

## ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN EL CULTIVO DEL MAÍZ, MEDIANTE EL SEGUIMIENTO DE HUMEDAD EN LA ZONA RADICULAR CON SONDAS DE CAPACITANCIA (FDR)

R. Mestas Valero<sup>1\*</sup>, M. I. García<sup>2</sup>, M. D. Báez<sup>2</sup> y A. Paz González<sup>1</sup>

1: Instituto de Xeología Isidro Parga Pondal  
Facultad de Ciencias  
Universidad de la Coruña  
Campus A Zapateira. s/n CP 15071, La Coruña,  
e-mail: rmestas@udc.es, web: <http://www.udc.es>

2: Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (CIAM).  
Carretera C-542 de Betanzos a Mesón do Vento, km 7,5. Abegondo, 15318 A Coruña.  
e-mail: dolores.baez.bernal@xunta.es,

**Palabras clave:** Humedad en el suelo, Maíz, FDR, Evapotranspiración

**RESUMEN.** *La humedad del suelo ( $\theta$ ), es un parámetro esencial que permite evaluar el consumo y la disponibilidad de agua para los cultivos. Una alternativa frente a los métodos tradicionales, es el uso de sensores de capacitancia (FDR) para cuantificar la dinámica de  $\theta$  en la zona no saturada del suelo. El objetivo de este trabajo, fue estimar el consumo de agua en un cultivo de maíz (*Zea mays* L), basado en el seguimiento "in situ" del contenido de  $\theta$  mediante el uso de FDR. Fue estimada la evapotranspiración potencial del cultivo del maíz ( $ET_c$ ), según la ecuación de la FAO a partir de variables climáticas, la fenología del cultivo se evaluó cada semana. La  $ET_c$  fue de 275,58 mm sobrestimando al cálculo estimado con FDR ( $ET_r$ ) que fue de 197,51 mm. Concluyéndose, que el uso de sensores FDR como herramienta para estimar el consumo de agua por los cultivos, resulta viable y presenta ventajas frente a otros métodos.*

**ABSTRACT.** *The soil moisture ( $\theta$ ), is an essential parameter used for assessing the availability and consumption of the water by the crops. An interesting alternative compared to traditional methods is the use of capacitance sensors (FDR) to quantify the dynamics of  $\theta$  at the unsaturated zone of the soil. The objective of this work was to estimate the water consumption in a maize crop (*Zea mays* L), based on "in situ" monitoring of the  $\theta$  content using FDR. Was estimated crop potential evapotranspiration ( $ET_c$ ), according to the FAO equation using climatic variables and the phenology of the crop was evaluated every week. The  $ET_c$  was 275.58 mm overstating the estimate whit FDR ( $ET_r$ ), which was 197.51 mm. The main conclusion was that the use of FDR as a sensor to estimate the water consumption by crops is feasible and has advantages compared to other methods.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El contenido de humedad en la zona no saturada del suelo, constituye una de las variables más importantes en los procesos de intercambio en la interfase suelo-planta-atmósfera, por lo que el seguimiento de la variación del contenido hídrico en el suelo es relevante, principalmente para estudios de infiltración, drenaje, conductividad hidráulica y riego, entre otros. Además, es una variable indispensable para la comprensión de muchos procesos hidrológicos que están involucrados en una gran variedad de procesos naturales (geomorfológicos, climáticos, ecológicos, etc.) que actúan en diferentes escalas de espacio y tiempo (Entin et al. 2000).

Mediante el seguimiento de los cambios de humedad en el perfil del suelo, es posible también, calcular balances hídricos, por consiguiente permite estimar las pérdidas de agua en el suelo debido a la transpiración de

los vegetales y la evaporación desde la superficie.

Considerando la importancia de la humedad en el suelo, varias técnicas o métodos fueron propuestos para su determinación, pudiendo ser determinada directa o indirectamente. Entre otros, se utiliza el método gravimétrico, la tensiometría, la sonda de neutrones, la reflectometría en el dominio temporal (TDR) o de la frecuencia (FDR). (Frequency Domain Reflectometry).

