

## ALGUNOS PROBLEMAS INSTRUMENTALES RELACIONADOS CON LA DETERMINACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DEL SUELO

Ignacio Morell Evangelista\*  
Juan Tuñón Colom\*

---

### RESUMEN

Las medidas de humedad en el suelo resultan una herramienta sencilla para muchos campos de investigación. En parcelas experimentales y en lisímetros no se pueden aplicar técnicas destructivas, por lo que se han venido utilizando otro tipo de técnicas que han venido mejorando en las últimas décadas: TDR, Tensiómetros, Sonda de neutrones.

Se han contrastado este tipo de medidas con valores de evapotranspiración en una parcela experimental de cítricos con lisímetros en Castellón (España). Los resultados obtenidos muestran que las variaciones de humedad en periodos de tiempo cortos, de uno o varios días no son nada óptimos, y resultan poco apropiados.

### Palabras clave

TDR; tensiómetros; lisímetros; parcela experimental; Castellón

### ABSTRACT

Water soil content determinations are an easy methodology used in several applications. These methodologies are not available in experimental sites or lysimeters, because of soil destruction is not possible. TDR, tensiometers and Radvicative methods are the most accepted to solve this problem, and the technology have been improved in the last years.

We have compare TDR and Tensiometers measurement with evapotranspiration values determined in an experimental site in Castellon (Spain) with citrus crops. The results obtained shown that the measurements with TRD and tensiometers are still not improved to determine the daily variations in soil water content.

### Key words

TDR; tensiometers; experimental site; lysimeters; Castellon (Spain)

## INTRODUCCIÓN

Las medidas de humedad en el suelo se realizan de forma generalizada en campos muy diversos tales como prácticas agrícolas, medidas biológicas, diversas aplicaciones medioambientales y obra civil así como, por supuesto, en tareas de investigación afines a estas actividades como la edafología, climatología, hidrogeología, geotecnia, ciencias biológicas, ciencias ambientales, etc.

En este trabajo se aborda la problemática de las medidas de humedad para la determinación precisa del balance hídrico del suelo. La medida directa de la humedad en el suelo no presenta ningún tipo de dificultad; su determinación se puede realizar de forma económica, sencilla y rápida sin necesidad de equipos complejos. El cálculo de la humedad gravimétrica es preciso y fiable, y su conversión a humedad volumétrica no requiere más que conocer la densidad aparente del suelo en cuestión, cuya determinación se realiza también de forma simple. El principal problema radica en que estas medidas son puntuales, en el espacio y en el tiempo, y también destructivas por lo que no permiten repetición de la determinación.

Los lisímetros suponen una gran ventaja a la hora de realizar aproximaciones a este tipo de cálculos, sin olvidar las limitaciones que representa la simplificación de este tipo de medidas respecto a un acuífero en general, y de la zona no saturada en particular. A pesar de la más que discutible representatividad espacial de los resultados obtenidos (Morell, 1995; Gonzalo et al., 1995; Samper, 1997), es posible suponer que en un contexto hidrogeológico similar sean aplicables (Issar and Passchier, 1990). Cuando menos, permiten conocer y evaluar detalles del comportamiento hídrico que, evidentemente, pasan desapercibidos cuando se hacen aproximaciones teóricas o regionales.

Son destacables las aportaciones de los lisímetros como herramienta para la estimación de la evapotranspiración (Allen, 1990; Daame et al., 1993, 1995; Tuñón, 2000), y son ampliamente utilizados en zonas agrícolas o forestales para la planificación de riegos en diferentes ambientes del centro de Europa (Meissner, et al., 1998a) y Africa, (Jackson, 1999); incluso la planificación de regadíos en California, basada en cálculos a tiempo real (CIMIS), mediante un sistema automatizado de medidas en diferentes estaciones meteorológicas, está apoyado en medidas lisimétricas (Snyder y Pruitt, 1992).

A grandes rasgos los lisímetros se pueden dividir en dos grandes grupos: los lisímetros de pesada y los de percolación. En los de pesada, dotados de básculas de precisión, se determinan las diferencias de humedad por pesada en tiempo real, lo cual tiene gran interés en investigaciones cuyo objetivo sea determinar la evapotranspiración, coeficientes de cultivo o resistividad de los diferentes mecanismos de flujo de agua en el sistema suelo-planta-aire; el principal problema de este tipo de instalaciones es su elevado coste y complejo mantenimiento. Por el contrario, los lisímetros de percolación son mucho más económicos, y se suelen utilizar para determinar la infiltración del agua con objetivos muy dispares como la estimación de lixiviados, el estudio del flujo de contaminantes, experimentos de adsorción, mejora de aplicación de sistemas de riego y fertirrigación, etc.

