

## SEGUIMIENTO DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN EL ENTORNO DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA

M<sup>a</sup> Luisa Prados García<sup>1\*</sup>; Karl Vanderlinden<sup>2</sup>; Juan Vicente Giráldez Cervera<sup>3</sup>; Carolina  
Guardiola-Albert<sup>4</sup> y C. Mediavilla Laso<sup>1</sup>

1: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).  
Área de investigación en procesos activos y calidad ambiental.  
Oficina de Proyectos de Sevilla. Plaza de España,  
Torre Norte. 41013 Sevilla  
e-mail: ml.prados@igme.es

2: Grupo de Suelo y Agua  
Centro *Las Torres-Tomejil*  
IFAPA, Consejería de Agricultura y Pesca  
Ctra. Sevilla-Cazalla, km 12.2, 41200 Alcalá del Río (Sevilla)

3: Departamento de Agronomía,  
Universidad de Córdoba e Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC,  
Campus de Rabanales, Edificio da Vinci. Ctra. Madrid, km 396, 14071 Córdoba

4: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).  
Área de investigación en procesos activos y calidad ambiental.  
C/Ríos Rosas, nº23, 28013, Madrid

**Palabras clave:** Zona no Saturada, Doñana, Balance de Agua, Recarga, Sensores de Capacitancia ECH<sub>2</sub>O.

**RESUMEN.** *Mejorar el conocimiento sobre la recarga del acuífero Almonte-Marismas es de gran relevancia para la gestión de los recursos hídricos en el entorno del Parque Nacional de Doñana. Con el fin de realizar un seguimiento de la humedad del suelo se instalaron sensores de humedad a distintas profundidades en diez puntos seleccionados. Se presentan los detalles de la instalación, el procedimiento de calibración en laboratorio y los datos registrados inicialmente, de los que se puede inferir el flujo del agua en el suelo y determinar la situación de la capa freática, así como las oscilaciones de la misma. Usando estos resultados se desarrollará y validará un modelo de balance de agua que permita la recarga del acuífero.*

**ABSTRACT.** *The Almonte-Marismas aquifer recharge is an important variable on the hydrological resources management of the Doñana National Park and its environment. In order to study this variable, ten monitoring points were selected in the area, according to different characteristics, where water content sensors were installed at different depths, to study water flux through the vadose zone. Some calibration tests were made for these soils. Obtained data are presented, evaluating water flux through the vadose zone. Water content profiles on the monitored points are described and water table position has been defined, as well as its oscillations. In the future, a water flux balance model will be developed and validated for these soils, using the obtained data. This model is expected to evaluate the vadose zone influence on the aquifer recharge.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas y ecotonos presentes en Doñana dependen en gran medida de la disponibilidad del agua. Pequeños cambios en las condiciones hídricas naturales pueden provocar desequilibrios de graves repercusiones en las características ecológicas y medioambientales de los mismos. La dinámica espacio-temporal del agua en el suelo es el resultado de la interacción de procesos de infiltración, redistribución, percolación, y evapotranspiración, y determina la distribución, abundancia o permanencia de las especies vegetales a través de los equilibrios ecohidrológicos. En este trabajo se describe la red de sensores electromagnéticos empleada para realizar un seguimiento en continuo de la humedad del suelo en varios puntos del Entorno Natural de Doñana y sus proximidades, dentro del marco de un estudio sobre la recarga del acuífero Almonte-Marismas.

Robinson *et al.* (2008) revisaron recientemente los métodos disponibles para medir la humedad del suelo en aplicaciones ecológicas e hidrológicas a escala de cuenca, y destacan que la medición en continuo con

redes de sensores puede cubrir escalas espacio-temporales intermedias que ningún otro método puede abarcar. Los sensores de capacitancia ofrecen una excelente alternativa al TDR, por su bajo coste y bajo consumo energético (Bogena *et al.*, 2007). Miden la permitividad dieléctrica del suelo que se relaciona con el contenido de humedad mediante una relación empírica, por lo que es recomendable calibrar los sensores para cada tipo de suelos cuando se pone en marcha una amplia red de sensores (Kizito *et al.*, 2008). Para este estudio se eligió el sensor ECH<sub>2</sub>O EC-20 (Decagon Devices Inc. 2006, 2007). McMichael y Lascano (2003), Czarnomski *et al.* (2005), Nemali *et al.* (2007) y Bandaranayake *et al.* (2007) evaluaron el volumen de suelo explorado por estos sensores, así como el efecto de la temperatura y la conductividad eléctrica, y la influencia del tipo de suelo. En general los sensores ECH<sub>2</sub>O muestran mayor sensibilidad a estos factores, pero su bajo coste justifica en la mayoría de las ocasiones una calibración específica.