Desafortunadamente, cada uno de estos tiene algunas desventajas, unos más que otros. Por ejemplo, el método gravimétrico no puede ser automatizado, es destructivo y su ejecución requiere mucho tiempo. (Brandelik y Hubner, 1997; Alva et al., 1999).

Una alternativa interesante para establecer el perfil de humedad en un suelo, es la utilización de métodos basados en el uso de sensores de capacitancia. Son métodos muy poco destructivos, no contaminantes, de fácil manejo que proporcionan medidas *in situ* e instantáneas del contenido hídrico en el perfil del suelo, pudiéndose obtener balances hídricos.

Tanto para cultivos a cielo abierto como para cultivos protegidos, la medición y control del contenido hídrico y de nutrientes en el suelo son requerimientos necesarios para optimizar la gestión y el manejo del recurso hídrico. Los requerimientos de agua en los cultivos varían, temporal y espacialmente, en función del clima, del manejo, de la fase y de la variedad del cultivo, por lo que su cálculo debe ser local (Doorenbos y Pruitt, 1977). Asegurar una humedad adecuada en la zona de raíces durante las etapas críticas es esencial para obtener rendimientos óptimos. Las etapas más críticas del maíz, desde el punto de vista hídrico, son durante la floración y el jiloteo. El maíz es un cultivo más sensible al estrés hídrico que otras gramíneas como trigo o sorgo.

Los objetivos del presente trabajo fueron, calcular el consumo de agua en el ciclo de un cultivo de maíz y estimar la variación del contenido de agua en el perfil del suelo mediante un balance hídrico con el uso de una sonda de capacitancia portátil de lectura manual.

## 2. MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en un cultivo de maíz durante la campaña agrícola de 2008 (ente los meses de julio a octubre), en el Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (La Coruña), situado en una zona costera atlántica, cuyas coordenadas geográficas son 43°14' latitud Norte, 8°15' longitud Oeste y una altitud de 91 m.s.n.m. con suelo profundo de textura franco limosa desarrollado sobre esquistos de Órdenes. Su clima es templado con inviernos suaves y lluviosos y veranos suaves relativamente secos, con una precipitación media anual alrededor de 1.288 mm y temperatura media anual de aproximadamente 13,3 °C. (Báez et al., 2005).

Durante el experimento se llevaron a cabo las técnicas culturales habituales en el cultivo de maíz, evaluándose la fenología del cultivo cada semana.

Con datos meteorológicos obtenidos de una estación meteorológica ubicada en el lugar del experimento, fueron efectuados cálculos de los valores diarios de la evapotranspiración en el maíz ( $ET_c$ ), utilizándose la metodología propuesta por la FAO (Allen et al., 1998), de acuerdo con la siguiente expresión.

$$ET_c = ET_o * K_c, \quad (1)$$

Donde,  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia en  $mm \text{ día}^{-1}$  y  $K_c$  el coeficiente de cultivo (adimensional). La  $ET_o$  se ha calculado utilizando la ecuación de Penman-Monteith FAO-56.

El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) varió según el estado fenológico  $K_{c \text{ inc}}=0,30$ ;  $K_{c \text{ int}}=1,20$ ;  $K_{c \text{ fin}}=1,00$  (Allen et al., 1998).

Para estimar el contenido de agua en el perfil del suelo, se instalaron en el terreno 12 tubos de acceso de PVC de 50 mm de diámetro, a una profundidad de 160 cm. Utilizando el kit de instalación proporcionado por el fabricante, los tubos de acceso se introdujeron en el suelo verticalmente de forma que se aseguraba un íntimo contacto entre el suelo y la pared exterior del tubo. A continuación, con el uso de una sonda de capacitancia FDR y un data logger portátil (Modelo Diviner 2000) se efectuaron las mediciones de la constante dieléctrica del suelo, consecuentemente estimándose el contenido de agua en el mismo, esta labor se realizó con una frecuencia de cada tres días, durante todo el periodo del trabajo.

