

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



***EVALUACIÓN DE DOS EQUIPOS DE MEDIDA DEL  
ESTADO HÍDRICO DEL SUELO (5TE Y MPS2) EN UN  
CULTIVO DE PEPINO EN INVERNADERO***

INGENIERÍA TÉCNICA AGRÍCOLA  
HORTOFRUTICULTURA Y JARDINERÍA  
TRABAJO MONOGRÁFICO

*Alumno: Francisco Javier Pérez Raya*

*Directores:*

*Santiago Bonachela Castaño*

*M<sup>a</sup> Dolores Fernández Fernández*

***Almería, septiembre de 2013***



## AGRADECIMIENTOS

*A todo el personal de la Estación Experimental “Las Palmerillas” y a todas aquellas personas que de forma directa o indirecta, me han ayudado a la realización de este proyecto. A mis tutores María Dolores Fernández Fernández y Santiago Bonachela Castaño por su labor y consejos.*

*A mis padres, Javier y Ángeles, por estar a mi lado ahora y siempre, y a mis hermanas, Alicia y María, por aguantándome en mis momentos de desánimo.*

*A mis compañeros de Agroponiente S.A. por el apoyo e interés mostrado durante y después de mis prácticas de empresa.*

*Muchas gracias.*



# ÍNDICES



## ÍNDICE GENERAL

	<u>Página</u>
1 INTERÉS Y OBJETIVOS.....	1
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 EL SECTOR HORTÍCOLA DE INVERNADERO.....	6
2.1.1. El cultivo del pepino.....	8
2.2 EL USO DEL AGUA EN EL SECTOR HORTÍCOLA DE INVERNADERO.....	8
2.2.1. Recursos hídricos.....	8
2.2.2. Sistema de riego y almacenamiento de agua.....	9
2.2.3. Prácticas de manejo de riego actuales.....	10
2.2.4. Problemas medioambientales asociados con el manejo del riego.....	11
2.3 PROGRAMACIÓN DE RIEGOS EN INVERNADERO.....	12
2.3.1. Programación de riegos mediante datos climáticos.....	12
2.3.2. Programación del riego mediante sensores.....	13
2.3.3. Sensores que miden el estado hídrico del cultivo.....	14
2.3.4. Programación del riego mediante sensores de suelo.....	15
2.3.4.1. <i>Sensores que miden el potencial matricial.....</i>	<i>15</i>
2.3.4.2. <i>Sensores que miden el contenido volumétrico de agua.....</i>	<i>17</i>
2.4 SISTEMAS DE CONTROL DEL RIEGO.....	19

3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 INVERNADERO Y MEDIO DE CULTIVO.....	23
3.1.1. Localización del ensayo y características del invernadero.....	23
3.1.2. Sistema de fertirrigación.....	24
3.2 MATERIAL VEGETAL Y TÉCNICAS DE CULTIVO.....	25
3.2.1. Material vegetal.....	25
3.2.2. Trasplante.....	25
3.2.3. Marco de plantación.....	25
3.2.4. Tutorado, poda y recolección.....	25
3.2.5. Fertilización.....	26
3.2.6. Sanidad vegetal.....	26
3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS.....	27
3.4 MEDIDAS.....	27
3.4.1. Parámetros climáticos.....	27
3.4.2. Estado hídrico del suelo.....	28
3.4.3. Potencial matricial.....	29
3.4.4. Contenido volumétrico de agua en suelo.....	30
3.4.5. Humedad gravimétrica.....	30
3.4.6. Conductividad eléctrica de la solución del suelo.....	31
3.4.7. Potencial hídrico foliar y del tallo.....	31
3.4.8. Comparación de resultados.....	32
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1 POTENCIAL HÍDRICO DEL CULTIVO.....	35
4.2 EQUIPO 5TE.....	36



4.2.1. Conductividad eléctrica del suelo.....	36
4.2.2. Temperatura del suelo.....	37
4.2.3. Contenido volumétrico de agua del suelo.....	39
4.3 EQUIPO MPS2.....	48
4.3.1. Temperatura del suelo.....	48
4.3.2. Potencial matricial del agua en el suelo.....	48
4.3.2.1. <i>Medidas del ciclo de desecación completo</i> .....	48
4.3.2.2. <i>Potencial matricial del agua en el suelo con valores de no estrés hídrico</i> .....	54
5 CONCLUSIONES.....	63
6 BIBLIOGRAFÍA.....	67



## ÍNDICE DE FIGURAS, CUADROS Y FOTOGRAFÍAS

<b>FIGURAS</b>	<u>Página</u>
Figura 3.1. Alzado y planta del invernadero experimental.....	23
Figura 3.2. Perfil suelo enarenado.....	24
Figura 3.3. Ubicación de los equipos de medida con respecto al gotero y a la planta.....	28
Figura 3.4. Recomendación del fabricante para la instalación del equipo 5TE en el suelo....	28
Figura 4.1. Evolución del potencial hídrico en hoja ( $\Psi_h$ ) y en tallo ( $\Psi_t$ ) de plantas de pepino sometidas a desecación y de plantas bien regadas (control) en dos ciclos de desecación. NS: Diferencias no significativas ( $P < 0,05$ ); *: Diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0,05$ ).....	37
Figura 4.2. Conductividad eléctrica de la solución del suelo ( $CE_{ss}$ ) determinadas a partir de las medidas de CE del suelo ( $CE_s$ ) realizadas con los equipos 5TE y medidas puntuales de CE tomadas manualmente con sondas de succión para cada ciclo de desecación.....	36/37
Figura 4.3. Evolución de la temperatura del suelo medida con tres equipos 5TE y con tres equipos MPS2 en los dos ciclos de desecación estudiados.....	38
Figura 4.4. Evolución de la temperatura del suelo a lo largo de un día representativo en cada uno de los dos ciclos de desecación estudiados y medida con tres equipos 5TE y tres equipos MPS2.....	39
Figura 4.5. Dinámica temporal del contenido volumétrico de agua (CVA) del suelo en un cultivo de pepino sometido a dos ciclos de desecación. Medidas de CVA realizadas de forma continua con tres equipos 5TE y medidas diarias realizadas con un equipo TDR en los mismos bulbos húmedos donde estaban localizados los equipos 5TE.....	40
Figura 4.6. Relación lineal entre el CVA del suelo medido con equipos 5TE y TDR para cada uno de los tres equipos 5TE evaluados.....	41
Figura 4.7. Ajuste lineal de los tres equipos 5TE en cada ciclo de desecación.....	43
Figura 4.8. Curva de calibración específica para el suelo enarenado del equipo 5TE.....	44
Figura 4.9. Ajuste lineal de los equipos 5TE calibrados con la curva de calibración específica y con la curva de calibración propuesta por el fabricante del equipo 5TE.....	45

Figura 4.10. Permittividad dieléctrica medida con los tres equipos 5TE sumergidos en agua con distinta conductividad eléctrica.....	47
Figura 4.11. Relación entre el CVA del suelo medido con equipos 5TE y el potencial matricial del agua en el suelo medido con tensiómetros.....	47
Figura 4.12. Dinámica temporal del potencial matricial del agua en el suelo en un cultivo de pepino sometido a tres ciclos de desecación. Medidas realizadas de forma continua con tres equipos MPS2 y medidas diarias realizadas con tensiómetros en los mismos bulbos húmedos donde estaban localizados los equipos MPS2.....	49
Figura 4.13. Evolución del potencial matricial del agua en el suelo de los equipos MPS2 durante el periodo previo al inicio del primer ciclo de desecación cuando el contenido volumétrico de agua en suelo era alto.....	50
Figura 4.14. Muestra de la redistribución del contenido de agua en el bulbo húmedo durante dos días representativo (16/12/12 y 17/12/12).....	50
Figura 4.15. Relación lineal entre el potencial matricial del suelo medido con equipos MPS2 y con tensiómetros en cada uno de los tres equipos MPS2 evaluados.....	51/52
Figura 4.16. Ajuste lineal en cada ciclo de desecación entre las medidas de potencial hídrico del suelo medido con tres equipos MPS2 y con Tensiómetros.....	54
Figura 4.17. Relación lineal entre el potencial del suelo medido con equipos MPS2 y con tensiómetros en cada uno de los tres equipos MPS2 evaluados considerando sólo los periodos del ciclo de desecación sin estrés hídrico.....	55/56
Figura 4.18. Ajuste lineal entre el potencial matricial medido con los equipos MPS2 y el medido con tensiómetro en el mismo bulbo húmedo en los periodos sin estrés hídrico cada ciclo de desecación.....	58
Figura 4.19. Curva de calibración específica del equipo MPS2 utilizando los valores medidos a primera hora de la mañana durante el 2º ciclo para el periodo sin estrés.....	59
Figura 4.20. Ajuste lineal de los equipos MPS2 calibrados con la Ecuación 2 en el primer y tercer ciclo.....	60
Figura 4.21. Relación entre el contenido volumétrico de agua (CVA) y el potencial matricial del agua en el suelo (kPa) medidos durante el segundo ciclo de desecación. Datos promedio de tres equipos 5TE (usando la calibración del fabricante) y 3 tensiómetros.....	61

## CUADROS

## Página

Cuadro 3.1. Nutrientes aportados ( $\text{mM L}^{-1}$ ) y conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva aportada en cada fase fenológica.....	26
Cuadro 3.2. Enemigos naturales empleados para el control de plagas, dosis y fecha de introducción en el invernadero.....	26
Cuadro 3.3. Fechas de aplicación de los ciclos de desecación.....	27
Cuadro 4.1. Índices estadísticos calculados para comparar las medidas con los equipos 5TE y TDR en dos ciclos de desecación: RMSE (Root Mean Square Error) y MBE (Mean Bias Error).....	42
Cuadro 4.2. Resumen de la comparación estadística de equipos y de ciclos (agrupando los equipos) de las rectas de regresión obtenidas entre el CVA medido con cada equipo 5TE y TDR en cada ciclo de desecación. NS: Diferencias no significativas; *: Diferencias estadísticamente significativas.....	42
Cuadro 4.3. Índices estadísticos calculados al comparar las medidas con los equipos 5TE y TDR en el primer ciclo de desecación. El CVA de los equipos 5TE se ha calculado a partir de la permitividad dieléctrica usando la calibración específica desarrollada en este trabajo y la propuesta por el fabricante. RMSE (Root Mean Square Error) y MBE (Mean Bias Error).....	45
Cuadro 4.4. Índices estadísticos calculados de la comparación de las medidas con los equipos MPS2 y Tensiómetros en tres ciclos de desecación. RMSE (Root Mean Square Error), MBE (Mean Bias Error). Ambos en $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .....	52
Cuadro 4.5. Resumen de la comparación estadística de equipos y de ciclos (agrupando los equipos) de las rectas de regresión obtenidas entre el CVA medido con cada equipo 5TE y TDR en cada ciclo de desecación. NS: Diferencias no significativas; *: Diferencias estadísticamente significativas.....	53
Cuadro 4.6. Índices estadísticos calculados de la comparación de las medidas con los equipos MPS2 y Tensiómetros en tres ciclos de desecación considerando sólo los datos en los que el cultivo no presentaba estrés hídrico. RMSE (Root Mean Square Error), MBE (Mean Bias Error). Ambos en $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ .....	56
Cuadro 4.7. Comparación de la ordenada en el origen y de la pendiente de las relaciones lineales que mejor se ajustaron a los datos medidos de potencial matricial entre equipos por ciclo y entre ciclos de desecación agrupando los datos de los distintos equipos de medida ( $P < 0,05$ ). NS: Diferencias no significativas; *: Diferencias estadísticamente significativas.....	57
Cuadro 4.8. Índices estadísticos calculados de la comparación del potencial matricial medido a primera hora de la mañana con los equipos MPS2 corregidos usando la calibración específica y con tensiómetros en el primer y tercer ciclo de desecación en el periodo sin estrés. RMSE (Root Mean Square Error) y MBE (Mean Bias Error).....	60

**FOTOGRAFÍAS**

Página

Fotografía 1.1. Imagen de los equipos 5TE (izquierda) y MPS2 (derecha).....	4
Fotografía 3.1. Detalle de la instalación del MPS2.....	29
Fotografía 3.2. Detalle de la instalación de los equipos 5TE.....	30

# ***INTERESES Y OBJETIVOS***





## 1 INTERESES Y OBJETIVOS

La escasez de recursos hídricos en el litoral de Almería unido a una creciente contaminación de nitratos en los acuíferos de las zonas de producción en invernadero (Decreto 36/2008 de la Junta de Andalucía) hace necesario un uso más eficiente y controlado de la fertirrigación y, en particular, del agua de riego. El reciente incremento de los costes de los fertilizantes (algunos han aumentado su precio más del 25 %) y las exigencias de los mercados de una horticultura más respetuosa con el medio ambiente (Directiva Europea de nitratos 91/676/EC) está obligando al sector a usar criterios técnicos en la gestión del riego/fertirriego que minimicen los problemas de contaminación de suelos y aguas, y optimicen el uso de recursos escasos. Además, la implantación creciente de programadores de riego en las explotaciones comerciales proporciona grandes posibilidades de que el manejo del riego/fertirriego se haga de una manera más eficiente y controlada mediante el uso de equipos de medida y control de agua y nutrientes.

Diversos trabajos han evaluado el uso de sensores que miden el estado hídrico del suelo (tensiómetros, watermark, enviroScan) y de planta (dendrómetros) para su uso en la programación de riegos en cultivos hortícolas en invernadero (Fernández y col., 2012). Sin embargo, alguno de estos equipos no son fáciles de manejar (dendrómetros), son relativamente caros (enviroScan) o se ven afectados por salinidad (Watermark, EnviroScan). Los avances que se han producido en los últimos años en el desarrollo de nuevos sensores proporcionan un amplio abanico de equipos para el manejo del riego. Este trabajo pretende evaluar distintos sensores comerciales que miden el estado o la cantidad de agua en el suelo teniendo en cuenta criterios relativos a su precisión, robustez, precio y sencillez de instalación y manejo, con el objetivo de que puedan utilizarse en la automatización del fertirriego en los cultivos hortícolas en invernadero del litoral de Almería.

Los objetivos específicos de este proyecto fueron evaluar el comportamiento de dos equipos de bajo coste de medida del agua en el suelo. Estos equipos han sido seleccionados siguiendo los criterios anteriormente indicados. Los equipos evaluados han sido (Fotografía 1.1):

1. Un equipo de medida del contenido volumétrico del agua (CVA) en el suelo (STE, Decagon Devices Inc. Pulmann, WA, USA).

2. Un equipo de medida del potencial del agua en el suelo (MPS2, Decagon Devices Inc. Pulmann, WA, USA).



**Fotografía 1.1** Imagen de los equipos 5TE (izquierda) y MPS2 (derecha).

# ***REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA***



## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. EL SECTOR HORTÍCOLA DE INVERNADERO

La superficie de invernaderos en el mundo es superior a las 700.000 ha y con un crecimiento continuo, concentrándose principalmente en Asia (China y Japón), en la cuenca Mediterránea y en países del norte de Europa. La cuenca Mediterránea alberga unas 130.000 ha de invernaderos, destacando Almería con unas 25.983 hectáreas (Sanjuán, 2007), lo que supone el 49% de la superficie de invernaderos de España. Este importante incremento en la superficie de invernaderos se ha debido al impacto económico que produce en la zona y porque es posible obtener producciones de calidad con un uso más eficiente de recursos tales como el agua, pesticidas, fertilizantes y mano de obra (Pardossi y col., 2004). Así en España, aunque la superficie de invernaderos tan sólo supone el 0,2 % de la superficie total útil (SAU) el valor de la producción supone el 10% de la producción final agraria (PFA) de España. A nivel de la Comunidad Autónoma de Andalucía, la horticultura bajo invernadero, junto con el aceite de oliva y las aceitunas, es un sector clave en la economía andaluza, desde el punto de vista económico, al ser un sector generador de empleo y permitir que el balance comercial agrario sea positivo.

En Almería, a pesar de contar con una extensa superficie agrícola de 179.223 ha en el año 2011 (Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, Junta de Andalucía), y con un gran valor de la producción agrícola de 1.668.385 millones €, las hortalizas son el pilar principal de la agricultura almeriense. El valor de la producción hortícola supone el 94,95% del total y el 91,42% del volumen total producido, aunque la mayor superficie corresponde a los frutales con una superficie de 88.929 ha. Los productos hortícolas comercializados tienen como destino el mercado español con el 30,5% y el restante 69,5% de la producción hortícola es exportada hacia países de la Unión Europea, Suiza, este Europa, Canadá, USA, etc. Los principales países destino de las exportaciones son Alemania (33%), Francia (18%), Holanda (14%) y Reino Unido (11%) (Fundación Cajamar, 2012). Las fechas correspondientes donde se realizan dichas exportaciones son entre septiembre y junio, concentrándose en los meses de diciembre, enero, febrero y mayo. Además, la horticultura de invernadero de Almería tiene un gran impacto en la economía de la provincia, con un valor de la producción comercializada de 1.413.412 millones de € (Fundación Cajamar, 2012), y un importante desarrollo de las empresas de comercialización y manipulación, con una facturación de 1885 millones € y 8980

trabajadores, así como de la industria auxiliar, que da empleo entorno a 5.400 personas y factura 1.322 millones de euros (Fundación Tecnova, 2007).

El sistema productivo de la provincia de Almería se caracteriza por el empleo de estructuras de bajo coste, con reducido consumo de energía y mínima modificación del microclima generado bajo el invernadero, siendo el invernadero “parral” o “tipo Almería” el principal representante. El invernadero parral se desarrolló en la época de los años 60 a partir de unas estructuras del mismo nombre que servían de soporte al cultivo de uva de mesa de la zona (parras). Estas estructuras están conformadas a base de postes de madera y un tejido o malla de alambre (Bretones, 1992). En un principio estos invernaderos eran completamente planos, y posteriormente se le fue dando una inclinación con el objetivo de evacuar el agua de la lluvia apareciendo variantes de los invernaderos parrales: a dos aguas y raspa y amagado .

En la actualidad el término *parral* se aplica en general a las estructuras en las que la sujeción del plástico se realiza deslizándolo por medio de un doble tejido de alambre; como alternativa a este sistema tenemos la de tensar el plástico fijándolo a perfiles tipo omega mediante diversos sistemas de taqueo. Las estructuras de invernadero predominantes son el parral multicapilla simétrico con casi un 52 % y el parral plano con el 42 % (Céspedes y col., 2009). En cuanto a la superficie invernada, el 60 % está ocupada por invernaderos tipo parral multicapilla simétrico frente al 33 % ocupada por invernaderos tipo parral plano (Céspedes y col., 2009). Además de estos invernaderos tradicionales se encuentran los invernaderos multitúnel (1,2%) (Céspedes y col., 2009) que se caracterizan por la cubierta curva y por su estructura totalmente metálica.

### **2.1.1. El cultivo del pepino**

La producción de pepino a nivel mundial ha aumentado considerablemente en los últimos años debido a la gran demanda, especialmente desde el año 2000 que incrementó muy rápido su producción llegando en 2005 a los 42 millones de toneladas. En la actualidad, el pepino es una hortaliza muy cultivada en Europa y América del Norte. En España, la superficie destinada al cultivo de pepino es de 8.148 ha, con una producción de 664.975 toneladas (Junta de Andalucía, 2012).

En la provincia de Almería, el cultivo de pepino es uno de los principales cultivos junto con el tomate y el pimiento, con una superficie y con una producción, de 4.498 ha de 378.317 toneladas, respectivamente (Junta de Andalucía, 2012). Principalmente, la producción de

pepino es para consumo en fresco, estando la mayor parte de la producción de Almería destinada a la exportación, colocando así a Andalucía en la comunidad de España que exporta mayor cantidad con un 86,2% (Junta de Andalucía).

## **2.2. EL USO DEL AGUA EN EL SECTOR HORTÍCOLA DE INVERNADERO**

### **2.2.1 Recursos hídricos**

Los recursos hídricos en la provincia de Almería son escasos lo que ha llevado a que durante décadas se haya padecido un fuerte déficit estructural de agua. El inventario de regadíos de la Junta de Andalucía (2008) cifra en  $105 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$  el déficit hídrico estructural. La agricultura en invernadero es la principal usuaria de agua en la provincia. Los recursos disponibles se distribuyen en un 20% de origen superficial y el 80% de origen subterráneo. Los recursos superficiales proceden del pantano de Benínar y abastecen de riego a la comunidad de regantes Sol-Poniente. El uso mayoritario de origen subterráneo ha producido la sobreexplotación de los acuíferos en el campo de Dalías, con el consiguiente proceso de salinización (IGTME, 1991). La demanda creciente de agua por la agricultura, industria y población ha empujado a buscar otras fuentes alternativas como el trasvase, desalación y depuración.

En la actualidad se está utilizando agua procedente de desalación y depuración para el riego de los cultivos hortícolas. La desaladora de Carboneras tiene una capacidad de producción de  $40 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$  aproximadamente, y a pesar de su mayor coste se está introduciendo en zonas con aguas de mala calidad del Levante de Almería. La Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.) de la ciudad de Almería produce  $15 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$  de agua depurada, que tras ser sometida a un tratamiento es usada en los regadíos del Bajo Andarax. En la actualidad, en unas 2.000 ha de invernaderos de la Vega de Almería utilizan estas aguas como fuente primaria de riego y, en un futuro próximo, está previsto reutilizar gran parte de las aguas depuradas del Campo de Dalías.