Bandaranayake *et al.* (2007) utilizaron estos sensores en un suelo arenoso y concluyeron que se ven afectados por la salinidad, por las variaciones de temperatura (sensores superficiales) y que subestiman la humedad cuando el suelo no se encuentra bien compactado. En este estudio no se encuentran estos inconvenientes, por tratarse de horizontes profundos y no salinos. Otros autores han comparado su funcionamiento con otros sensores (Blonquist *et al.*, 2005), mostrando debilidades como su gran susceptibilidad a la variación de la conductividad eléctrica con las temperaturas diurnas o una sobreestimación de la permitividad real cuando hay una conductividad eléctrica elevada. Sin embargo, los suelos de este estudio no tienen presencia de sales y el hecho de estudiar la humedad en profundidad hace que se disminuya considerablemente la afección por variaciones bruscas de temperatura, por lo que estos sensores son una opción muy adecuada teniendo en cuenta los objetivos y las condicionantes de este estudio. Estas características los hacen idóneos para su uso en redes de sensores (Bogena *et al.*, 2007), como la expuesta en este trabajo.

El objetivo del mismo es evaluar el uso los sensores EC-20 para el seguimiento de la humedad del suelo bajo las condiciones edafoclimáticas del Entorno Natural de Doñana y sus proximidades, empleando una calibración realizada en laboratorio para cada punto e interpretando los primeros datos obtenidos con la red, comparando los dos métodos utilizados para la instalación de los sensores.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Puntos instrumentados

Se seleccionaron cuatro puntos piloto en los que fueron instaladas las sondas de medición de humedad en otoño de 2007. Tras un breve periodo de evaluación, se procedió al equipamiento del resto de puntos en estudio durante el 2008 (ver figura 1).

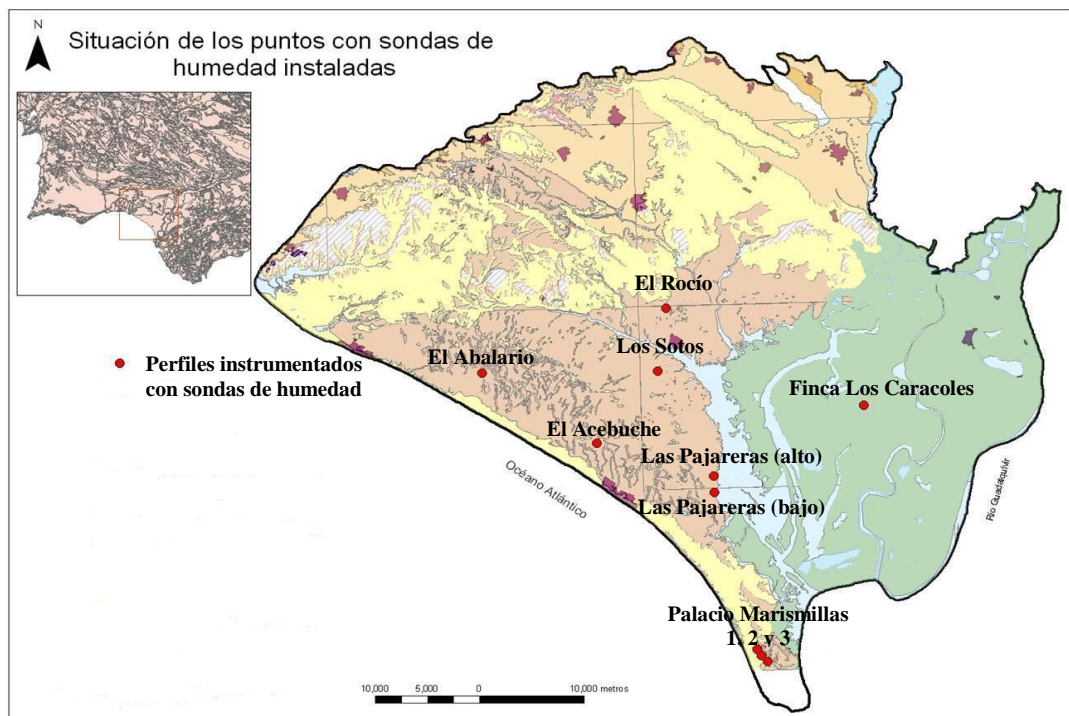


Figura 1. Mapa de situación de los puntos de la red de monitorización en el Entorno Natural de Doñana.

A continuación y a modo de ejemplo se presentarán datos obtenidos en los ensayos de calibración de los sensores y los datos de campo observados desde el 1 de abril de 2008 hasta el 31 de marzo de 2009 para los puntos de El Acebuche y uno de los tres puntos del entorno del Palacio de Marismillas, el de cota media (Marismillas-2).

El punto denominado El Acebuche (coordenadas UTM\_Huso29: X = 716291; Y = 4102657) se encuentra cubierto de pinar y arbustos característicos de monte blanco (*Rosmarinus officinalis*, *Halimium halimifolium*, *Ulex minor*). La capa freática se encuentra a más de un metro de profundidad. El suelo es arenoso, color ocre y el primer horizonte tiene elevada presencia de restos vegetales (color más oscuro que el resto, bastante homogéneo).

