

UTILIDAD DE LA TÉCNICA TDR PARA LA MEDIDA DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN CAMPOS DE GOLF

J. C. TAPIAS PANTEBRE*, M. SALGOT DE MARÇAY* y A. CASAS PONSATI**

* Laboratorio de Edafología. Departamento de Productos Naturales Biología Vegetal y Edafología. Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona. Avda. Joan XXIII s/n. 08028 Barcelona

** Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Facultad de Geología, Universidad de Barcelona. Martí i Franquès s/n. 08028 Barcelona

Abstract. Golf courses are often blamed to consume water in excess for the irrigation of the grass cover. To amend this image golf course managers should reduce water consumption using all the available technical improvements. The best way to establish soil water needs is by controlling systematically the soil moisture variations at different zones of the course. Among the methods available, the time domain reflectometry (TDR) technique is that offers the best perspectives because the relationship existing between the dielectric permittivity and the soil moisture content. In this paper we present the results obtained from the calibration of the TDR method to sands having a texture and composition as recommended by the USGA, as well as the application of this technique to measure both spatial and temporal variability of soil water content at different zones in two golf courses and their incidence in scheduling the irrigation needs. The results obtained show that TDR method provides accurate and fast measurements with the possibility to get automate and continuous digital readings as required in golf courses management.

Key words: Time domain reflectometry (TDR), soil moisture, volumetric humidity, dielectric permittivity, soil-water relationship, golf courses.

Resumen. Los campos de golf son a menudo criticados por un consumo excesivo de agua para regar el césped. Para corregir esta imagen, los gestores de los campos de golf deben procurar reducir al máximo este consumo utilizando todos los medios técnicos a su alcance. La mejor forma de fijar las necesidades mínimas de agua en el suelo, manteniendo una cubierta vegetal adecuada, es mediante el control sistemático de las variaciones de humedad de las distintas zonas del campo. En la actualidad, entre los métodos disponibles, la técnica de la reflectometría en el dominio de tiempos (TDR) es la que ofrece mejores perspectivas debido a la relación existente entre la permitividad dieléctrica de los suelos y su contenido de humedad. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la calibración del método TDR para arenas de textura y composición igual a los sustratos utilizados para la construcción de los campos de golf, así como de la aplicación de la técnica en la medida de la variabilidad espacial y temporal del contenido volumétrico de agua del suelo de distintas zonas en dos campos de golf.

Palabras clave: Reflectometría en el dominio temporal (TDR), humedad del suelo, humedad volumétrica, permitividad dieléctrica del suelo, relación suelo-agua, campos de golf.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de optimizar el riego de los campos de golf se justifica por su gran proliferación durante los últimos años. En 1990 existían en Cataluña sólo 16 campos de golf, en 1992 eran 21 los que estaban en funcionamiento y en 1993 se había llegado a los 25. Actualmente hay 38, cuatro más en construcción y varios en proyecto.

La cantidad de agua que debe aportarse por medio de riego a un campo de golf se realiza a menudo sobre la base de la experiencia del cuidador o greenkeeper. No es razonable, que un aspecto tan importante, no sólo desde el punto de vista ambiental sino también económico, pueda gestionarse mediante una simple valoración empírica.

Entre los métodos no destructivos que suelen emplearse para determinar la humedad del suelo (sonda de neutrones, resistividad eléctrica, bloques de yeso, etc.), la reflectometría en el dominio temporal (TDR) está siendo considerada actualmente como la más adecuada. El método, aunque desarrollado inicialmente para localizar roturas en cables conductores, permite calcular de forma sencilla la permitividad dieléctrica.

La permitividad dieléctrica puede definirse como la polarización eléctrica adquirida por una substancia como consecuencia de la inducción generada por un campo electromagnético. La permitividad dieléctrica se expresa en faradios/m, pero generalmente se utiliza la permitividad dieléctrica relativa respecto a la del vacío, también denominada constante dieléctrica, que es adimensional.