El agua de lluvia recogida de las cubiertas de los invernaderos es, en la actualidad, una fuente secundaria de agua en numerosas explotaciones, y permite disponer de agua de calidad y evitar asimismo problemas de inundaciones o avenidas. Para evitar este último problema las ordenanzas municipales recogen la obligatoriedad de disponer de las instalaciones necesarias para conducir el agua de lluvia y de condensación recogida sobre la cubierta, hasta el depósito de recogida u otros dispositivos.

### 2.2.2. Sistemas de riego y almacenamiento de agua

El sistema de riego utilizado en los invernaderos es el riego por goteo con un 99,7% de la superficie de los invernaderos (Pérez y Céspedes, 2001), con un coeficiente de uniformidad medio del 77% (Lupiañez, 2009). Estos valores están por debajo del mínimo obligatorio (85%) del reglamento de producción integrada de cultivos hortícolas protegidos de Andalucía (Orden de 10 octubre de 2007, BOJA núm. 211). Un estudio reciente (Baeza y col., 2010) ha puesto de manifiesto que tan sólo el 54 % de las fincas evaluadas presenta una uniformidad de distribución aceptable, buena o excelente, con coeficiente de uniformidad superior al 80%. Teniendo en cuenta que la mayoría de los invernaderos ocupan superficies llanas y que las subunidades de riego suelen ser pequeñas, la uniformidad de distribución del agua de riego debería incrementarse mejorando el manejo y el mantenimiento de los sistemas de riego: regulación y control de presiones en las subunidades, reparación de fugas y limpieza de la red, manejo de balsas y filtros, etc. (Lupiañez, 2009).

El sistema de riego localizado en los invernaderos de Almería se caracteriza por el empleo de goteros interlinea en un 79% de la superficie y los goteros autocompensantes con un 21% de la superficie de los invernaderos (Pérez y Céspedes, 2001). Los caudales más usuales en los goteros integrados son de 2 y 3 litros hora<sup>-1</sup>, prevaleciendo los caudales de 3 litros hora<sup>-1</sup> y el 81% de la superficie de invernaderos tiene emisores con menos de 10 años y de estos el 55% son menores de 5 años (Pérez y Céspedes, 2001).

En general, las instalaciones presentan un elevado nivel tecnológico, casi el 50% de las fincas cuenta con un programador de riego (Céspedes y col., 2009) que permite automatizar las operaciones de riego y fertilización.

Una gran ventaja del sistema de riego por goteo es que permite aplicar los fitosanitarios y fertilizantes disueltos en el agua de riego aprovechando la localización y racionamiento del agua, evitando las pérdidas por lixiviación en comparación con otros sistemas de riego. Los abonos disueltos se almacenan en depósitos donde se extraen mediante equipos para su inyección en la tubería de riego.

La mayoría de las explotaciones de invernaderos disponen de balsas de riego (83,5%, Céspedes et al., 2009) para garantizar el suministro hídrico a los cultivos, que son, en general, pequeñas y sin cubrir (21,7% cubiertas). En la provincia de Almería se han inventariado 8.730 balsas



mayores de 150 m<sup>2</sup>, que ocupan unos 6,17 km<sup>2</sup> y que están concentradas en las zonas invernadas (Casas y col., 2011).

### 2.2.3. Prácticas de manejo del riego actuales

La gestión del riego que se realiza en los invernaderos de Almería en la mayoría de los casos está basada en la experiencia de técnicos y agricultores (Pérez-Parra y Céspedes, 2001; Thompson y col., 2007). El 18,7 % de los productores manejan el riego según las recomendaciones del técnico y un 57,2 % sigue las recomendaciones del técnico unido a su experiencia (Pérez-Parra y Céspedes, 2001). Los cultivos son regados con frecuencias de riego que oscilan entre un riego cada tres o cuatro días y un riego diario, en función, sobre todo, de la demanda evaporativa de los cultivos, de la época del año y del tipo de suelo y el volumen de agua aplicado en cada riego. Esta gestión del riego es poco precisa ya que no se tienen en cuenta las necesidades reales de los cultivos. Por ello, es necesario que los agricultores adopten prácticas de riego más racionales. Entre ellas estarían los métodos de programación del riego basados en las necesidades hídricas de los cultivos (Fernández y col., 2001), o en el empleo de sensores que monitorizan el estado hídrico del suelo o de la planta permiten la gestión del riego.

El aporte medio de agua de riego a los principales cultivo hortícolas en suelo (sin incluir el tomate), medidos durante 6 campañas agrícolas consecutivas (1993/94–1998/99) en 41 invernaderos representativos del Campo de Dalías (Fernández y col., 2007), fue de 228 L m<sup>-2</sup> por ciclo de cultivo y osciló entre 158 L m<sup>-2</sup> en la judía verde de otoño-invierno y 363 L m<sup>-2</sup> en el pimiento de otoño-invierno. En un estudio similar en el Campo de Níjar el aporte medio a un tomate de otoño-primavera fue de 558 L m<sup>-2</sup> (Carreño y col., 2000). Estos valores son claramente inferiores a los aportes a dichos cultivos al aire libre (Fernández y col., 2007), debido, sobre todo, a la menor demanda evaporativa en el invernadero (menor radiación solar y velocidad de viento), en comparación al aire libre (Orgaz y col., 2005), y a que los cultivos hortícolas en invernadero suelen desarrollarse en ciclos centrados en invierno, mientras que al aire libre los ciclos suelen estar centrados en verano (Orgaz y col., 2005).

Los aportes por campaña agrícola son generalmente mayores que por ciclo de cultivo, al ser frecuentes las rotaciones anuales de dos cultivos. Los aportes medios a las principales rotaciones de cultivo en invernadero del Campo de Dalías oscilaron entre 363 (pimiento de otoño-primavera) y 502 L m<sup>-2</sup> (pimiento de otoño-invierno + melón de primavera), con un valor promedio de 444 L m<sup>-2</sup> (Fernández y col., 2007). Los aportes totales anuales suelen ser aún

mayores, ya que es común realizar riegos de desinfección, lavado de sales y mantenimiento del sistema de riego entre campañas agrícolas. Considerando estos riegos suplementarios (Peña, 2009), el valor medio estimado del aporte total anual es de  $495 \text{ L m}^{-2}$  en el campo de Dalías.

La gestión del riego en explotaciones hortícolas pertenecientes a la zona regable del Poniente de Almería se ha evaluado mediante la utilización de indicadores o índices de gestión del riego (RIS, suministro relativo de agua de riego, siglas en inglés). Los valores medios del suministro relativo de agua de riego (RIS) es de 1,13 (González, 2003; Fernández y col., 2007), lo que significa que los agricultores aportaron, de media, un 13% más de agua de las necesidades de sus cultivos. Se trata de un valor medio aceptable, ya que los agricultores buscan maximizar el rendimiento y la calidad de sus productos. Por el contrario, el cultivo de pepino se riega, normalmente, por exceso en las explotaciones del Poniente de Almería, aplicándose un 160% de riego en relación a los requerimientos hídricos del cultivo.

En cuanto al manejo del riego a lo largo del ciclo de cultivo, en general los volúmenes de riego aportados son excesivos durante el periodo de establecimiento del cultivo, ajustándose bastante bien a los requerimientos hídricos del cultivo durante el resto del ciclo (González, 2003; Fernández y col., 2007). Durante el periodo de establecimiento de los cultivos en invernadero, los requerimientos hídricos son muy bajos (inferiores a  $0,5 \text{ mm día}^{-1}$ ), pero normalmente los agricultores aplican riegos excesivos para mejorar la disponibilidad de agua en el suelo cuando el sistema radicular es pequeño y mejorar las condiciones microclimáticas (reducir el déficit de presión de vapor con la evaporación de agua desde el suelo).

#### **2.2.4. Problemas medioambientales asociados con el manejo del riego**

Los problemas medioambientales asociados al riego en el sistema de producción de hortalizas bajo invernadero de Almería son: (i) contaminación de acuíferos con nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), (ii) sobreexplotación de acuíferos profundos, (iii) ascenso del nivel freático del acuífero superficial del Campo de Dalías, y (iv) intrusión salina en el acuífero del Campo de Dalías. Obras de ingeniería como la construcción de plantas desaladoras y el bombeo del agua desde la Balsa del Sapo pueden ofrecer soluciones al menos parciales sobre estos últimos aspectos. La reducción de la contaminación con  $\text{NO}_3^-$  del acuífero requiere cambios en las prácticas de manejo del riego y la fertilización.

La contaminación de los acuíferos con nitratos es consecuencia de la lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  desde sistemas agrícolas. Los acuíferos que reciben drenajes de ecosistemas naturales tienen

concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  muy bajas  $<5 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ . La lixiviación de nitratos consiste en el transporte vertical de nitratos disueltos en el agua de drenaje y está asociado al uso de fertilizantes nitrogenados en agricultura siendo común en la agricultura de regadío. La contaminación de acuíferos con nitratos es un tema de salud pública. El consumo de aguas con nitratos puede inducir la enfermedad metahemoglobinemia, también conocida como “síndrome de los bebés azules” que afecta a niños pequeños.

Por ello, existe legislación que limita la concentración de  $\text{NO}_3^-$  de las aguas potables. La Directiva Nitratos de la UE (Directiva 91/676/CEE del Consejo de 12 de diciembre de 1991) establece un nivel máximo de  $50 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$  en todas las aguas subterráneas y superficiales de la UE. Cuando la concentración de nitratos excede este límite, las zonas asociadas son declaradas ‘Zonas Vulnerables a la contaminación por Nitratos (ZVN)’, en las cuales se deben adoptar ‘programas de actuación’ encaminados a la reducción de la contaminación por nitratos de origen agrario.

### **2.3. PROGRAMACIÓN DE RIEGOS EN INVERNADERO**

Las técnicas desarrolladas para la programación del riego tienen como objetivo ayudar en la toma de decisiones en el manejo del riego, cuándo regar y cuánta agua aplicar. En zonas con escasez de agua y/o donde el coste de este recurso es elevado, como es el caso del cultivo en invernadero en Almería, exige un uso más eficiente y para ello es imprescindible que se desarrollen técnicas de programación de riegos adaptadas a esa zona. La programación del riego se puede realizar a partir de medidas del contenido de agua en el suelo, medidas del estado hídrico de la planta o a partir de datos climáticos.

#### **2.3.1. Programación del riego mediante datos climáticos**

La programación del riego con datos climáticos es el procedimiento más extendido a nivel mundial y se basa en la utilización expresiones matemáticas que, a partir de datos climáticos, permiten estimar el volumen de agua consumido por el cultivo o evapotranspiración del cultivo (ETc). Se sigue una contabilidad de pérdidas (ETc) y ganancias (riegos y lluvia) de modo que, en todo momento puede conocerse el agua que queda en el suelo a disposición del cultivo. Cuando se utilizan sistemas de riego por goteo, dada la elevada frecuencia de riegos se suele ignorar el papel del suelo como almacén de agua y se considera que el contenido de agua en el suelo no varía con el tiempo. La utilización de una cubierta de plástico en

invernadero permite ignorar la contribución de la lluvia y la programación del riego se simplifica y la cantidad de agua a aplicar es igual a las estimaciones de la ETC.

Se han desarrollado numerosos modelos para estimar la ETC, pero el modelo desarrollado por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977) es el más ampliamente usado a nivel mundial en cultivos al aire libre. Este modelo estima el consumo de agua del cultivo o evapotranspiración (ETc) como el producto de la evapotranspiración de un cultivo de gramíneas de referencia (ETo), que cuantifica el efecto que tiene el clima sobre la demanda de agua del cultivo, y el coeficiente de cultivo (Kc), que depende del cultivo en cuestión, su estado de desarrollo y disponibilidad de agua en el suelo, sirve como una integración de las diferencias físicas y fisiológicas entre el cultivo y el cultivo de referencia. Esta separación de los efectos del clima y cultivo sobre el consumo de agua ha permitido su aplicación en distintas condiciones climáticas o de cultivo.

Este modelo ha sido calibrado y evaluado en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar para su uso en los cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español (Fernández y col., 2001; Orgaz y col., 2005; Bonachela y col., 2006; Fernández y col., 2010). Utilizando el modelo de la FAO adaptado a invernadero se desarrolló un software, PrHo v 2.0 (© 2008 Fundación Cajamar; Fernández y col., 2008) y se han elaborado recomendaciones de riego basadas en datos climáticos medios de radiación solar exterior y temperatura de dentro de invernadero de una serie histórica de más de veinte años (<http://www.publicacionescajamar.es/series-sistematicas/centros-experimentales-las-palmerillas/dosis-de-riego-para-los-cultivos-hortícolas-bajo-invernadero-en-almeria/>). Estas herramientas se desarrollaron que técnicos y agricultores optimicen los aportes de riego a los cultivos hortícolas bajo invernadero, y que además sean fácilmente utilizables.

### **2.3.2. Programación del riego mediante sensores**

La programación de riego mediante sensores se basa en la medida del estado hídrico del suelo o de la planta, y permiten adaptar el manejo del riego a las características particulares de cada cultivo/finca. Hasta finales de los 80, la mayor parte de estos sensores requerían medidas manuales y su uso en fincas comerciales era muy limitado. El desarrollo tecnológico reciente ha permitido el desarrollo de una nueva generación de sensores con mayores prestaciones, así como de las tecnologías de monitorización y transmisión de datos.

### **2.3.3. Sensores que miden el estado hídrico del cultivo**

La programación de riegos basada en medidas del estado hídrico de la planta tiene como principal ventaja sobre otros métodos que la medida se hace directamente en la planta, que es la unidad de producción, en lugar de usar un parámetro ambiental (ej. suelo) o una estimación basada en cálculos matemáticos. Los sensores que más aplicaciones tienen para el manejo del riego son: (i) sensores de temperatura de hoja/cubierta, (ii) sensores de flujo de savia y (iii) sensores de diámetro del tallo (Gallardo y Thompson, 2003).

Los sensores de diámetro de tallo miden la contracción del tallo que ocurre durante el día en respuesta a la transpiración y el crecimiento del tallo; ambos parámetros son muy sensibles al estrés hídrico. Los sensores de flujo de savia que miden directamente la transpiración de la planta y la diferencia de temperatura entre la hoja o el cultivo y el ambiente es también un indicador sensible al estrés hídrico. Generalmente, estos sensores permiten identificar el momento del riego pero no de la dosis a aplicar. Su aplicación en la programación del riego (PR) necesita que previamente se haya definido los valores umbrales (medidas tomadas en plantas bien regadas) que permitan decidir el momento de riego. Además, los valores necesitan ser normalizados para eliminar las variaciones en el estado hídrico debidas a la demanda evaporativa, de forma que se pueda distinguir entre los efectos debidos a un suelo con un contenido de agua insuficiente o las debidas a la demanda evaporativa.

El uso de los sensores del estado hídrico del cultivo en la programación de riego básicamente se ha realizado a nivel de investigación y su aplicación en fincas comerciales ha sido muy limitada. La interpretación de los datos, el coste, la complejidad técnica, mantenimiento y apoyo técnico son algunas de las causas. Por ejemplo, la utilización de los sensores del diámetro del tallo en cultivos hortícolas de ciclo corto en invernadero la interpretación de los datos es más difícil debido a una rápida tasa de crecimiento; además su sensibilidad en la detección de estrés hídrico en cultivos de invernadero decrece en condiciones invernales de baja demanda evaporativa (Gallardo y col., 2006).

### **2.3.4. Programación del riego mediante sensores de suelo**

El manejo del riego con sensores se basa en mantener la humedad del suelo entre dos límites, uno inferior que indica los valores más secos del suelo cuando se debe iniciar el riego para evitar que el cultivo sufra estrés hídrico y un límite superior que indica los valores más húmedos que se permiten para que el drenaje sea mínimo.

#### 2.3.4.1. Sensores que miden el potencial matricial

El potencial matricial ( $\Psi_m$ ) es el resultante de la fuerza con la que el agua es retenida por la matriz del suelo y es un indicador del esfuerzo que tiene que realizar la planta para extraer agua. El potencial matricial del suelo es determinado por medio de sensores como son el tensiómetro, bloque de yeso, matriz granular y MPS2.

Los tensiómetros son instrumentos utilizados para registrar el potencial matricial del agua en el suelo, proporcionando información de cuál es el grado de limitación que la planta encuentra para extraer agua. Este instrumento es sencillo, fácil de usar, barato y no les afecta la salinidad.

El principio de funcionamiento de este sensor consiste en medir la fuerza con que succiona el suelo la columna de agua, donde previamente es necesario que se establezca el equilibrio del movimiento del agua entre el suelo de alrededor y la cápsula cerámica. El agua se mueve por diferencias de potenciales entre dos puntos, es decir, se mueve desde un punto de más energía hacia otro punto de menos energía.

Los tensiómetros tienen un rango de trabajo suficiente para las condiciones agronómicas. El rango de trabajo del tensiómetro viene determinado por la presión a la que se introduce el aire en el interior. La presión a la cual esto ocurre depende del radio efectivo del poro más grande de la cápsula cerámica y de la tensión superficial del fluido del tensiómetro. Así a mayor poro menor es la presión de trabajo. Normalmente el límite superior de los tensiómetros es de -80 kPa, acercándose a -100 kPa, donde el vapor de agua sale espontáneamente fuera de la solución. El rango de trabajo del tensiómetro se puede acortar mediante la utilización de una cápsula cerámica para este determinado rango. El rango de trabajo para un microtensiómetro aireando el fluido cuidadosamente se puede aumentar hasta el potencial de -140 kPa (Tamari y col., 1993).

El tiempo de respuesta del sensor viene dado por el equilibrio necesario entre el agua del tensiómetro y la de alrededor de la cápsula cerámica. La rapidez de respuesta es muy alta independientemente del tipo del suelo (Young y Sisson, 2002).

Es esencial que exista un buen contacto entre la cápsula cerámica y el suelo. El hoyo que se requiere para introducir el tensiómetro al suelo debe ser de un tamaño igual al diámetro del tubo plástico del instrumento. Generalmente, se utiliza una barrena de suelo o un tubo de

hierro galvanizado para hacer el hoyo. Cuando el hoyo es muy grande y el contacto no es bueno, el aire penetra en la cápsula cerámica y las lecturas altas no son las correctas. También puede deslizarse agua libre por las paredes exteriores del tubo plástico y entonces las lecturas serán muy bajas e incorrectas.

El MPS2 es un sensor que mide el potencial matricial ( $\Psi_m$ ) y la temperatura del suelo. El potencial matricial se debe a la atracción del agua por las partículas del suelo, y es el componente más importante del potencial hídrico del suelo. El MPS2 mide únicamente el potencial matricial, por lo que en suelos salinos será necesario cuantificar independientemente el potencial osmótico.

El equipo mide la permitividad dieléctrica de una matriz sólida compuesta de dos discos de cerámicas. La permitividad dieléctrica de los discos cerámicos porosos depende de la cantidad presente de agua en los espacios porosos de la cerámica. El contenido en agua de los discos de cerámica porosa se puede transformar en potencial hídrico usando la curva de humedad característica de la cerámica. El drenaje de la cerámica en un amplio rango de potencial es un punto importante en el diseño del sensor. El potencial hídrico al cual el poro drena (el potencial de entrada de aire) depende del tamaño del poro y una cerámica ideal debería tener poros que oscilaran desde muy pequeños a muy grandes. La cerámica del MPS2 fue diseñada para aproximarse al ideal, sin embargo tiene un volumen de poros grandes que drenan a potenciales hídricos más húmedos. Esto limita el rango de medida entre -5 kPa (el potencial de entrada del aire en los poros más grandes de la cerámica) y -500 kPa.

El MPS2 utiliza un termistor de superficie para medir la temperatura y está situado justo debajo del molde de plástico. Es importante que el equipo esté perfectamente enterrado para que el sol no incida directamente en el sobremolde de plástico, lo caliente y origine medidas erróneas.

#### 2.3.4.1. Sensores que miden el contenido volumétrico de agua

Los sensores para la medida del contenido de agua en el suelo más recientes se basan en la medida de la constante dieléctrica del suelo (Topp y col., 1980). El agua libre tiene una alta constante dieléctrica (80), mientras que la de los sólidos del suelo es de 3 a 7, siendo la del aire igual a 1. La diferencia de valores entre las constantes dieléctricas de los componentes del

suelo húmedo permite estimar el contenido de agua libre a partir de la medida de la constante dieléctrica.

Se pueden distinguir principalmente dos tipos, los basados en la Reflectometría en el Dominio del Tiempo (Time Domain Reflectometry, TDR) y los basados en la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (Frequency Domain Reflectometry, FDR).

La Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR) es un método (TDR) que mide el tiempo que tarda en recorrer un pulso electromagnético las dos varillas de acero inoxidable separadas 5 cm. Las ondas se transmiten entre dos o más varillas de acero inoxidable a través del suelo, el cual se comporta como un dieléctrico. Un generador envía una serie de pulsos electromagnéticos, la señal se refleja en el final de cada línea de transmisión (varilla) y retorna de vuelta al receptor de la unidad principal. El tiempo recorrido, para una longitud dada de varillas, es proporcional a la constante dieléctrica del suelo. La velocidad con la que se desplaza el pulso depende del material en contacto y circundante a las varillas. La fracción volumétrica del suelo ocupada por agua tiene una enorme influencia en la constante dieléctrica del suelo ya que su valor dieléctrico (80), mucho mayor que el de los otros constituyentes del suelo (suelo mineral 4; materia orgánica 4; aire 1). Debido a la gran diferencia entre la constante dieléctrica del agua y la del resto de componentes del suelo, la velocidad de desplazamiento depende principalmente del contenido de agua del suelo (Topp y col., 1980).