Para estimar el balance hídrico se empleó el procedimiento descrito por Arauzo et.al (2003), donde para cada periodo comprendido entre dos aportes de agua consecutivos (lluvia), el cálculo permite obtener los valores de evapotranspiración (independientemente del tipo de cubierta vegetal) y drenaje, así como las variaciones en el contenido de agua.

Los cálculos de  $\theta$  fueron realizados a una profundidad donde el sistema radicular del cultivo tiene influencia, en el que se producen procesos de evapotranspiración y pueden darse procesos de infiltración hacia capas inferiores, cuando el aporte de agua es excesivo. Para cada periodo entre dos aportes por lluvia existen dos periodos bien diferenciados: El que fue denominado “recarga de agua”, que se da mientras se produce el periodo de lluvias, y el periodo de “descarga”, en el que no existe aporte de agua.

$\Delta H$  es definido como el incremento de agua en la zona de influencia radicular durante el periodo de recarga, y se obtiene mediante la diferencia entre el valor máximo al finalizar el periodo de lluvia y el valor mínimo al anterior periodo de lluvia. En la que,  $\Delta H$  corresponde a la siguiente ecuación:

$$\Delta H = LL - (ET_r + \text{infiltr}_r) \quad (2)$$

Donde: LL corresponde al aporte de agua por lluvia (Valor conocido),  $ET_r$  es la evapotranspiración durante el periodo de recarga y  $\text{infiltr}_r$  infiltración en periodo de recarga.

$(ET_r + \text{infiltr}_r)$  representa la pérdida de agua en el estrato por evapotranspiración y/o infiltración durante el periodo de recarga, cuyo valor puede ser despejado.

La pérdida de agua en la zona de influencia radicular durante el periodo de descarga se define como  $\Delta H'$ , y se obtiene por diferencia entre el valor máximo tras finalizar el periodo de carga (lluvias) del ciclo actual y el valor mínimo anterior al siguiente aporte de agua. Como durante el periodo de descarga no existe aporte de agua,  $\Delta H'$  se expresaría como:

$$\Delta H' = (ET_d + \text{infiltr}_d) \quad (3)$$

Donde:  $ET_d$  y  $\text{infiltr}_d$  la evapotranspiración y la infiltración corresponden exclusivamente al periodo de descarga, para este periodo la  $\text{Infiltr}_d$  no fue considerada, debido a que es este periodo y en la zona de influencia radicular (0-70 cm) el suelo no supero la capacidad de campo (CC) (Figura 2.)

Las ganancias o pérdidas de agua en el perfil de suelo ( $\Delta E$ ), se obtiene por diferencia entre los valores mínimos entre dos ciclos de riego consecutivos y se define como la ganancia o pérdida de agua en la zona de influencia radicular.

Para cada ciclo completo entre dos periodos de lluvia, incluyendo los periodos de recarga y descarga, las pérdidas por evapotranspiración e infiltración totales se expresaría como:

$$\text{infiltr} + ET = (ET_r + \text{infiltr}_r) + (ET_d + \text{infiltr}_d) \quad (4)$$

Los valores de evapotranspiración estimados mediante FDR fueron comparados con los valores de evapotranspiración calculados por la metodología FAO, mediante análisis de regresión simple. Se ha considerado como variable dependiente la evapotranspiración calculados por la metodología FAO y como variable independiente o explicativa a la estimada mediante el uso del FDR. También se han calculado una serie de estadísticos comparativos como la raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE), el error medio cuadrático (ER) y el índice de similitud (IS) (Willmott,1982).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION.

La comparación entre el consumo de agua del maíz estimado utilizando la metodología propuesta por la FAO-56 ( $ET_c$ ) a través de la ecuación Penman-Monteith (PM) y la obtenida mediante la sonda de capacitancia FDR ( $ET_r$ ), se presenta en la Figura 1.