La permitividad dieléctrica relativa de un suelo compuesto por tres componentes (aire, agua y partículas minerales) es igual a:

$$k = k_w^\alpha \theta + k_m^\alpha (1-n) + k_a^\alpha (n-\theta)$$

donde,

k_w es la permitividad dieléctrica relativa del agua

k_a es la permitividad dieléctrica del aire

k_m es la permitividad dieléctrica de las partículas minerales

n es la porosidad del suelo

θ es el contenido volumétrico en agua del suelo

α es un factor estructural, cuyo valor para suelos isótropos es 0,5

La permitividad dieléctrica relativa del agua es aproximadamente igual a 80, la de las partículas minerales constituyentes de suelo oscila entre 3 y 5, y la del aire es igual a 1. Por tanto, dado el elevado contraste entre k_w y los demás componentes del suelo, el contenido en agua es el factor dominante del valor de esta propiedad en los suelos.

La TDR mide el tiempo de ida y vuelta de un impulso electromagnético de alta frecuencia (del orden del GHz). La velocidad de propagación del impulso es función de la permitividad dieléctrica del medio, que a su vez está muy condicionada por el contenido en agua del mismo. De ahí que el método pueda aplicarse para la medida indirecta del contenido de humedad del suelo.

Cuando el impulso electromagnético encuentra un cambio de impedancia en la línea sufre una reflexión que es captada por el receptor. Para caracterizar una sonda es necesario conocer la longitud y el diámetro de las varillas, además de la separación entre ellas. A partir de estos parámetros se puede determinar la impedancia de la sonda (Krauss, 1984) mediante la ecuación siguiente:

$$Z_o = 60 \ln \left[\frac{2s}{d} \right]$$

donde,

Z_o es la impedancia de la sonda

s es la distancia máxima entre las varillas

d es el diámetro de la varilla

Las sondas pueden ser de varios tipos: de dos varillas, de tres o más varillas o bien coaxiales. Teóricamente son preferibles las sondas coaxiales debido a la distribución más homogénea de las líneas equipotenciales; sin

embargo, por la mayor facilidad de implantación en el suelo, para las medidas de campo se utilizan preferentemente las sondas constituidas por dos o más varillas paralelas. Zegelin y White (1989) han demostrado la mejor respuesta de las sondas provistas de 3 ó más varillas.

Numéricamente, para los materiales no magnéticos, la permitividad dieléctrica relativa es equivalente al cuadrado del cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (c_o) y la velocidad de una onda de retorno (v):

$$k = \left(\frac{c_o}{v} \right)^2$$

Esta relación de velocidades es igual al cociente entre el tiempo de retorno de la onda electromagnética y la longitud de las varillas, por tanto, la permitividad dieléctrica relativa puede medirse de forma relativamente sim-

ple. La figura 1 muestra la clara diferencia entre los tiempos de llegada para suelos con contenido de humedad del 20%, 25% y 30%.

El tiempo de tránsito de ida y vuelta del impulso electromagnético viene dado por:

$$t = \frac{2l}{c_o} \sqrt{k}$$

donde:

- t es el tiempo doble de reflexión
- l es la longitud de la varilla
- k es la permitividad dieléctrica relativa del medio
- c_o es la velocidad de la luz

Para calcular la humedad volumétrica a partir de la k medida con la técnica de la TDR pueden utilizarse dos tipos de relaciones matemáticas, las empíricas y las de base física:

Relaciones empíricas	Relaciones basadas en modelos físicos
Topp <i>et al.</i> (1980)	Dobson <i>et al.</i> (1985)
Nadler (1991)	Roth <i>et al.</i> (1990)
Jakobsen y Schjonning (1993)	Whalley (1993)
Heimovaara (1993)	Van Loon <i>et al.</i> (1991)
Timlin y Pachepsky (1996)	