El TDR mide con precisión el contenido volumétrico de agua de suelos hasta con un 50% de grava (Drungil y col., 1989), pero no en suelos con densidades bajas (Dirksen y Dasberg, 1993; Weitz y col., 1997) y en suelos con alto contenido orgánico o con altos contenidos en arcilla (Brisco y col., 1992; Dasberg y Hopmans, 1992; Roth y col., 1992; Weitz y col., 1997).

Las ventajas del TDR son la alta precisión, no requiere una calibración específica, dan lecturas sencillas y es un método no destructivo. Sin embargo, es un sistema complejo y caro, y tiene baja aplicabilidad en condiciones altamente salinas (Dasberg y Or, 1999). Una de las mayores dificultades del TDR es que el uso de la longitud del cable está restringido a menos de 25 m (Ferré y Topp, 2002).

Recientemente, se han desarrollado sensores dieléctricos que permiten la medida simultánea de humedad y CE, lo que los hace muy interesantes para su uso en el manejo del riego y fertilización. Como ejemplo de estos sensores son el WET (Delta T Devices Ltd), GS3 (Decagon



Devices, Inc.) y 5TE (Decagon Devices Inc, USA). El sensor GS3 está indicado para su uso en sustratos, mientras que los sensores 5TE y WET pueden usarse en suelo o sustrato, pero el precio del 5TE es inferior debido a un diseño más simple.

El 5TE mide la humedad de suelo, temperatura de suelo y conductividad eléctrica del mismo, tres parámetros fundamentales para gran variedad de estudios en vegetales y para el monitoreo productivo en cultivos. Es un sensor capacitivo del tipo Frequency Domain Reflectometry (FDR, Reflectometría en el dominio de la frecuencia) que usa un campo electromagnético para medir la constante dieléctrica del suelo ya calcular su contenido de humedad (Topp y col., 1980). El sensor emite una onda a 70 MHz a las varillas que se cargan en función del material. La carga almacenada es proporcional a la constante dieléctrica y al contenido de agua del suelo.

La conductividad eléctrica (CE) se mide mediante la aplicación de una corriente eléctrica alterna a dos electrodos y mide la resistencia entre ellos. La conductividad se calcula multiplicando la inversa de la resistencia (conductancia) por la constante de celda (que es la relación entre la distancia entre los electrodos y su área). El 5TE utiliza como electrodos dos tornillos ubicadas en dos de las varillas del equipo para medir la conductividad eléctrica del suelo, que es la CE total del medio (agua, aire y nutrientes). Para el manejo de la fertilización es más interesante conocer la CE de la solución del suelo, que es un buen indicador de la concentración de solutos en el suelo. La CE de la solución del suelo puede estimarse a partir de los valores medidos de la CE del suelo (Hilhorst, 2000). El sensor está calibrado de fábrica con una precisión del 10% para un rango de 0 a 7  $\text{dS m}^{-1}$ . En este rango de conductividad eléctrica del suelo las medidas del contenido agua no se ven afectadas (Kizito y col., 2008), para valores superiores a 7  $\text{dS m}^{-1}$  se requiere una calibración específica.

El 5TE utiliza un termistor de superficie para medir la temperatura, que se encuentra junto a la base de una de las púas. Es importante que el sensor esté bien enterrado pues si el sol da directamente sobre el molde de plástico es obvio que dará lecturas muy por encima de la real.

En la instalación del sensor es importante que éste quede completamente enterrado en el medio de cultivo porque las medidas se pueden ver afectas fuertemente. También es importante asegurarse un buen contacto entre el suelo y las varillas.

## 2.4. SISTEMAS DE CONTROL DEL RIEGO

En la actualidad, los programadores de riego no han adoptado aún los sistemas de control más avanzados y se basan en la estrategia on/off (Romero y col., 2012). Las soluciones comerciales disponibles requieren que la dosis de riego sea introducida por el usuario. Solo después, el programador de riego actúa arrancando/parando la bomba de riego y abriendo/cerrando las válvulas para aplicar la dosis de riego a cada sector. Un sistema de control muy popular está basado en aplicar el riego para reponer el agua usada por el cultivo en días previos, usando la evapotranspiración del cultivo (ETc) o cambios en el contenido de agua del suelo.

Comercialmente existen programadores automáticos del riego que regulan la humedad del suelo en base a medidas proporcionadas por sensores. El sistema más simple de programador de riego consiste en aplicar el riego cuando se detecta que las medidas realizadas por los sensores están por debajo de un límite y aplican la dosis de riego introducida por el usuario. Un sistema más complejo sería aquel en el cual el riego se activa cuando detecta que la humedad del suelo medida con los sensores está por debajo de un límite y detiene el riego cuando la humedad supera el límite superior. Este tipo de programadores requieren que se equipen con sensores precisos, que se realicen medidas de humedad continuas a intervalos de tiempo pequeños, que no se vean afectados por salinidad y que sean robustos. Estos sistemas comerciales han sido comparados por Cardenas-Lailhacar et al. (2008, 2010) y concluyen, que cuando los límites se han definido adecuadamente, todos los sistemas tienen potencial para ahorrar agua cuando se comparan con un manejo tradicional basado en la programación en base a tiempo de riego. Estos autores también han mostrado que la incorporación de un sensor de lluvia como un feed-forward puede ahorrar una cantidad sustancial de agua de riego.

En general los sensores de planta han tenido menos aplicaciones prácticas para el manejo del riego que los sensores de suelo. A pesar de que el control del riego basado en medidas de plantas tiene mayor relevancia en el funcionamiento de la planta que el control basado en medidas de suelo, pero las dificultades prácticas en su implementación han limitado su uso por agricultores (Jones, 2004).

# ***MATERIAL Y MÉTODOS***



### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. INVERNADERO Y MEDIO DE CULTIVO

##### 3.1.1. Localización del ensayo y características del invernadero

El ensayo se realizó durante un ciclo de cultivo de otoño-invierno de la campaña 2012/2013 en un invernadero de la Estación Experimental de Las Palmerillas (Cajamar Caja Rural), situada en el término municipal de El Ejido, Almería (36° 48' N; 2' 3° W y 155 m altitud).

El invernadero era asimétrico INACRAL (Castilla y col., 1989) de dimensiones 30 × 21 metros (Figura 3.1), con una pendiente de 8,2° en la cara sur y 18,5° en la cara norte, y la orientación era Este-Oeste. La estructura era de tubo galvanizado sobre peanas redondas de cemento. El techo estaba formado por un mallado de alambre galvanizado que sostenía la lámina plástica polietileno tricapa incoloro difuso de larga duración. El invernadero también contaba con un doble techo fijo realizado con plástico de 37,5 micras de espesor, colocado en tiras de 4 m de ancho unidas entre sí con la finalidad de evitar el goteo de agua de condensación sobre el cultivo, como medida física de control de mildiu (*Pseudoperonospora cubensis*).

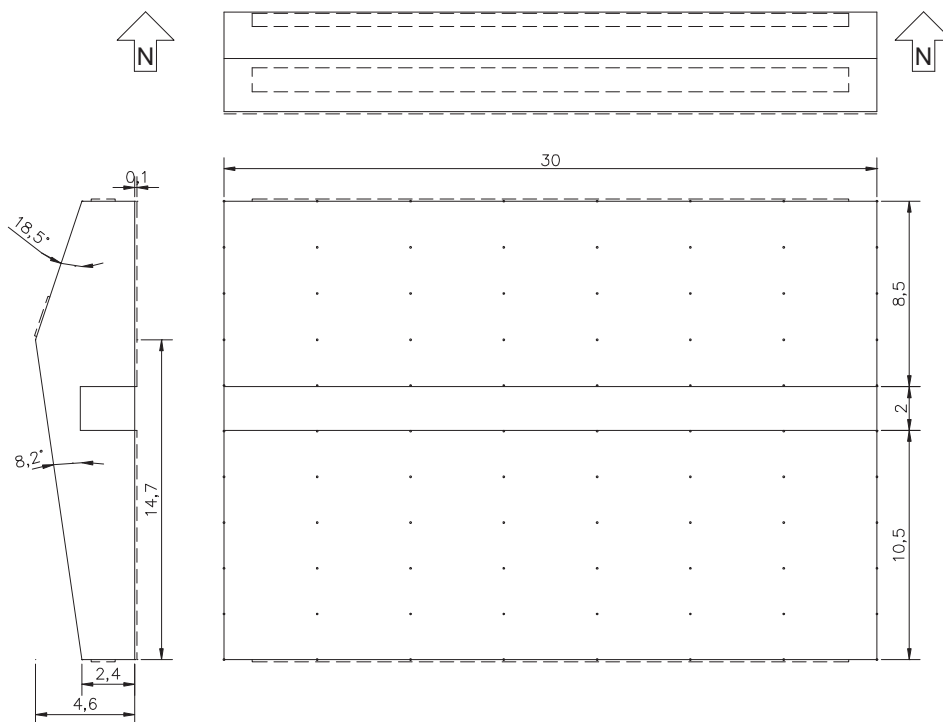


Figura 3.1 Alzado y planta del invernadero experimental.

La ventilación del invernadero era pasiva, con dos ventanas cenitales abatibles y dos laterales enrollables, todas ellas cubiertas con una malla de 20 x 10 hilos  $\text{cm}^{-2}$ . La apertura y cierre de las ventanas estaba automatizada con un controlador (Hortimax, Pijnacker, The Netherlands) que se activaba cuando la temperatura superaba los 24°C.

El suelo del invernadero era un suelo enarenado típico compuesto por una capa de suelo original nivelada, una capa de 30 cm de suelo aportado de textura franca y, por encima, una capa de 10 cm de arena de playa (Figura 3.2).

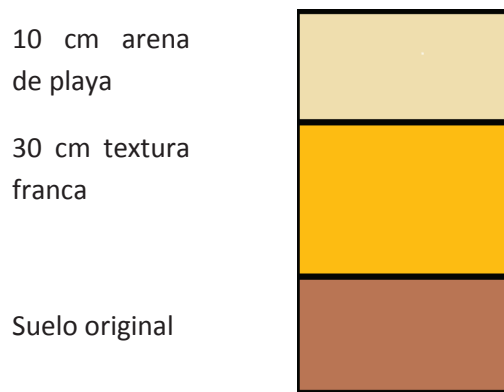


Figura 3.2 Perfil suelo enarenado.

### 3.1.2 Sistema de fertirrigación

El sistema de riego era localizado (por goteo) con goteros autocompensantes (Netafim, Tel Aviv, Israel) con un caudal de  $2 \text{ l h}^{-1}$  a una presión nominal de 1 kPa y se instaló el 14 de septiembre de 2012. La distancia entre ramales portagoteros era de 1,5 m y 0,5 m entre goteros. El coeficiente de uniformidad del sistema de riego, medido antes del inicio del ensayo fue de 95,4%. El sistema de riego estaba dividido en 2 sectores de riego y cada uno disponía de un contador de volumen de agua, regulador de presión y electroválvula.

El sistema de fertirrigación estaba formado por un programador automático (Modelo 100R, Riegos Guadalfeo, El Ejido, España) y ocho tanques para disolver los abonos. La inyección de nutrientes y ácidos se realizaba mediante venturis regulados por medio de sondas de conductividad eléctrica y pH.

## **3.2. MATERIAL VEGETAL Y TÉCNICAS DE CULTIVO**

### **3.2.1. Material vegetal**

El material vegetal utilizado fue pepino (*Cucumis sativus* L.), cultivar Caronte (Fitó, Barcelona, España), que está recomendado para siembras que vayan del 10 de septiembre al 10 de octubre. Este cultivar produce una planta vigorosa, con cuaje en toda la caña y rebrota con facilidad, además de presentar muy buena resistencia a enfermedades y al virus de CVYV (virus de las venas amarillas) y de CYSDV (virus del amarilleo). El fruto es de color oscuro, recto, acanalado y con una buena conservación.

### **3.2.2. Trasplante**

El trasplante se realizó el 27 de septiembre de 2012, e inmediatamente se colocó una manta térmica de polipropileno de 17 g m<sup>-2</sup>, como barrera física para el control de mosca blanca. La manta térmica se mantuvo hasta el 11 de octubre de 2012.

### **3.2.3. Marco de plantación**

El marco de plantación fue 1,5 m entre líneas y 0,5 m entre plantas. La densidad de plantación fue de 1,33 plantas m<sup>-2</sup>. El trasplante fue realizado el 27 de septiembre, apartando la arena y haciendo un orificio en el suelo para depositar en el agujero el cepellón con la plántula.

### **3.2.4. Tutorado, poda y recolección**

El tutorado que se realizó fue el vertical mediante hilos de polipropileno (rafia), que se unieron a la zona basal de la planta mediante anillas de plástico y se ataron al alambre del emparrillado que estaba sobre la línea de cultivo. A medida que el cultivo fue creciendo se fue liando de forma manual en la rafia y se le colocaron también anillas de plástico para mejorar la sujeción. Cuando el cultivo alcanzó el emparrillado, el tallo principal se guió horizontalmente 0,25 m mediante el uso de perchas dejándolo caer verticalmente hacia el oeste.

La poda se realizó eliminando todos los tallos secundarios del tallo principal de la planta. Además, se eliminaron los frutos por debajo de los primeros 50 cm y todos los frutos mal formados para evitar que consumieran recursos de la planta. Cuando el tallo principal alcanzó el emparrillado, además del tallo principal, se le dejó un tallo secundario a cada planta que se guió horizontalmente 0,25m con una percha y después se dejó caer verticalmente hacia el este.

Durante todo el ciclo del cultivo se realizaron un total de 24 recolecciones, la primera recolección se realizó a los 43 días después del trasplante y la última el día 17/01/2013. La frecuencia de estas recolecciones fue de dos veces por semana.

### 3.2.5. Fertilización

La fertilización se aplicó mediante fertirriego siguiendo los equilibrios nutricionales representados en el Cuadro 3.1. La conductividad eléctrica de la solución nutritiva osciló entre 2,5 y 2,9 dS m<sup>-1</sup> y el pH se mantuvo alrededor de 5,5.

**Cuadro 3.1** Nutrientes aportados (mM L<sup>-1</sup>) y conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva aportada en cada fase fenológica.

Fase	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CE
<b>Enraizamiento</b>	11,0	0,5	2,0	5,2	4,6	2,6	0,5	2,7
<b>Hasta floración</b>	13,3	1,5	1,5	6,0	4,6	2,6	0,5	2,9
<b>Producción</b>	13,0	0,6	1,5	6,4	4,4	2,0	0,9	2,5

### 3.2.6. Sanidad vegetal

Los métodos de sanidad vegetal empleados para el control de plagas fueron medidas físicas (antesalas en las puertas de acceso al invernadero y mallas en las ventanas), trampeo masivo (placas cromáticas), plantas reservorio e introducción de enemigos naturales. Como plantas reservorio se plantó cebada para el control de pulgón (*Rhopalisphum padi*). Los enemigos naturales introducidos fueron *Aphidius colemani*, *Eretmocerus mundus* y *Amblyseius swirskii*. En el Cuadro 3.2 se muestran los enemigos naturales empleados para el control biológico, las dosis y el momento de la suelta.

Cuando el control biológico de plagas no fue efectivo para controlar la población de plaga se recurrió a los tratamientos químicos, utilizando las materias activas autorizadas para el cultivo de pepino y respetando los plazos de seguridad. El control de enfermedades se realizó con tratamientos químicos con materias activas autorizadas y respetando los plazos de seguridad.

**Cuadro 3.2** Enemigos naturales empleados para el control de plagas, dosis y fecha de introducción en el invernadero.

Enemigo natural	Dosis (individuos m <sup>-2</sup> )	Fecha
<i>Aphidius colemani</i>	1,6	2/10/12 y 30/10/12
<i>Eretmocerus mundus</i>	8	23/10/12
<i>Amblyseius swirskii</i>	4	27/09/12
<b>Sobres de A. swirskii</b>	1 sobre cada 2 plantas	25/10/12



### 3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los ensayos se realizaron en cinco líneas de cultivo ubicadas en la parte norte del invernadero. Las líneas portagotos contaban con llaves de paso para permitir no regar cuando el resto del invernadero se regaba. Los sensores o equipos se instalaron en las tres líneas centrales. En cada una de estas tres líneas se instalaron dos tensiómetros manuales, una sonda de succión, un MPS2, un 5TE y varillas TDR. Estos sensores para la medida del estado hídrico del suelo fueron instalados el 29/11/2012. Las plantas durante el ciclo de cultivo fueron regadas cuando los valores de los tensiómetros eran inferiores a -20 kPa con una dosis equivalente a las necesidades hídricas del cultivo estimadas con PrHo (© 2008 Fundación Cajamar). La evaluación de los equipos se realizó aplicando tres ciclos de desecación (Cuadro 3.3) durante los cuales las plantas no recibieron aplicaciones de riego. Entre ciclos de desecación las plantas se regaron abundantemente con la misma solución nutritiva que el resto del invernadero para mantener unas condiciones estables de CE en el suelo. En el análisis estadístico se consideró que las medidas experimentales seguían un diseño de bloques al azar. Los bloques correspondían a las líneas de cultivo o portagotos.

**Cuadro 3.3** Fechas de aplicación de los ciclos de desecación.

CICLO	FECHA
1 <sup>er</sup> CICLO	8/12/2012 a 20/12/2012
2 <sup>o</sup> CICLO	9/1/2013 a 24/1/2013
3 <sup>er</sup> CICLO	27/1/2013 a 31/1/2013

### 3.4. MEDIDAS

#### 3.4.1. Parámetros climáticos

Se midió la temperatura y la humedad relativa dentro del invernadero con un aspirósicrómetro ventilado (Hortimax, Pijnacker, The Netherlands) localizado a la altura del cultivo. Los datos se registraron cada 5 segundos, promediándose cada 5 minutos y fueron almacenados en un PC. La radiación solar en exterior se midió con un piranómetro (mod. CM6, Kipp&Zonen, Delft, Holanda) localizado a 1,5 m de altura. Los valores fueron medidos cada 2 segundos, después se promediaron y almacenaron cada 5 minutos con un datalogger (DL-15, Thies Clima, Göttingen, Alemania).

### 3.4.2. Estado hídrico del suelo

Los equipos que miden el estado hídrico del suelo (MPS2, Tensiómetros, TDR y sondas 5TE) se instalaron a unos 5 cm del tallo de la planta y del gotero (Figura 3.3). En la instalación de los sensores se apartó primeramente la arena, después se procedió a su instalación y, posteriormente, se volvió a aportar la arena. En todos los casos la profundidad de instalación se refiere a la superficie del suelo sin considerar la capa de arena. El extremo inferior de todos los equipos quedó a 15 cm de profundidad. Esta profundidad se eligió porque permitía que las sondas 5TE y MPS2 estuviesen completamente enterrados tal y como recomienda el fabricante (Figura 3.4), quedando unos 2 cm de cable enterrados en el suelo. Los sensores MPS2 y 5TE se conectaron a un datalogger Campbell (modelo CR3000, Campbell Scientific, USA). Se tomaron lecturas cada 5 segundos, promediándose los datos cada 5 minutos.

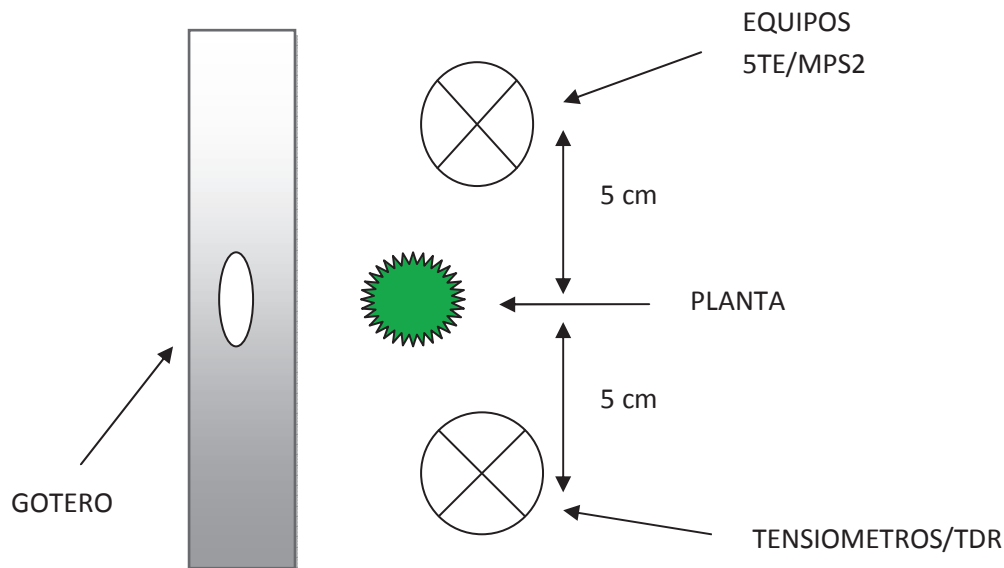


Figura 3.3 Ubicación de los equipos de medida del agua en suelo con respecto al gotero y la planta.



Figura 3.4 Recomendación del fabricante para la instalación del equipo 5TE en el suelo.

