solución de fertirriego estándar que se aplica en los cultivos de la zona en el período de plena producción (Tabla 1).
2. Salino N-2: regado con una solución de fertirriego salina ( $CE=5 \text{ dS m}^{-1}$ ) y sensores normalizados con la solución de fertirriego del tratamiento control ( $CE=2 \text{ dS m}^{-1}$ ).
3. Salino N-5: el cultivo fue regado y los sensores fueron normalizados con una solución salina ( $CE=5 \text{ dS m}^{-1}$ ).

Las soluciones salinas para la normalización y el riego se obtuvieron añadiendo 1.84 g de ClNa por litro a la solución de fertirriego estándar.

Los tres tratamientos recibieron igual volumen de agua en cada riego, y éste se calculó en base a la evapotranspiración ( $ET_c$ ) estimada (Orgaz et al. 2005). Los tratamientos se aplicaron según un diseño completamente aleatorio, con 3 tratamientos y 3 repeticiones por tratamiento. Cada parcela estaba compuesta por 6 plantas en línea, con una superficie por parcela de 4 m<sup>2</sup>. Desde el trasplante hasta la aplicación de los tratamientos todas las parcelas se regaron con una solución nutritiva estándar para el cultivo de tomate en Almería (Tabla 1). Los distintos tratamientos de salinidad se aplicaron desde el día 11/01/06 hasta el 16/02/06. Desde el 17/02/06 hasta el 16/3/06 se aplicaron a todas las parcelas varios riegos de lavado con un volumen de unos 10 mm en cada riego ( $CE=0.4$  dS m<sup>-1</sup>).

**Tabla 1:** Composición parcial de la solución de fertirriego estándar (concentraciones en mmol L<sup>-1</sup>).

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CE (dS m <sup>-1</sup> )
7.9	1.6	2.1	0.5	5.4	3.1	1.3	2.0

## 2.2. Determinaciones

En cada repetición se instaló una sonda de capacitancia, tensiómetros y sondas de succión a 6 cm de separación del ramal portagoteros y a 8 cm de distancia del gotero medido longitudinalmente; estas distancias se tomaron en relación a la parte central de cada sensor. El contenido de agua en el suelo se midió de forma continua cada 30 minutos con sondas de capacitancia (modelo EnviroSCAN, Sentek Sensor Technologies, Stepney, South Australia, Australia) a 5-15 cm y a 15-25 cm de profundidad bajo la capa de arena. Diariamente se midió el potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) con tensiómetros manuales (modelo ISR-300, Irrrometer, Co. Riverside, CA, USA) a 10 y 20 cm de profundidad bajo la capa de arena. En cada parcela también se midió dos veces por semana la  $CE$  de la solución del suelo ( $CE_{ss}$ ) extraída con sondas de succión instaladas a igual profundidad que los tensiómetros. La  $CE$  del extracto saturado ( $CE_e$ ) se determinó en muestras tomadas a 5-15 cm y 15-25 cm de profundidad en las tres repeticiones del tratamiento control y tres de las seis parcelas de los tratamientos salinos. La  $CE_e$  se determinó cuando la salinidad de la solución del suelo era máxima (17/2/06).

## 3.- Resultados y Discusión

La Fig. 1 muestra la evolución de la  $CE$  de la solución de suelo ( $CE_{ss}$ ), la humedad volumétrica de agua del suelo ( $HVS$ ) y del potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) a 10 cm de profundidad. La  $CE_{ss}$  antes de iniciar la aplicación de los tratamientos fue similar entre tratamientos, con valores entre 1.8 y 2.2 dS m<sup>-1</sup> (Fig. 1a). Posteriormente, la aplicación de la solución salina de fertirriego ( $CE=5$  dS m<sup>-1</sup>)

<sup>1</sup>) a los tratamientos salinos supuso un aumento en la  $CE_{ss}$ , apreciándose su efecto una semana después de iniciados los tratamientos. La  $CE_{ss}$  aumentó rápidamente hasta 4.6 dS m<sup>-1</sup> el 31 de enero, después el incremento de salinidad fue más lento, alcanzándose valores máximos de 4.8-4.9 dS m<sup>-1</sup> el 14 de febrero. La  $CE_{ss}$  del tratamiento control fue claramente inferior a la alcanzada en los tratamientos salinos, alcanzando valores máximos de 2.9 dS m<sup>-1</sup>. La aplicación de los riegos de lavado a partir del 17/02/06 provocó una importante disminución de la  $CE_{ss}$  en los tratamientos salinos y en menor medida en el tratamiento control, alcanzándose valores de 1.8, 1.2 y 1.0 dS m<sup>-1</sup> en los tratamientos Salino N-2, Salino N-5 y control, respectivamente. La  $CE_e$  para los tratamientos control y salinos el 17 de febrero fue de 1.8 y 3.2 dS m<sup>-1</sup>, respectivamente.