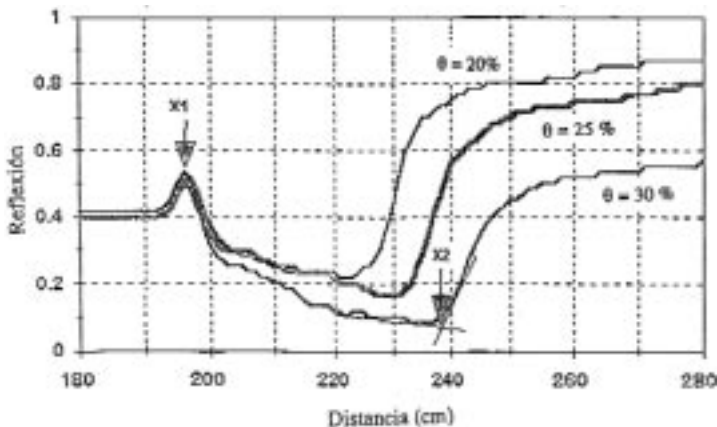


FIGURA 1: Curvas de TDR medidas en suelos con distinto contenido volumétrico de agua. Nótese el retardo en la llegada de la señal desde x_1 a x_2 , a medida que aumenta la humedad del suelo desde 20% a 25% y 30%.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los ensayos para determinar la utilidad de la técnica TDR para medir la humedad en el suelo se han llevado a cabo en dos campos de golf: El Real Club de Golf de El Prat, situado en el término municipal de El Prat del Llobregat, a 15 km al SW de Barcelona y junto al aeropuerto de esta ciudad y Club de Golf de Sant Cugat, situado en el término municipal de Sant Cugat del Vallés, 20 km al norte de Barcelona.

El instrumento utilizado ha sido un TRIME[®]-System fabricado por Imko GmbH, dotado de tres sondas diferentes: una de medida de la permitividad dieléctrica relativa y dos calibradas para medir directamente la humedad volumétrica en tanto por ciento. El equipo opera a una frecuencia de 2 GHz y la resolución en la medida del tiempo de tránsito de la onda electromagnética es de 3 picosegundos. Se ha dispuesto también del programa SMCAL de calibración y del TDR-SCAN de visualización gráfica de la señal de la onda en el monitor de un ordenador portátil.

Como han puesto de manifiesto Hook y Livingston (1995), la técnica de la TDR, como cualquier otra técnica instrumental de medida, está sujeta a diferentes fuentes de errores e interferencias. En nuestro caso, a pesar de que el equipo disponía de una sonda de medida que proporcionaba directamente la humedad volumétrica del suelo a partir del método de calibración de Topp *et al.* (1980),

hemos preferido utilizar una sonda que midiese la variable primaria, es decir la permitividad dieléctrica relativa del suelo.

Para determinar la humedad volumétrica se efectuó una calibración propia con diez muestras de arena de granulometría y composición análoga a la que recomienda la USGA (Powell, 1993) para la construcción de los *greens* de los campos de golf. Para ello se tomaron porciones de arena seca de 2 litros y se humedecieron en diferentes proporciones, con el fin que tuviesen una humedad volumétrica variable en un amplio espectro. El agua se añadió con jeringuilla, procurando que la distribución de agua en el substrato fuese homogénea. Posteriormente, se midió la permitividad dieléctrica de cada una de las muestras con la técnica de la TDR, en el mismo recipiente de 2 litros, ya que, según Topp y Davis (1985) el volumen involucrado por la medida de humedad es el correspondiente a un cilindro de altura igual a la longitud de las varillas de la sonda y cuyo diámetro es 1,4 veces la distancia entre ellas. Por tanto, en el caso de la sonda P3 del instrumento Trime utilizado en este estudio, el volumen de muestra medido con la sonda es de 616 cm³, dado que la longitud de las varillas es de 16 cm y su distancia de 5 cm.

