



Título del artículo.

Estructura y calibración de un sistema electrónico de monitoreo del flujo de agua en la zona no saturada.

Título del artículo en idioma Inglés.

Structure and calibration of an electronic system for monitoring water flow in the unsaturated zone.

Autores.

Javier Salas-García
Jaime Gárfias-Soliz
Juan Carlos Pérez-Merlos
Hilario Jesús Llanos-Acebo

Referencia bibliográfica:

MLA

Salas-García, Javier, Jaime Gárfias-Soliz, Juan Carlos Pérez-Merlos e Hilario Jesús Llanos-Acebo. "Diseño de un sistema electrónico automático para monitorear el flujo de agua en la zona no saturada". *Tlamati* 5.4 (2014): 43-48. Print.

APA

Salas-García, J., Gárfias-Soliz, J., Pérez-Merlos, J. C. y Llanos-Acebo, H. J. (2014). Diseño de un sistema electrónico automático para monitorear el flujo de agua en la zona no saturada. *Tlamati*, 5(4), 43-48.

ISSN: 2007-2066.

Publicado el 31 de Diciembre del 2014

© 2014 Universidad Autónoma de Guerrero

Dirección General de Posgrado e Investigación

Dirección de Investigación

TLAMATI, es una publicación trimestral de la Dirección de Investigación de la Universidad Autónoma de Guerrero. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Dirección de Investigación de la UAG. Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos previa cita de nuestra publicación.



Estructura y calibración de un sistema electrónico de monitoreo del flujo de agua en la zona no saturada.

Javier Salas-García¹

Jaime Gárfias-Soliz¹

Juan Carlos Pérez-Merlos¹

Hilario Jesús Llanos-Acebo²

¹ Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Universidad s/n. Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria. C.P. 50295. Toluca, México. +52(722)180 6191 ext. 226.

² Departamento de Geodinámica. Universidad del País Vasco. Los Apraiz, I. Vitoria-Gasteiz, C.P. 01006. País Vasco.

*Autor de correspondencia
proyectos@javersalasg.com

Resumen

Para determinar la disponibilidad de agua de un acuífero, es esencial cuantificar su recarga. A pesar de la variedad de métodos para estimarla, a menudo éstos están limitados por la instrumentación necesaria para calcular sus componentes. El objetivo de este trabajo es presentar el diseño de un equipo de monitoreo hidrológico capaz de monitorear el perfil del flujo de agua en un pozo de monitoreo en función de cuatro variables obtenidas en el campo: el contenido de humedad, la presión de succión, el flujo en secciones transversales y el nivel freático. La instrumentación desarrollada se instaló en tres pozos de monitoreo del valle de Toluca. Comprende una unidad de control conectado a un servidor de internet a través de un enlace de telefonía celular. El equipo transmite los valores de las variables monitoreadas a intervalos programables. Se presenta la estructura y el proceso de calibración de los instrumentos instalados. El consumo de corriente del sistema es de 0.6 miliamperes (mA) en reposo y de 13.5 mA en operación con un ciclo de trabajo del 0.11%, lo que permite un tiempo de operación de dos meses sin reemplazar su batería (6 Volts y 12 Amper-hora). Se determinó una ecuación de calibración que incluye una compensación por efecto de la temperatura para los bloques de yeso que determinan indirectamente el contenido de humedad con un $R^2=0.95$. El error relativo porcentual de los lisímetros resultó menor del 5% para volúmenes mayores de 100 mL. Los transductores empleados en los tensiómetros y en los freatómetros tuvieron en promedio $R^2 = 0.98$. Esto muestra a pesar de su bajo costo, esta instrumentación es capaz de determinar las variables monitoreadas. Además, esta tecnología puede ser aplicada para transmitir otras variables medidas *in situ*, en función de los objetivos de la investigación en particular de que se trate.