Los lisímetros se diseñan de forma que se anula la escorrentía (Lener, 1990), de modo que toda el agua que entra en el sistema se utiliza para contribuir al relleno de los poros del suelo permitiendo la infiltración una vez superada la capacidad de campo. De esta forma se puede determinar la infiltración aforando el volumen de agua que ha percolado por el lisímetro; el resto del agua o ha quedado retenida en el suelo o

se ha evapotranspirado. La variación del almacenamiento se determina a partir de variaciones de la humedad, por lo que su medida debe hacerse con el máximo grado posible de fiabilidad.

Por tanto, se hace necesario el uso de técnicas de medida de la humedad que sean preservativas de las condiciones hidrodinámicas y que permitan la repetición en el espacio y el tiempo de estas medidas. Estas técnicas se han venido usando desde hace varios años con una mejora considerable de los instrumentos y de su aplicación, estando ampliamente extendido el uso de las mismas. De todas ellas, la más usadas son los métodos radiactivos y los métodos basados en la determinación de la constante dieléctrica del sistema suelo-agua-aire. Otras técnicas emergentes, como la determinación en el dominio de las microondas vía satélite, todavía no tienen el suficiente grado de definición requerido en la mayor parte de los estudios ya que sólo permiten la medida de la humedad en los primeros centímetros del suelo y con una escala espacial poco apropiada.

### **Métodos radiactivos**

El método más común es la sonda de neutrones (Haverkamp et al., 1984), cuyos resultados para obtener perfiles de humedad en función de la profundidad son aceptables, pero tienen el gran inconveniente de requerir personal especializado, licencias de uso, elevado coste y muchas prohibiciones para su utilización en algunas aplicaciones (Starr et al., 1999a,b); además, están fuertemente influenciadas por la distribución al azar que tiene la radiactividad en la naturaleza y, sobre todo, porque su utilización no es posible en los primeros 15 cm del suelo (Martínez-Fernández et al., 1994), donde se produce la mayor variación de la humedad. También dan problemas en suelos con alto contenido en materia orgánica, donde puede existir hidrógeno en las sustancias orgánicas

que interfieren (Brady y Weil, 1996) y su uso requiere la instalación de un tubo de zinc en el suelo donde se va a realizar el perfil. Todo esto, junto con la aparición de nuevas técnicas, han dejado la sonda de neutrones en relativo desuso (López-Rodríguez, 1997).

La técnica de la sonda de neutrones está basada en la capacidad que tienen los átomos de hidrógeno de disminuir drásticamente la velocidad de desplazamiento de los neutrones y dispersarlos. Por tanto, si se tiene una fuente de emisión de neutrones, por ejemplo americio - berilio, estos neutrones, si encuentran átomos pequeños como los del hidrógeno en su trayectoria, chocarán con ellos y disminuirán su velocidad. Estos neutrones más lentos se pueden localizar con un detector que transforma la lectura en humedad volumétrica del suelo.

### **Métodos eléctricos**

Si la utilización de la sonda de neutrones supuso un gran avance con respecto a las técnicas destructivas, el sistema de Reflectometría en Dominio de Tiempo, (TDR) (Topp et al, 1980) fue otro gran adelanto, que ya fue propuesto por Davis y Chudobiak (1975) y Davis y Annan (1977), aunque, con anterioridad, el balance del potencial entre dos barras metálicas en línea colocadas en el suelo ya fue reconocido por Kirkschether (1960). En Gardner et al. (1991) se revisa el desarrollo de esta técnica, que está basada en la medida de la velocidad de un pulso que circula por una línea de transmisión electromagnética, como si fuese una onda guiada. La velocidad de este pulso se utiliza para conocer la constante dieléctrica del suelo, que está influenciada por la cantidad de agua que hay en él, pues la constante dieléctrica del agua es unas 20 veces superior a la del suelo.

La medida de la constante dieléctrica del

de la señal electromagnética. La frecuencia que proporciona mejores resultados está entre 100 MHz y 4GHz, campo en que el efecto asociado a la vibración y a la rotación de las moléculas de agua es despreciable (Ledieu et al., 1986; Ledieu y Dautrebande, 1987). A 1 GHz la constante dieléctrica del agua es de 80.36, mientras que para el suelo varía entre 3 y 5, y para el aire es 1. Estas diferencias son las que hacen posible determinar el contenido volumétrico de agua en el suelo. La medida en el campo de la constante dieléctrica se hace mediante sondas. Normalmente, las sondas son de dos tipos, fijas y móviles. Las fijas constan de varias varillas de acero inoxidable. En un estudio de Zegelin et al. (1989), se pone de manifiesto que se obtienen mejores resultados con las de tres varillas. Las móviles suelen ser cilíndricas y se introducen en tubos de PVC que se han de instalar para poder realizar los perfiles de humedad.