A partir del ajuste por mínimos cuadrados se ha obtenido una función de calibración cúbica muy similar a la de Topp *et al.* (1980), cuya expresión es la siguiente:

$$\theta = -4,2 \times 10^{-2} + 3,15 \times 10^{-2} k - 7,94 \times 10^{-4} k^2 + 9,7 \times 10^{-6} k^3$$

Los valores experimentales de la calibración se han representado en la figura 2, conjuntamente con las principales funciones de calibración propuestas en la bibliografía. Como puede observarse, para valores de permitividad inferiores a 15 todas las funciones siguen una traza análoga, pero a partir de este valor se produce una amplia dispersión.

Para efectuar una comparación entre las diferentes funciones de calibración preexistentes, y determinar cual de ellas se ajustaba mejor a nuestras determinaciones experimentales, se llevó a cabo el tratamiento estadístico multivariable conocido como análisis de agrupación (cluster analysis). El resultado de este análisis estadístico se muestra gráficamente en

el dendrograma de la figura 3, donde puede apreciarse que las menores distancias euclídeas con nuestros datos experimentales corresponden a las funciones de van Loon *et al.*

(1991) y Topp *et al.* (1980), mientras que la expresión que menos se ajusta a nuestros datos experimentales es la de Nadler *et al.* (1991).

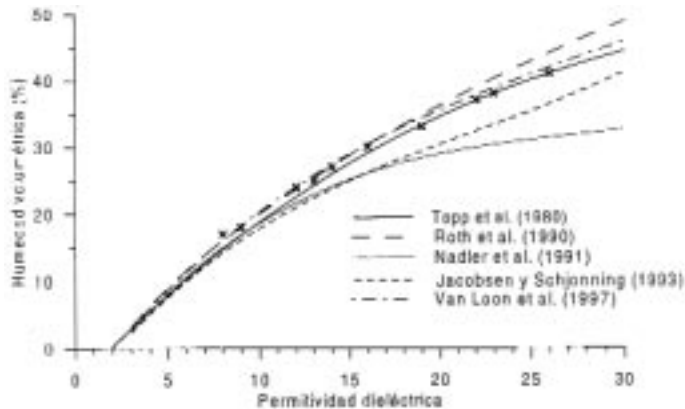


FIGURA 2: Representación gráfica de la función calibración obtenida en este estudio a partir de los valores experimentales en los substratos de los campos de golf, identificados por una (x). Se incluyen también las principales curvas de calibración calculadas por otros autores en distintos tipos de suelos.

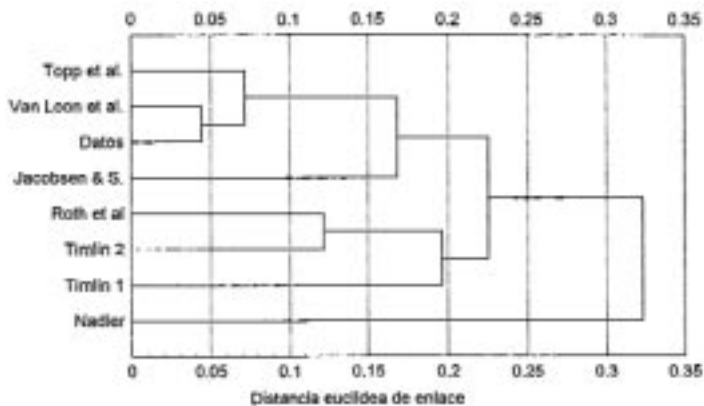


FIGURA 3: Examen de la similitud entre las diferentes funciones de calibración deducida a partir del *Cluster Analysis*. Nótese que las menores distancias euclídeas de los datos experimentales de los campos de golf considerados corresponden a las funciones de calibración propuestas por Topp *et al.* (1980) y Van Loon *et al.* (1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Previamente a la toma de datos en campo se llevó a cabo un análisis para averiguar la sensibilidad de la técnica de la TDR frente a las variaciones de constituyentes distintos al contenido en agua, como la textura y compo-

sición de las partículas sólidas del suelo.