El punto dos del entorno del Palacio de Marismillas (Marismillas-2: coordenadas UTM\_Huso29: X = 732381; Y = 4080629) es de los tres instrumentados en esta zona el que se encuentra en la cota media. Sobre este punto encontramos cubierta de pino (*Pinus pinea*) como única vegetación presente. El suelo está formado por arenas anaranjadas en todo el perfil. Entre los 2 y los 2,5 m se encuentran abundantes restos de conchas marinas. El nivel piezométrico se detectó a una profundidad de 3,5 m.

## 2.2. Instalación de los sensores

Los sensores fueron instalados a distintas profundidades en los perfiles seleccionados, y hasta una profundidad máxima dependiente, principalmente, del nivel freático. Para instalar los sensores en profundidad se utilizaron dos métodos: zanja y barrenas. El primer método se utilizó en todos los puntos de menos de 3 m de profundidad y consiste en practicar una zanja en el suelo y en un lateral de la misma insertar los sensores de forma horizontal, paralelos a la superficie del suelo y con su lado más estrecho en perpendicular a dicha superficie. Esto permite medir en suelo inalterado y evita la alteración del flujo vertical del agua y la acumulación de agua en el suelo justo encima del sensor. En los puntos más profundos y, a veces, como complemento al método de zanja, se empleó el método de la barrena en algunos emplazamientos. Consiste en realizar agujeros mediante una barrena, hasta la profundidad deseada, e insertar el sensor en posición vertical dentro de esa perforación con una barra metálica provista de un porta sensor. Se comprueba mediante el ECH<sub>2</sub>O-check (Decagon Devices Inc., Pullman, WA) que el sensor funciona correctamente antes de cubrirlo definitivamente. En este estudio se analiza si se observan diferencias entre los datos aportados por los sensores instalados con los dos métodos.

Las mediciones se realizaron con una frecuencia de 15 minutos y se almacenaron en un registrador de datos EM-50 (Decagon Devices Inc., 2007).

En el punto de El Acebuche no se llegó hasta el nivel freático en el momento de instalación de los sensores, sin embargo en Marismillas-2 se encuentra monitorizada la ZNS en toda su profundidad.

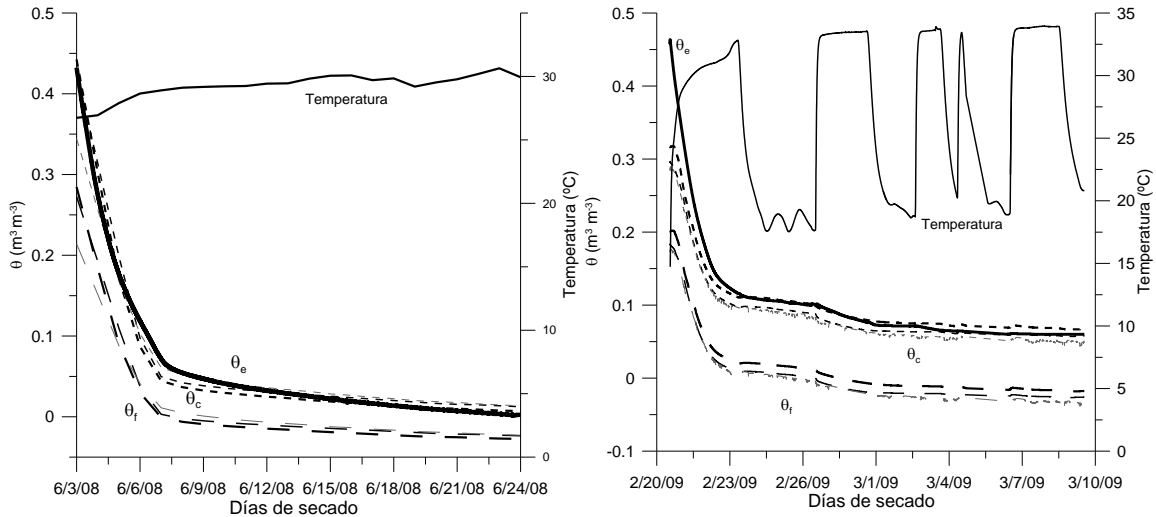
## 2.3. Calibración de los sensores

Se realizaron calibraciones específicas para cada profundidad en los distintos puntos de medición. Para ello se llenaron cilindros perforados, de unos 25 cm de altura y 10 cm de diámetro, con el suelo y se insertaron los sensores así como un sensor de temperatura tras haber saturado la muestra. Después de dejar drenar los cilindros aproximadamente 12h, se situaron sobre balanzas de precisión dispuestas en el interior de una estufa. Los sensores ECH<sub>2</sub>O-20 (EC-20) se introdujeron en la muestra en estufa, junto con dos sensores de temperatura, uno en el interior y otro en el exterior de la muestra. Los sensores registraron en continuo los datos de humedad volumétrica (con la calibración del fabricante) y la temperatura. Se procedió al secado lento de las muestras, registrando en continuo tanto la masa medida por las balanzas como las mediciones de los sensores. La humedad volumétrica observada se estima a partir de la humedad gravimétrica obtenida en báscula, tras secado de la muestra a 105°C.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Resultados de la calibración

Los datos obtenidos en dos de los ensayos de calibración realizados se presentan en la Figura 2. Se observa que los sensores EC-20 con la calibración del fabricante subestiman los contenidos de humedad. Si nos fijamos en las variaciones de temperatura, al contrario de lo que indican otros autores (Blonquist et al., 2005; Bandaranayake et al., 2007), la lectura de los sensores no se ve afectada por las variaciones de la misma, puesto que los cambios en la pendiente de la curva responden a cambios en el contenido de humedad observado en el ensayo.