El sistema TDR es ampliamente utilizado para la determinación en campo de la humedad del suelo en los últimos años, pero últimamente se están desarrollando otros métodos en función de la capacitancia (Ruth, 1999), longitud de resonancia (Starr et al., 1999a), o la impedancia mediante analizadores de redes (Campbell, 1990; Starr et al., 1999b), así como otras aplicaciones de la constante dieléctrica (Fabregat-Santiago et al., 1999).

### **Métodos de resistencia eléctrica**

Otros métodos muy utilizados son los de la resistencia eléctrica, basados en la propiedad que tienen algunos materiales porosos como el yeso, el nylon o la fibra de vidrio, de conducir la corriente eléctrica, cuya resistencia está relacionada con el contenido de humedad. Si se introducen pequeños bloques de estos materiales en el suelo con unos electrodos insertados,

absorben agua en función del contenido de humedad del suelo, lo que da lugar a variaciones de la resistencia eléctrica. Si se mide esta resistencia eléctrica se puede determinar el contenido de humedad del suelo.

### **Tensiómetros**

Los tensiómetros son instrumentos que determinan el potencial del agua. El potencial del agua en el suelo depende de la suma de los potenciales de las fuerzas que actúan sobre ella. Las principales fuerzas que actúan sobre el agua en el suelo son la gravedad (potencial gravitacional), la adhesión a las partículas sólidas de la matriz del suelo (potencial matricial), la atracción iónica (potencial osmótico) y la presión hidrostática (potencial de presión).

En el sistema agua-planta-suelo el potencial del agua juega un papel muy importante. Las plantas funcionan como si fueran bombas, moviendo el agua desde el suelo hasta la atmósfera como respuesta a los diferentes potenciales del agua en el suelo, planta y aire. El sistema hidráulico que mueve el agua desde el suelo a través de la planta y hacia el aire actúa como un verdadero medio continuo de manera que los cambios de presión en las raíces se manifiestan de forma automática en las hojas (Nulsen et al., 1977; Leyton, 1978). Para compensar el agua perdida por evapotranspiración la planta absorbe agua del suelo. La energía del agua viene expresada generalmente en forma de potencial hídrico, que puede tomarse como el contenido de energía libre o energía potencial por unidad de volumen de agua. El potencial del agua puede entenderse como la capacidad almacenada para producir trabajo por unidad de volumen. El potencial total del agua en un punto será la suma resultante de todos los factores que afectan a esa energía libre contenida.

En el sistema planta-suelo, el movimiento del agua es pasivo. Esto significa, que el agua se mueve de zonas de potencial alto a zonas de menor potencial. En condiciones iguales, cuanto mayor sea la diferencia de potencial más rápido será el movimiento del agua. Los otros factores que afectan al movimiento del agua son factores que influyen en la capacidad de los conductos para transportar el agua, conocidos como conductancia.

El agua estará en continuo movimiento mientras haya un gradiente de potencial, excepto si existen barreras que taponen la vía de circulación del agua. El movimiento sólo cesará cuando el potencial sea el mismo dentro de todo el sistema; en este caso se habrá alcanzado el equilibrio.

## PROBLEMAS OPERACIONALES

### Instalación y Diseño

A continuación se comentan algunas de las experiencias obtenidas a lo largo de varios años de medidas de humedad en una parcela experimental, con lisímetros de percolación y diversas parcelas anexas, equipada con sondas TDR de la marca IMKO y tensiómetros (Tuñón et al, 1999).

La humedad del suelo en los lisímetros se ha medido mediante la instalación de tensiómetros y sondas TDR fijas (figura 1) en el lisímetro de mayor superficie. Además, se han instalado tubos-Trime para lectura con sonda móvil en cada uno de los lisímetros, como la que se muestra en la figura 2, con una profundidad de 1 m, así como tubos trime de 2 y 3 metros de profundidad en las parcelas contiguas. El nivel piezométrico en esta zona está a 260 cm de profundidad, aproximadamente.

Los tensiómetros son del tipo SKT 600 que miden la tensión con traductor de

presión y están conectados a un data logger Campbell. Estos tensiómetros están instalados a 10, 30, 50, 70 y 90 cm al igual que las sondas TDR fijas.