En la fórmula de Roth *et al.* (1990), la humedad volumétrica se calcula según la expresión:

$$\theta = \frac{k^\alpha - n - (1 - n) k_s^\alpha}{k_w^\alpha - 1}$$

donde,

k es la permitividad dieléctrica relativa aparente del suelo

k_w es la permitividad dieléctrica relativa del agua

k_s es la permitividad eléctrica relativa de los componentes sólidos del suelo

n es la porosidad del suelo

α es el factor estructural, igual a 0,5 para suelos isótropos

La influencia de la temperatura en la permitividad dieléctrica relativa del agua se ha estudiado a partir de la fórmula de Weast (1986):

$$k_w = 78,54 \left[1 - 4,579 \times 10^{-3}(t - 25) - 1,19 \times 10^{-5}(t - 25)^2 - 2,8 \times 10^{-8}(t - 25)^3 \right]$$

donde, t es la temperatura expresada en °C

Por tanto, la permitividad dieléctrica aparente del agua disminuye de 82.2 a 78.5 cuando la temperatura pasa de 15°C a 25°C y en consecuencia influye en la determinación de la humedad volumétrica del suelo.

En la fórmula de Jacobsen y Schjonning (1993) las variables independientes, aparte de la permitividad dieléctrica relativa, son la densidad aparente y los contenidos en arcilla y materia orgánica.

$$\theta = -3,41 \times 10^{-2} + 3,45 \times 10^{-2} k - 11,4 \times 10^{-4} k^2 + 17,1 \times 10^{-6} k^3 - 3,7 \times 10^{-2} \rho_a + 7,36 \times 10^{-4} \% \text{ arcilla} + 47,7 \times 10^{-4} \% \text{ mat org}$$

donde,

k es la permitividad dieléctrica relativa aparente del suelo

ρ_a es la densidad aparente del suelo

$\% \text{ arcilla}$ es el porcentaje de arcilla del suelo

$\% \text{ mat org}$ es el porcentaje en materia orgánica del suelo

En los campos de golf la variación de estos parámetros es relativamente pequeña (Tapias, 1997): la densidad aparente del suelo oscila entre 1,1 y 1,6 g cm⁻³; el contenido en arcilla raramente llega al 5%; el contenido en materia orgánica alcanza como máximo un 8%.

El análisis de sensibilidad de estos parámetros ha demostrado que influyen muy poco en el resultado final cuando las características del suelo son relativamente homogéneas. Así, por ejemplo, si la permitividad dieléctrica relativa de un suelo es igual a 12, el contenido de humedad del suelo disminuye del 25% al 23,1% cuando la densidad aparente aumenta de 1 a 1,5 g/cm³. En cambio, como puede apre-

ciarse en la figura 4, el contenido de humedad varía sólo de 24,7% a 25% cuando el contenido de arcilla aumenta desde un 1% a un 5%.

Variaciones espaciales

En los campos de golf es muy importante poder determinar la variación espacial de la humedad volumétrica del suelo, para así poder diseñar un buen sistema de riego que distribuya el agua allí donde sea necesaria. La técnica de la TDR es ideal debido a la rapidez de ejecución de las medidas, su elevada sensibilidad y su carácter no destructivo. Estudios de este tipo han sido realizados previamente por Hokett *et al.* (1992) a nivel de laboratorio y por Rajkai y Rydén (1992) en parcelas experimentales.