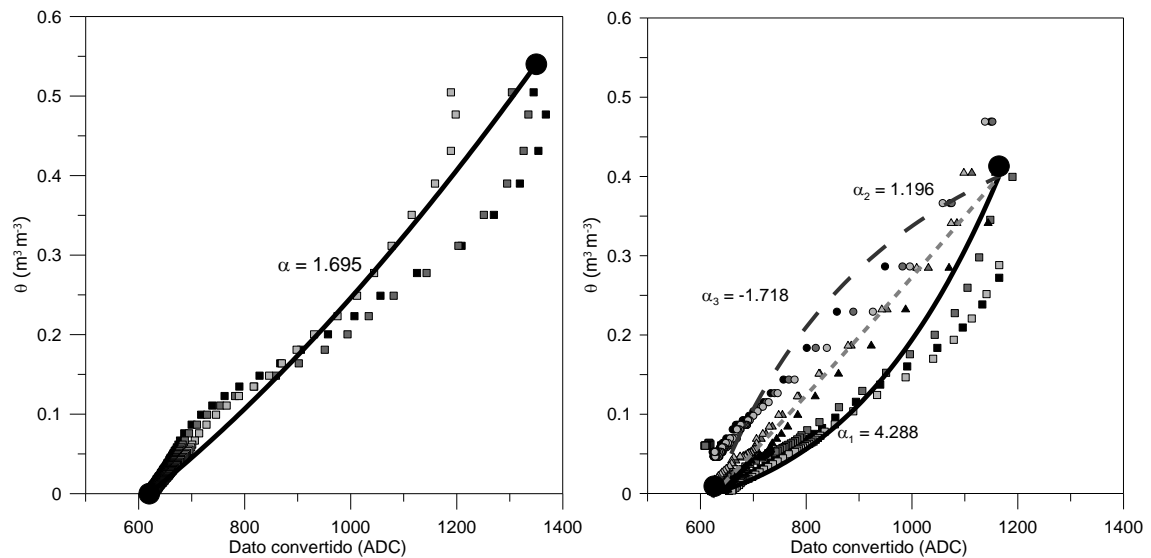


**Figura 2.** Ensayo de calibración de sensores para muestras de Marismillas-2 (**Fig. 2a**) y de El Acebuche (**Fig. 2b**); se comparan los valores de humedad obtenidos con la calibración del fabricante ( $\theta_f$ ), los observados en el ensayo ( $\theta_o$ ) y los obtenidos tras aplicar una relación de calibración lineal sencilla, propuesta en este trabajo ( $\theta_c$ ). En el ensayo de El Acebuche se estudiaron tres cilindros con muestras de tres profundidades distintas en el mismo ensayo (0.2, 0.4 y 0.6 m), observándose en la **Fig. 2b** los valores medios para cada uno.

Para este estudio se han realizado dos calibraciones. En una de ellas se ha aplicado el método propuesto por Sakaki et al. (2008) (ver Fig. 3) en el que, partiendo de los contenidos máximo y mínimo de humedad, se elabora un ajuste de un coeficiente  $\alpha$ , de forma que:

$$\theta_v = \frac{ADC^\alpha - ADC_{sec}^\alpha}{ADC_{sat}^\alpha - ADC_{sec}^\alpha} \phi \quad (1)$$