Figura 1. Sonda TDR-P3 de la casa IMKO

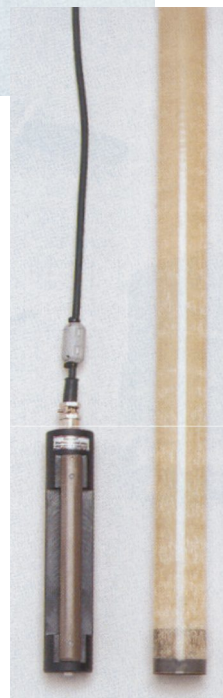


Figura 2. Sonda TDR móvil junto con un Tubo Trime para la determinación de perfiles de humedad

Las densidades aparentes obtenidas en cada lisímetro muestran una gran dispersión, siendo la densidad media de  $1.64 \text{ g/cm}^3$  y valores entre  $1.50$  y  $1.86 \text{ g/cm}^3$ . En la figura 3 se muestra la calibración de la sonda móvil

para los tube probe en el suelo de la parcela con la que se han realizado las medidas de humedad.

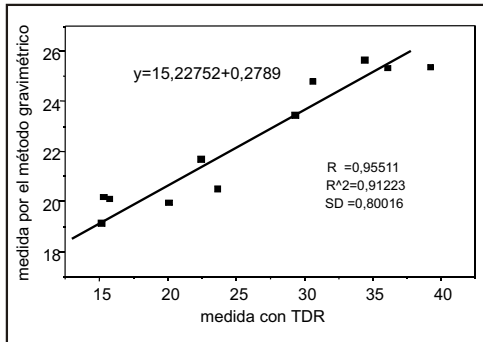


Figura 3. Calibración de la sonda Tube Probe

### Tensiómetros

La elaboración de las curvas psicrométricas para calibrar los tensiómetros resultó muy compleja dada la dificultad de ajuste de las curvas teóricas a los resultados obtenidos, ya que se muestra muy sensible a pequeños cambios de las diferentes constantes. Por otro lado las medidas en suelos alterados, como los introducidos en el psicrómetro, dejan un amplio margen a la posible desviación de las lecturas de campo.

Esto obligó a desinstalar los tensiómetros del lisímetro para intentar calibrarlos en el laboratorio para este tipo de suelos. Las experiencias obtenidas junto con los numerosos errores de medida condujeron a abandonar este tipo de medidas dada la imposibilidad de discernir cual podía ser la lectura errónea respecto al resto de tensiómetros.

Por otro lado, cabe destacar que la instalación en el campo de los equipos de medida junto con la estación meteorológica, el data-logger y las sondas TDR, sin posibili-

dad de equipar una caseta para aislar los equipos de almacenamiento de datos, pudo provocar algún tipo de alteración en las medidas, bien por las frecuentes tormentas, que provocaban la alteración de algunas lecturas, cotejadas con otra estación meteorológica cercana (a menos de 500 m), o en la alimentación o incluso en el propio sistema de almacenamiento.

En definitiva, las medidas tensiométricas no mostraron resultados coherentes que permitieran obtener interpretaciones fiables ni pudieron ser utilizadas las curvas características de cada suelo para verificar su coherencia con la humedad medida mediante otras técnicas.

### Sondas TDR tipo P3

En cuanto a las medidas de humedad mediante sondas TDR se utilizaron dos dispositivos distintos. Inicialmente se instalaron las sondas tipo P3 fijas, con sección circular y tres pins de igual dimensión y paralelos entre sí. Estas sondas se introdujeron de forma simultánea a la construcción del lisímetro a profundidades de 10, 30, 50, 70 y 90 cm, con objeto de asegurar un buen contacto entre los electrodos y el suelo.

Las medidas se obtenían mediante un lector digital conectado a la salida RSD200 de las sondas, que realiza una lectura sistemática tras emitir un pulso eléctrico. Estas lecturas se realizaron de forma diaria durante un periodo superior a un año, siempre por la misma persona y con el mismo procedimiento operativo.

De cada sonda se tomaban tres lecturas, que solían ser bastante similares, pero en ocasiones estas medidas presentaban una dispersión mayor con un rango de lecturas superior al 3% en valores absolutos de humedad volumétrica, lo cual suponía una

variación muy superior en ocasiones a la propia variación diaria esperada. Algunos problemas adicionales de lectura aconsejaron una nueva calibración del lector; lo que supuso dos meses de ausencia de datos. Salvados estos problemas, las lecturas se mostraron generalmente consistentes, aunque persistieron algunas desviaciones ocasionales.