### 3.4.3. Potencial matricial

Para la determinación del potencial matricial del agua en el suelo se utilizaron tensiómetros (Irrrometer, Riverside, California, USA) y MPS2 (Decagon Device, Pullman, Washington, USA). En cada línea de cultivo se instalaron dos tensiómetros a 15 y a 25 cm de profundidad sin considerar la capa de arena y un MPS2 (Decagon Devices Inc, USA). Antes de su instalación, los tensiómetros (rango de trabajo de 0 a -100 kPa) se sumergieron (las cápsulas porosas) en agua durante 24 horas y después se rellenaron con una solución antialgas. A continuación, se les aplicó una tensión de -70 kPa y se les extrajeron las burbujas de aire. Para la instalación se utilizó una barrena de suelo del diámetro de los tensiómetros y se hicieron agujeros a una profundidad de 15 y 25 cm cerca de dos plantas diferentes. Ambos agujeros se rellenaron parcialmente con barro y después se introdujo el tensiómetro presionando hasta llegar al fondo. Finalmente, la tierra extraída con la barrena se colocó alrededor del tubo de plástico del tensiómetro, presionando a su alrededor y con el suelo con el fin de evitar la formación de grietas por donde el agua pudiese infiltrarse preferentemente. Periódicamente se realizó un mantenimiento de los tensiómetros, revisando que no hubiera burbujas dentro del líquido y que el nivel de éste fuera el adecuado.

En la misma planta donde se instaló el tensiómetro a 15 cm se instaló un MPS2, cada uno a un lado de la planta (Fotografía 3.1, Figura 3). Los MPS2 se instalaron realizando un agujero a 15 cm de profundidad, después se rellenó parcialmente el agujero con barro y finalmente se introdujo verticalmente el MPS-2 presionando hasta asegurarse que los discos de cerámica del sensor quedaban completamente en contacto con el barro. El resto del sensor se cubrió con tierra, presionándola alrededor para asegurar que no quedaran grietas.



**Fotografía 3.1** Detalle de la instalación del MPS2

#### 3.4.4. Contenido volumétrico de agua del suelo

Para la determinación del contenido volumétrico de agua del suelo (CVA, % ó  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) se utilizaron equipos TDR (modelo miniTRASE, Soil Moisture Equipment Corp, Santa Barbara, California, USA) y sondas 5TE (Decagon Device, Pullman, Washington, USA).

Se instalaron dos varillas TDR de 15 cm de longitud en la parte este de las plantas donde estaban instalados los equipos 5TE. Para instalar las varillas del TDR se apartó la arena y las varillas se clavaron verticalmente en el suelo utilizando una guía para mantenerlas paralelas entre sí y a la distancia de separación correspondiente. Después se aportó arena, colocando un trozo de tubería de 12 cm de diámetro para evitar que las varillas quedasen completamente enterradas y de esta manera localizarlas fácilmente. Esta tubería fue retirada en cada medida y vuelta a colocar después. Para obtener los datos de CVA en suelo se utilizó la ecuación de calibración propuesta por el fabricante (Topp y col., 1989), que es válida para nuestras condiciones (Contreras, 2003).

Las sondas 5TE se instalaron apartando unos 10 cm de tierra y después se insertaron verticalmente las varillas de las sondas (Fotografía 3.2), quedando la parte inferior a 15 cm de profundidad. Después, se aportó la tierra retirada, compactándola alrededor de la parte superior de la sonda para evitar la formación de grietas. Finalmente, se aportó la arena.



Fotografía 3.2 Detalle de la instalación de los equipos 5TE.

#### 3.4.5. Humedad gravimétrica

Se determinó la humedad gravimétrica del suelo aportado en dos fechas (7/12/2012 y 24/1/2013), tomándose 3 muestras de suelo en cada fecha. Inmediatamente después de su obtención las muestras fueron pesadas y secadas en estufa a 105 °C hasta peso constante, con

lo que se determinó la humedad gravimétrica. Se utilizó una densidad aparente del suelo de  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$  (Fernández y col., 2004) para calcular la humedad volumétrica o contenido volumétrico de agua del suelo.

### 3.4.6. Conductividad eléctrica de la solución del suelo

Para la determinación de la conductividad eléctrica (CE) de la solución del suelo se utilizaron sondas de succión (modelo SSAT-LT-600, Irrrometer, Riverside, California, USA). Se colocaron 3 sondas de succión a 15 cm de profundidad, una en cada línea de cultivo correspondiente al ensayo. La instalación se realizó siguiendo el mismo procedimiento empleado para la instalación de los tensiómetros.

Antes de iniciar el primer (7/12/2012) y segundo ciclo (24/1/2013) de desecación se tomaron muestras de la solución de suelo y se determinó la CE de la solución extraída con un conductímetro (modelo BASIC 30, Crison Instruments S.A., Barcelona, España).

Para transformar la CE de la solución del suelo medida por los equipos 5TE en la CE de la solución de los poros del suelo se siguió el manual del equipo 5TE así como los resultados de Hilhorst (2000) que determinó la relación entre ambas CE (Ecuación 1).

$$\sigma_p = \frac{\epsilon_p \sigma_b}{\epsilon_b - \epsilon_{ob} = 0} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $\sigma_p$  es la CE de la solución de los poros del suelo,  $\epsilon_p$  es la permitividad dieléctrica del agua del poro en el suelo,  $\sigma_b$  es la CE eléctrica medida por el equipo 5TE,  $\epsilon_b$  es la permitividad dieléctrica de la solución del suelo y  $\epsilon_{ob}$  es la permitividad dieléctrica del suelo cuando la CE de la solución del suelo es 0.  $\epsilon_p$  se calculó mediante la Ecuación 2.

$$\epsilon_p = 80,3 - 0,37*(T_{soil} - 20) \quad \text{Ecuación 2}$$

### 3.4.7. Potencial hídrico foliar y del tallo

El estado hídrico del cultivo se caracterizó mediante el potencial hídrico en hoja ( $\Psi_{hoja}$ ) y tallo ( $\Psi_{tallo}$ ). La medida del  $\Psi_{hoja}$  se realizó en hojas completamente expandidas con una cámara de presión (Soil Moisture Co., California, USA) en torno a las 12:00 hora solar. El  $\Psi_{tallo}$  fue medido sobre hojas que habían estado previamente cubiertas al menos 4 horas con papel de aluminio

y bolsa de plástico. El  $\Psi_{\text{hoja}}$  y el  $\Psi_{\text{tallo}}$  se midió en 4 hojas de plantas bien regadas y en 4 hojas de plantas sometidas a desecación.

### 3.4.8. Comparación de resultados

Las medidas de los equipos MPS2 y 5TE se compararon con las medidas efectuadas con los tensiómetros y TDR, respectivamente. En dichas comparaciones se determinó mediante regresiones la recta que mejor se ajustaba a los datos medidos utilizando el programa Statgraphics Plus Version 5.1 (Manugistic Co., Rockville, MD, USA).

Adicionalmente, para evaluar el comportamiento de los equipos se calcularon los índices estadísticos (Willmott, 1982): RMSE (Root Mean Square Error) y MBE (Mean Bias Error).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - O_i)^2}{n}}$$

Ecuación 3

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - O_i)}{n}$$

Ecuación 4

Donde n es el número de observaciones, Y es el potencial matricial medido con el MPS2 o el contenido volumétrico medido con el 5TE y O es el potencial matricial medido con el tensiómetro o el contenido volumétrico medido con el TDR, respectivamente.

## ***RESULTADOS Y DISCUSIÓN***

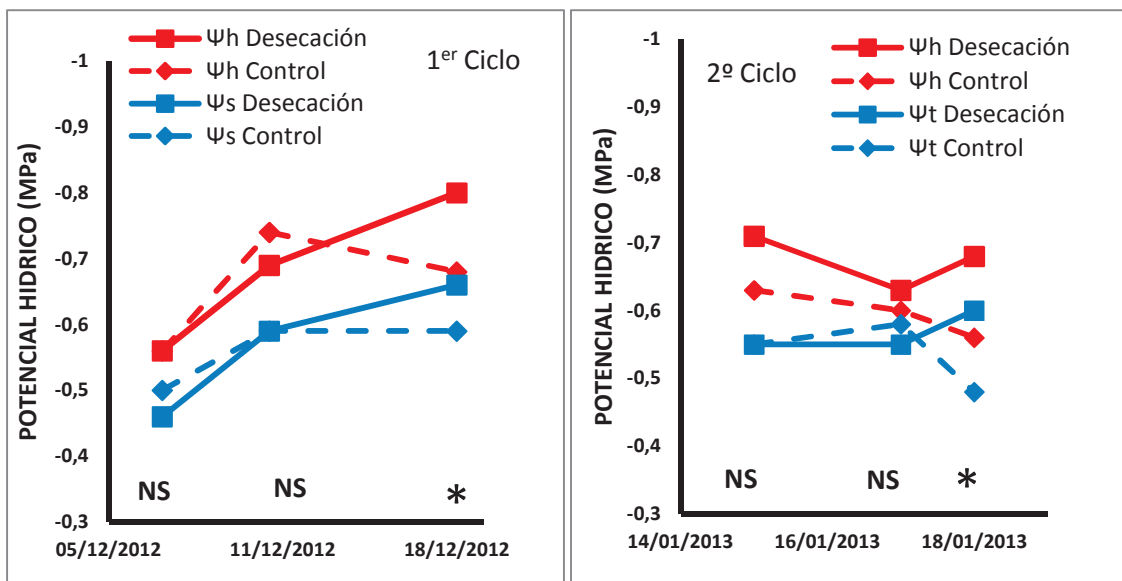




## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. POTENCIAL HÍDRICO DEL CULTIVO

La Figura 4.1 muestra los valores medidos del potencial hídrico del tallo ( $\psi_t$ ) y hoja ( $\psi_h$ ) del cultivo de pepino durante los dos ciclos de desecación estudiados, y los compara con las medidas realizadas en un cultivo regado sin limitación hídrica (control). Estos ciclos de desecación incluyen los valores de contenido volumétrico de agua (CVA) del suelo que normalmente ocurren en los cultivos hortícolas en invernadero del litoral de Almería. En los dos ciclos de desecación, los valores de potencial hídrico en hoja (oscilaron entre -0,56 y -0,80 MPa) fueron, lógicamente, ligeramente menores (más negativos) que en tallo (oscilaron entre -0,46 y -0,66 MPa). No se encontraron diferencias estadísticas entre el potencial hídrico de las plantas sometidas a desecación y las plantas control en las dos medidas realizadas al principio de ambos ciclos (Figura 4.1), pero si en la realizada al final de los mismos cuando las plantas sometidas a desecación presentaron potenciales hídricos del tallo y hoja menores que las plantas adecuadamente regadas o control. Es decir, que las plantas sometidas a desecación estuvieron sometidas a condiciones de estrés hídrico al final de ambos ciclos.

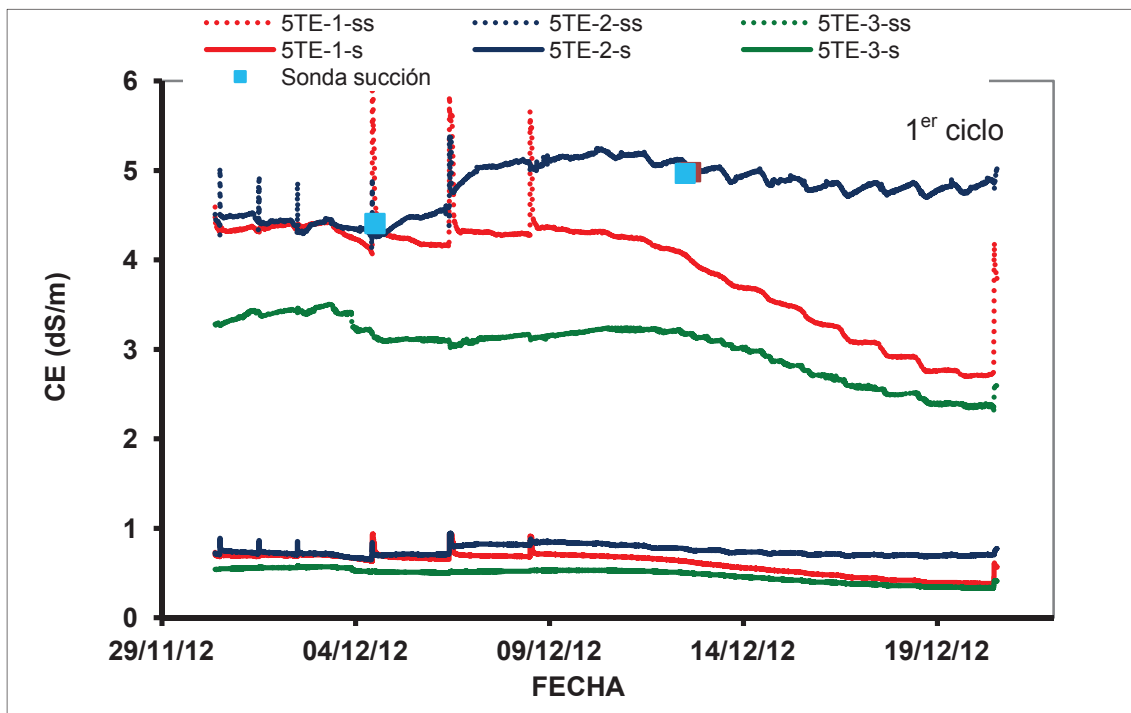


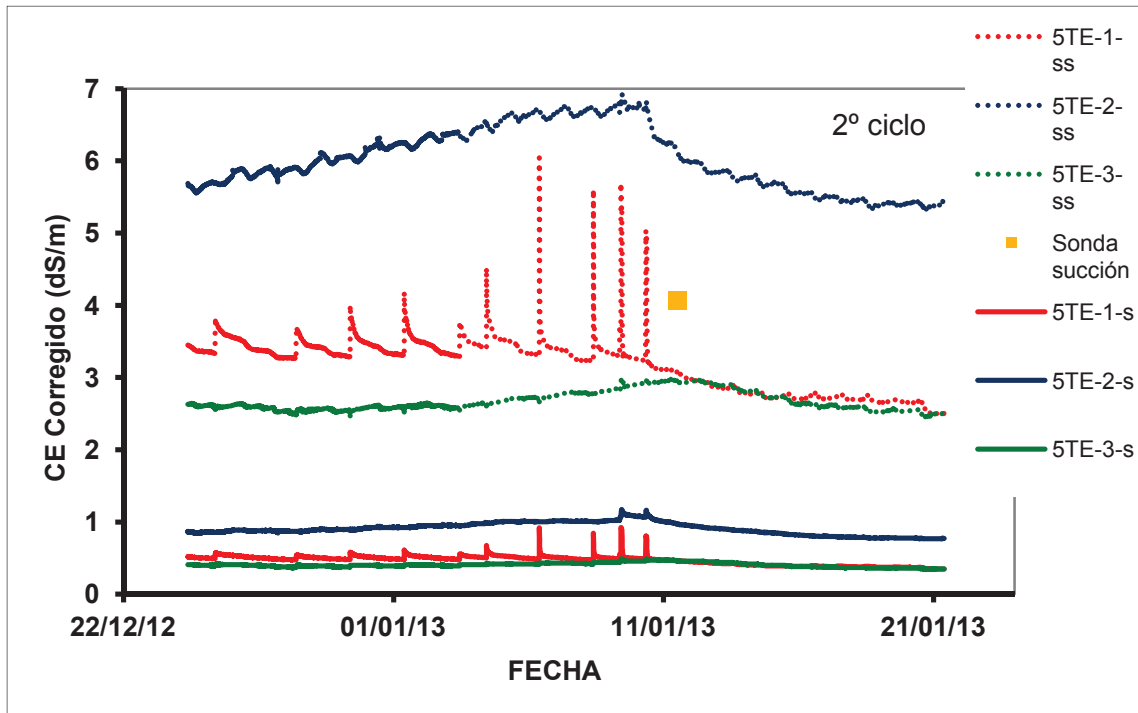
**Figura 4.1** Evolución del potencial hídrico en hoja ( $\Psi_h$ ) y en tallo ( $\Psi_t$ ) de plantas de pepino sometidas a desecación y de plantas bien regadas (control) en dos ciclos de desecación. NS: Diferencias no significativas ( $P < 0,05$ ); \*: Diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0,05$ ).

## 4.2. EQUIPO 5TE

### 4.2.1. Conductividad eléctrica del suelo

La Figura 4.2 presenta los valores medidos de conductividad eléctrica del suelo ( $CE_s$ ) en los dos ciclos de desecación estudiados. Los valores absolutos de  $CE_s$  medidos con los tres equipos 5TE fueron, en general, bajos, en torno o menores a  $1 \text{ dS m}^{-1}$  (Figura 4.2), en los dos ciclos de desecación y, en general, el comportamiento de los equipos en ambos ciclos fue similar: aumentaron ligeramente cuando se aumentó el CVA del suelo antes de cada ciclo y luego disminuyeron progresivamente durante el ciclo de desecación del suelo (Figura 4.2). En ambos ciclos hubo diferencias claras de  $CE_s$  entre los tres equipos 5TE, con valores cercanos a  $1 \text{ dS m}^{-1}$  en un sensor y valores en torno a  $0,5 \text{ dS m}^{-1}$  en los otros ciclos. La Figura 4.2 también muestra los valores de CE de la solución de los poros del suelo ( $CE_{ss}$ ) determinados a partir de las medidas de  $CE_s$  realizadas con el 5TE y siguiendo la metodología propuesta por Hilhorst (2000) y recomendada por el fabricante ([www.decagon.com](http://www.decagon.com)). El valor promedio de los tres equipos al inicio del primer y segundo ciclo de desecación, que fue de  $4,1$  y  $3,8 \text{ dS m}^{-1}$  respectivamente, se aproximaron a las medidas puntuales de CE de la solución del suelo ( $CE_{ss}$ ) extraída con sondas de succión, excepto para el equipo 5TE-2 en el primer ciclo, y presentaron valores superiores en el equipo 5TE-2 e inferiores en los equipos 5TE-1 y 5TE-3 en el segundo ciclo.





**Figura 4.2** Conductividad eléctrica de la solución del suelo ( $CE_{ss}$ ) determinadas a partir de las medidas de  $CE$  del suelo ( $CE_s$ ) realizadas con los equipos 5TE y medidas puntuales de  $CE$  tomadas manualmente con sondas de succión para cada ciclo de desecación.

#### 4.2.2. Temperatura del suelo

Los valores medidos de temperatura del suelo fueron muy similares en los tres equipos 5TE (Figura 4.3) y oscilaron entre 16 y 19°C en el primer ciclo de desecación, y entre 15 y 18°C en el segundo. En ambos ciclos la temperatura del suelo aumentó a medida que avanzó el ciclo de desecación (Figura 4.3). Esta evolución de la temperatura debe estar ligada a las condiciones ambientales dado que la sensibilidad de las medidas de temperatura del equipo 5TE a los cambios en el CVA y la  $CE_s$  es pequeña (Kizito y col., 2008). Por otro lado, los tres equipos 5TE presentaron valores de temperatura del suelo similares entre sí y ligeramente inferiores a los medidos con los equipos MPS2. Teniendo en cuenta los estudios previos realizados por Vaz y col. (2013) y la similitud de las medidas de nuestros equipos parece que el equipo 5TE puede medir la temperatura correctamente.

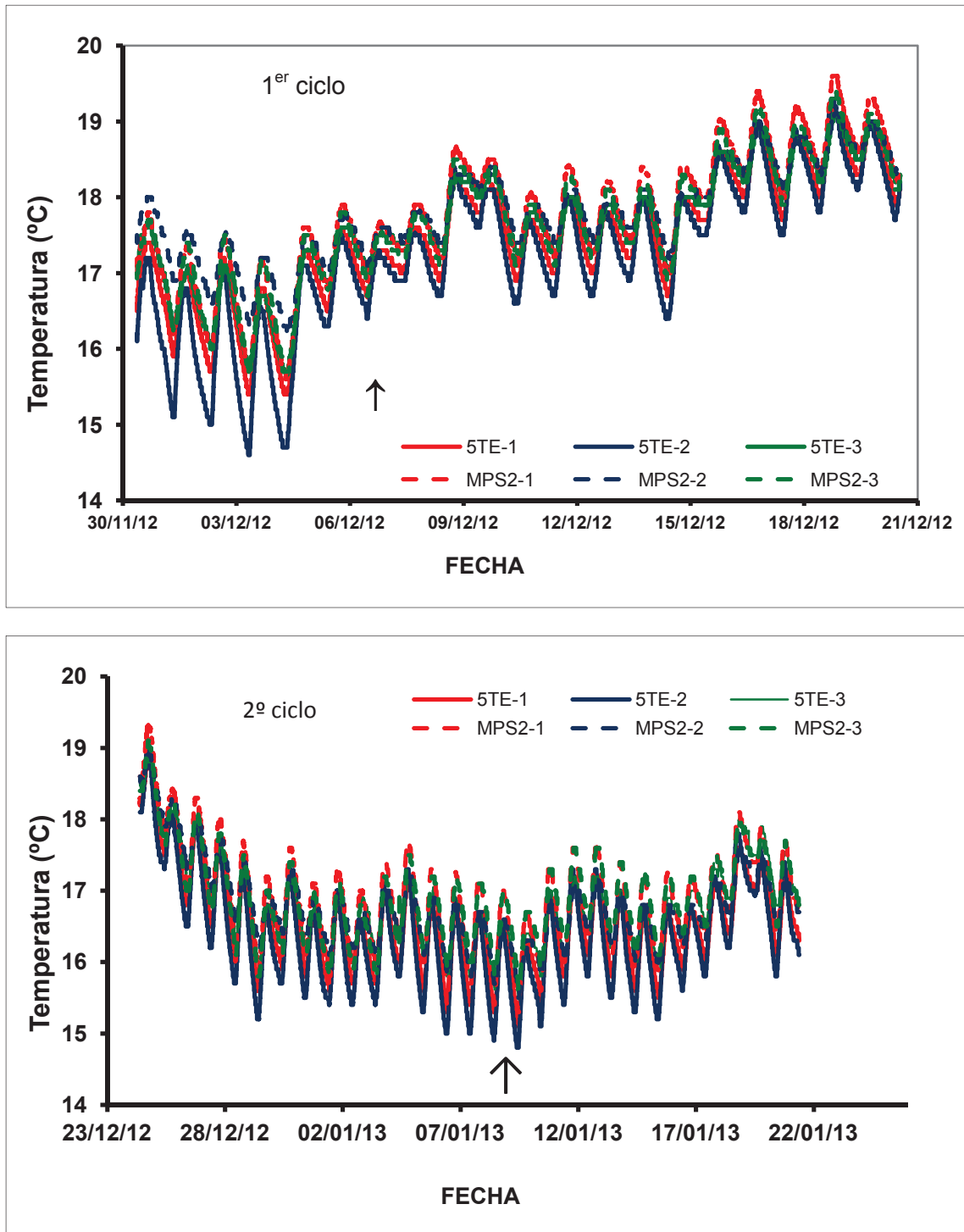


Figura 4.3 Evolución de la temperatura del suelo medida con tres equipos 5TE y con tres equipos MPS2 en los dos ciclos de desecación estudiados.