Palabras clave: instrumentación, flujo de agua, zona vadosa

Abstract

In order to determine availability of water from an aquifer, it is essential to quantify its recharge. Despite the variety of methods to estimate it, often they are limited by the necessary instrumentation to calculate its components. The aim of this paper is to present the design of hydrological monitoring equipment capable of monitoring the flow profile of water in a

Como citar el artículo:

Salas-García, J., Gárfias-Soliz, J., Pérez-Merlos, J. C. y Llanos-Acebo, H. J. (2014). Diseño de un sistema electrónico automático para monitorear el flujo de agua en la zona no saturada. *Tlamati*, 5(4), 43-48.

monitoring well in terms of four variables obtained in the field: the water content, suction pressure, the water flow through cross sections and the water table level. The developed instrumentation was installed into three monitoring wells in the Toluca Valley. It includes a control unit connected to an Internet server through a cellular link. The equipment transmits the monitored variable values at programmable intervals. The structure and the calibration of the tools are presented here. The current consumption of the system is 0.6 milliamperes (mA) in standby mode and 13.5 mA in operation, with a duty cycle of 0.11 %, which allows an operation time of two months without replacing the battery (6 volts and 12 Ampere hour). It was determined a calibration equation that includes a compensation for the temperature effect of gypsum blocks indirectly determine the moisture content with an $R^2 = 0.95$. The relative error percentage of the lysimeters was lower than 5% for larger volumes than 100 mL. The pressure transducers used in water level meters and tensiometers had an average $R^2 = 0.98$. This shows despite its low cost, that instrument is capable of determining the monitored variables. In addition, this technology can be applied to impart other variables measured *in situ*, depending on the objectives of the particular investigation concerned.

Palabras clave: instrumentation, water flow, vadose zone

Introducción

Para determinar la capacidad de un acuífero como recurso hídrico, es esencial cuantificar su recarga. En consecuencia, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para su estimación (Scanlon, Healy y Cook, 2002). A pesar de la variedad de métodos, muchos están limitados por la cantidad de parámetros disponibles, los que a su vez dependen del tiempo y del costo de la adquisición, operación y mantenimiento de la instrumentación requerida. En general, en los métodos aplicados en la zona vadosa, se necesita una instrumentación capaz de monitorear el contenido de humedad, el nivel freático y el potencial de succión a diferentes profundidades.

En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo presentar el diseño de un equipo de monitoreo hidrológico (EMH) capaz de monitorear el perfil del flujo de agua en un pozo de monitoreo, en función de cuatro variables obtenidas en el campo: el contenido de humedad, la presión de succión, el flujo en secciones transversales y el nivel freático. La instrumentación presentada se instaló en tres pozos de monitoreo del valle de Toluca con resultados satisfactorios. Debido a la magnitud de este trabajo, sólo se presentan los principios de operación y diseño del EMH. En un trabajo posterior se presentará la metodología de su instalación en los pozos de monitoreo y las mediciones realizadas con estos equipos en el campo.

Materiales y Métodos

Estructura del EMH

El equipo de monitoreo electrónico (EMH) se divide en tres secciones (véase figura 1). La primera sección (véase figura 1a) corresponde a la tarjeta principal (TP), que coordina todas las operaciones del EMH, incluidos los sensores en la zona vadosa que constituyen la segunda sección (véase figura 1b). La tercera sección (véase figura 1c) corresponde a los tres freáticos instalados en los piezómetros de los pozos de monitoreo en la zona saturada. Los datos medidos por el EMH se pueden almacenar localmente o transmitirse a través de un enlace mediante una red de telefonía celular.

La TP está conectada a una batería recargable sellada de 6 V que sirve como fuente de energía para alimentar a