Cuando se consideran los datos acumulativos como en la figura 1a, las diferencias entre  $ET_c$  y  $ET_r$ , en

general tienden a aumentar conforme avanza el ciclo vegetativo del maíz. No obstante al comparar los datos diarios de  $ET_c$  y  $ET_r$  en la figura 1b, se aprecia que a escala diaria ambas variables presentan el mismo valor o siempre la demanda potencial de agua ( $ET_c$ ) supera al consumo real ( $ET_r$ ) en cuyo caso se genera déficit hídrico.

Los periodos con déficit y sin déficit están distribuidos a lo largo de todo el ciclo vegetativo del maíz durante el año de estudios.

En la figura 1b también se observa que la demanda potencial de agua  $ET_c$  presentó una tendencia a aumentar desde el inicio del ensayo hasta el día 98 después de la siembra (dds), alcanzando los valores más elevados entre 3,6 y 4,9 mm día<sup>-1</sup> entre los días 88 y 98 dds coincidiendo con el ciclo vegetativo de el final de floración y formación de granos y posteriormente se mantuvo por debajo de 3,5 mm día<sup>-1</sup> con tendencia a disminuir hasta la cosecha.

Los principales periodos con déficit hídrico fueron, en la etapa de crecimiento vegetativo desde los 56 a 60 y de los 60 a 74 días dds, para la etapa de floración y formación de grano fueron desde los 91 a 102 días dds y desde los 126 a 129 días dds (figura 1b)

De acuerdo con la tabla 2 y la figura 1, se observa la representación de los valores acumulados de la  $ET_c$  y la  $ET_r$ , donde, el consumo de agua por el maíz para el periodo de estudio estimada a través de la ecuación PM fue de 275,58 mm y mediante el uso de FDR fue de 168,75 mm.

La  $ET_c$  media para el periodo estudiado es de 2,85 mm día<sup>-1</sup> y 2,17 mm día<sup>-1</sup> en la  $ET_r$ , teniéndose, un máximo de  $ET_c$  y  $ET_r$  de 4,9 y 3,94 mm día<sup>-1</sup> respectivamente, coincidiendo estos valores con el estado fenológico de formación de granos del maíz.

La infiltración estimada para este periodo fue de 26 mm, estimación hecha solo en el periodo de descarga ( $\Delta H$ ) mediante el balance hídrico, (Tabla 1).

El coeficiente de determinación entre  $ET_c$  y  $ET_r$  estimado para dicho periodo fue de  $R^2=0,47$ , con un RMSE de 0,92 mm día<sup>-1</sup> equivalente a un error relativo del 32,32 % y un índice de similitud de 0,34. Este coeficiente de determinación e índice de determinación son bajos debido a que en este periodo de estudios presenta mayor número de días con déficit hídrico que sin déficit.

En la figura 2 se representa precipitación para cada periodo entre lecturas de datos de  $\theta$  (cada tres días) así como contenido hídrico medio registrado a las profundidades de 0-70 cm, 70-120 cm y 120-160 cm, estimado mediante el FDR.

En el curso del ensayo se han observado importantes fluctuaciones del contenido hídrico del suelo principalmente en la zona de influencia radicular (0 a 70 cm), oscilando entre 20,99% y 28,47%, en respuesta a los aportes de agua de lluvia y a la evapotranspiración del cultivo.

A profundidades de 70-120 y 120-160 cm, el  $\theta$  es más alto con promedios de 32,7% y 35,5% respectivamente, teniendo una menor oscilación y con una tendencia a disminuir durante el periodo de estudios.

El coeficiente de variabilidad (CV) de los datos de  $\theta$  en los 12 puntos de medición fue de 0,10; 0,13 y 0,42 a profundidades de 0-0,70 cm; 70-120 cm y 120-160 cm respectivamente.

