

Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores

• María Flores-Medina • Francisco Flores-García • Víctor Velasco-Martínez •
Instituto Tecnológico de la Laguna, México

• Guillermo González-Cervantes* •
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

*Autor de correspondencia

• Francisco Jurado-Zamarripa •
Instituto Tecnológico de la Laguna, México

Resumen

Flores-Medina, M., Flores-García, F., Velasco-Martínez, V., González-Cervantes, G., & Jurado-Zamarripa, F. (septiembre-octubre, 2015). Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(5), 75-88.

El agua se ha convertido en un recurso escaso y es primordial para la producción de alimentos. Por esto, la generación de nuevos métodos para la administración y cuidado del vital recurso es cada día más necesaria. En este artículo se presenta un sistema que facilita el monitoreo continuo de la humedad del suelo basado en una nueva tecnología de comunicación: Red Inalámbrica de Sensores (RIS), tecnología emergente que se ha estado utilizando en el ámbito agrícola en los últimos años. Como parte del sistema, se diseñan y desarrollan tres nodos sensores enfocados al monitoreo de humedad en suelo. Se seleccionaron y acoplaron sensores que miden la humedad del suelo con el principio de reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (RDF); se describe el método de calibración con el método volumétrico como referencia para obtención de los parámetros de ajuste en los nodos sensores de la RIS. Se diseñó una interfaz para visualización y almacenamiento de la información de la RIS; la información fue enlazada a una cuenta Dropbox para accederla de forma remota. Se presenta después la instalación del sistema RIS en condiciones controladas como prueba y validación de la estabilidad y funcionamiento del sistema en el monitoreo de la humedad del suelo. Finalmente se analiza la importancia de la contribución de esta nueva tecnología, para facilitar el monitoreo de la humedad en suelo y otras variables en los ciclos de cultivo.

Palabras clave: humedad de suelo, redes inalámbricas de sensores, sistema de monitoreo automático.

Introducción

El agua es uno de los recursos indispensables para que los alimentos sean producidos de forma correcta y posean buena calidad, así como los nu-

Abstract

Flores-Medina, M., Flores-García, F., Velasco-Martínez, V., & González-Cervantes, G., & Jurado-Zamarripa, F. (September-October, 2015). Monitoring Soil Moisture using a Wireless Sensor Network. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(5), 75-88.

Water has become a scarce resource and is crucial to the production of food. Therefore, it is increasingly necessary to generate new methods to manage and conserve this vital resource. This article presents a system that helps to continuously monitor soil moisture using a new communications technology— Wireless Sensor Networks (WSN). This is an emerging technology that has been used in agriculture over recent years. Part of the system includes the design and development of three sensor nodes to monitor soil moisture. Sensors were selected and coupled to measure soil moisture using the principle of Frequency Domain Reflectometry. The calibration method is described, which is based on the volumetric method as a reference to obtain fit parameters for the WSN nodes. An interface was designed to display and store the WSN information and the information was linked to a Dropbox account for remote access. The study presents the installation of the WSN system under controlled test conditions as well as the validation of the stability and functioning of the system for monitoring soil moisture. Lastly, the importance of this new technology to aid the monitoring of soil moisture and other variables in the crop cycles is analyzed.

Keywords: Soil moisture, wireless sensor network, automated monitoring system.

Recibido: 12/12/2014

Aceptado: 02/06/2015

trientes necesarios para que puedan ser llevados a la mesa de los hogares (Muñoz-Arboleda, 2009).

La problemática del agua en zonas desérticas ha aumentado con la escasez de agua en el mundo. La Laguna, formada por las principales

ciudades productoras de la región, pertenece a una zona semidesértica, que enfrenta desde hace años la problemática del abastecimiento de agua dirigido a su población y a sus múltiples actividades industriales (Guzmán-Soria *et al.*, 2006). La agricultura es uno de los sectores con mayor consumo de agua (80%) en la producción de alimentos (Pfister, Bayer, Koehler, & Hellweg, 2011) y la actividad agrícola es de las más sobresalientes en la Comarca Lagunera. Por esto se han comenzado a investigar alternativas para mejorar la productividad de este recurso.

Para lograr un proceso de cultivo eficiente y evitar el desperdicio de agua, es necesario conocer las necesidades hídricas de cada cultivo. Para ello se debe evaluar el comportamiento del agua en el sustrato, determinar su frecuencia de riego y la cantidad a suministrar, sin llegar al derroche (Santos-Pereira, De-Juan-Valero, Picornell-Buendía, & Martín-Benito, 2010). Conocer y monitorear la humedad de suelo en los cultivos es parte fundamental del análisis del balance hídrico de las plantas, pues ayuda a la determinación de humedad aprovechable para ellas, evaluar la pérdida de agua por evaporación y drenado, analizar qué tipo de sustrato es el adecuado acorde con el comportamiento de agua-suelo-planta y las condiciones climáticas que favorezcan el cultivo que se está produciendo (Salcedo-Pérez *et al.*, 2007).