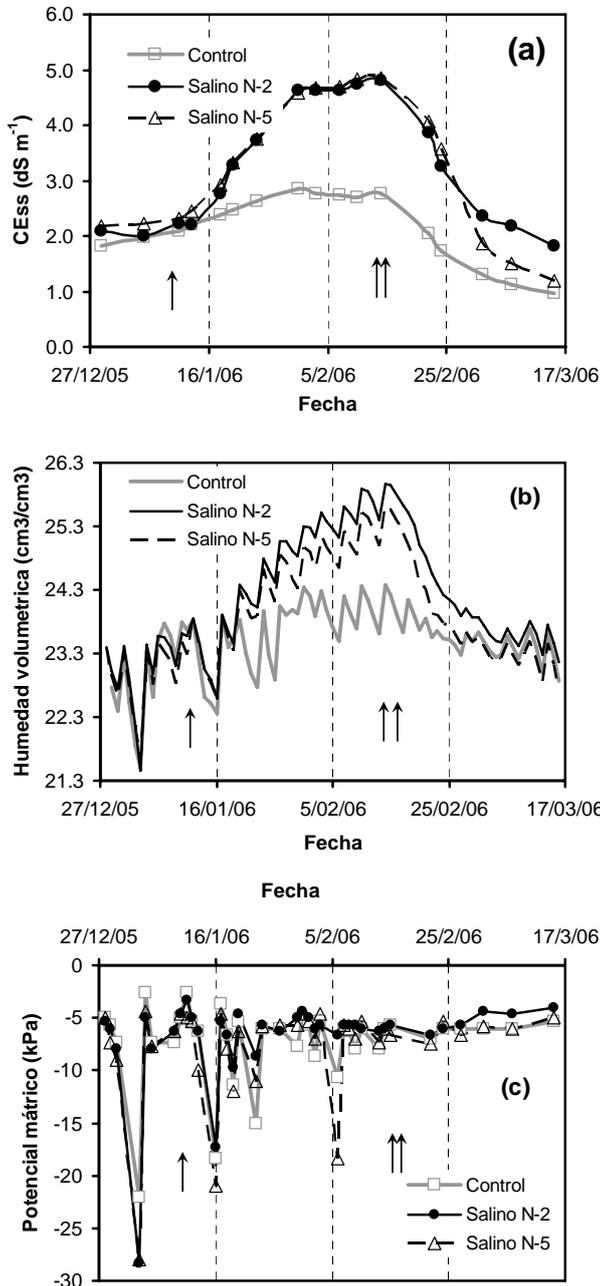
A pesar de que los tres tratamientos recibieron el mismo volumen de riego, la  $HVS$  medida con SC mostró valores muy diferentes entre los tratamientos salinos y el control (Fig. 1b), con una evolución similar a la de la  $CE_{ss}$  (Fig. 1a). Los valores iniciales de  $HVS$  fueron muy similares entre tratamientos. A partir del 11 de enero, con la aplicación de la solución salina de fertirriego ( $CE=5$  dS m<sup>-1</sup>) a los tratamientos salinos, la  $HVS$  aumentó rápidamente hasta el 29 de enero, siendo posteriormente menor la tasa de incremento. La aplicación de los riegos de lavado ( $CE=0.4$  dS m<sup>-1</sup>) a partir del 17 de febrero provocaron una rápida e importante caída en la humedad del suelo en los tratamientos salinos. El máximo incremento en los valores de  $HVS$  en relación al control, que se atribuye a la aplicación de la solución salina ( $CE=5$  dS m<sup>-1</sup>) en los tratamientos Salino N-2 y Salino N-5, fue aproximadamente del 10%. En el tratamiento control, también se produjo un ligero incremento en la humedad entre el 11 y el 30 de enero, que disminuyó entre el 31 de enero y el 17 de marzo, mostrando una evolución similar a los ligeros cambios en  $CE_{ss}$ .

El  $\Psi_m$  fue muy similar entre tratamientos (Fig. 1c), indicando que no hubo diferencias en la humedad del suelo entre los tres tratamientos. Durante el periodo desde el 17 de febrero hasta el 15 de marzo, se observó una rápida e importante reducción en la  $HVS$  (Fig. 1b) en los tratamientos Salino N-2 y Salino N-5; sin embargo el  $\Psi_m$  se mantuvo constante en los tres tratamientos y fue superior a -10 kPa (Fig. 1c), indicando que el suelo estaba húmedo y que no se produjo ese proceso de desecación del suelo, ya que se aplicaron importantes volúmenes de riego para el lavado de sales.

La evolución de la  $CE_{ss}$ ,  $HVS$  y  $\Psi_m$  a 20 cm de profundidad fue similar a la observada a 10 cm de profundidad (datos no presentados).