todo el EMH. Además, contiene un microcontrolador PIC18F4550 que coordina los siguientes elementos: a) circuitos para administrar la fuente de alimentación, entre los que destacan reguladores *LDO* (*Low-DropOut*) caracterizados por tener un bajo consumo, así como requerir una reducida diferencia de voltaje entre la entrada y la salida. b) Un reloj en tiempo real (*RTC*) que internamente actualiza sus propios registros que contabilizan los segundos, minutos, horas y días de operación. Esta información es crítica para indicar al microcontrolador el momento en el que debe realizar las mediciones, así como durante la descarga y sincronización de la información. El *RTC* empleado tiene la matrícula DS1302 y es fabricado por la empresa MAXIM (2008). La comunicación de este circuito con el microcontrolador se establece mediante una transmisión en serie. c) Una memoria no volátil *EEPROM* con matrícula 24LC1025 y una capacidad de 1 Mega bit distribuidos en 128,000 registros de 1 Byte (Microchip, 2011). d) Una serie de comparadores para acondicionar la señal proveniente de tres lisímetros. e) Un oscilador y un multiplexor analógico para medir la resistividad eléctrica asociada al contenido de humedad en tres bloques de yeso.

La sección correspondiente a la zona vadosa consiste en un conjunto de instrumentos compuesto por: a) un bloque de yeso para medir el contenido de humedad, b) un lisímetro para medir el flujo de agua y c) un tensiómetro para medir el potencial de succión.

Los elementos de medición de los tres bloques de yeso del EMH (véase figura 1b), consisten en un par de electrodos de cobre de 8 cm de largo y 3 mm de diámetro, separados entre sí una distancia de 5 mm. El yeso disminuye las diferencias entre lecturas en tipos de suelo con distinto grado de salinidad y aporta una mayor estabilidad a las lecturas (Measurement Engineering Australia [MEA], 1998). De este modo, las variaciones en el contenido de humedad en el medio circundante se reflejan en la resistividad eléctrica entre las terminales de cada bloque de yeso.

El lisímetro consiste en un embudo en cuya salida se encuentra acoplada un material sintético hidrofílico, que conduce el agua capturada hacia una apertura acotada por dos terminales conductoras (TC). Al caer una gota, estas terminales cierran un circuito eléctrico acoplado a la etapa de acondicionamiento de la TP, misma que contabiliza el número de gotas que ingresan al área de captura del embudo.