Existen métodos directos o indirectos para la medición de la humedad en suelo (Santos-Pereira *et al.*, 2010). Los métodos directos se llevan a cabo de forma manual por los especialistas: requieren tiempo, instalaciones especiales, equipos y de manera continua se afecta el área de cultivo. Los métodos indirectos miden *in situ*. Se constituyen por dispositivos especiales con diferentes principios de funcionamiento (Florentino, 2006). A pesar de que los métodos indirectos son más rápidos y precisos, se tiene el inconveniente de que se requiere llevar a campo equipos que interpreten, extraigan y almacenen los datos, como los data logger, o establecer instalaciones especiales y costosas para el instrumental de medición. Por tanto, en ambos métodos se vuelve difícil la obtención y

monitoreo continuo de la variable, complicando el registro y la observación de los cambios de humedad en el suelo que se da en los ciclos de cultivo.

Una tecnología que se ha estado implementando en diferentes áreas (Luo, 2012) son las redes inalámbricas de sensores (RIS o WSN, por sus siglas en inglés). Una RIS consiste de varios módulos electrónicos (nodos sensores) que tienen acoplados diferentes sensores cada uno. Los nodos sensores son distribuidos en un área general a monitorear. Cada nodo sensor mide de forma puntual las variables, utilizando los sensores que le fueron incorporados, para luego procesar esta información. Después la información en el nodo sensor es transmitida de modo estratégico e inalámbrico entre los demás nodos sensores de la RIS o de manera directa a un nodo coordinador. El nodo coordinador por lo común es conectado a un servidor, donde se registra toda la información de la RIS (García, Bri, Sendra, & Lloret, 2010; Hema, Murugan, & Chitra, 2012; Kumar, Øvsthus, & Kristensen, 2014; Rawat, Singh, Chaouchi, & Bonnin, 2014).

Los sistemas RIS realizan un monitoreo continuo de variables sin necesidad de un mantenimiento continuo a la electrónica. Los componentes de la RIS deben ser diseñados y acoplados según las necesidades de la aplicación, para que sea un sistema desatendido y fiable. Los nodos sensores pueden ser alimentados por energías renovables, haciéndolos una tecnología autónoma y sustentable (Seah, Eu, & Tan, 2009). Como la comunicación de datos utiliza un medio inalámbrico, su instalación es sencilla y los costos son más accesibles: los sistemas RIS facilitan el acceso a la información desde una oficina sin necesidad de ir a campo. Una RIS puede formar parte de un sistema de control, haciendo que los nodos sensores lleven a cabo acciones como abrir válvulas de control de riego, encender ventiladores, extractores o aparatos de clima, accionar aspersores, etc., convirtiéndose en redes inalámbricas de sensores y actuadores (RISA) (Aqeel-ur-Rehman *et al.*, 2010; Matijevics & János, 2010).

Los sistemas basados en RIS han sido utilizados para facilitar el monitoreo de variables agrícolas y meteorológicas (Aqeel-ur-Rehman, Azafar-Abbasi, Islam, & Ahmed-Shaikh, 2014; Mathurkar & Chaudhari, 2013; Mercado *et al.*, 2012; Wang, Zhang, & Wang, 2006), ya sea en campo abierto (Escolar-Díaz, Carretero-Pérez, Calderón-Mateos, Marinescu, & Bergua-Guerra, 2011; Gopalakrishna-Moorthy, Yaashuwanth, & Venkatesh, 2013; Hwang, Shin, & Yoe, 2010; Patil, Davande, & Mulani, 2014; Santhosh & K-Paulose, 2012; Yu, Pute, Han, & Zhang, 2013) o en invernaderos (Chaudhary, Nayse, & Waghmare, 2011; Kasaei, Kasaei, & Kasaei, 2011). También han ayudado al monitoreo de diferentes cultivos con estructuras de red pequeñas o grandes (Ruiz-García, Lunadei, Barreiro, & Robla, 2009).

En investigaciones recientes se habla de aplicaciones de sistemas basados en RIS enfocadas al monitoreo de humedad en suelo para administrar y aprovechar al máximo el consumo de agua en cultivos (Khan, Ali, Suryani, Ahmad, & Zakarya, 2013; Kotamäki *et al.*, 2009; Majone *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2011). La figura 1 muestra la estructura y dispersión de un sistema basado

en RIS para monitoreo de humedad del suelo en agricultura.

El Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el Instituto Tecnológico de la Laguna (ITL), colaboran en la creación de nuevos instrumentos basados en RIS para el monitoreo de variables en cultivos en tiempo real, ya sea en campo abierto o invernadero.

En este artículo se presenta el diseño de un primer sistema prototipo utilizando RIS, enfocado a facilitar el monitoreo continuo de humedad en suelo. También se presenta el diseño de una interfaz para observación y almacenamiento de los datos. Se describe el proceso de calibración y la integración de las sondas de humedad con los nodos sensores que conforman la RIS, así como la validación operativa del sistema en un invernadero.

Material y métodos

Las pruebas del sistema RIS para el monitoreo de la humedad en suelo se realizaron en un

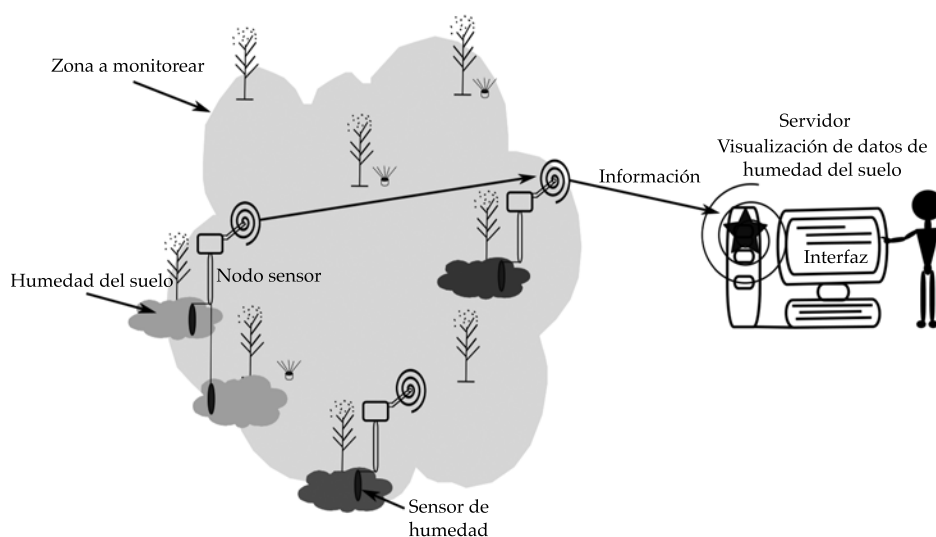


Figura 1. Modelo conceptual de un sistema de monitoreo de humedad en suelo basado en RIS.

invernadero en la ciudad de Torreón, Coahuila, México (latitud 25° 35' 31.7", longitud -103° 22' 40"). En este invernadero se cultiva una planta ornamental (*Caladium bicolor*) (Ortiz-Sanchez et al., 2013), que para esta investigación se consideró como un estudio de caso.

Características de la RIS

El sistema está formado por tres prototipos de nodos sensores a los cuales les fueron adaptados sondas que miden humedad en suelo, un nodo coordinador y una interfaz gráfica de usuario. Los nodos sensores están contruidos con la tecnología RIS Waspote PRO Libelium (Libelium, Zaragoza, España).

El nodo sensor 1 tiene adaptados dos sondas de humedad VH400 (SH5 y SH6) para medir humedad en suelo. También le fue integrado el sensor SHT11 (THP1) para medir temperatura ambiental, humedad relativa y punto de rocío. Al nodo sensor 2 se le adaptaron cuatro sondas de humedad VH400 (SH1, SH2, SH3 y SH4) y al nodo sensor 3 se le incorporó sólo una sonda de humedad VH400 (SH7).

La sonda o sensor VH400 (Vegetronix, River-ton, Estados Unidos) es de alta frecuencia, que mide humedad de suelo con respuesta lineal por tramos, con un rango de 0 a 50% VWC. Es un método indirecto que utiliza el principio de reflectometría en el dominio de la frecuencia (RDF) (Vita-Serman, Schugurensky, Carrión, & Rodríguez, 2006). La sonda emplea el principio de emisión de señales de radiofrecuencia, donde la señal reflejada es proporcional a la humedad de suelo existente (Capraro et al., 2008).

El sensor SHT11 (Sensirion, Stäfa, Suiza) maneja rangos de temperatura entre -40 y 123.8 °C, con precisión de ± 0.4 °C, humedad relativa de 0 a 100% HR, con precisión de $\pm 3\%$ HR, y a partir de estas dos variables se calcula el porcentaje de punto de rocío, según lo especificado en la hoja de datos del sensor. Ambos sensores son de bajo costo, buena precisión en su rango de trabajo y bajo consumo energético.