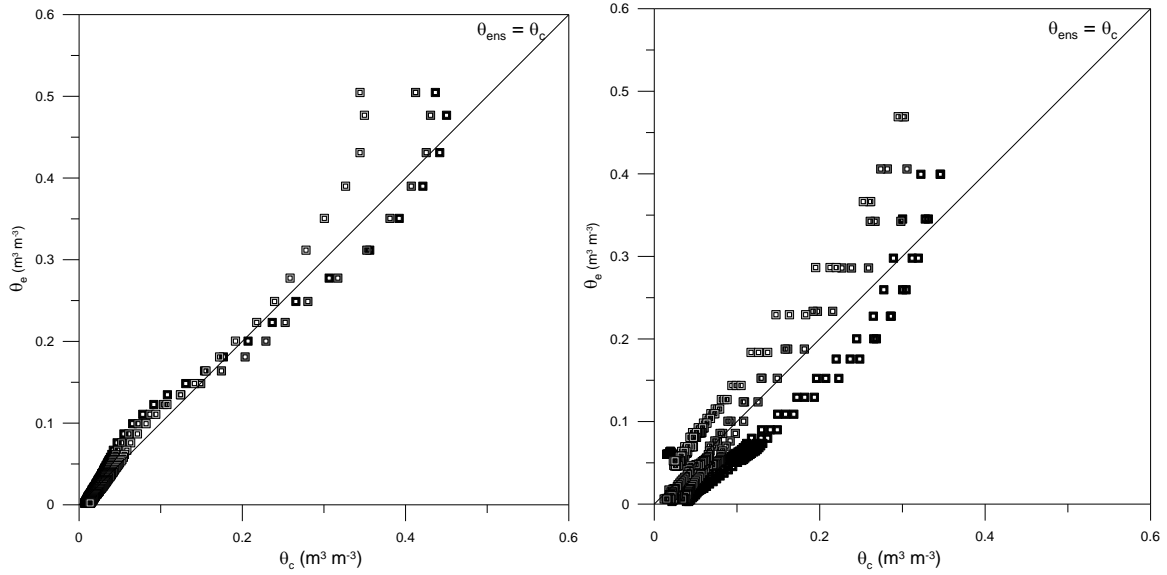
donde  $ADC$  (*analog to digital converted*) es el valor bruto aportado por los sensores, definido por el fabricante como RAW, que es un dato que convierte directamente la señal analógica en un valor numérico;  $\phi$  es la porosidad del suelo y  $\alpha$  es el coeficiente a ajustar. Por otro lado se ha elaborado una calibración sencilla, ajustando los valores de la región seca (correspondientes a una humedad menor al 30%) a una línea recta (ver Fig. 4).



**Figura 3.** Calibración de los sensores para las muestras de Marismillas-2 (**Fig. 3a**) y de El Acebuche (**Fig. 3b**) en las tres profundidades estudiadas (1, 2 y 3, respectivamente), siguiendo el modelo propuesto por Sakaki et al., (2008)

La calibración propuesta por Sakaki et al. (2008) nos da buen resultado para las muestras de Marismillas-2, ajustándose prácticamente a una línea recta. Para el ensayo de El Acebuche, al ser distintas profundidades, obtenemos distintos valores para  $\alpha$  y además las curvas obtenidas no se ajustan bien a

partir de un valor de humedad de  $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Con una calibración más sencilla podemos obtener un mejor ajuste, como se observa en la Fig. 4, en la que observamos que el ajuste es bastante bueno hasta contenidos de alrededor de  $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .



**Figura 4.** Humedad volumétrica observada en el ensayo frente a la humedad estimada por los sensores tras aplicarles la relación de calibración propuesta en las muestras de Marismillas-2 (**Fig. 4a**) y de El Acebuche (**Fig. 4b**).

Para estudiar la precisión de la medida de los sensores, antes y después del ajuste, se ha realizado un estudio de error, cuyos resultados se pueden observar en la Tabla 2. Las variables estudiadas son el error medio (EM), error medio absoluto (EMA), raíz del error medio cuadrático (REMC), error medio relativo (EMR) y coeficiente de eficiencia (CE). El estudio del error se ha calculado para los valores medios de cada profundidad estudiada y para los distintos modelos de calibración utilizados en este estudio.

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^* - x_i) \quad (2)$$

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i^* - x_i| \quad (3)$$

$$REMC = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^* - x_i)^2} \quad (4)$$

$$EMR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i^* - x_i|}{x_i} \quad (5)$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |x_i^* - x_i|}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})} \quad (6)$$

**Tabla 2.** Valores obtenidos en el estudio de error realizado a los modelos de calibración estudiados.

		Calibración propuesta	EM	EMA	REMC	EMR	CE
Lectura sensores calibración fabricante	M		-0,0524	0,0524	0,0636	2,5270	0,7102
	AC	$\theta = 4.24E - 04 \cdot ADC - 0.29$	-0,0922	0,0922	0,0957	1,0824	-0,8696
Valores calibración propuesta	M	$\theta = 5.92E - 04 \cdot ADC - 0.3592$	-0,0014	0,0080	0,0181	0,5995	0,9754
	AC	$\theta = 5.28E - 04 \cdot ADC - 0.3059$	-0,0035	0,0122	0,0222	0,0975	0,8967
Valores calibración Sakaki et al., (2008)	M		0,0038	0,0150	0,0248	0,3739	0,9522
	AC	$\theta = \frac{ADC_{\text{sat}}^{\alpha} - ADC_{\text{seco}}^{\alpha}}{ADC_{\text{sat}}^{\alpha} - ADC_{\text{seco}}^{\alpha}} \cdot \phi$	0,0466	0,0503	0,0521	0,6462	0,4660