La evolución paralela mostrada por la  $HVS$  del suelo y la  $CE_{ss}$  indica que los sensores de capacitancia fueron sensibles a la salinidad. Dado que el suelo estuvo muy próximo a capacidad de campo, la  $CE_e$  puede estimarse como la mitad de la  $CE_{ss}$ . En el tratamiento control, la  $CE_e$  osciló entre valores máximos de 1.4 dS m<sup>-1</sup> y 0.5 dS m<sup>-1</sup> al final del periodo de lavado de suelo. La disminución en la humedad volumétrica y  $CE_{ss}$  en el tratamiento control,

mientras que el  $\Psi_m$  permanecía constante y alto, durante el 14 de febrero y el 15 de marzo, indican que los sensores de capacitancia fueron sensibles incluso a valores de salinidad relativamente bajos. La sobrestimación en el contenido volumétrico de agua fue del 4% por cada 1 dS m<sup>-1</sup> de incremento de la  $CE_{ss}$  bajo estas condiciones experimentales (Thompson et al., en prensa).



**Fig.1.** Evolución de (a) la conductividad eléctrica de la solución del suelo ( $CE_{ss}$ ) a 10 cm de profundidad, (b) la humedad volumétrica del suelo (5-15 cm de profundidad) medida con sensores de capacitancia (b), y el potencial mátrico a 10 cm de profundidad (c) en los tres tratamientos. La flecha indica el comienzo de la aplicación de los tratamientos (11/01/06). La doble flecha indica el comienzo de la aplicación de riegos de lavado de sales (17/02/06).

Los resultados de otros trabajos en laboratorio han puesto también de manifiesto el efecto de la salinidad sobre la medida del contenido de agua del suelo realizada con SC. Mead et al. (1995) y Baumhardt et al. (2000) observaron como las sondas de capacitancia sobrestimaban el contenido de agua del suelo después de aplicar una solución salina a columnas de suelo. Kellener et al. (2004) indicaron que un incremento en la conductividad iónica del medio reduce la frecuencia de oscilación medida por la sonda de capacitancia, por lo que se registran valores del contenido de agua del suelo mayores.

La normalización de los sensores de capacitancia con una solución salina de 5 dS m<sup>-1</sup> (Salino N-5) frente a la normalización con una solución de 2 dS m<sup>-1</sup> (Salino N-2) no tuvo efecto en la sobrestimación de la humedad volumétrica cuando se aplicó una solución salina de fertirriego. Mead et al. (1995) indicaron que la normalización de los SC con la solución salina eliminaba completamente el error inducido por niveles de salinidad del suelo moderada ( $CE_e=3.4$  dS m<sup>-1</sup>) y lo reducía apreciablemente en niveles más altos ( $CE_e$  de 7.7 y 15.4 dS m<sup>-1</sup>).

Los resultados de este trabajo han puesto de manifiesto que las medidas del contenido volumétrico de agua del suelo realizadas con un SC fueron muy sensibles a la salinidad del suelo, incluso a valores de salinidad relativamente bajos. La normalización de los SC con una solución salina no eliminó la sobrestimación del contenido de volumétrico del suelo.

*Agradecimientos.* Agradecemos la asistencia técnica prestada por Luis Cardona-Romero en el desarrollo del ensayo y por Francisco Bretones de la Estación Experimental de la Fundación Cajamar por su ayuda y asistencia en temas relacionados con la electrónica y electricidad.

## Bibliografía

- Arregui, L. M. y Quemada, M. 2006. Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. *Plant Soil* 288:57-69
- Baumhardt, R.L., Lascano, R.J. y Evett, S.R. 2000. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1940-1946.
- Fares, A., y Alva, A.K. 2000. Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:311-318.
- Fares, A., V. Polyakov. 2006. Advances in crop water management using capacitance sensors. *Adv. Agron.* 90:43-77.
- Girona, J., Mata, M., Fereres, E., Goldhamer, D.A. y Cohen, M. 2002. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agric. Water Manage.* 54:107-122.
- Kelleners, T.J., Soppe, R.W.O, Robinson, D.A., Schaap, M.G., Ayars, J.E. y Skagg, T.H. 2004. Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:430-439
- Mead, R.M., Ayars, J.E. y Liu, J. 1995. Evaluating the influence of soil texture, bulk density and soil water salinity on a capacitance probe calibration. *ASAE Paper* No. 95-3264. ASAE, St. Joseph, MI.
- Orgaz, F., Fernández, M.D., Bonachela, S., Gallardo, M. y Fereres, E. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agric. Water Manage.* 72:81-96.
- Paltineanu, I.C. y Starr, J.L. 1997. Real-time soil water dynamics using multi-sensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1576-1585.

- Starr, J.L. y Paltineanu, I.C. 1998. Soil water dynamics using multi-sensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:115–122.
- Starr, J.L., y Paltineanu, I.C. 2002. Capacitance devices. p. 463–474. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 4*. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, L.C. y Fernández, M.D. (2007a). Using plant water status to define soil water thresholds for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agric. Water Manage.* 88:147–158
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, M.C. y Fernández, M.D. (2007b). Determination of lower limits for irrigation management using in-situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. *Agric. Water Manage.* doi 10.1016/j.agwat.2007.04.009.
- Thompson, R.B., Gallardo M., Fernández M.D., Valdez L.C. y Martínez-Gaitán C. (en prensa). Effect of salinity on soil moisture measurements made with a capacitance sensor under vegetable production conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*