### **Sondas TDR tipo Tube-probe**

Con objeto de incrementar la densidad de medidas de humedad, se instalaron tubos en cada lisímetro (tubos Trime) que permitían introducir una sonda de humedad formada por cuatro grupos de sensores dispuestos de forma paralela al eje mayor y simétricos entre sí. Como precaución inicial, la instalación de los tubos-guía es un paso crucial ya que es necesario asegurar un íntimo contacto entre el tubo y las paredes del sondeo. La casa comercial suministra también los utensilios necesarios para la instalación de los tubos, pero es aconsejable realizarla mediante un sistema de hinca con la ayuda de un equipo de perforación tipo Cobra.

El lector necesario para realizar las medidas es el mismo que el utilizado para las sondas TDR fijas, pero debe tener distinta calibración por lo que no es posible utilizarlo para ambos sistemas. El precio del lector es muy elevado.

En cuanto a las medidas en estas sondas plantearon una serie de dudas. En primer lugar la longitud de los pins es de 20 cm, de forma que la lectura debe corresponder a la media de la determinada a lo largo de toda la longitud de los sensores. Se podía determinar la medida entonces de 20 en 20 cm y el problema estaba resuelto con sólo extender el valor medido a la longitud total de los sensores. Sin embargo, se realizaron diferentes medidas usando el mismo razonamiento,

determinando la humedad a lo largo del primer metro, primero en escalones de medida cada 20 cm. y después de forma consecutiva pero en escalones de medida de 10 cm. El resultado no fue nada esperanzador.

Se volvieron a realizar las medidas repitiendo las medidas tres veces y considerando el valor medio. Esto implicaba un tiempo de medida cercano a 30 minutos en cada lisímetro, siempre y cuando no hubiese desviaciones demasiado grandes en cuyo caso la repetición de las medidas pasaba a ser de hasta seis réplicas. Entre tanto, de forma esporádica se efectuaban lecturas de humedad nulas, en las que el lector quedaba en blanco, las cuales fueron repitiéndose de forma sistemática en algunas profundidades de varios lisímetros, sin explicación lógica ni causa alguna.

La lecturas fueron variando de forma sistemática con mayor frecuencia, hasta que de forma casual se constató que la orientación de los pins dentro del tubo también era motivo de variación de las lecturas, por lo que se decidió realizar las lecturas siempre en una misma orientación, fácil de repetir dada la orientación E-W de la disposición de los lisímetros.

Pese a este tipo de variaciones las lecturas siempre presentaban variaciones que hacía poco fiable las medidas para los objetivos que se perseguían en la investigación, que era determinar las variaciones diarias de la humedad en el suelo con el grado de precisión que se pretendía, ya que la mayor parte de las variaciones de humedad se producían en los 30 primeros centímetros, y en especial en los 20 más cercanos a la superficie, por lo que dichas técnicas se mostraban poco útiles para este objetivo.

En la figura 4, que representa las variaciones de los valores de humedad

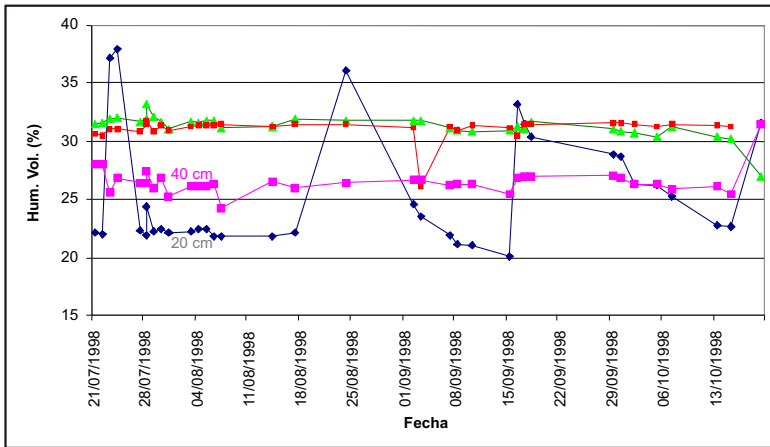


Figura 4. Variaciones de la humedad volumétrica medidas con sondas TDR

obtenidos en uno de los lisímetros para un corto periodo, se observa que a las profundidades de 60 y 80 cm, y en menor medida a 40 cm, los rangos de variación de los valores de humedad son muy estrechos, y sólo ocasionalmente se registran desviaciones superiores a un rango de 1 ó 2%; sin embargo, a la profundidad de 20 cm se registran variaciones muy notables de humedad con valores mínimos del orden del 22% y máximos en torno a 38%.