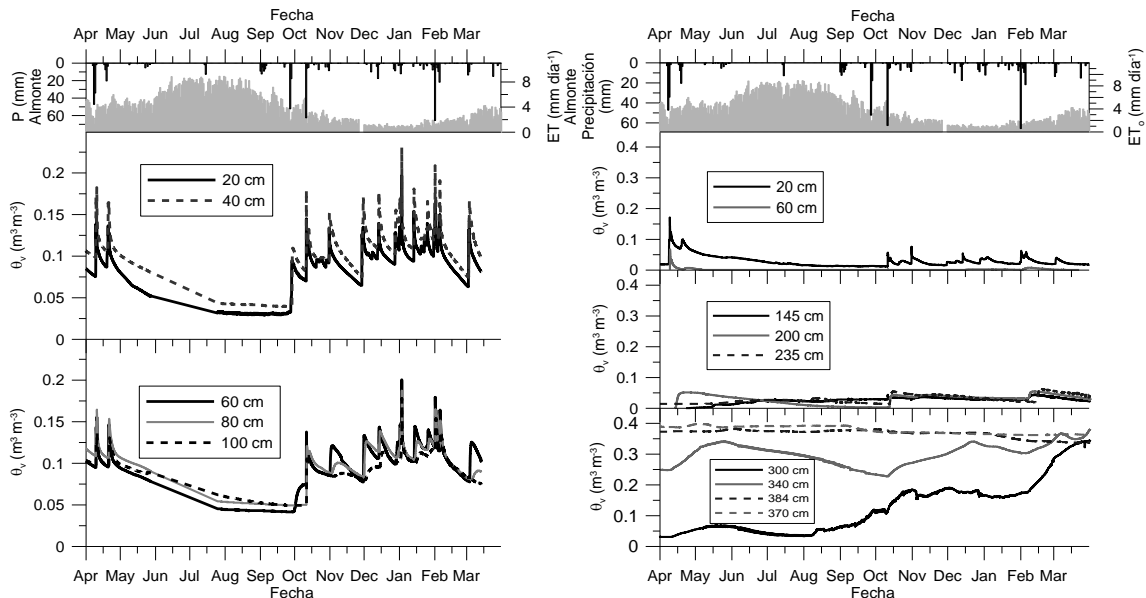
Cabe destacar que el error medio es prácticamente cero en los valores calibrados, aunque el error medio

relativo está en torno al 10%. Esto se debe a que, para valores de humedad elevada, estos sensores pierden sensibilidad (Bogena et al., 2007), por lo que es más difícil el ajuste. De cualquier modo los valores obtenidos con la calibración propuesta muestran menor error que los medidos por los sensores con la calibración de fábrica y con la calibración propuesta por Sakaki et al. (2008) y la eficiencia del ajuste aumenta hasta el 97% para el caso de Marismillas-2 y hasta el 89% para el caso de El Acebuche (de más difícil ajuste, dada su variabilidad).

### 3.2. Datos de campo obtenidos por los sensores

Los datos obtenidos de los registros de los sensores en los distintos puntos nos aportan una relevante información del flujo de agua en el suelo, como se puede observar en la Figura 5, en la que se muestra un ejemplo de los datos registrados en dos de los puntos instrumentados. En esta figura, los datos se han relacionado con la precipitación y la evapotranspiración de una estación meteorológica cercana (Almonte).

En dicha figura se observa el registro de contenidos de humedad en cada uno de los sensores instalados en los puntos mencionados, tras aplicar la relación de calibración. En todos los puntos se ha registrado con claridad la influencia de las precipitaciones en los contenidos de humedad registrados por los sensores más superficiales, aumentando y disminuyendo estos contenidos muy rápidamente y siendo estos ascensos coincidentes en el tiempo con la fecha de precipitaciones. Al ir aumentando en profundidad, el aumento de humedad se produce de forma menos acusada, con retraso respecto a los días de lluvia y el descenso de la humedad se produce de forma más lenta.



**Figura 5.** Registro de los datos de campo desde el 1 de abril de 2008 hasta el 31 de marzo de 2009 en los puntos de El Acebuche (Fig. 5a) y de Marismillas-2 (Fig. 5b), en relación a las precipitaciones y la evapotranspiración registradas en la estación meteorológica de Almonte para el mismo periodo.