Los tensiómetros consisten en un cilindro circular recto

(a) Tarjeta principal

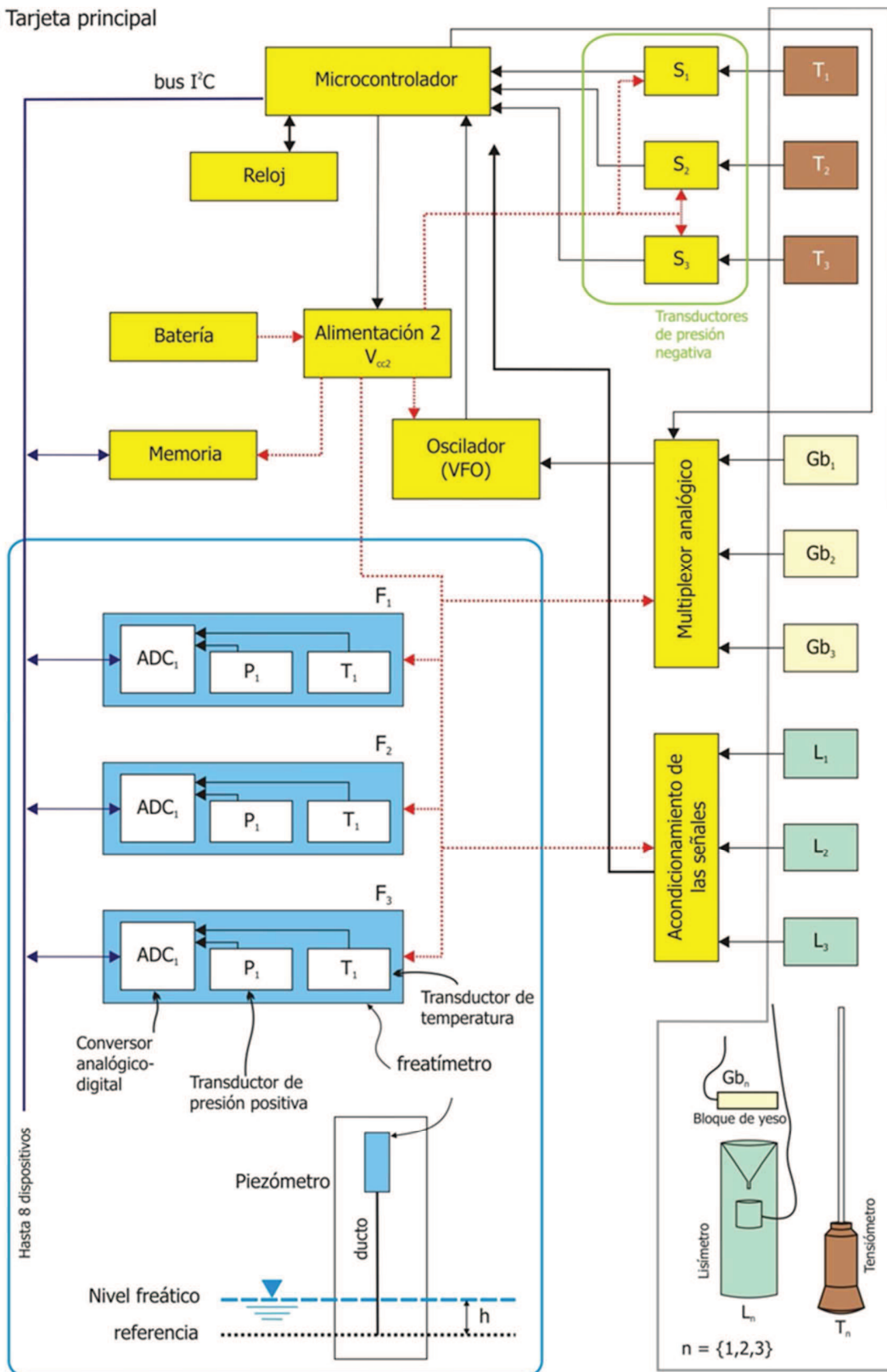


Figura 1. Diagrama a bloques del sistema de monitoreo hidrológico. Para su descripción se divide en tres secciones: (a) tarjeta principal, (b) instrumentación en la zona vadosa e (c) instrumentación en los piezómetros.

con un volumen interior de 350 mL, conectado con la superficie del suelo a través de un conducto flexible (véase figura 4.1b). La interfaz entre el agua contenida en el tensiómetro y el medio en el que se requiere medir la presión de succión está constituida por un material cerámico poroso. La longitud de los conductos esta en función de la profundidad a la que se instala cada tensiómetro. El diseño de los tensiómetros de este trabajo considera una instalación aproximadamente a 5 m, 10 m y 15 m, dependiendo de la estratigrafía de cada pozo. Esta característica los distingue respecto a los de otros estudios en que los tensiómetros se instalan desde unos cuantos centímetros hasta alrededor de 3 m a partir de la superficie del suelo (Araya, Gowing y Dise, 2010; Bradley, Clay, Clifford, Gerrard y Gurnell, 2010). La razón de esto obedece a las limitaciones que imponen las excavaciones necesarias para instalar los lisímetros a esa profundidad.

Para medir la profundidad del nivel freático en un pozo de monitoreo, el EMH emplea tres freatímetros. Para llevar a cabo esta misma función, algunos medidores comerciales miden la presión ejercida por la columna de agua en cuestión. Sin embargo, algunos de éstos determinan la presión absoluta y tienen el inconveniente de incluir el efecto de la presión atmosférica, por lo que se necesita un equipo adicional para restar dicha contribución (Rasmussen y Crawford, 1997). El método empleado en el freatímetro de este trabajo consiste en medir la presión diferencial entre la atmósfera y un tubo que se introduce en la columna de agua del pozo cuyo nivel se requiere calcular. De esta manera, la presión en el interior de dicho tubo es proporcional a la columna de agua. Puesto que la presión medida es diferencial, no necesita un medidor adicional para compensar la presión atmosférica (Salas-García, Gárfias, Llanos y Martel 2010). Además, cada freatímetro incluye un termómetro, cuya utilidad radica no sólo en la determinación de la temperatura *in situ* del agua subterránea; también permite hacer correcciones menores en la determinación del nivel freático a diferentes temperaturas.