Por las razones antes expuestas, las medidas que se asignan a la profundidad de 20 cm responden realmente a la media de la humedad existente entre las profundidades de 10 y 30 cm, que es la longitud sobre la que la sonda efectúa las medidas. Esto significa que no existe información sobre las variaciones de humedad en los primeros 10 cm del suelo, en los que con frecuencia se alcanza la saturación (46-48%) y en los que se producen las máximas pérdidas por evapotranspiración. Para intentar resolver este problema, se midió la humedad colocando el sensor entre la superficie y 20 cm de profundidad, pero los frecuentes laboreos a que se sometía el suelo para

simular condiciones reales provocaban lecturas erráticas.

En la tabla I se muestran los valores obtenidos a diferentes profundidades, y la desviación estándar de las medidas realizadas. Se han significado aquellas cuya desviación sea superior a 0,3, cuya influencia puede ser poco relevante en profundidad pero crucial en los horizontes superiores.

En la tabla 2 se muestra un ejemplo de las diferencias que se obtienen para las medidas diarias de evapotranspiración entre las calculadas experimentalmente a partir de las variaciones de humedad y las obtenidas empíricamente mediante la fórmula de Penman. La interpretación más simple es que las discrepancias observadas se deban a la falta de precisión en los cálculos empíricos, pero la variabilidad en las lecturas de humedad introducen un serio factor de incertidumbre.

A la vista de estos datos, y una vez resueltos los problemas de instalación y calibración de las sondas, se puede decir que las variaciones de humedad de cierto rango, sobre todo en bajos estados de desecación,

**Tabla 1.** Datos de humedad volumétrica y desviaciones estándar de las lecturas (tres a cinco réplicas)

	20 cm	DS	40 cm	DS	60 cm	DS	80 cm	DS
06/03/1998	32,60	0,10	31,73	0,15	31,05	0,19	32,93	0,23
07/03/1998	30,33	0,23	31,90	0,00	31,97	0,56	32,82	0,30
08/03/1998	29,95	0,30	31,73	0,06	31,22	0,15	32,30	0,20
09/03/1998	29,93	0,06	31,53	0,15	31,38	0,24	32,17	0,06
10/03/1998	27,67	0,42	31,53	0,17	31,92	0,23	32,32	0,27
11/03/1998	27,53	0,21	31,13	0,06	30,87	0,06	32,15	0,23
12/03/1998	26,43	0,15	31,75	0,24	31,03	0,45	32,43	0,23
13/03/1998	25,67	0,23	31,36	0,44	31,96	0,19		
14/03/1998	24,53	0,32	31,47	0,12	31,03	0,12	32,53	0,06
16/03/1998	23,93	0,06	31,57	0,12	31,28	0,26	28,40	6,32
17/03/1998	24,43	0,15	31,40	0,10	31,33	0,06	31,74	0,22
18/03/1998	22,87	0,15	31,50	0,10	31,10	0,20	32,03	0,06
20/03/1998	23,00	0,10	31,33	0,15	31,07	0,15	32,30	0,17
23/03/1998	22,13	0,15	30,90	0,27	30,80	0,33	32,00	0,20
24/03/1998	22,08	0,36	30,83	0,30	32,40	0,25	32,10	0,00
20/07/1998	21,97	0,06	27,03	0,06	31,43	0,25	30,63	0,15
21/07/1998	22,10	0,26	28,00	0,17	31,50	0,17	30,67	0,06
22/07/1998	22,03	0,15	28,00	0,17	31,57	0,12	30,57	0,06
23/07/1998	37,20	0,10	25,57	0,29	31,97	0,15	31,07	0,21
24/07/1998	38,00	0,00	26,87	0,15	32,07	0,06	31,07	0,21
27/07/1998	22,37	0,25	26,40	0,20	31,67	0,12	30,80	0,20
28/07/1998	21,90	0,10	26,43	0,40	31,87	0,06	31,53	0,12
29/07/1998	22,20	0,17	26,03	0,12	32,10	0,26	30,83	0,06
30/07/1998	22,40	0,00	26,90	0,17	31,67	0,25	31,40	0,00
31/07/1998	22,07	0,15	25,27	0,12	31,03	0,15	30,94	0,62
03/08/1998	22,20	0,10	26,13	0,21	31,73	0,06	31,27	0,12
04/08/1998	22,40	0,20	26,13	0,06	31,63	0,21	31,33	0,06
05/08/1998	22,40	0,00	26,13	0,06	31,80	0,10	31,40	0,20
06/08/1998	21,80	0,10	26,27	0,12	31,77	0,06	31,40	0,20
07/08/1998	21,77	0,06	24,23	0,06	31,17	0,06	31,50	0,10