Para determinar la distribución lateral de la humedad del suelo se midieron perfiles longitudinales de unos 20 metros de longitud y un espaciado entre puntos de medida de 2,5 metros, siendo la distancia entre perfiles de 2,5 metros. Estos ensayos se realizaron en ambos

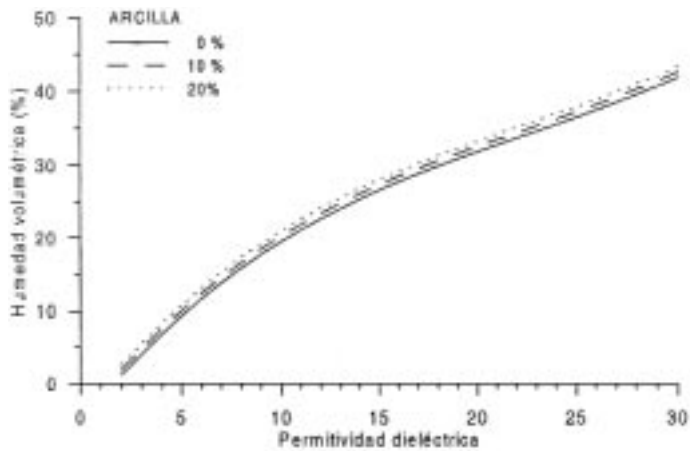


FIGURA 4: Influencia del contenido en arcilla sobre la determinación de la humedad volumétrica a partir de la permitividad dieléctrica relativa según la expresión de Jacobsen y Schjonning (1983).

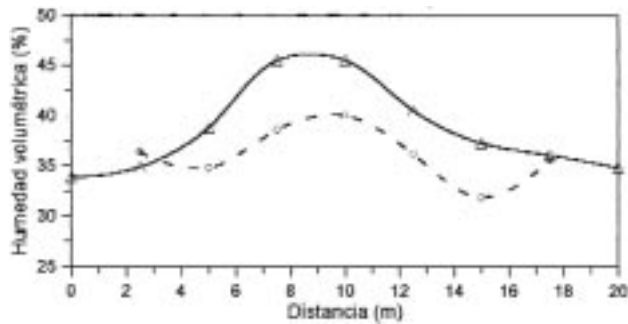


FIGURA 5: Variación espacial de la humedad volumétrica en dos perfiles del *green* Largo del campo de golf de Sant Cugat. Los máximos contenidos de humedad corresponden a la zona central del *green*.

campos de golf, sobre todo en los greens, que son las zonas más sensibles y cuidadas.

En la figura 5 se muestran los resultados de dos perfiles paralelos medidos transversalmente, el mismo día, en el *green* Largo del campo de golf de Sant Cugat. Se aprecia que en ambos perfiles se produjo un aumento de la humedad volumétrica en la zona central, donde prácticamente se alcanza el nivel de saturación. Las zonas más húmedas de los perfiles correspondían a muy ligeras depresiones en la topografía de la superficie del *green*.

Para tener una mejor representación de la distribución de humedad del suelo en todo el *green* se completaron las observaciones hasta disponer de una red regular de 64 medidas,

distribuidas sobre toda la superficie según una malla de 2,5 metros de espaciado. Las determinaciones se efectuaron sobre los mismos puntos en tres momentos diferentes del día, a las 10 de la mañana, a las 12 del mediodía y a las 4 de la tarde. Con el conjunto de las medidas se trazaron los tres mapas seriales de isóneas de humedad representados en la figura 6, donde se aprecia la irregular distribución de valores, aunque de forma general varían desde mínimos inferiores a un 20% en las zonas laterales del *green* a casi el 45% en la zona central. Estos resultados indican la importancia del drenaje, ya sea superficial o hipodérmico en la distribución del agua del suelo en los campos de golf.