Calibración del EMH

Para calibrar las lecturas de los sensores de resistividad eléctrica en los bloques de yeso, se determinó el contenido de humedad de las muestras por el método gravimétrico, el cual consiste en tomar una muestra del suelo, pesarla y desecarla en un horno a 110 °C sucesivamente hasta que su peso no cambie, lo cual ocurrió generalmente después de 8 horas en las muestras analizadas. La cantidad de agua extraída, determinada por la diferencia de peso, es precisamente la contenida originalmente en la muestra (Sanders, 1998).

Para medir cuantitativamente la calidad del ajuste de las funciones características de los sensores, se emplearon los siguientes indicadores: error medio absoluto [MAE], el error de raíz media cuadrática [RMSE], el coeficiente de determinación R^2 , (Legates y McCabe, 1999) y el coeficiente Nash y Sutcliffe [NS] (1970).

Para calibrar el número de gotas detectadas por el lisímetro, se vertieron diez volúmenes conocidos y se contabilizaron las gotas resultantes. Cuando el material hidrofílico del lisímetro está seco, se requiere superar un umbral en el que dicho material se satura lo suficiente como para comenzar a gotear. El volumen se cuantificó a partir de la

caída de la primera gota. Esto parte del supuesto de que en el interior de la columna el material hidrofílico tiene un contenido de humedad en equilibrio con el medio poroso circundante.

Los transductores de presión que están presentes en los tensiómetros se calibraron inicialmente con diez distintos valores de presión entre 0 y 50 kPa provenientes de una bomba de vacío y un manómetro analógico. Se realizó una segunda calibración con una columna de agua, estableciendo cinco valores de presión entre 0 y 20 kPa. Por otra parte, los transductores de los freatímetros se calibraron realizando mediciones de diez diferentes alturas de una columna de agua distribuidas en un rango de 20 kPa; de manera similar al proceso de calibración desarrollado en otros trabajos (Arzate, Álvarez, Yutis, Pacheco y López-Loera, 2006; Salas-García et al., 2010).

Resultados y discusión

Uno de los parámetros más importantes de desempeño de un sistema electrónico es su consumo de energía. Para el uso eficiente de ésta, el microcontrolador entra en un modo de bajo consumo después de verificar la hora del RTC. Este consumo resultó ser de 0.6 mA. La verificación de la hora actual se realiza a intervalos de 17 segundos, con una duración de 2 ms, lo cual representa un ciclo de trabajo de tan solo 0.011%, resultando en un ahorro de energía del 99.989 % durante los tiempos de espera con respecto al mismo sistema sin esta función. Cuando termina el tiempo de espera entre mediciones, el microcontrolador activa un regulador secundario que alimenta todos los sensores instalados en el pozo de monitoreo, con excepción del acondicionamiento de señal de los lisímetros, que siempre esta activo. El consumo de corriente durante este intervalo es de 13 mA durante 3.25 s.

Se determinaron una serie de coeficientes de aproximación de un polinomio de segundo orden para caracterizar la respuesta del oscilador que mide indirectamente la resistencia eléctrica de los bloques de yeso. En los 9 bloques de yeso que se calibraron, se obtuvo, en promedio, un RMSE = 1.16, $R^2 = 0.95$, MAE = 1.08 y $NS = -1.9$, lo que constituye una diferencia en las mediciones mucho menor que la diferencia del contenido de humedad de las muestras en el campo, debido a la heterogeneidad de medios porosos en medios naturales, por lo que el desempeño de estos sensores de contenido de humedad es apropiado para su aplicación en el campo. Al incorporar los resultados de un análisis paramétrico de la variación de la temperatura, T , la frecuencia medida en Hertz en el oscilador f_{VFO} , encontramos que en función de la resistencia eléctrica en los bloques de yeso, R_b y de la temperatura, T , en °C, se determinó f_{VFO} como (véase ecuación 1):

$$f_{VFO} = \frac{1.44}{1000(1500 + 2R_b)C} + (0.0162 \text{Log}(R_b) - 0.2334)T - 0.000014824R_b + 1.9108027 \quad (1)$$

En donde, a su vez R_b se relaciona con el contenido de humedad como (véase ecuación 2):

$$R_b = a_2\theta^2 + a_1\theta + a_0 \quad (2)$$

en donde a_0 , a_1 y a_2 son coeficientes de calibración particulares de cada bloque de yeso.