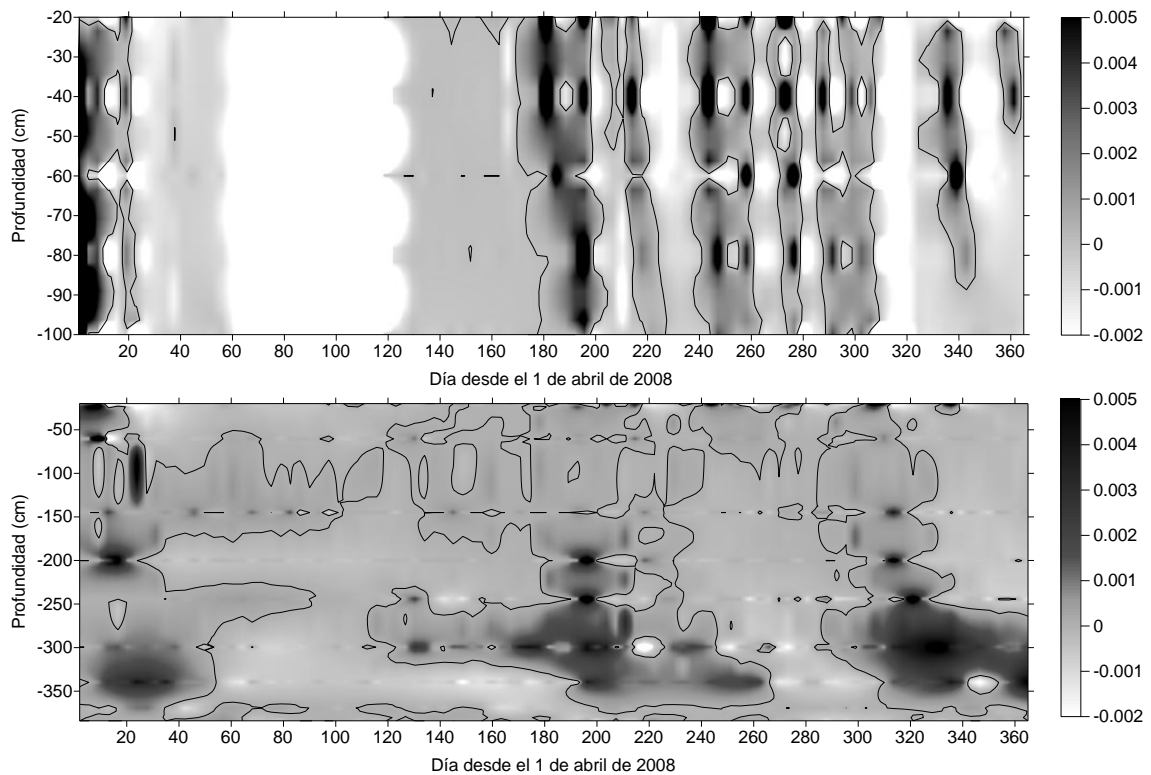
En el punto de El Acebuche (Fig. 5a) no se ha registrado el ascenso del nivel freático, encontrándose este a mayor profundidad que los sensores instalados. Sin embargo se observa claramente cómo el funcionamiento de los sensores es bastante homogéneo en toda la profundidad del perfil, siendo su respuesta a las precipitaciones muy similar, aunque conforme aumenta la profundidad, los aumentos de humedad son cada vez menos acusados y se producen con un cierto retraso en el tiempo respecto a las precipitaciones. En este caso los sensores fueron instalados mediante el método de la zanja, observándose muy buena respuesta de los mismos ante las variaciones de humedad.

Se observa claramente en el punto estudiado en el entorno del Palacio de Marismillas (Fig. 5b) la situación de la capa freática, situada a partir de los 3,7 m, así como su zona de oscilación, que en época de lluvias asciende hasta los 2,7 m y en época de estiaje se encuentra por debajo de los 3,4 m. Además el sensor situado a 2 m registra un aumento de la humedad más elevado que los inmediatamente superiores en varios momentos del ciclo, momentos que coinciden con épocas de precipitación, pero con un ligero retraso. Esto puede deberse a un movimiento horizontal del agua desde zonas superiores, pudiendo encontrarse en esta profundidad una zona de mayor compactación (coincide con el horizonte en el que se

encontraron restos de conchas) y por tanto produciéndose un flujo horizontal preferente. Asimismo se puede apreciar cómo en el mes de agosto se produce una disminución en el contenido de humedad a una profundidad de 3,4 m a la vez que a 2,7 m se registra un aumento del mismo. Esto se puede deber a un ascenso capilar de la humedad, probablemente por influencia de la presión de la ET. Como se había comentado, en este punto la instalación de los sensores se realizó mediante el método de barrenas, observando una buena respuesta de los sensores en toda la profundidad del perfil.

En la Figura 6 se pueden observar representadas las variaciones de humedad cada 24 horas durante el periodo estudiado en ambos puntos.

En el punto de El Acebuche (Fig. 6a) se observa que la influencia de las precipitaciones se aprecia en toda la profundidad del perfil estudiado, así como en el periodo de estío o en los periodos de ausencia de lluvias el suelo se mantiene en situación de disminución de humedad en todo el perfil. Al estudiar un perfil poco profundo, se observa la rapidez con la que se producen las oscilaciones en los contenidos de humedad (humectación-deseccación), característica de estos suelos arenosos.



**Figura 7.** Variaciones de humedad registradas en el periodo de tiempo estudiado en los puntos de El Acebuche (Fig. 7a) y de Marismillas-2 (Fig. 7b) en todo el perfil estudiado.

En el punto del entorno del Palacio de Marismillas (Fig. 6b) se puede ver lo mencionado anteriormente. Los aumentos de humedad en el perfil en profundidad observados se registran con un retraso en el tiempo respecto a las precipitaciones. Además a 2,7 m se observa el aumento de humedad en verano mientras en la zona inferior se produce una disminución de la misma. Se comprueba cómo la zona alrededor de los 3 m de profundidad es la que registra mayores variaciones de humedad, es decir, es la zona donde tiene lugar la recarga del acuífero en este punto. En la zona más profunda no se producen variaciones importantes, puesto que ésta se encuentra en saturación permanente.

Estas variaciones en los contenidos de humedad podrían permitir, sin necesidad de modelar el flujo de agua, estimar cuantitativamente la recarga que se produce al acuífero.