La Figura 4.4 muestra la evolución diaria de la temperatura del suelo durante un día representativo (13/12/12 en el primer ciclo y 02/01/13 en el segundo ciclo). En todos los equipos 5TE la temperatura alcanzaba valores máximos alrededor de la 17:00 hora solar, que se mantuvieron durante 1 o 2 horas, y luego disminuyeron progresivamente hasta alcanzar

valores mínimos durante las primeras horas de la mañana (8:00 hora solar), manteniéndose estos valores durante 1 o 2 horas.

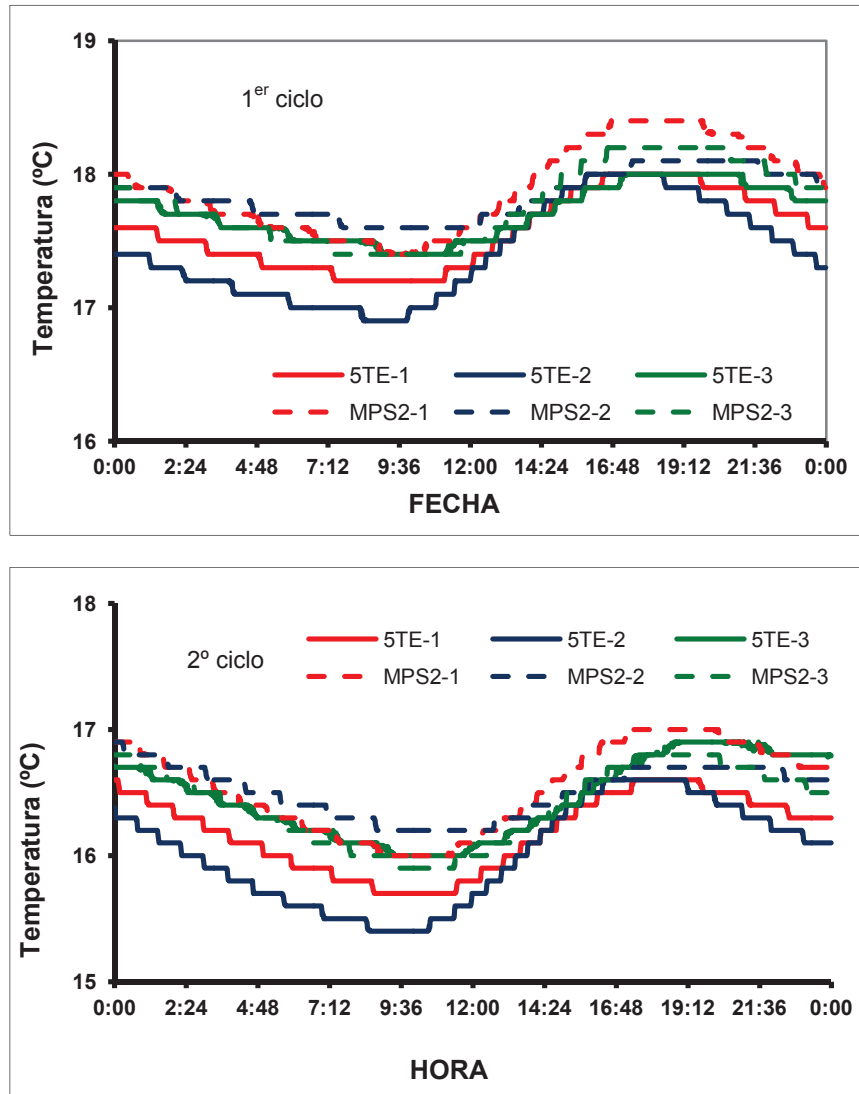
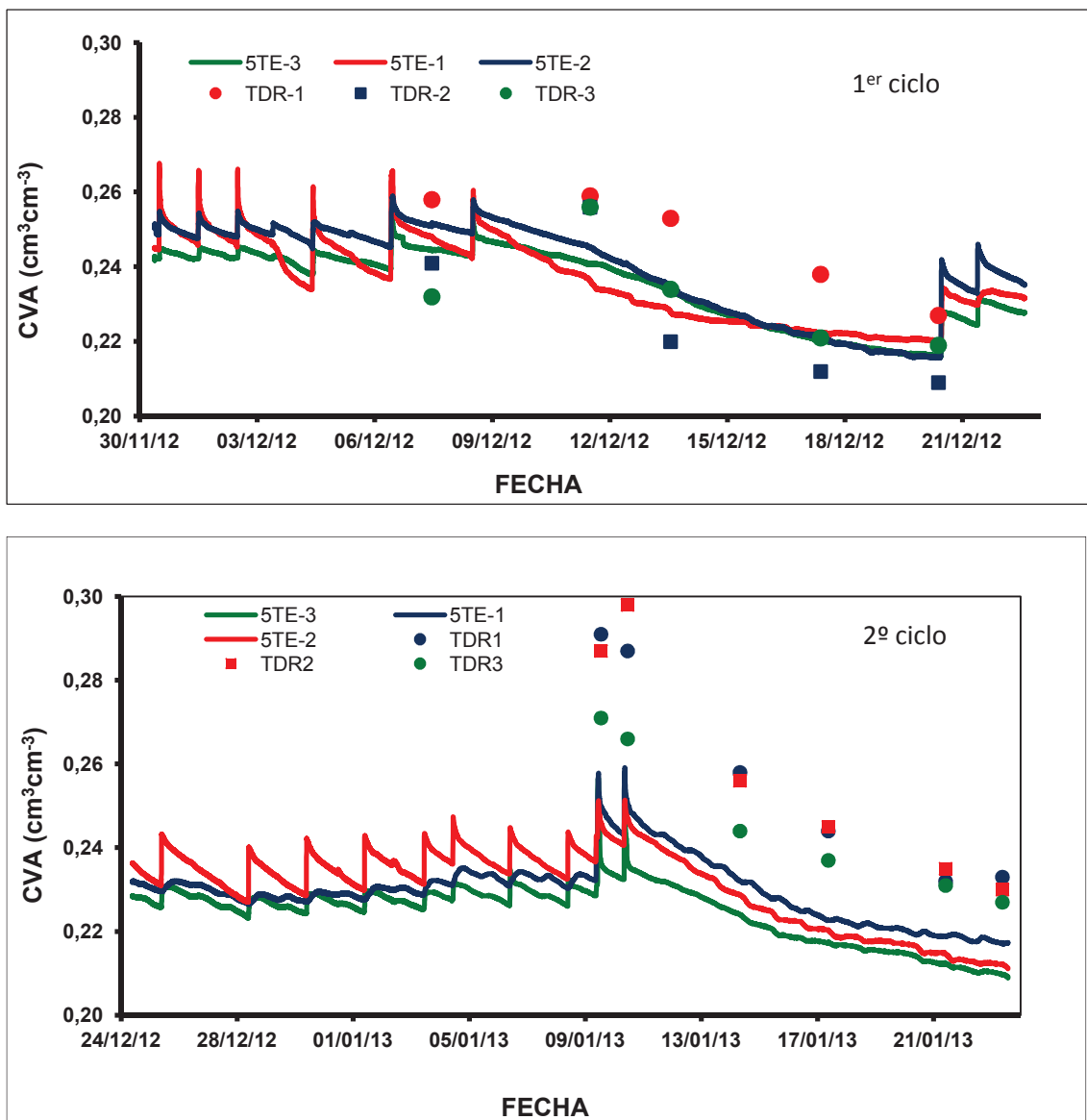


Figura 4.4 Evolución de la temperatura del suelo a lo largo de un día representativo en cada uno de los dos ciclos de desecación estudiados y medida con tres equipos 5TE y tres equipos MPS2.

#### 4.2.3. Contenido volumétrico de agua del suelo

La Figura 4.5 muestra para cada uno de los dos ciclos de desecación estudiados la dinámica temporal de contenido volumétrico de agua (CVA) del suelo medido con tres equipos 5TE, junto con las medidas puntuales (diarias) realizadas con un equipo TDR en los mismos bulbos húmedos del suelo donde estaban localizados los 5TE. En general, antes de iniciar los ciclos de desecación cuando se aplicaron frecuencias y dosis de riego normales en el cultivo de pepino, todos los equipos 5TE presentaron aumentos bruscos del CVA durante el riego (aporte de

agua) y descensos progresivos entre riegos (consumo de agua), aunque hubo diferencias entre los equipos 5TE en como registraron estos procesos (Figura 4.5). Posteriormente, durante los ciclos de desecación todos los equipos 5TE presentaron un descenso progresivo del CVA que fue suavizándose con el tiempo, aunque también se observaron diferencias entre equipos en la intensidad y dinámica del proceso de desecación del suelo en ambos ciclos (Figura 4.5). En general, los valores de CVA medidos con los equipos 5TE fueron claramente inferiores a las medidas del TDR (Figura 4.5).



**Figura 4.5** Dinámica temporal del contenido volumétrico de agua (CVA) del suelo en un cultivo de pepino sometido a dos ciclos de desecación. Medidas de CVA realizadas de forma continua con tres equipos 5TE y medidas diarias realizadas con un equipo TDR en los mismos bulbos húmedos donde estaban localizados los equipos 5TE.

La Figura 4.6 muestra la relación lineal encontrada entre el CVA del suelo medido con los equipos 5TE (calibración por defecto del fabricante) y el medido con el TDR (calibración por defecto del fabricante) en cada uno de los 3 equipos 5TE evaluados y en los dos ciclos de desecación estudiados. En general, los equipos 5TE subestimaron el CVA del suelo medido con los equipos TDR, sobre todo en el segundo ciclo de desecación, y el error o subestimación aumentó al aumentar el CVA del suelo (Figura 4.6).

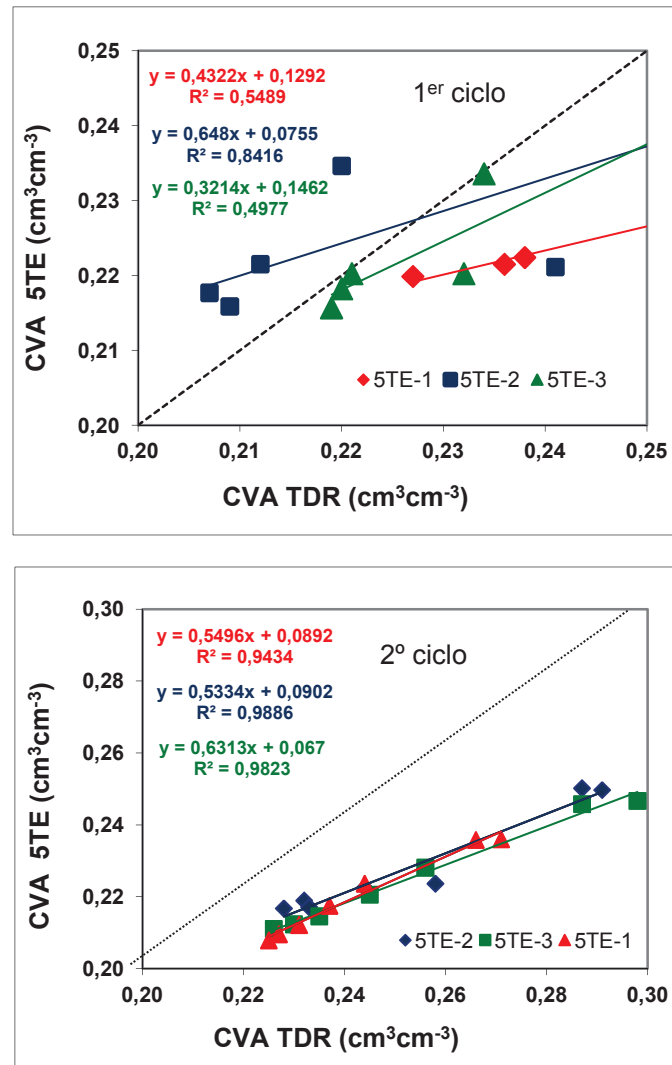


Figura 4.6 Relación lineal entre el CVA del suelo medido con equipos 5TE y TDR para cada uno de los tres equipos 5TE evaluados.

El ajuste entre las medidas realizadas con los equipos 5TE y TDR en el primer ciclo de desecación fue, en general, bajo, excepto para el 5TE-2 que presentó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,85 (Figura 4.6). En el segundo ciclo el ajuste fue bueno en los tres equipos 5TE (valores  $R^2$ ), los cuales mostraron un comportamiento muy similar entre sí,

aunque todos los equipos subestimaron los valores medidos con el TDR (Figura 4.6). Los estudios de Saito y col. (2009) Varble y Chávez (2011) y Vaz y col. (2013) también encontraron que los equipos 5TE con la calibración de fábrica subestimaban la medida del CVA del suelo a partir de valores de  $0,15-0,20 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ , siendo el error cada vez mayor a medida que aumenta el CVA. Los valores del error medio (MBE) y de la raíz del error medio cuadrado (RMSE) para cada equipo y ciclo se muestran en el Cuadro 4.1 y fueron más altos en el segundo ciclo. Hignet y Evett (2008) indicaron que para la mayoría de aplicaciones de investigación agrícolas se requiere una precisión del CVA  $\pm 0,01-0,02 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ , por lo que para considerar que un equipo (con su ecuación de calibración es necesario que los estadísticos MBE y RMSE sean menores que  $\pm 0,02 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  y  $\pm 0,035 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ , respectivamente. En general, en el segundo ciclo cuando los equipos presentaron un comportamiento más homogéneo, los valores del MBE fueron mayores que los requeridos para considerar al equipo preciso, mientras que los errores RMSE fueron ligeramente inferiores a los considerados precisos.

**Cuadro 4.1** Índices estadísticos calculados para comparar las medidas con los equipos 5TE y TDR en dos ciclos de desecación: RMSE (Root Mean Square Error) y MBE (Mean Bias Error).

EQUIPOS	1 <sup>er</sup> CICLO		2 <sup>o</sup> CICLO	
	MBE ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	RMSE ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	MBE ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	RMSE ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
5TE-1	-0,0053	0,0083	-0,0216	0,0222
5TE-2	-0,0202	0,0222	-0,0275	0,0301
5TE-3	0,0025	0,0125	-0,0271	0,0284
Los tres equipos	-0,0077	0,0155	-0,0245	0,0263

En los dos ciclos de desecación estudiados no se encontraron diferencias estadísticas ( $P < 0,05$ ) entre los tres equipos 5TE en la pendiente ni en la ordenada en el origen de las relaciones lineales que mejor se ajustaron a los datos medidos (Cuadro 4.2). Es decir, en los dos ciclos de desecación los tres equipos 5TE mostraron un comportamiento similar entre sí.

**Cuadro 4.2** Resumen de la comparación estadística de equipos y de ciclos (agrupando los equipos) de las rectas de regresión obtenidas entre el CVA medido con cada equipo 5TE y TDR en cada ciclo de desecación. NS: Diferencias no significativas; \*: Diferencias estadísticamente significativas.

CICLO	EQUIPOS	ORDENADA	PENDIENTE
1 <sup>er</sup> CICLO	5TE-1 vs 5TE-2	NS	NS
	5TE-1 vs 5TE-3	NS	NS
	5TE-2 vs 5TE-3	NS	NS
2 <sup>o</sup> CICLO	5TE-1 vs 5TE-2	NS	NS
	5TE-1 vs 5TE-3	NS	NS
	5TE-2 vs 5TE-3	NS	NS
1 <sup>er</sup> CICLO vs 2 <sup>o</sup> CICLO	Los tres equipos	*	*



Cuando se agruparon los datos de los tres equipos 5TE en cada ciclo de desecación (Figura 4.7), el ajuste entre las medidas realizadas con los equipos 5TE y TDR fue claramente mejor en el segundo ciclo de desecación ( $R^2=0,95$ ). En el primer ciclo, el rango de valores del CVA del suelo medidos fue relativamente pequeño ( $0,21 - 0,26 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) y la relación lineal que mejor se ajustó a los datos medidos con TDR ( $\text{CVA}_{5\text{TE}} = 0,33\text{CVA}_{\text{TDR}} + 0,15$ ) presentó un coeficiente de determinación bajo ( $R^2=0,42$ ), mientras que en el segundo ciclo el rango de valores de CVA medidos fue mayor ( $0,23 - 0,30 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) y la regresión lineal que mejor se ajustó ( $\text{CVA}_{5\text{TE}} = 0,56\text{CVA}_{\text{TDR}} + 0,08$ ) presentó un coeficiente de determinación alto ( $R^2=0,96$ ). Globalmente los equipos 5TE subestimaron el CVA del suelo medido con los TDR, error que aumentó al aumentar el CVA, excepto para los CVA del suelo más bajos en el primer ciclo de desecación (Figura 4.7). La mejora observada en el segundo ciclo pudo deberse a que las condiciones del suelo que rodea a los equipos se habían homogeneizando al avanzar el ciclo de cultivo. La menor  $\text{CE}_s$  medida en el segundo ciclo de desecación también pudo contribuir, ya que la  $\text{CE}$  del medio afecta a las medidas del 5TE (Figura 4.10). Los valores medidos de  $\text{CE}_s$  en el primer ciclo fueron relativamente altos. Otro factor que puede afectar (Varble y col., 2011) es la variación de la temperatura del suelo, pero en nuestras medidas los valores de temperatura del suelo fueron similares en los dos ciclos de desecación evaluados.

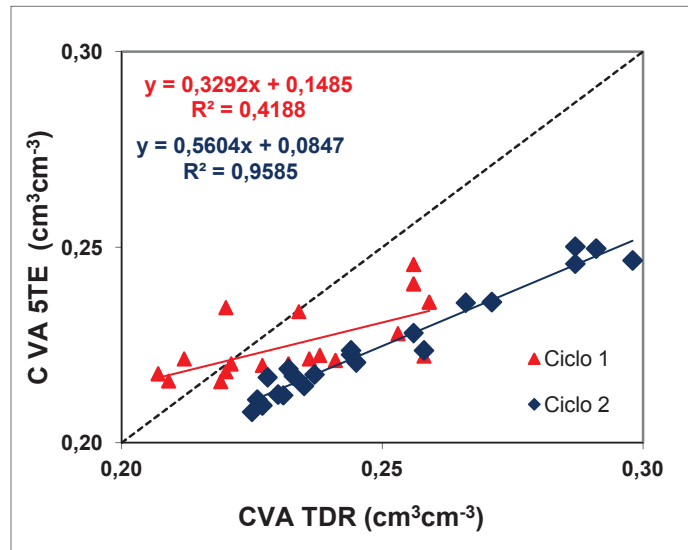


Figura 4.7 Ajuste lineal de los tres equipos 5TE en cada ciclo de desecación.

Igualmente, se calcularon los errores MBE y RMSE de manera conjunta para los equipos 5TE en cada ciclo (Cuadro 4.1) y el comportamiento observado fue similar al descrito anteriormente para los equipos individuales. Cuando se compararon la pendiente y la ordenada en el origen de las regresiones lineales que mejor se ajustaron a los datos conjuntos

de los tres equipos se encontró que fueron estadísticamente distintas para los dos ciclos de desecación (Cuadro 4.1). Es decir, el comportamiento de los equipos 5TE con respecto a las medidas de CVA realizadas con los TDR fue distinto en los dos ciclos de desecación estudiados.

Como los datos medidos en el segundo ciclo de desecación se desarrollaron con una conductividad eléctrica del suelo próxima a los valores comunes en los suelos enarenados del litoral de Almería (Figura 4.2) y había transcurrido más tiempo para que las condiciones del suelo cercano a los equipos se homogeneizaran, consideramos más adecuado usar los valores medidos en el segundo ciclo de desecación para obtener una curva de calibración específica del equipo 5TE para este suelo (Figura 4.8).

$$CVA_{5TE} (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}) = -5 \cdot 10^{-5} x^3 + 0,0019 x^2 - 0,005 x \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde x es la permitividad dieléctrica medida por el equipo 5TE.