En lo que respecta a la calibración de los lisímetros, la relación resultó ser en promedio 1 gota = 50 μ L. A fin de percibir con mayor claridad la diferencia entre los valores medidos respecto a su aproximación lineal, se calculó el error relativo porcentual, mismo que es elevado (hasta un 20%) para valores menores a 20 mL; mientras que dicho error disminuye para volúmenes mayores. Esto se debe a que algunas gotas de agua quedan adheridas a las paredes internas del cono del lisímetro, y no drenan con la misma fluidez que para los valores más altos de flujo.

Los transductores empleados en los tensiómetros son del mismo tipo que los empleados en los freatímetros. Sin embargo, para los tensiómetros se usó el puerto complementario de vacío del transductor; mientras que para los freatímetros se usó el puerto de presión positiva. En consecuencia, los resultados de la calibración fueron muy similares, con un R^2 promedio de 0.98. Lo anterior es el resultado de una etapa de linearización incorporada por el fabricante en el mismo transductor. El rango de operación en los primeros fue de 0 a 50 kPa, y para los freatímetros de 0 a 20 kPa. Esto se debe al orden menor de las variaciones en el nivel freático. Además, para emplear la escala completa en los freatímetros sería necesario extender 2.5 m el ducto conectado a cada transductor, lo que incrementaría el peso del equipo, lo cual a su vez incrementaría el costo del cable de acero para sostener el sensor así como el riesgo de que el freatímetro quedara atorado dentro de los piezómetros.

Conclusiones

La calibración de los equipos ha demostrado que, a pesar de su bajo costo, esta instrumentación es capaz de determinar con un buen grado de precisión las variables monitoreadas. En particular, los resultados de la calibración de los bloques de yeso indican que aunque éstos tienen una respuesta cuantitativamente distinta, son capaces de aportar datos cuantitativos si se calibran individualmente. Se obtuvieron un conjunto de ecuaciones no lineales que describen la relación entre f_{VFO} , θ , R_b y T mediante coeficientes de ajuste individuales. Estos resultados concuerdan con estudios similares que también compensan el efecto de la temperatura en sus determinaciones (Castiglione, Shouse, Mohanty y Van Genuchten, 2005).

Los lisímetros presentaron una respuesta altamente lineal. Además, su diseño permite una instalación a profundidades de varios metros. Esto constituye una ventaja cuando se compara con otros estudios en los que la profundidad de instalación es mucho menor y, aunque algunos son más precisos, el diseño del tipo de lisímetro desarrollado en este trabajo permite su aplicación a profundidades mayores (Benli, Kodal, Ilbeyi, y Ustun, 2006; Nichol, Rowlett y Barbour, 2008). La calibración de los transductores empleados en los tensiómetros y freatímetros también mostró una tendencia lineal y su diseño evita los problemas asociados al uso de transductores de presión absoluta,

en conformidad con otros trabajos (Rasmussen y Crawford, 1997).