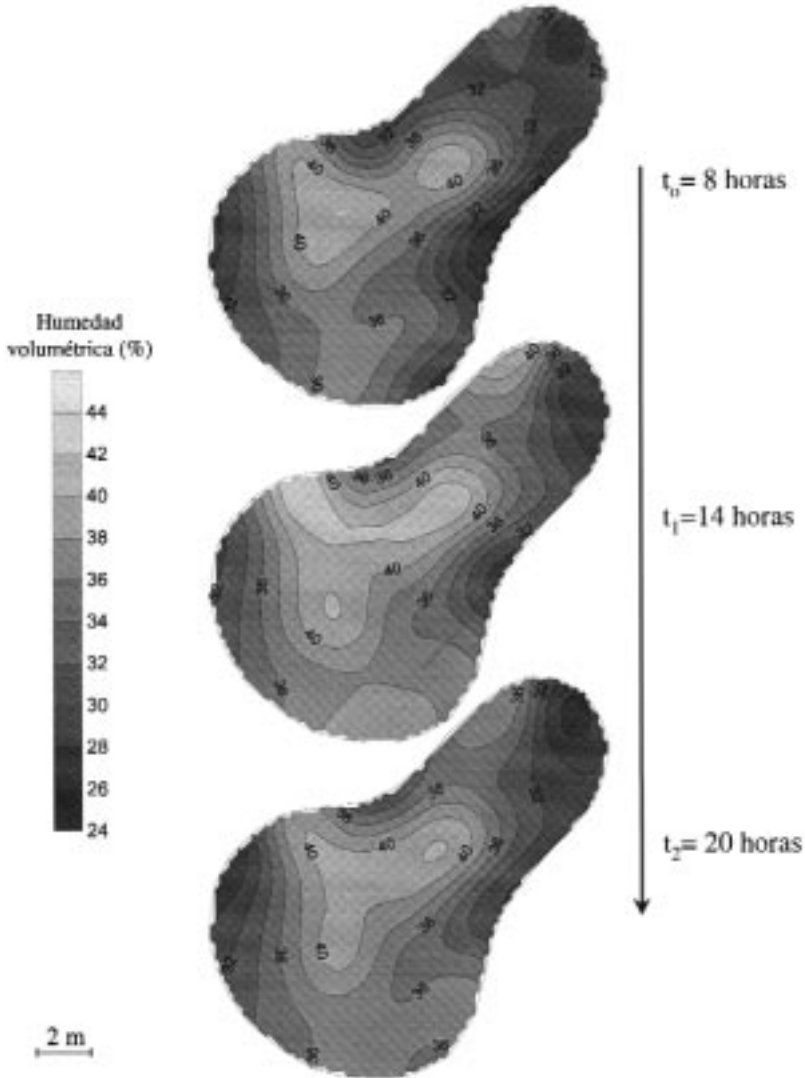


FIGURA 6: Cartografía de la variación del contenido volumétrico de agua en el *green* Largo del campo de golf de Sant Cugat en tres momentos diferentes del día.

Variaciones temporales

Aparte de las variaciones espaciales de humedad volumétrica que hemos discutido en el apartado anterior, durante las diferentes observaciones efectuadas se puso de manifiesto que la humedad del suelo variaba a lo largo del tiempo, pero no de igual forma en todos los puntos.

Generalmente, después del riego efectuado a primera hora de la mañana, el contenido de humedad tendía a disminuir con el tiempo a causa de las pérdidas por evapotranspiración y drenaje, pero en algunos casos las medidas de TDR detectaron un apreciable aumento, sin razón aparente. Para interpretar este efecto se realizaron medidas

de evolución temporal a lo largo del día en los períodos secos del año, que son los que requieren una aportación de riego prácticamente diaria.

Un ejemplo de estas determinaciones es el obtenido en el green 17, del recorrido verde, del campo de golf de El Prat, en el que se controlaron las variaciones temporales en quince puntos de medida distribuidos por toda la superficie del green durante todo un día. Las mediciones se realizaron desde las diez de la mañana hasta las nueve de la noche, en intervalos de dos horas y media.

Las variaciones en cuatro de estos puntos se muestran en la figura 7, donde puede verse

que hay dos tipos de tendencias en la evolución del contenido de humedad, según la topografía del green:

- En las zonas más altas del green, la humedad del suelo disminuye progresivamente a lo largo del tiempo.
- En las zonas bajas e intermedias, hay un ligero aumento como consecuencia del drenaje hipodérmico desde las zonas altas, para posteriormente disminuir paulatinamente.