#### 4. CONCLUSIONES

Queda patente en este estudio que es necesario establecer una relación de calibración para los suelos estudiados para poder cuantificar con precisión los contenidos de humedad del suelo. Sin embargo para realizar un análisis cualitativo y estudiar las variaciones que se producen en estos contenidos de humedad, se puede valorar muy positivamente la información que aportan estos sensores incluso sin calibrar, ofreciendo además la gran ventaja de tener un coste muy económico y un registro de datos en continuo a

una elevada frecuencia temporal.

Al estudiar las relaciones de calibración de estos sensores se encuentran complicaciones cuando se trata de elevados contenidos de humedad. En este caso los sensores se vuelven más imprecisos. Sin embargo, como se ha visto en los datos registrados en campo, estos suelos arenosos rara vez registran contenidos de humedad superiores a  $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  y cuando se registran se puede considerar el suelo como saturado, por lo que estas imprecisiones no afectarán en gran medida al estudio del flujo de agua en estos suelos.

La instalación de estos sensores a lo largo de la ZNS permite situar con gran precisión la capa freática, así como sus oscilaciones. Es necesario disponer de una mayor serie de datos para sacar conclusiones de los distintos factores que pueden tener influencia en dichas oscilaciones, aunque se apuntan algunas ideas como el ascenso capilar o el flujo lateral procedente de cotas más elevadas. Así mismo se observa que los datos aportados por los sensores instalados mediante el método de barrenas tienen características similares al instalado mediante zanja, por lo que el funcionamiento se da por correcto en ambos casos, a la espera de continuar obteniendo más datos para el análisis.

Los datos obtenidos de esta red de monitorización permitirán modelar el flujo de la ZNS de esta unidad hidrogeológica para así estimar la recarga del acuífero que se produce a través de la ZNS. Por último se realizará un análisis ec hidrológico de la zona, estudiando el sistema suelo-planta-atmósfera y valorando la influencia de las posibles modificaciones en las pautas de precipitación y temperatura (cambio climático) en este sistema.

*Agradecimientos.* Este trabajo se ha realizado con financiación del IGME y con la colaboración de la oficina de proyectos del IGME en Sevilla y del IFAPA-Centro Las Torres-Tomejil de la Junta de Andalucía, así como con ayuda del personal de la ICTS de la Estación Biológica de Doñana. Los autores agradecen el trabajo de campo y la mejora del equipo usado en laboratorio a F. Ruíz y A. Martínez de la O.P. del IGME en Sevilla, a E. Rodríguez y M. Morón del centro IFAPA Las Torres-Tomejil, así como al resto del equipo del Área de Producción Ecológica y Recursos Naturales del mismo.

## REFERENCIAS

- Bandaranayake, W.M., L.R. Parsons, M.S. Borhan, y J.D. Holeyton, 2007. Performance of a Capacitance-Type Soil Water Probe in a Well-Drained Sandy Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 993–1002.
- Blonquist, J.M. Jr., D.A. Robinson, y V.P. Rasmussen, 2005. Standardizing Characterization of Electromagnetic Water Content Sensors: Part 1. Methodology. *Vadose Zone J.* 4, 1048–1058.
- Bogena, H.R.; Huisman, J.A.; Oberdörster C. y Vereecken, H. 2007. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *J. Hydrol.* 344, 32–42.
- Czarnomski, N.M., G.W. Moore, T.G. Pypker, J. Licata, y B.J. Bond, 2005. Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest. *Can. J. For. Res.* 35, 1867–1876.
- Decagon Devices, Inc. 2006. *ECH<sub>2</sub>O Soil Moisture Sensor. Operator's Manual, for models EC-20, EC-10 y EC-5. Version 5.*
- Decagon Devices, Inc. 2007. *EM50, Data Collection System. User's Manual, versión 4.*
- Kizito, F., Campbell, C.S., Campbell, G.S., Cobos, D.R., Teare, B.L., Carter, B., Hopmans, J.W., 2008. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor, *J. Hydrol.*, 352, 367–378.
- McMichael, B. y R. J. Lascano, 2003. Laboratory evaluation of a commercial dielectric soil water sensor. *Vadose Zone J.* 2, 650–654.
- Nemali, K.S., F. Montesano, S.K. Dove, y M.W. van Iersel, 2007. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH<sub>2</sub>O and Theta probes. *Sci. Hort.* 112, 227–234.
- Robinson, D.A.; Campbell, C.; Hopmans, J.W.; Hornblukle, B.; Jones, S.B.; Knight, R.; Ogden, F.; Selker, J. y Wendroth, O. 2008. A review vision for soil moisture measurements for ecological and hydrological watershed scale observations. *Vadose Zone J.* 7, 358–389.
- Sakaki, T., A. Limsuwat, K. M. Smits, and T. H. Illangasekare, 2008. Empirical two-point a-mixing model for calibrating the ECH<sub>2</sub>O EC-5 soil moisture sensor in sands, *Water Resour. Res.* 44, W00D08, doi:10.1029/2008WR006870.