**Tabla 2.** Comparación de los valores diarios de evapotranspiración obtenidos mediante cálculos experimentales y empíricos

Fecha	Lluvia (mm)	Humedad 0-20 cm	Humedad 20-40 cm	Humedad 40-60 cm	Humedad 60-100 cm	Volumen de agua (l)	ET medida (mm)	ETo Penman (mm)
06/03/1998	0.0	32,60	31,73	31,05	32,93	322.5		2.59
07/03/1998	0.2	30,33	31,90	31,97	32,82	319.7	2.8	2.31
08/03/1998	0.0	29,95	31,73	31,22	32,30	315.0	4.7	2.17
09/03/1998	0.0	29,93	31,53	31,38	32,17	314.4	0.6	3.16
10/03/1998	0.0	27,67	31,53	31,92	32,32	311.5	2.8	2.91
11/03/1998	0.0	27,53	31,13	30,87	32,15	307.7	3.9	1.84
12/03/1998	0.0	26,43	31,75	31,03	32,43	308.1	-0.5	2.69

tienen buena precisión, pero las variaciones del orden del 1%, que suelen darse en los primeros centímetros del suelo, y que son debidas esencialmente a evapotranspiración, presentan mayores complicaciones de determinación. A este respecto, conviene apuntar que en experiencias realizadas en California (Snyder y Pruitt, 1992) se encontró buena coincidencia entre los datos diarios calculados mediante la fórmula de Penman y los determinados en lisímetros de pesada en los que las variaciones de humedad son determinadas con alta precisión.

También es destacable el hecho de que la anisotropía propia del suelo y las variaciones de textura en general y de densidad aparente en particular, proporcionan una gran dispersión de valores debido a que las calibraciones se realizan sobre muestras heterogéneas, de igual textura y altamente porosas y permeables, por lo que la presencia de suelos arcillosos o limosos, así como la salinidad del suelo y del agua puede introducir cambios sustanciales en el comportamiento dieléctrico del agua tanto estructural como de la retenida por cualquiera de las fuerzas actuantes en la zona no saturada que pueden justificar el comportamiento de este tipo de instrumental.

## CONCLUSIONES

La determinación de la variación de la humedad es un requisito crucial para la determinación del balance hídrico del suelo. Las medidas tradicionales basadas en la determinación de la humedad gravimétrica se muestran resolutivas pero requieren la aplicación de métodos destructivos.

Las medidas indirectas, entre ellas las basadas en la relación entre la humedad y la

constante dieléctrica del sistema agua-suelo-aire (TDR), presentan algunos problemas operacionales relacionados con la instalación de los dispositivos y con la calibración del sistema.

Particular dificultad se encuentra en la determinación de la humedad en los niveles más superficiales del suelo donde el rango de variación es más amplio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Allen, S.I. (1990). Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in northern Syria. *Agricultural Forestry Meteorology*. Vol. 49. pp 291-309.
- Brady, N. C. y Weil, R. R. (1996). *The nature and properties of soils*. Prentice Hall (Ed.) New Jersey. 740 p
- Campbell, J. E. (1990). Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Sci. Soc. of Amer. J.* 54: 332-341
- Daamen, C.C.; Simmonds, L.P.; Sivakumar, M.V.K. (1995). The impact of sparse millet crops on evaporation from soil in semiarid Niger. *Agric. Water Management*. Vol 27. pp 225-242.
- Daamen, C.C.; Simmonds, L.P.; Wallace, J.S.; Laryea, K.B.; Sivakumar, M.V.K. (1993). Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agric. Forestry Meteorology*. Vol 65. pp 159-173.
- Davis, J. L. y Annan A. P. (1977). Electromagnetic detection of soil Moisture: Progress Report I. *Canadian J. of Remote Sensing* 3: 76-86