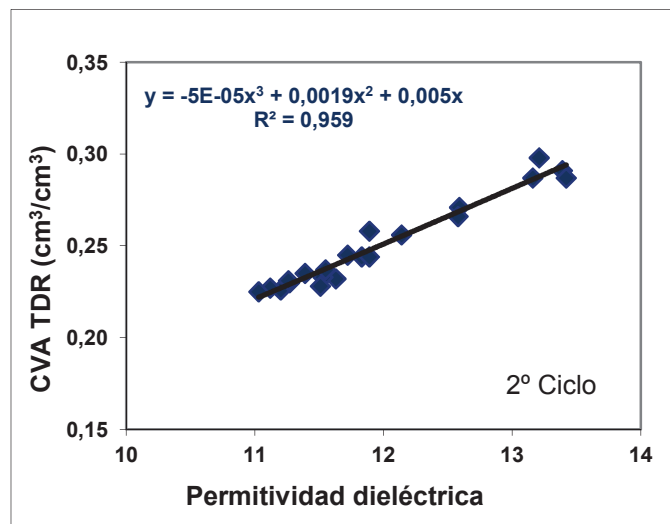


Figura 4.8 Curva de calibración específica para el suelo enarenado del equipo 5TE.

La Figura 4.9 compara las medidas de los equipos 5TE del primer ciclo de desecación usando la curva de calibración específica desarrollada para este suelo (Ecuación 5) y la curva de calibración dada por el fabricante (Topp y col., 1980) con las medidas realizadas con el TDR. La calibración específica no mejoró la precisión de la medida del CVA del equipo 5TE del primer ciclo. Por una parte, la pendiente siguió siendo diferente a 1 y los errores MBE y RMSE, como se puede ver en el (Cuadro 4.1) tuvieron incluso valores más altos.

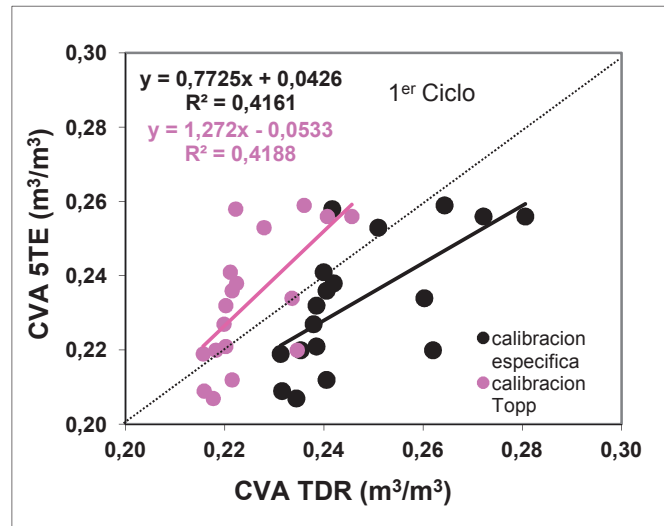


Figura 4.9 Ajuste lineal de los equipos 5TE calibrados con la curva de calibración específica y con la curva de calibración propuesta por el fabricante del equipo 5TE (Topp y col.,1980).

Cuadro 4.3 Índices estadísticos calculados al comparar las medidas con los equipos 5TE y TDR en el primer ciclo de desecación. El CVA de los equipos 5TE se ha calculado a partir de la permitividad dieléctrica usando la calibración específica desarrollada en este trabajo y la propuesta por el fabricante. RMSE (Root Mean Square Error) y MBE (Mean Bias Error).

EQUIPOS	MBE (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	RMSE (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
Calibración específica	0,014	0,019
Calibración fabricante	-0,008	0,015

El rango de valores de CVA medidos en los ciclos de desecación estudiados incluyen los valores de CVA que normalmente ocurren durante el ciclo de cultivo en un suelo enarenado con una textura media. En estas condiciones, los equipos 5TE han subestimado los valores del CVA medidos con TDR. El TDR utilizado en nuestro trabajo usa la relación entre el CVA y la permitividad dieléctrica del suelo desarrollada por Topp y col. (1980) y fue previamente evaluado en un suelo enarenado con un rango de CVA más amplio (Fernández y col., 2004). El TDR presentó una buena precisión en la medida del CVA del suelo enarenado, con un RMSE de 0,013 cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>, no requiriendo una calibración específica para este tipo de suelo enarenado (Fernández y col., 2004). El TDR tampoco ha requerido el desarrollo de calibraciones específicas cuando se ha evaluado en distintos tipos de suelo (Gaskin y Miller, 1996; Vaz y col., 2013). Sin embargo, el equipo 5TE si ha mostrado desviaciones importantes con la calibración de Topp y col. (1980) para CVA altos (Saito y col., 2009; Varble y Chávez, 2011; Vaz y col., 2013).

Dada la precisión del equipo TDR para medir el CVA en suelo enarenado se procedió a desarrollar un calibración específica del equipo 5TE para este suelo (Figura 4.9) con los datos

del segundo ciclo de desecación. Cuando esta calibración se aplicó a los datos de permitividad dieléctrica medida con los equipos 5TE en el primer ciclo no mejoró la precisión (Cuadro 4.3). Entre las causas podría deberse a que el rango CVA utilizado para el desarrollo de la calibración específica fue pequeño, habitualmente el desarrollo de una ecuación de calibración requiere un rango de valores entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (Topp y col., 1980; Varble y Chávez, 2011). La temperatura también influye en el CVA y debería considerarse en el proceso de calibración, o bien realizar las medidas en los momentos en los que la temperatura es similar, por ejemplo a primera hora de la mañana (Varble y Chávez, 2011). En la calibración específica no se ha incluido la temperatura y las medidas se realizaron en torno a las 12:00 hora solar, sin embargo las variaciones en temperatura entre ciclos no fueron importantes (Figura 4.3). Kizito y col. (2008) encontraron diferencias de  $0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  en el CVA cuando la temperatura varió en  $10^\circ\text{C}$  y de  $0,02 \text{ dS m}^{-1}$  en la  $\text{CE}_s$ .

La falta de precisión de la calibración específica en el primer ciclo de desecación podría deberse al efecto de la salinidad. Varble y Chávez (2011) indican errores en el CVA con el incremento de CE y estos son mayores cuando el suelo tiene un contenido de arcilla mayor. Vaz y col. (2013) también indican que para suelos salinos es necesario desarrollar una calibración específica para estas condiciones. El fabricante (Decagon Devices, Inc.) indica que la precisión del equipo 5TE no se ve afectada cuando la CE de la solución del suelo es inferior a  $10 \text{ dS m}^{-1}$ . Sin embargo, Ganjegunte y col. (2012) obtuvo sobreestimación en las medidas del CVA con el equipo 5TE tanto en laboratorio como en campo en un suelo franco arcilloso cuando la CE del extracto saturado era de  $3,2 \text{ dS m}^{-1}$ . Vaz y col. (2013) también encontraron una significativa desviación del CVA medida con 5TE cuando la CE (medida en pasta saturada) era de  $8 \text{ dS m}^{-1}$ .

La CE en las sondas de succión medida al inicio del primer y segundo ciclo fue de  $5$  y  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , respectivamente. Previamente a su instalación los equipos 5TE fueron testados sumergiéndolos completamente en agua destilada a la que se le fue añadiendo ClK (Kizito y col., 2008) para aumentar la CE del agua desde  $0$  hasta  $6,9 \text{ dS m}^{-1}$ . La evolución de la permitividad dieléctrica frente a la salinidad del agua fue similar en los tres equipos (Figura 4.10), con valores constantes para CE entre  $1,3$  y  $2,8 \text{ dS m}^{-1}$ , mostrando un ligero incremento cuando la CE del agua era de  $4,4 \text{ dS m}^{-1}$ . La variación en la permitividad dieléctrica fue mayor para una CE del agua de  $5,5 \text{ dS m}^{-1}$ , valor que se mantuvo constante para  $6,9 \text{ dS m}^{-1}$  de CE del agua. La mayor CE medida con sondas de succión al inicio del primer ciclo ( $5 \text{ dS m}^{-1}$ ), superior al valor de CE del agua que afectó a la permitividad dieléctrica ( $4,4 \text{ dS m}^{-1}$ , Figura 4.10), pudo

ser la causa de la falta de precisión de la calibración específica desarrollada con los datos medidos en el segundo ciclo.

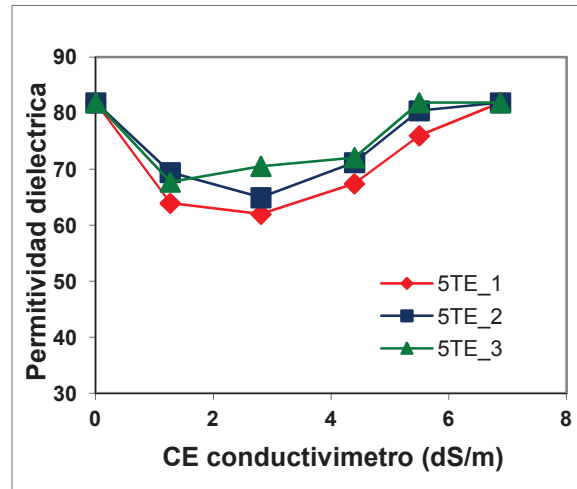


Figura 4.10 Permittividad dieléctrica medida con los tres equipos 5TE sumergidos en agua con distinta conductividad eléctrica.

Por último, la Figura 4.11 muestra la relación entre el CVA del suelo medido con equipos 5TE y el CVA del suelo medido con tensiómetros. En un rango muy estrecho de CVA (de 0,23 a 0,21  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) se produce una clara reducción lineal del potencial matricial desde valores cercanos a -10 kPa hasta valores de -50 kPa, cuando el cultivo comienza a sufrir estrés hídrico. Por lo que en este suelo habría que regar a partir de CVA del 0,22  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ , pero no parece aconsejable usar este equipo 5TE para programar con precisión el riego dado la necesidad de usar calibraciones específicas y por el rápido cambio del potencial matricial en un estrecho rango de CVA.

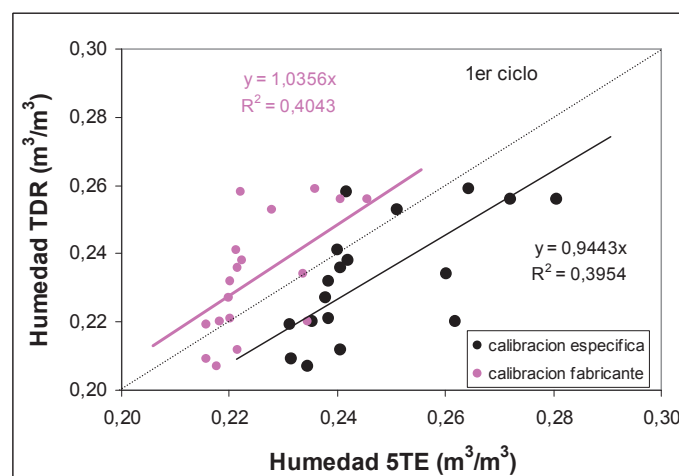


Figura 4.11. Relación entre el CVA del suelo medido con equipos 5TE y el potencial matricial del agua en el suelo medido con tensiómetros.

### 4.3. EQUIPO MPS2

#### 4.3.1. Temperatura del suelo

Los valores medidos de temperatura del suelo fueron muy similares en los tres equipos MPS2 evaluados (Figura 4.3). Las temperaturas medidas con los equipos MPS2 fueron ligeramente superiores a las temperaturas medidas con los equipos 5TE, aunque las diferencias estuvieron siempre por debajo de 1°C. Los valores medidos de temperatura del suelo oscilaron entre 16 y 19°C en el primer ciclo de desecación, y entre 15 y 18°C en el segundo. En ambos ciclos, la temperatura del suelo aumentó a medida que avanzó el ciclo de desecación (Figura 4.3).

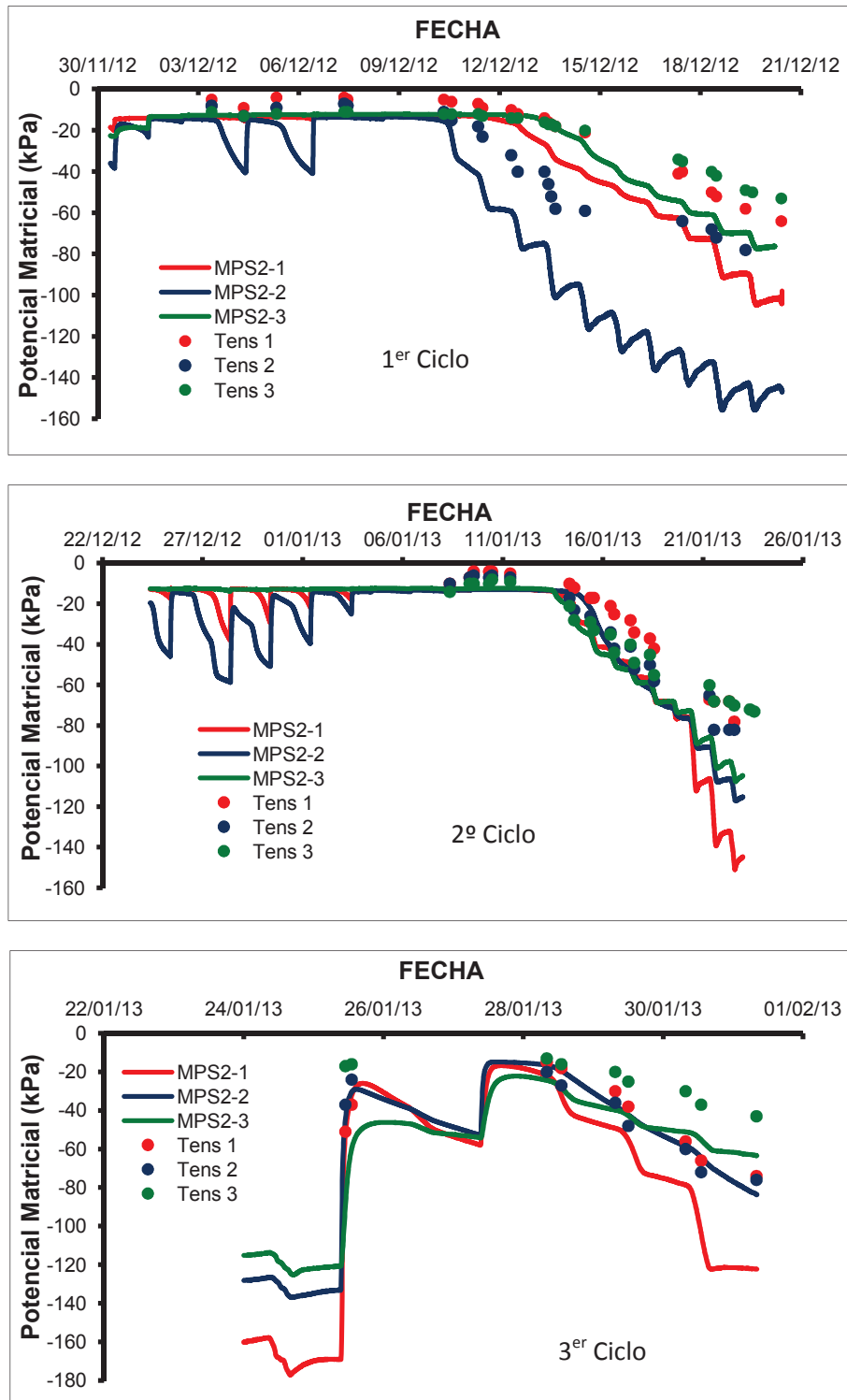
Con respecto a la evolución diaria de la temperatura del suelo (Figura 4.4) los tres equipos MPS2 midieron valores de temperatura del suelo máximos al final de la tarde y mínimos durante las primeras horas de la mañana, tal y como ocurrió con los equipos 5TE (Figura 4.4).

#### 4.3.2. Potencial matricial del agua en el suelo

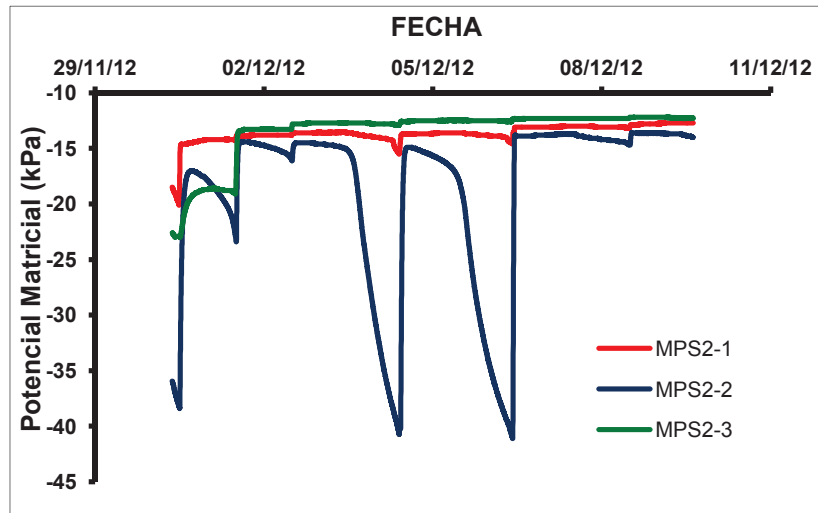
##### 4.3.2.1. Medidas del ciclo de desecación completo

La Figura 4.12 muestra la dinámica temporal del potencial matricial del suelo ( $\Psi_m$ ) medido con tres equipos MPS2 junto con las medidas puntuales (diarias) realizadas con tensiómetros localizados en el mismo bulbo húmedo que los equipos MPS2 en los tres ciclos de desecación estudiados durante el cultivo de pepino. Antes de iniciar los dos primeros ciclos de desecación, cuando el cultivo se regaba siguiendo las prácticas normales en la zona, los distintos equipos MPS2 presentaron comportamientos diferenciados: algunos de ellos (MPS2-1 y MPS2-3 en el primer ciclo y MPS2-3 en el segundo ciclo) no presentaron variaciones de  $\Psi_m$  durante los riegos manteniendo valores prácticamente constantes entre -12 y -13 kPa (Figura 4.12 y Figura 4.13), mientras que otros equipos si mostraron las variaciones típicas de respuesta a un riego: aumento drástico durante la aplicación y descenso progresivo durante el periodo entre riegos. Estos datos parecen indicar que este equipo no fue sensible a valores de  $\Psi_m$  mayores de  $\approx$  -12-13 kPa (Figura 4.12 y Figura 4.13), valores que se corresponden con altos contenidos volumétricos de agua en el suelo, por lo que su uso para mantener condiciones de alta disponibilidad de agua en el suelo parece discutible. Posteriormente, durante los ciclos de desecación, todos los equipos MPS2 presentaron reducciones progresivas de los valores de  $\Psi_m$  con el tiempo y, en general, los valores medidos por los equipos MPS2 fueron claramente inferiores (más negativos) que las medidas de los tensiómetros localizados en los mismos bulbos húmedos (Figura 4.12). Además, se observaron claras diferencias entre los equipos MPS2 en la intensidad y dinámica del proceso de desecación del suelo. De hecho, en el primer

ciclo los valores de  $\Psi_m$  del equipo MPS2-2 parecen anómalos, ya que fueron mucho menores que los otros equipos. Por ello decidimos realizar un tercer ciclo de desecación (Figura 4.12). En el segundo y tercer ciclo, en cambio, el equipo MPS2-2 presentó un comportamiento similar a los otros equipos.

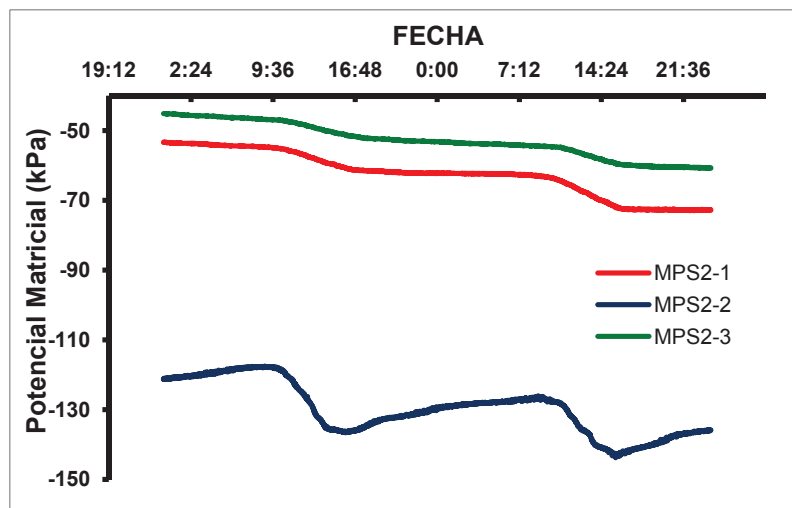


**Figura 4.12** Dinámica temporal del potencial matricial del agua en el suelo en un cultivo de pepino sometido a tres ciclos de desecación. Medidas realizadas de forma continua con tres equipos MPS2 y medidas diarias realizadas con tensiómetros en los mismos bulbos húmedos donde estaban localizados los equipos MPS2.



**Figura 4.13** Evolución del potencial matricial del agua en el suelo de los equipos MPS2 durante el periodo previo al inicio del primer ciclo de desecación cuando el contenido volumétrico de agua en suelo era alto.