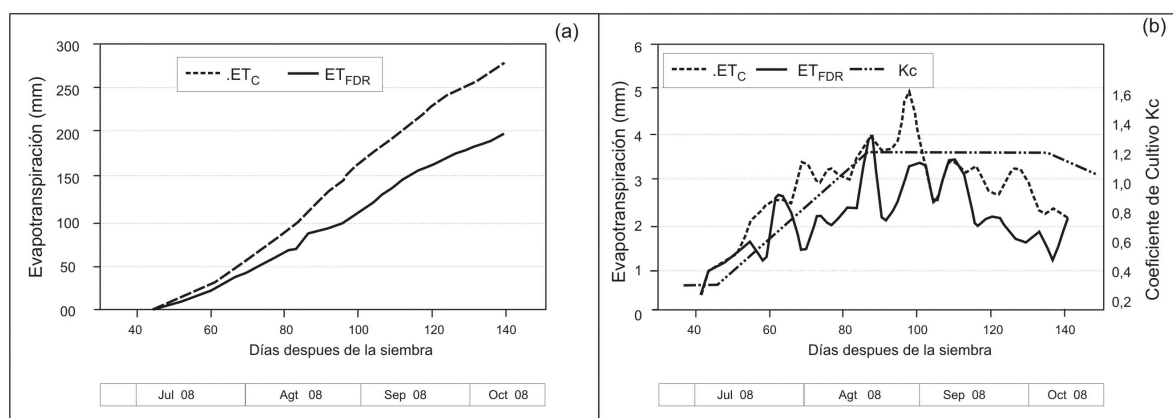
Comparando la figura 1b y 2 se aprecia un buen paralelismo entre los periodos, con mayor diferencia entre  $ET_c$  y  $ET_r$ , es decir con mayor déficit y aquellos con menor contenido hídrico a la profundidad de 0-70 cm

**Tabla 1.** Balances hídricos del periodo de Recarga y Descarga en el cultivo del maíz durante el periodo del estudio

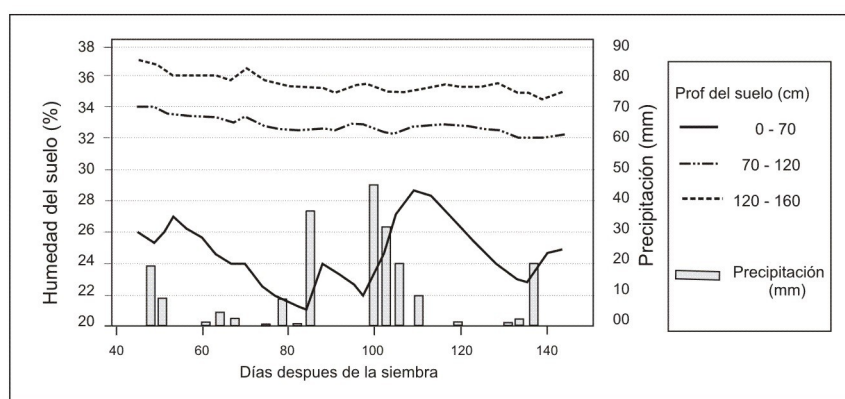
	Recarga ( $\Delta H$ )		Descarga ( $\Delta H'$ )		
$\Delta H$	75,318 mm	162,6 mm	$\Delta H'$	93,43 mm	126,03 mm
$ET_c$	60,67 mm		Lluvia	32,6 mm	
Infil	26,60 mm		Infil		
Lluvia	162,6 mm	162,6 mm	$ET_r$	126,03 mm	126,03 mm

**Tabla 2.** Resumen de los valores obtenidos en el balance Hídrico durante el periodo de estudio en el cultivo de Maíz

Variable	
Nro de días	95,00 días
ET <sub>c</sub> Total (FAO)	275,58 mm
ET <sub>r</sub> Total (real – FDR)	168,60 mm
Aporte agua (lluvia)	195,20 mm
ET Per. recarga ( $\Delta H$ )	42,30 mm
ET Per. descarga ( $\Delta H'$ )	126,30 mm
Infiltr (Periodo de $\Delta H$ )	26,60 mm



**Figura 1.** (a) Evapotranspiración acumulativa estimada con el modelo FAO versus la evapotranspiración calculada a partir de sondas FDR en el cultivo de Maíz, (b) Evapotranspiración diaria para ambos casos.