La etapa de transmisión de datos es una de las contribuciones de este trabajo al estado del arte de sistemas de monitoreo de parámetros hidrológicos subterráneos. A pesar de que desde hace algunos años existen investigaciones que emplean dispositivos electrónicos instalados en el campo para un monitoreo continuo, su uso es muy poco frecuente (Schwartz, Schreiber y Yan, 2008). En la actualidad, aunque existen estaciones de monitoreo remoto automáticas, en su mayoría tienen su aplicación en el registro de parámetros meteorológicos o tectónicos, estas últimas sobre todo ante el riesgo de erupciones volcánicas (Saltykov, Kugaenko, Sinitsyn y Chebrov, 2008; Lee y Wu, 2009). El equipo de transmisión desarrollado en el marco de este proyecto permite enviar no solo las variables de los sistemas aquí desarrollados. Esta tecnología puede ser aplicada para transmitir otras variables medidas *in situ*, en función de los objetivos de la investigación en particular de que se trate.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT), a la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) y a la Universidad del país Vasco (UPV) por la distinción en el otorgamiento de las becas y el apoyo al primer autor en el financiamiento para el desarrollo de la presente investigación. Asimismo, los autores agradecen el soporte logístico por parte del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA).

Referencias

- Araya Y. N., Gowing D. J. y Dise N. (2010). A controlled water-table depth system to study the influence of fine-scale differences in water regime for plant growth. *Aquatic Botany*, 92(1), 70-74.
- Arzate J. A., Álvarez R., Yutsis V., Pacheco J. y López-Loera H., (2006). Geophysical modeling of Valle de Banderas graben and its structural relation to bahía de Banderas, México. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 23 (2), 184-198.
- Benli, B., Kodal, S., Ilbeyi, A. y Ustun, H. (2006). Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. *Agricultural Water Management*, 81, 358-370.
- Bradley C., Clay A., Clifford N. J., Gerrard J. y Gurnell A. M. (2010). Variations in saturated and unsaturated water movement through an upland floodplain wetland, Mid-Wales, UK. *Journal Of Hydrology*, 393(3-4), 349-361.
- Castiglione P., Shouse P. J., Mohanty B. P. y Van Genuchten M. T. (2005). Analysis of temperature effects on tension infiltrometry of low permeability materials. *Vadose Zone J*, 4(3), 481-487.
- Lee W. H. K. y Wu Y. M. (2009). *Encyclopedia Of Complexity And Systems Science*.
- Legates, D. y M., G. J. (1999). Evaluating the use measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35, 233-241.

- Maxim. (Enero 1, 2008). Ds1302 Trickle-Charge Time-keeping Chip. Obtenido de <http://web.media.mit.edu/~msung/SAK2/DS1302Z.pdf>
- MEA. (Noviembre 13, 1998). Resurrecting the gypsum block for soil moisture. *Measurement Engineering Australia*, Obtenido de: <http://Www.Mea.Com.Au/Files/Publications/Pub-Sm04.Pdf>
- Microchip. (2011). *24AA1025/24lc1025/24FC1025. 1024k I2c™ CMOS Serial EEPROM*. Microchip Technology Inc.
- Nichol, C. F., Rowlett, D. K. y Barbour, S. L. (2008). A new standpipe lysimeter design for the measurement of soil matric suction. *Vadose Zone Journal*, 7, 919-929.
- Nash J. E. y Sutcliffe J. V. (1970), River flow forecasting through conceptual models. Part I- a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Rasmussen T. C. y Crawford L. A. (1997). Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers. *Groundwater*, 35(3), 502-511.
- Salas-García J., Gárfias J., Llanos H. y Martel R. (2010). Diseño y aplicación de instrumentación para la caracterización hidrometeorológica e hidrogeológica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(2), 233-247.
- Saltykov V., Kugaenko Y., Sinitsyn V. y Chebrov V., (2008), Precursors Of Large Kamchatka Earthquakes Based On Monitoring Of Seismic Noise. *Journal Of Volcanology And Seismology*, 2(2), 94-107.
- Sanders L., (1998). *A manual of field hydrogeology*. New Jersey. USA.
- Scanlon B. R., Healy R. W. y Cook P. G., (2002), Choosing Appropriate Techniques For Quantifying Groundwater Recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18-39.
- Schwartz B. F., Schreiber M. E. y Yan T., (2008), Quantifying Field-Scale Soil Moisture Using Electrical Resistivity Imaging. *Journal Of Hydrology*, 362(3-4), 234-246.