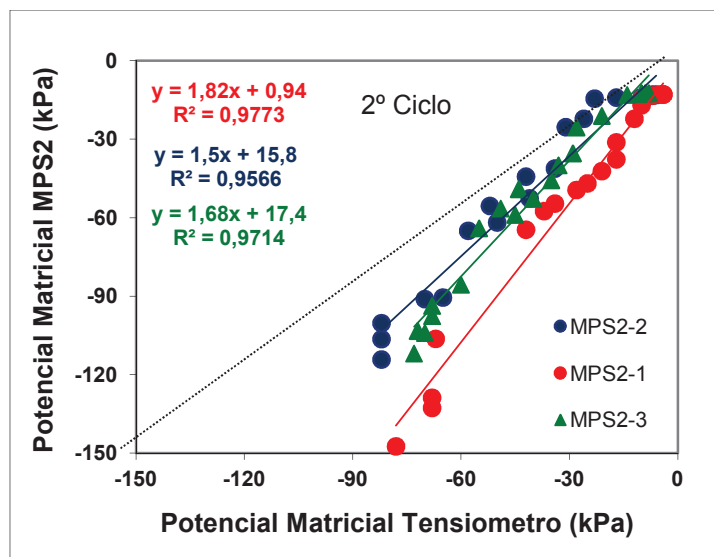
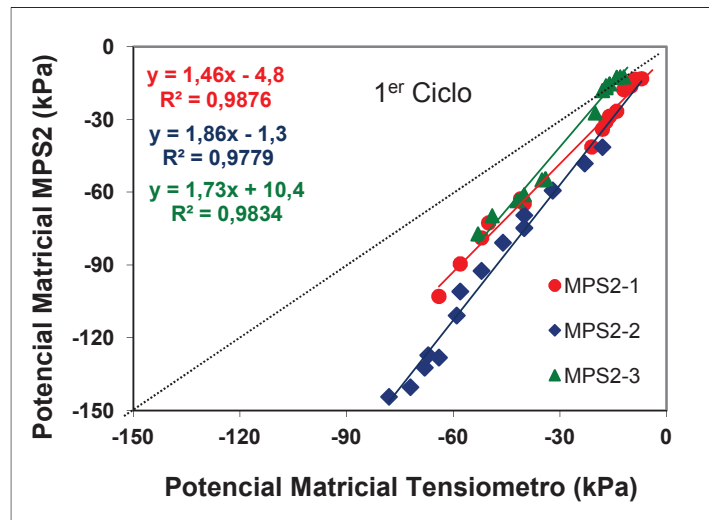
En los ciclos de desecación también se observó que los valores de  $\Psi_m$  mostraban periódicamente una especie de escalones que iban intensificándose a medida que avanzaba la desecación del suelo. Estos cambios ocurrían durante el periodo nocturno (Figura 4.14) cuando apenas había absorción de agua por el cultivo y predominaba la redistribución de agua dentro del bulbo húmedo. A medida que el suelo se iba desecando aumentaban los gradientes de  $\Psi_m$  entre las distintas zonas del bulbo húmedo, acentuando la redistribución de agua dentro del suelo, que era evidente durante el periodo nocturno.



**Figura 4.14** Muestra de la redistribución del contenido de agua en el bulbo húmedo durante dos días representativo (16/12/12 y 17/12/12).



La Figura 4.15 muestra la relación lineal encontrada entre los valores de  $\Psi_m$  medidos con cada uno de los tres equipos MPS2 (calibración de fábrica) evaluados y las correspondientes medidas realizadas con los tensiómetros en cada uno de los tres ciclo de desecación estudiados. En general, en todos los ciclos los equipos MPS2 subestimaron los valores de  $\Psi_m$  medidos con los tensiómetros y las diferencias aumentaron al disminuir el CVA del suelo, sobre todo en el primer ciclo (Figura 4.15). El equipo MPS2-2 mostró un comportamiento diferente en el primer ciclo de desecación con respecto al segundo y tercer ciclo (Figura 4.15).



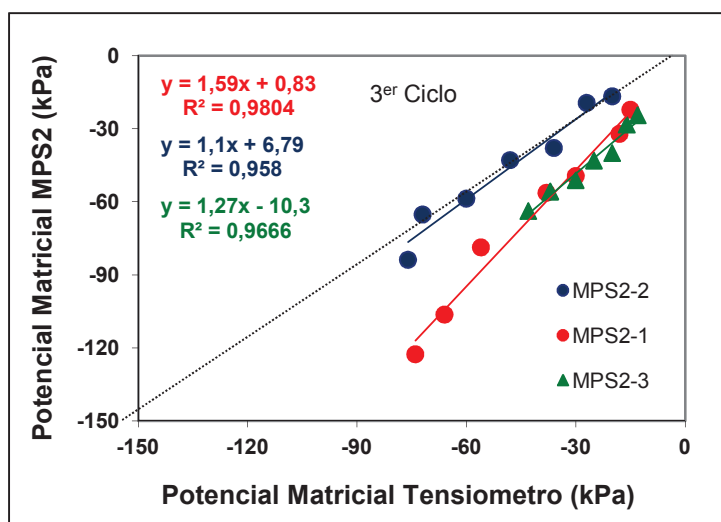


Figura 4.15 Relación lineal entre el potencial matricial del suelo medido con equipos MPS2 y con tensiómetros en cada uno de los tres equipos MPS2 evaluados.

El ajuste entre las medidas realizadas con los equipos MPS2 y los tensiómetros fue alto en todos los equipos y en los tres ciclos de desecación. Los coeficientes de determinación de dichos ajustes fueron altos y similares en los tres ciclos de desecación. Los errores MBE y RMSE, que se indican en el Cuadro 4.4, fueron altos para el conjunto de los tres equipos aunque disminuyeron al avanzar el ciclo del pepino, lo que parece indicar que el tiempo transcurrido desde la instalación de los equipos pudo influir en las medidas. Los errores menores se obtuvieron en el tercer ciclo aunque en este ciclo la desecación no fue tan severa como en los dos ciclos anteriores. Además, hubo diferencias entre equipos en los errores. El equipo MPS2-2 mostró los errores más altos en el primer ciclo, pero los menores errores en los dos ciclos posteriores. El equipo MPS2-3 mostró valores de errores más estables.

Cuadro 4.4 Índices estadísticos calculados de la comparación de las medidas con los equipos MPS2 y Tensiómetros en tres ciclos de desecación. RMSE (Root Mean Square Error), MBE (Mean Bias Error). Ambos en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

EQUIPOS	1 <sup>er</sup> CICLO		2 <sup>o</sup> CICLO		3 <sup>er</sup> CICLO	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
MPS2-1	-19,5	21,6	-29,6	35,6	-24,3	27,8
MPS2-2	-45,2	48,0	-9,6	15,4	2,2	5,5
MPS2-3	-12,1	15,9	-15,9	20,3	-17,4	17,8
CONJUNTO	-26,8	32,9	-18,2	24,9	-13,2	19,3

La comparación de las rectas de regresión de los distintos equipos en cada ciclo de desecación se muestra en el Cuadro 4.5. En general, el comportamiento de los tres equipos MPS2 con

respecto a las medidas de potencial matricial realizadas con los tensiómetros fue distinto entre equipos y entre los tres ciclos de desecación evaluados. La ordenada en el origen fue estadísticamente diferente ( $P < 0,05$ ) entre equipos en todos los ciclos, excepto para los equipos MPS2-1 y MPS2-3 en el tercer ciclo. Con respecto a la pendiente fue estadísticamente diferente ( $P < 0,05$ ) en los equipos MPS2-1 y MPS2-2 fueron en los tres ciclos, y en los equipos MPS2-2 y MPS2-3 en el segundo ciclo.

**Cuadro 4.5.** Resumen de la comparación estadística de equipos y de ciclos (agrupando los equipos) de las rectas de regresión obtenidas entre el CVA medido con cada equipo 5TE y TDR en cada ciclo de desecación. NS: Diferencias no significativas; \*: Diferencias estadísticamente significativas.

CICLO	EQUIPOS	ORDENADA	PENDIENTE
<b>1<sup>er</sup> CICLO</b>	MPS2-1 vs MPS2-2	*	*
	MPS2-1 vs MPS2-3	*	*
	MPS2-2 vs MPS2-3	*	NS
<b>2<sup>o</sup> CICLO</b>	MPS2-1 vs MPS2-2	*	*
	MPS2-1 vs MPS2-3	*	NS
	MPS2-2 vs MPS2-3	*	NS
<b>3<sup>er</sup> CICLO</b>	MPS2-1 vs MPS2-2	*	*
	MPS2-1 vs MPS2-3	NS	NS
	MPS2-2 vs MPS2-3	*	NS
<b>1<sup>er</sup> CICLO vs 2<sup>o</sup> CICLO</b>		*	*
<b>1<sup>er</sup> CICLO vs 2<sup>o</sup> CICLO</b>		*	*
<b>2<sup>o</sup> CICLO vs 3<sup>er</sup> CICLO</b>		NS	*

Cuando se agruparon los datos de los tres equipos MPS2 en cada ciclo de desecación (Figura 4.16) el ajuste lineal entre las medidas realizadas con los equipos MPS2 y los tensiómetros fue bueno, (Figura 4.16). Para el conjunto de medidas realizadas con los equipos MPS2 y tensiómetros, la relación lineal que mejor se ajustó a los datos medidos en el primer ciclo de desecación ( $\Psi_{\text{MPS2}} = 1,86\Psi_{\text{TEN}} + 6,62$ ) presentó un coeficiente de determinación alto ( $R^2 = 0,943$ ). En el segundo ciclo la relación lineal que mejor se ajustó fue  $\Psi_{\text{MPS2}} = 1,41\Psi_{\text{TEN}}$  con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,96$ , mientras que en el tercer ciclo, el mejor ajuste lineal ( $\Psi_{\text{MPS2}} = 1,304\Psi_{\text{TEN}}$ ) presentó un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,941$ .

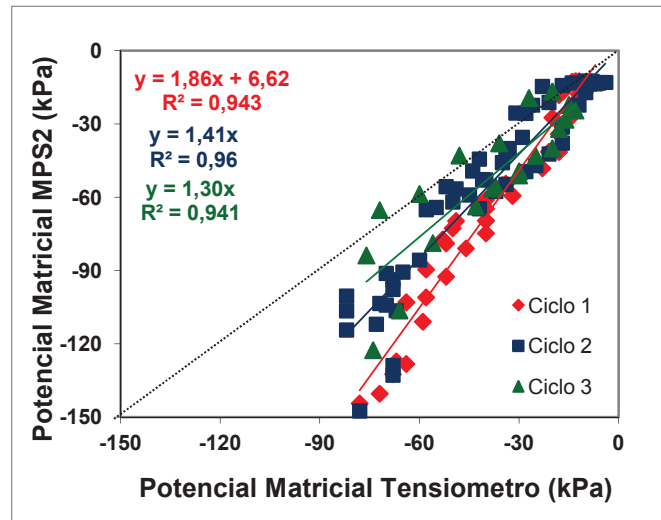


Figura 4.16. Ajuste lineal en cada ciclo de desecación entre las medidas de potencial hídrico del suelo medido con tres equipos MPS2 y con Tensiómetros.

Los errores MBE y RMSE de la comparación del  $\Psi_m$  medido con los equipos MPS2 y con tensiómetros calculados de manera conjunta para los tres equipos MPS2 en cada ciclo de desecación se muestran en el Cuadro 4.4. Los errores fueron mayores en el primer ciclo, disminuyendo en los dos ciclos posteriores.

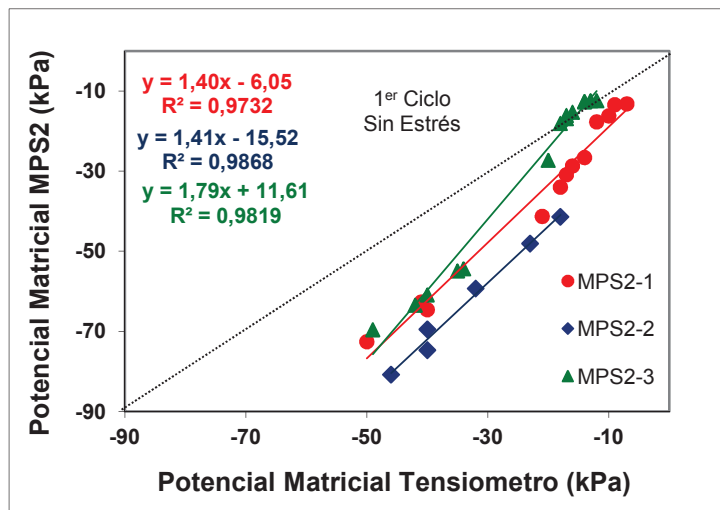
Cuando se compararon las rectas de ajuste de manera conjunta para cada ciclo (Cuadro 4.5) también se encontraron diferencias estadísticas ( $P < 0,05$ ) en las pendientes y las ordenadas en el origen entre ciclos de desecación, excepto en la ordenada de los ciclos 2º y 3º, es decir el comportamiento de los equipos fue distinto en cada ciclo de desecación evaluado. Estas diferencias entre ciclos pudieron deberse por un lado a diferencias de precisión de los equipos MPS2 al secarse el suelo, a partir de valores próximos a -80 kPa. También pudo influir el que no hubiese pasado tiempo suficiente para que la placa cerámica del equipo MPS2 se estabilizase ya que los errores disminuyeron con el tiempo (Cuadro 4.5).

#### 4.3.2.2. Medidas del periodo del ciclo de desecación sin estrés hídrico

En los tres ciclos de desecación el rango de valores del potencial matricial medido con el tensiómetro en el suelo fue grande (-4 a -82 kPa). Parte de estos valores teóricamente causarían estrés hídrico en los cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado (Thompson y col., 2007; González y col., 2009). Como los agricultores no van a regar estresando sus cultivos, salvo en casos muy específicos y de forma muy limitada como cuando intentan favorecer el enraizamiento o aumentar los grados brix (González y col., 2009), parece

más lógico analizar el comportamiento de los equipos MPS2 en los periodos en los que no hubo estrés hídrico del cultivo de pepino. Por ello se realizó una nueva evaluación y calibración de los equipos MPS2 cuando los valores de los tensiómetros indicaban que el cultivo no estaba estresado. Las medidas de  $\Psi_t$  y  $\Psi_h$  realizadas en el cultivo de pepino (Figura 4.1) indican que el cultivo mostró diferencias significativas de estos parámetros con respecto a las plantas regadas adecuadamente a partir del 18/12/12 en el primer ciclo y del 18/01/13 en el segundo ciclo. Estas diferencias ocurrieron cuando el potencial matricial medido con tensiómetros alcanzaban valores en torno a -50 kPa. Este valor coincide a grandes rasgos con los valores umbrales de ocurrencia de déficit hídrico medidos previamente en cultivos en invernadero y suelo enarenado en la zona (Thompson y col., 2007; González y col., 2009). Considerando este valor umbral se determinó el periodo de los ciclos en el que el cultivo no estuvo estresado y se evaluaron los equipos MPS2 en dichos periodos en los tres ciclos de desecación estudiados.

La Figura 4.17 muestra la relación lineal encontrada entre los valores de  $\Psi_m$  medidos con cada uno de los tres equipos MPS2 (calibración de fábrica) evaluados hasta potenciales matriciales en los que no se producía estrés a la planta (-50 Kpa) y las correspondientes medidas realizadas con los tensiómetros en cada uno de los tres ciclo de desecación estudiados. En general, en todos los ciclos los equipos MPS2 subestimaron los valores de  $\Psi_m$  medidos con los tensiómetros y las diferencias aumentaron al disminuir el CVA del suelo, sobre todo en el primer ciclo (Figura 4.17).



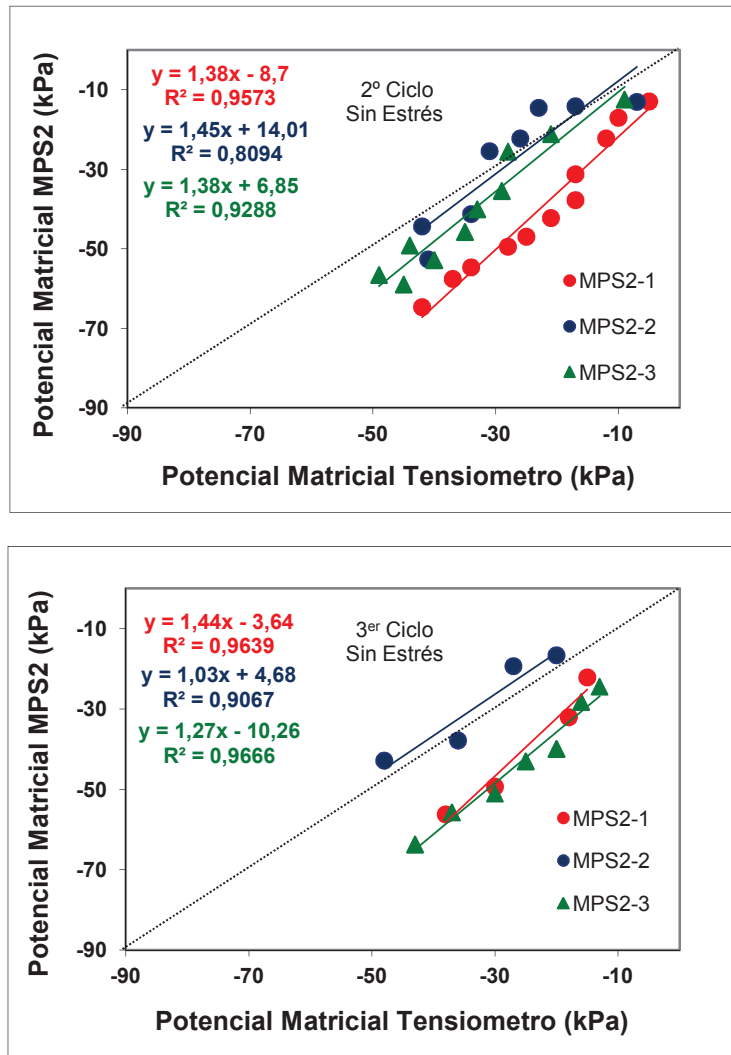


Figura 4.17 Relación lineal entre el potencial del suelo medido con equipos MPS2 y con tensiómetros en cada uno de los tres equipos MPS2 evaluados considerando sólo los periodos del ciclo de desecación sin estrés hídrico.

El ajuste entre las medidas realizadas con los equipos MPS2 y los tensiómetros fue bajo en todos los equipos y en los tres ciclos de desecación (Figura 4.17). Y los errores MBE y RMSE, indicados en el Cuadro 4.6, fueron inferiores cuando se consideró los ciclos de desecación completos.

Cuadro 4.6 Índices estadísticos calculados de la comparación de las medidas con los equipos MPS2 y Tensiómetros en tres ciclos de desecación considerando sólo los datos en los que el cultivo no presentaba estrés hídrico. RMSE (Root Mean Square Error), MBE (Mean Bias Error). Ambos en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

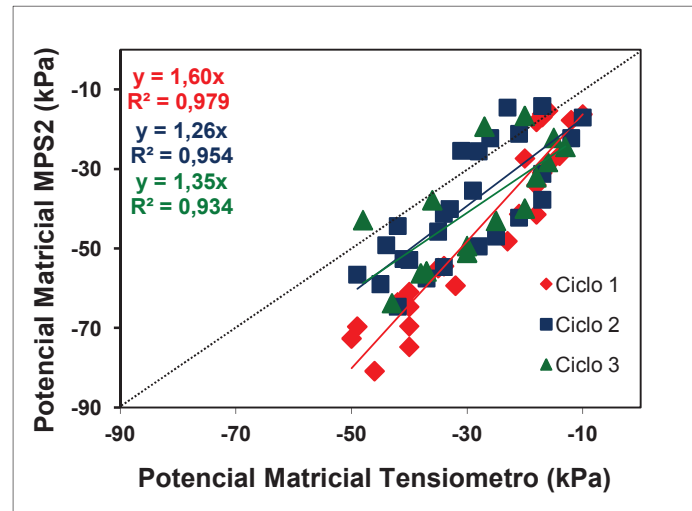
	1 <sup>er</sup> CICLO		2º CICLO		3 <sup>er</sup> CICLO	
EQUIPOS	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
MPS2-1	-15,63	16,85	-18,03	18,78	-14,65	15,41
MPS2-2	-29,13	29,46	-1,73	7,22	3,63	5,03
MPS2-3	-10,90	14,80	-6,78	8,50	-15,38	-15,80
CONJUNTO	-16,93	19,84	-9,18	12,88	-8,80	13,07

La comparación de las rectas de regresión entre el potencial matricial medido con los equipos MPS2 y con tensiómetros se muestra en el Cuadro 4.7. En el segundo y tercer ciclo de desecación, las pendientes de las rectas de ajuste no mostraron diferencias estadísticas ( $P < 0,05$ ) entre equipos, es decir todos responden con la misma intensidad a la variación del potencial matricial en valores superiores a -50 kPa. La ordenada en el origen en algunos casos fue igual (Cuadro 4.7). En el primer ciclo de desecación, las ordenadas en el origen fueron diferentes para los tres equipos MPS2 y tan solo fueron iguales las pendientes de los equipos MPS2-1 y MPS2-2.

**Cuadro 4.7** Comparación de la ordenada en el origen y de la pendiente de las relaciones lineales que mejor se ajustaron a los datos medidos de potencial matricial entre equipos por ciclo y entre ciclos de desecación agrupando los datos de los distintos equipos de medida ( $P < 0,05$ ). NS: Diferencias no significativas; \*: Diferencias estadísticamente significativas.