**Figura 2.** Oscilación del contenido de agua en el suelo (%) a distintas profundidades durante el periodo de estudio. Valores monitorizados con la sonda FDR (Modelo Diviner 2000) con una frecuencia de cada tres días.

#### 4. CONCLUSIONES

En este periodo de estudios, el consumo de agua por el cultivo de maíz estimado por el método de la FAO a partir de datos climáticos fue mayor al estimado con el uso de FDR, esto significa que, el cálculo del consumo de agua del maíz mediante la ecuación de PM-FAO 56 sobreestimó en un 38,7% en relación a la estimación del consumo de agua del maíz mediante la sonda de capacitancia FDR.

Las oscilaciones del contenido de agua en el suelo están sujetas a diferentes variables que pueden ser medias y/o estimadas, considerando el más relevante el aporte de agua (lluvia y/o riego). Por lo tanto, para el cálculo de la evapotranspiración mediante balances hídricos utilizando sondas de capacitancia FDR es muy importante conocer los aportes reales de agua.

Por consiguiente, el uso de las sondas de capacitancia portátil para calcular el consumo de agua en el cultivo de maíz y estimar la oscilación del contenido de humedad en el perfil del suelo, resulta viable y presenta algunas ventajas en relación a los métodos tradicionales, tales como las informaciones puntuales y en tiempo real del contenido de humedad en el perfil del suelo, teniendo este método un futuro promisorio en el manejo de los recursos hídricos.

*Agradecimientos.* “Con el apoyo del Programa Alβan, Programa de Becas de Alto Nivel de la Unión Europea para América Latina nº E07D403924PE”

#### REFERENCIAS

- Alva A.K, y A. Fares, 1999. New techniques for continuous monitoring of soil moisture content to improve citrus irrigation. Proceedings of the Florida State Horticulture Society FSHS, St Petersburg, FL.
- Allen R.G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith, 1998. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy.
- Arauzo, M., J.A. Díez, y P. Hernáiz, 2003. Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. En: *Investigación de la zona no saturada*, Vol. VI, ZNS'03 (J. Álvarez-Benedi y P. Marinero, eds). Instituto Técnico Agrario de Castilla León, Universidad Europea Miguel de Cervantes. Valladolid, 2003, 408 pp.
- Báez, D., J. Castro, J. López, y R. Novoa, 2005. Efecto del manejo de praderas dentro de una explotación de ganado vacuno en la evolución de nutrientes en suelo durante el periodo de drenaje. En: *Investigación de la zona no saturada*, Vol. VII, ZNS'05 (J. Samper, A. Paz González), Universidad de la Coruña. La Coruña, 2005, 57 pp.
- Brandelik, A., y C. Hubner, 1997. Soil moisture determination-Accurate, large and deep. *PHys. Chem. Earth*. Vol.21, Nº 3 pp. 157-160.
- Doorenbos, J., y W. O. Pruitt, 1977. Crop water requirements. FAO paper 24. Roma, Italia. 144 p. Shaw, R. H., y J. E. Newman. 1987. Weather stress in the corn crop. In: *National Corn Handbook*. Project leader: R. Nielsen. Purdue University. West Lafayette, Indiana. USA. 6 p.
- Entin, J. K., A. Robock, K.Y. Vinnikov, S. E. Hollinger, S. Liu, y A. Namkhai, 2000. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, n. D9, p. 11865-11877.
- Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 63(11): 1309-1313.