- Davis, J. L. y Chudobiak, W. J. (1975). In situ meter for a measuring relative permittivity of soils. Geol. Survey of Canada Paper 75-1: 75-79
- Fabregat-Santiago F., S. Ferriols, N., Gracia-Belmonte, G., Bisquert, J. y Morell, I. (1999). Estudio de los diferentes estados energéticos del agua del suelo en función de los fenómenos de relajación dieléctrica. En: R. Muñoz-Carpena, A. Ritter y C. Tascón (Eds.). Estudios de la Zona no Saturada. ICIA: Tenerife pp 39-44
- Gardner, C. M. K., Bell, J. P., Cooper, J. D., Dean, T. J. y Hodnett, M. G. (1991). Soil Water Content. In: C. E. Mullins and K. A. Smith (Eds). Soil Analysis Physical Methods. Marcel Dekker. New York pp 1-73
- Gonzalo, J.M.; Antigüedad, I.; Luengo C. Sánchez-Pérez J.M. (1995). Estudio de la zona no saturada en una parcela experimental en Arkaute (Araba). Problemática y resultados preliminares. En: Avances en la investigación en la zona no saturada. Ed. Serv. Central de Publ. del Gobierno Vasco. pp 409-420.
- Haverkamp, R. Vauclin, M. y Vachaud, G. (1984). Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: I local standpoint. Soil Science 137 (2): 78-90
- Issar, A.; Passchier, R. (1990). Regional Hydrogeological concepts. In: Groundwater recharge, A guide to understanding and estimating natural recharge. Lerner, D.N., Issar, A.S., Simmers, I. (Eds.). I.A.H. pp 21-98.
- Jackson, N.A.; Wallace, J.S. (1999). Soil evaporation measurements in an agroforestry system in Kenya. Agricultural and forest Meteorology. Vol 94, pp 203-215.
- Kirkschether, E. J. (1960). Ground constant measurement using a section of balanced two wire transmission line. Institution of Radio Engineers Translations on Antenas and Propagation AP. 8: 307-312
- Ledieu J. De Rider, P., De Clerk, P. y Dautrebande, S. (1986). A method of measuring soil water by Time Domain Reflectometry. J. Hydrol. 88: 319-328
- Ledieu, J. y Dautrebande, S. (1987). Measure de l'humidité des soils par reflectométrie temporelle (TDR). Bull. Groupe Francais Humidité Neutron. 22: 13-30
- Lerner, D. (1990). Precipitation recharge. In: Groundwater recharge, A guide to understanding and estimating natural recharge. Lerner, D.N., Issar, A.S., Simmers, I. (Eds.). I.A.H. pp 111-148.
- Leyton, L. (1978). Some thermodynamic concepts of water movement. In: Fluid Behavior in Biological Systems. Oxford Univ. Press., New York 235 p
- López-Rodríguez, J. J. (1997). Medida de la recarga por lluvia: Métodos instrumentales en parcelas y trazadores. En: Custodio Llamas y Samper, (Eds.). La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación Hidrológica. pp 111-124
- Martínez-Fernández, J., J. M. Sánchez-Pérez y Cammeraat, L. H. (1994). La medida de la humedad en el suelo mediante el método TDR (Time Domain Reflectometry). En: I. Morell (Ed.). Investigación en zona no saturada. Pbl. Universitat Jaume I. pp. 17-27
- Meissner, R.; Seeger, J.; Rupp, H.; Schonert, P. (1999). Estimating the effects of set-aside on water quality: scaling up of the lysimeter studies. Land Degradation & Development, Vol. 10, pp 13-20.

- Morell, I. (1995). Algunas consideraciones sobre la zona no saturada: problemática de estudio, tendencias y algunos ejemplos. En: Avances en la investigación en la zona no saturada.. Ed. Serv. Central de Publ. del Gobierno Vasco. pp 1-32.
- Nulsen, R.A., Thurtell, G.W. y Steveson, K. R. (1977). Response of leaf water potential to pressure changes at the root surface of corn plants. *Agron. J.* 69:951-954
- RUTH, B. (1999). A capacitance sensor with planar sensitivity for monitoring soil water content. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 63 (1): 48-54
- Samper, J. (1997). Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balance de agua: utilización, calibración y errores. En: Custodio et al. (Eds.) .1997. pp 41-82.
- Snyder, R.; Pruitt, W.O. (1992). Evapotranspiration data management in California. *Irrigation and drainage. Session Proceedings/water forum'92.* Baltimore. August, 1992. pp 128-133.
- Starr, C. G., Lowery, B, Cooley, E. T. y Hart (1999a). Development of a resonant lebgth technique fro soil water cotent measurement. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 63 (2): 278-285
- Starr, C. G., Lowery, B, Cooley, E. T. y Hart (1999b). Soil water content determination using network analyzer reflectometry methods. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 63(2): 286-289
- Topp, C. G., Davis, J. L. y Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Res. Res.* 16: 574-582
- Tuñón, J., Morell, I. y Ferriols, N. S. (1999). Observaciones prácticas sobre el cálculo del balance de agua. En: R. Muñoz-Carpena, Ritter y Tascón (Eds.). *Estudios de la Zona no Saturada.* ICIA. Tenerife. pp: 45-51
- Tuñón, J. (2000). Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. Tesis Doctoral. Universitat Jaume I.
- Zegelin, S. J., White, I. y Jeckins, D. R. (1989). Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Res. Res.* 25: 2367-2376