		ORDENADA	PENDIENTE
<b>1<sup>er</sup> CICLO</b>	MPS2-1 vs MPS2-2	*	NS
	MPS2-1 vs MPS2-3	*	*
	MPS2-2 vs MPS2-3	*	*
<b>2<sup>o</sup> CICLO</b>	MPS2-1 vs MPS2-2	*	NS
	MPS2-1 vs MPS2-3	*	NS
	MPS2-2 vs MPS2-3	NS	NS
<b>3<sup>er</sup> CICLO</b>	MPS2-1 vs MPS2-2	*	NS
	MPS2-1 vs MPS2-3	NS	NS
	MPS2-2 vs MPS2-3	*	NS
<b>1<sup>er</sup> CICLO vs 2<sup>o</sup> CICLO</b>		*	*
<b>1<sup>er</sup> CICLO vs 3<sup>er</sup> CICLO</b>		*	*
<b>2<sup>o</sup> CICLO vs 3<sup>er</sup> CICLO</b>		NS	NS

La relación lineal entre el potencial matricial medido con tensiómetros y el MPS2 agrupando los equipos en cada ciclo de desecación se muestra en la Figura 4.18. En el primer ciclo, la relación lineal que mejor se ajustó a los datos medidos ( $\Psi_{MPS2} = 1,60\Psi_{TEN}$ ) presentó un coeficiente de determinación alto ( $R^2 = 0,98$ ). En el segundo ciclo, la relación lineal que mejor se ajustó a los datos medidos fue  $\Psi_{MPS2} = 1,26\Psi_{TEN}$  con un  $R^2$  de 0,95. Mientras que en el tercer ciclo, la relación lineal que mejor se ajustó a los datos medidos fue  $\Psi_{MPS2} = 1,35\Psi_{TEN}$  con un  $R^2$  de 0,93.



**Figura 4.18** Ajuste lineal entre el potencial matricial medido con los equipos MPS2 y el medido con tensiómetro en el mismo bulbo húmedo en los periodos sin estrés hídrico cada ciclo de desecación.

Es decir que las rectas de regresión agrupando los datos de los equipos por ciclos no fueron estadísticamente distintas en el segundo y tercer ciclo de desecación, pero sí lo fue la recta del primer ciclo con respecto a los ciclos posteriores.

Tanto para el ciclo completo como para el periodo del ciclo sin estrés hídrico la comparación entre equipos y entre ciclos de desecación se ha realizado utilizando valores de potencial matricial medidos a primera hora de la mañana (8-9 horas) y mediodía (13-14 horas). Sí la comparación entre equipos se realiza utilizando sólo los valores medidos a primera hora de la mañana, cuando el potencial matricial es más estable, no hubo diferencias estadísticas ( $P < 0,005$ ) en las pendientes de los tres equipos MPS2 evaluados tanto en el ciclo completo como cuando sólo se considera el periodo sin estrés hídrico, excepto para la pendiente del equipo MPS2-1 y MPS2-2 en el primer y tercer ciclo completo de desecación (datos no mostrados). En el desarrollo y evaluación de las ecuaciones de calibración del sensor Watermark, que mide el potencial matricial del suelo indirectamente usando la resistencia eléctrica, habitualmente se han usado valores medidos antes de la salida del sol porque el potencial matricial es más estable (Shock y col., 1998; Irmak y Haman, 2001).

Los tensiómetros se han utilizado ampliamente para medir el  $\Psi_m$  en la programación del riego en fincas comerciales y en estudios de investigación (Campbell y Mulla, 1990; Young y Sisson, 2002). Sin embargo, estos equipos para que sean precisos requieren preparación y mantenimiento regular (Cassel y Klute, 1986; Young y Sisson, 2002). Los equipos MPS2 tienen varias características que los hacen atractivos para su uso en cultivos hortícolas y la principal es que requieren una preparación y mantenimiento mínimo. Sin embargo, nuestro trabajo ha



indicado que subestiman ampliamente los valores de potencial matricial. Por ello, hemos desarrollado una calibración específica para suelos enarenados para un rango de valores de potencial matricial en el que el cultivo no está normalmente estresado ( $\Psi_m > -50$  kPa) y utilizando los valores medidos a primera hora de la mañana (Figura 4.19). Dado que en el tercer ciclo tenemos pocos datos y que en el primer ciclo el comportamiento del MPS2 fue diferente al de los otros dos ciclos hemos considerado más adecuado usar los valores medidos en el segundo ciclo de desecación para obtener la curva de calibración específica (Figura 19).

$$\Psi = 0,73\Psi_{\text{MPS2}} \quad R^2=0,97$$

Ecuación 6

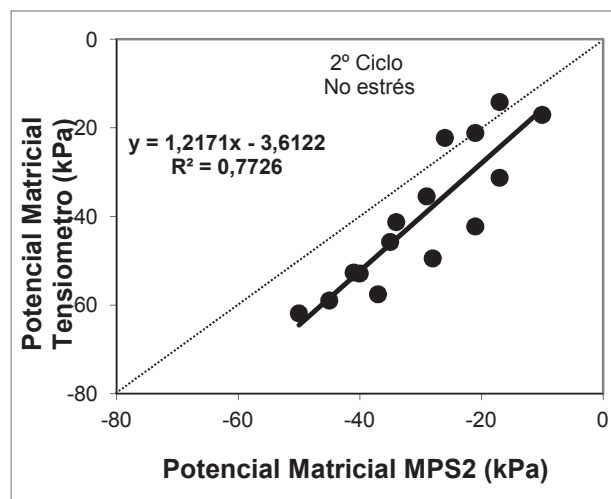


Figura 4.19. Curva de calibración específica del equipo MPS2 utilizando los valores medidos a primera hora de la mañana durante el 2º ciclo para el periodo sin estrés.

La Figura 4.20 muestra el  $\Psi_m$  medido a primera hora de la mañana con los equipos MPS2 usando la curva de calibración específica (Ecuación 6) en el primer y tercer ciclo de desecación para el periodo sin estrés hídrico corregidos comparándolas con las medidas realizadas con el tensiómetro. La precisión del equipo MPS2 mejoró cuando se aplicó la calibración específica, sobre todo en el tercer ciclo: La pendiente de la recta de regresión fue de 1,06 y los errores MBE y RMSE disminuyeron claramente (Cuadro 4.8).

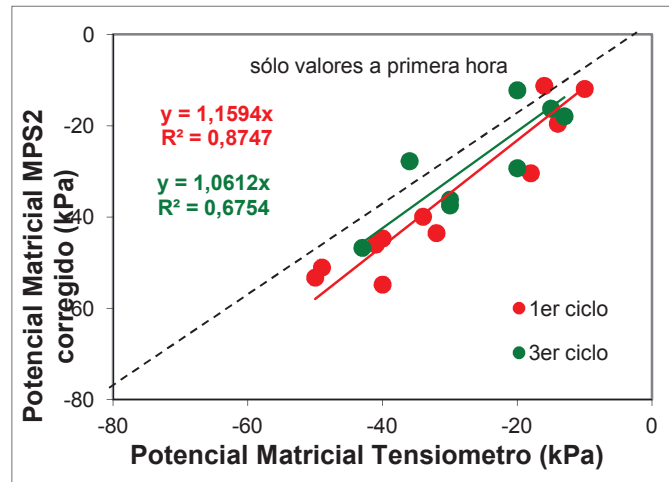


Figura 4.20 Ajuste lineal de los equipos MPS2 calibrados con la Ecuación 2 en el primer y tercer ciclo.

Thompson y col. (2007) evaluaron el comportamiento del equipo Watermark usando datos dinámicos (medidos de forma continua cada 30 minutos) y datos estáticos (un valor diario a las 6 a.m.). No encontraron una ventaja clara al usar datos continuos en comparación con usar un único dato diario.

**Cuadro 8.** Índices estadísticos calculados de la comparación del potencial matricial medido a primera hora de la mañana con los equipos MPS2 corregidos usando la calibración específica y con tensiómetros en el primer y tercer ciclo de desecación en el periodo sin estrés. RMSE (Root Mean Square Error) y MBE (Mean Bias Error).

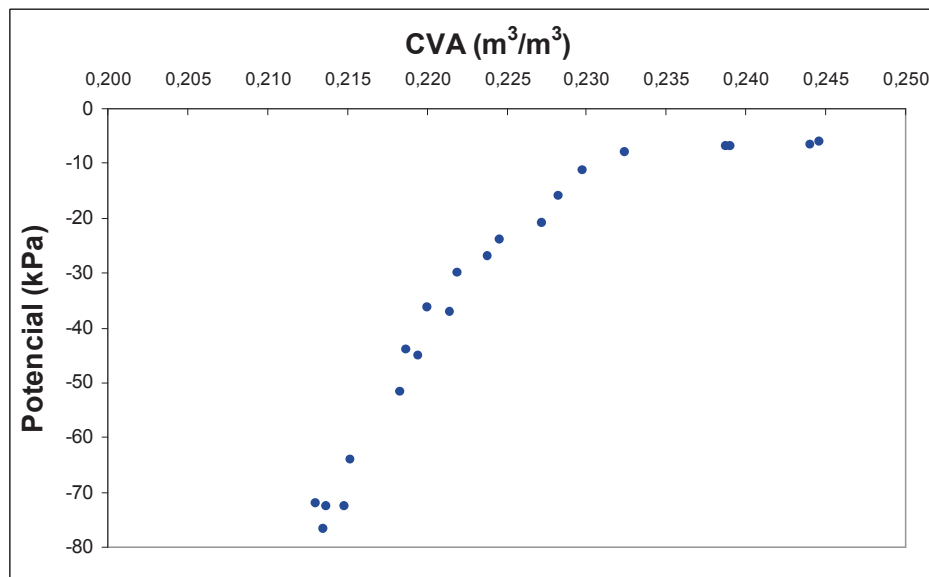
CICLO	MBE (kPa)	RMSE (kPa)
1 <sup>er</sup> Ciclo	-5,62	7,71
3 <sup>er</sup> Ciclo	-2,05	6,58

Para el uso en campo, el potencial mátrico del suelo ( $\Psi_m$ ) es un parámetro más práctico que el contenido volumétrico de agua en el suelo. Esto se debe a que los rangos de  $\Psi_m$  para iniciar o finalizar el riego (Campbell y Campbell, 1982) se conoce como el resultado de investigación o son proporcionados por los distribuidores de los equipos. Para cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado se han determinado valores límites de  $\Psi_m$  del suelo que causan estrés hídrico en el cultivo (Thompson y col., 2007; González y col., 2009). Para el cultivo del pepino nuestro trabajo determinó que el cultivo presentó estrés cuando el  $\Psi_m$  del suelo era inferior a -50 kPa.

Para determinar el límite inferior del contenido de volumétrico de agua en suelo a partir del cual el cultivo sufre estrés, generalmente se ha usado el método basado en fracciones de

agotamiento permisibles (Doorenbos y Kassan, 1979). Los valores de fracción de agotamiento permisible varían con la especie y el estado de desarrollo (Goldhamer y Snyder, 1989), por lo que tienen que ser definidos para cada situación de cultivo y suelo.

Para nuestras condiciones, se ha establecido el límite inferior de CVA relacionando los valores medidos con los equipos 5TE (utilizando la calibración del fabricante) con los valores de  $\Psi_m$  del suelo medido con tensiómetros (Figura 4.21). Se han utilizado los datos registrados durante el segundo ciclo de desecación, ya que las condiciones de conductividad eléctrica del suelo fueron próximas a los valores comunes en los suelos enarenados del litoral de Almería (Figura 4.2) y también por el tiempo transcurrido desde la instalación. El  $\Psi_m$  del suelo se mantuvo alto y constante con valores inferiores a 10 kPa cuando los valores de CVA fueron superiores a  $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , pero disminuyó rápidamente para valores CVA inferiores a  $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . En general, para suelos de textura franca se considera que capacidad de campo se corresponde con valores de  $\Psi_m$  del suelo de -33 kPa (Ritchie y col., 1999). Este valor correspondería a un CVA correspondiente en torno a  $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Como el cultivo de pepino mostró estrés hídrico cuando los valores  $\Psi_m$  del suelo eran inferiores a -50 kPa, que se corresponde con un CVA en torno a  $0,215 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , podemos considerar que el valor umbral de CVA cuando habría que regar este suelo sería  $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .



**Figura 4.21** Relación entre el contenido volumétrico de agua (CVA) y el potencial matricial del agua en el suelo (kPa) medidos durante el segundo ciclo de desecación. Datos promedio de tres equipos 5TE (usando la calibración del fabricante) y 3 tensiómetros.



## ***CONCLUSIONES***



## 5 CONCLUSIONES

1. El equipo de medida del contenido volumétrico de agua en suelo 5TE determinó bien el comportamiento general de esta variable en un cultivo de pepino en invernadero y en suelo enarenado, pero sus valores absolutos fueron poco precisos.
2. El equipo 5TE subestimó el contenido volumétrico de agua del suelo medido con un equipo TDR durante varios ciclos de desecación. El error de subestimación, que fue mayor al principio de los ciclos cuando el suelo estaba muy húmedo, disminuyó a medida que se secaba el suelo. Para reducir el error de medida se determinó una curva de calibración específica para este equipo y tipo de suelo.
3. El equipo de medida del potencial matricial de agua en suelo MPS2 determinó bien el comportamiento general de esta variable en un cultivo de pepino en invernadero y en suelo enarenado, pero sus valores absolutos fueron poco precisos.
4. El equipo MPS2 subestimó el potencial matricial del agua del suelo medido con tensiómetros durante varios ciclos de desecación. El error de subestimación, que fue mayor al principio de los ciclos cuando el suelo estaba muy húmedo, disminuyó a medida que se secaba el suelo. Para reducir el error de medida se determinó una curva de calibración específica para este equipo y tipo de suelo.
5. El equipo MPS2 no fue sensible a valores de potencial matricial del agua del suelo mayores de -10 a -12 kPa, por lo que su uso no es aconsejable en condiciones de cultivo donde haya que trabajar con estos potenciales: suelos de textura gruesa o contenidos volumétricos altos.
6. El manejo de los equipos, desde su instalación hasta la lectura de datos en el datalogger y su posterior transformación de datos (caso del 5TE), fue sencillo.





## ***BIBLIOGRAFÍA***



## 6 BIBLIOGRAFÍA

**Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M.** 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage paper 56, Roma, Italia, 301 pp.

**Bonachela, S., González, A. M. y Fernández, M. D.** 2006. Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data, *Irri. Sci.* (25): 53-62.

**Bretones F.** 1999. El Enarenado. En: Técnicas de producción de frutas y hortalizas en los cultivos protegidos del sureste español. F. Camacho (Ed.), Caja Rural de Almería. Mundi Prensa, pp. 99-111.

**Brisco, B., Pultz, T.J., Brown, R. J., Topp, G. C., Hares M. A. y Zebchuk W. D.** 1992. Soil moisture measurement using portable dielectric probes and time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 28: 1339-1346.

**Campbell, G. S., y Campbell, M. D.** 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *Advances in irrigation.* (1): 25-42.

**Cardenas-Lailhacar, B., Dukes, M. D., y Miller, G. L.** 2008. Sensor-based automation of irrigation on bermudagrass, during wet weather conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(2): 120-128.

**Cardenas-Lailhacar, B., Dukes, M. D., y Miller, G. L.** 2010. Sensor-based automation of irrigation on Bermudagrass during dry weather conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(3): 184-193.

**Carreño, J., Aguilar, J. y Moreno, S. M.** 2000. Gastos de agua y cosechas obtenidas en los cultivos protegidos del campo de Níjar (Almería). XVIII Congreso Nacional de Riegos. Huelva, 20 al 22 de junio de 2000.

**Casas, J. J., Toja, J., Bonachela, S., Fuentes, F., Gallego, I., Juan, M., León, D., Peñalver, P., Pérez, C. y Sánchez, P.** 2011. Artificial ponds in a Mediterranean region (Andalusia, southern Spain): agricultural and environmental issues; *Water and Environ. J.* (25-3): 308-317.

**Castilla, N., Lorenzo, P., Montero, J. I., Fereres, E., Bretones, F., López-Gálvez, J., y Pérez-Parra, J.** 1988. Alternative greenhouses for mild winter climate areas of Spain preliminary report. *Engineering and Economic Aspects of Energy Saving in Protected Cultivation* 245: 63-70.

**Céspedes, A. J., García, M. C., Pérez, J. J. y Cuadrado, I. M.** 2009. Caracterización de la explotación hortícola protegida de Almería. Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. Almería, España. 178 pp.

**Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, Junta de Andalucía.** 2012. Memoria resumen año 2012.

**Dasberg, S. y Hopmans, J. W.** 1992. Time domain reflectometry calibration for uniformly and no uniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1341-1345.

**Dasberg, S., y Or D.** 1999. *Drip Irrigation*. Berlin. Germany. 159 pp.

**Dirksen, C. y Dasberg, S.** 1993. Four component mixing model for improved calibration of TDR soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 660-667.

**Doorenbos, J. y Kassam, A.H.** 1979. Yield response to water. FAO: Irrigation and Drainage paper no 33. FAO. Roma Italia. 193 pp.

**Doorenbos, J. y Pruitt, W. O.** 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. FAO Riego y drenaje, no 24, FAO, Roma, Italia.

**Drungil, C. E. C., Abt, K. y Gish, T. J.** 1989. Soil moisture determination in gravelly soils with time domain reflectometry. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 32: 177-180.

**Fernández M.D., Bonachela S., Contreras A. y González A.M.** 2004. Evaluación de un equipo de medida continua de humedad basado en la reflectometría en el dominio de frecuencias en un suelo enarenado. Sinopsis trabajos. XXII Congreso Nacional de Riegos, Logroño, La Rioja. pp. 61-64.

**Fernández, M. D., Thompson, R. B., Bonachela, S., Gallardo, M. y Granados, M. R.** 2012. Uso del agua de riego en los cultivos de invernadero. En: Cuadernos de Estudios Agroalimentarios (CEA) (3), pp. 115-138.

**Ferré, P. A. y Topp, G.C.** 2002. Time Domain Reflectometry. Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. Soil Science Society of America Book Series, no 5, pp. 434-446.

**Fundación Cajamar.** 2012. Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería. Campaña 2011/2012. Informes y monografías. Edita Fundación Cajamar.

**Fundación Tecnova.** 2007. *Tecnómetro 2004*. Observatorio Económico y de Innovación de la Industria Auxiliar de la Agricultura, Almería, fundación tecnova.

**Gallardo, M. y Thompson, R. B.** 2003. Uso de los sensores de planta para la programación del riego; En: *Mejora de la Eficiencia en el Uso del Agua en Cultivos Protegidos* Fernández, M. y col. (eds.). Dirección General de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía; pp. 353-374.

**Ganjegunte, G. K., Sheng, Z., y Clark, J. A.** 2012. Evaluating the accuracy of soil water sensors for irrigation scheduling to conserve freshwater. *Applied Water Science*, 2(2): 119-125.

**Gaskin, G. J., y Miller, J. D.** 1996. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(2), 153-159.

**Goldhamer, D. A., y Snyder, R. L.** 1989. *Irrigation scheduling: a guide for efficient on-farm water management*. 67 pp.

**González, A. M.** 2003. *Programas de Riego para cultivos hortícolas en invernaderos enarenados en Almería*. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.

**González, A. M., Bonachela, S. y Fernández, M. D.** 2009. Regulated deficit irrigation in green bean and watermelon greenhouse crops. *Scientia Horticulturae*, 122(4): 527-531.

**Irmak, S. y Haman, D.Z.** 2001. Performance of the watermark Granular matrix sensor in sandy soils. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(6): 787-795.

**Jones, H. G.** 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427-2436.

**Kizito, F., Campbell, C. S., Campbell, G. S., Cobos, D. R., Teare, B. L., Carter, B., y Hopmans, J. W.** 2008. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352(3): 367-378.

**Lupiañez, N.** 2009. Caracterización y evaluación de instalaciones de riego localizado del Campo de Dalías. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Almería.

**Meek, D. W. y Hatfield, J. L.** 1994. Data quality checking for single station meteorological databases; *Agricultural and Forest Meteorology*, 69: 85-109.

**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.

**Pardossi, A., Incrocci, L., Incrocci, G., Malorgio, F., Battista, P., Bacci, L., Rapi B., Marzioletti P., Hemming J., y Balendonck, J.** 2009. Root zone sensors for irrigation management in intensive agriculture. *Sensors*, 9(4): 2809-2835.

**Ritchie, J. T., Gerakis, A., y Suleiman, A.** 1999. Simple model to estimate field-measured soil water limits. *Transactions of the ASAE*, 42(6): 1609-1614.

**Romero, R., Muriel, J. L., García, I., y Muñoz de la Peña, D.** 2012. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agricultural Water Management*; pp 59-67.

**Roth, C.H., Malicki, M.A. y Plagge, R.** 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as a basis for calibrating soil moisture measurements. *J. Soil Sci.* 43: 1-13.

**Saito, T., H. Fujimakib, H. Yasudac, y M. Inoue.** 2009. Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(6): 1931-1937.

**Sanjuán, J.F.** 2007. Detección de la superficie invernada en la provincia de Almería a través de imágenes Aster. Ed. Cuadrado, I.M. FIAPA. Almería.

**Tamari, S., Gaudu, J. C. y Simonneau, T.** 1993. Tensiometric measurement and metastable state of water under tension. *Soil Sci.* 156: 149-155.

**Thompson, R. B., Gallardo, M., Valdez, L. C., y Fernández, M. D.** 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agricultural water management*, 88(1): 147-158.

**Topp, G. C., Davis, J. L. y Annan, A. P.** 1980. Electromagnetic determination of soil-water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16: 574-582.

**Varble, J. L., y Chávez, J. L.** 2011. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management*, 101(1): 93-106.

**Vaz, C. M., Jones, S., Meding, M., y Tuller, M.** 2013. Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. *Vadose Zone Journal*, 12(2): 1-14.

**Weitz, A. M., Grauel, W. T., Keller, M. y Veldkamp. E.** 1997. Calibration of time domain reflectometry technique technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin. *Water Resour. Res.* 33: 1241-1249.

**Young, M. H. y Sisson, J. B.** 2002. Tensiometry. *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods.* Soil Science society of America Book Series, no 5. P 575-605.