Efectos similares de influencia de la topografía en la distribución de la humedad del suelo han sido descritos por Burt y Butcher (1985).

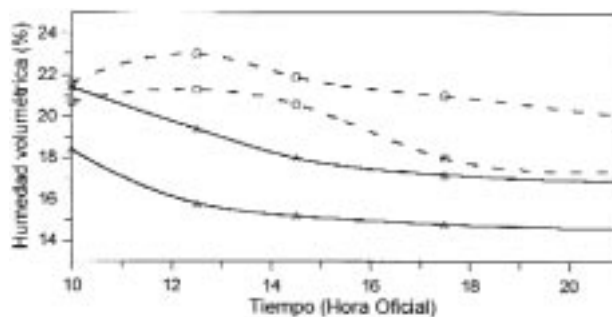


FIGURA 7: Evolución temporal del contenido de humedad en varios puntos del green 17 (recorrido verde) del campo de golf de El Prat, después de haberse efectuado el riego a las 7 de la mañana. Los valores de los puntos situados en la parte elevada se representan con el símbolo (Δ), mientras que los situados en las zonas bajas están referenciados con un círculo (O).

CONCLUSIONES

La técnica de la reflectometría en el dominio de tiempos (TDR) se ha mostrado como un método muy eficaz para la determinación de la humedad volumétrica de los campos de golf debido a su sencillez, rapidez y elevada precisión. Al mismo tiempo, cuenta con la posibilidad de automatización del registro para obtener lecturas continuas en forma digital.

Por otra parte, esta técnica ha mostrado una gran versatilidad de aplicaciones, tanto para medir la variabilidad espacial y tempo-

ral de los substratos de los campos de golf.

Finalmente, es un método que no plantea problemas ambientales como el peligro de exposición a las radiaciones de la sonda de neutrones, permite instalar un elevado número de sondas permanentes a bajo coste y no requiere complejas calibraciones como sucede con otros métodos.

REFERENCIAS

- Burt T.P. y Butcher D.P. (1985): Topography controls on soil moisture distributions. *J. Soil Sci.*, 36, 469-486.

- Hokett S.L., Chapman J.B. y Cloud S.D. (1992): Time domain reflectometry response to lateral soil water content heterogeneities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 313-316.
- Hook W.R. y Livingston N.J. (1995): Errors in converting Time Domain Reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 35-41.
- Jacobsen O.H. y Schjonning P. (1993): Field evaluation of time domain reflectometry for soil water measurements. *J. Hydrology* 151, 159-172
- Krauss J.D. (1984): Electromagnetics. 3ª edición. Mc Graw-Hill, 775 págs.
- Nadler A., Dasberg S. y Lapid I. (1991) Time Domain Reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 938-943.
- Powell T. (1993): Investigating the options in the new USGA green construction recommendations. USGA Green Section Record, November December, pp: 7-10.
- Rajkai K. y Rydén B.E. (1992): Measuring areal soil moisture distribution with the TDR method. *Geoderma* 52, 73-85
- Roth K., Schulin R., Flühler H. y Attinger W. (1990): Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research* 26, 2267-2273.
- Tapias J.C. (1997): *Estrategias de gestión hídrica en los campos de golf*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. 529 págs.
- Topp G.G., Davis J.L. y Annan A.P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16, 574-582.
- Topp G.G. y Davis J.L. (1985) Measurement of soil water content using Time Domain Reflectometry (TDR). A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 19-24.
- Van Loon K.W.P., Perfect E., Groenevelt P.H. y Kay B.D. (1991) Application of dispersion theory to time domain reflectometry in soils. *Transport in porous media* 6, 391-406.
- Weast R.C. (ed.) (1986) *Handbook of Physics and Chemistry*. 67th edition. CRC Press, Boca Raton.
- Zegelin S.J. y White I. (1989): Improved field techniques for soil water content and electrical conductivity measurement using Time Domain Reflectometry. *Water Resources Research*, 25, 2367-2376.