Cada uno de los nodos posee un panel solar de 7.2V (Libelium, Zaragoza, España), que

aprovecha la radiación solar de la región para recargar de manera continua la batería de litio de 6 600 mAh (Libelium, Zaragoza, España), que alimenta la electrónica del nodo sensor y los sensores.

Interfaz

La interfaz de usuario fue programada como un añadido en la plataforma de *software* libre *Quantum GIS* (QGIS) *Lisboa* v. 1.8 (OSGeo, Beaverton, Estados Unidos). Consiste en una ventana con una fila para cada nodo sensor perteneciente a la red, donde se puede observar la información de la última transmisión de datos recibidos. Por otra parte, los datos de eventos anteriores se van almacenando en archivos de texto csv. Los archivos de texto se almacenan en relación nodo sensor-fecha y cada archivo posee los datos monitoreados de un día completo del nodo sensor. Estos datos fueron enlazados a una cuenta de la nube Dropbox (Dropbox, Inc., San Francisco, USA), para que puedan ser observados desde otras ubicaciones. La figura 2 muestra la interfaz de usuario.

Cada nodo sensor realiza un ciclo de despertar, realizar y procesar mediciones, transmitir, esperar comandos por un minuto y dormir 14 minutos para el ahorro de energía. La interfaz puede mandar parámetros de configuración durante el tiempo de espera de cada sensor. Los datos transmitidos por cada nodo sensor son fecha, hora y el valor en los sensores agrícolas. También transmite otros datos técnicos para monitorear el correcto funcionamiento del sistema, como el nivel de batería. La interfaz cuenta con un botón de "Añadir Capa", que después permitirá añadir la capa vectorial de los datos capturados al SIG, *Quantum GIS* (QGIS).

Calibración de las sondas de humedad

A un volumen de 1 000 cm³ del sustrato lombri-composta se le añadió agua en incrementos de diferentes volúmenes conocidos. El sustrato fue secado antes por 24 horas en un horno a 105 °C. En cada incremento de agua se tomó la lectura



Figura 2. Interfaz gráfica en QGIS.

con cada sonda. Se calculó la relación de contenido volumétrico de agua (VWC, por sus siglas en inglés, equivalente a las unidades $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}\%$ o $\theta_v\%$) de las muestras y el VWC leído por las sondas, usando las ecuaciones de fabricante. Se obtuvo el error promedio de la comparativa de los dos VWC. Estos errores se presentan en el cuadro 1 de la sección de resultados.

Se realizó un ajuste en cada sonda. Utilizando las ecuaciones de fabricante, se calcularon los voltajes esperados para el VWC de cada muestra. Se obtuvo el error promedio de voltaje de cada sonda. Este error promedio se programó como *offset* en cada sonda. Se recalcularon los VWC con las ecuaciones de fabricante, utilizando los voltajes de calibración. Después se calcularon los intervalos de confianza de cada uno de los errores promedio a 95%, utilizando las diferentes muestras realizadas. Los resultados se tienen en el cuadro 1.

Instalación de la RIS

El invernadero donde fue instalado el sistema es tipo tubulado forrado de polietileno, cubierto de malla sombra. Las medidas son 50 m de largo, 10 m de ancho y 6 m de altura. En el interior del invernadero existe un sistema de aire lavado para disminuir la temperatura y aumentar la humedad relativa; dos extractores en la parte frontal están continuamente activados para extraer el aire caliente. En la primera mitad del invernadero se maneja un sistema de nebulización extrafino para la humidificación del ambiente.

Se colocaron los nodos sensores del sistema en tres secciones experimentales del invernadero (figura 3). El nodo sensor 1 fue instalado en una superficie de suelo de 18 m x 3 m, que tiene un sustrato mixto, donde se tienen varias líneas de plantas. Cada línea se riega con un sistema de cintilla. En un primer grupo de

Cuadro 1. Resultados de calibración de sondas.

Sensor	Error promedio VWC sin ajuste ($\text{cm}^3/\text{cm}^3 \%$)	Offset de ajuste en voltaje (V)	Error promedio VWC con ajuste ($\text{cm}^3/\text{cm}^3 \%$)	I.C. 95% error promedio VWC con ajuste ($\text{cm}^3/\text{cm}^3 \%$)
SH1	-27.5662	-0.7446	0.2771	± 1.2458
SH2	-26.3693	-0.7018	-1.8720	± 2.2766
SH3	-23.0769	-0.5789	-1.7680	± 2.1912
SH4	-10.6266	-0.3624	-0.3051	± 1.0500
SH5	-28.7696	-0.8347	-0.6428	± 1.2339
SH6	-12.2114	-0.3689	-0.6849	± 1.7369
SH7	-32.5981	-0.8607	-1.8494	± 2.6314

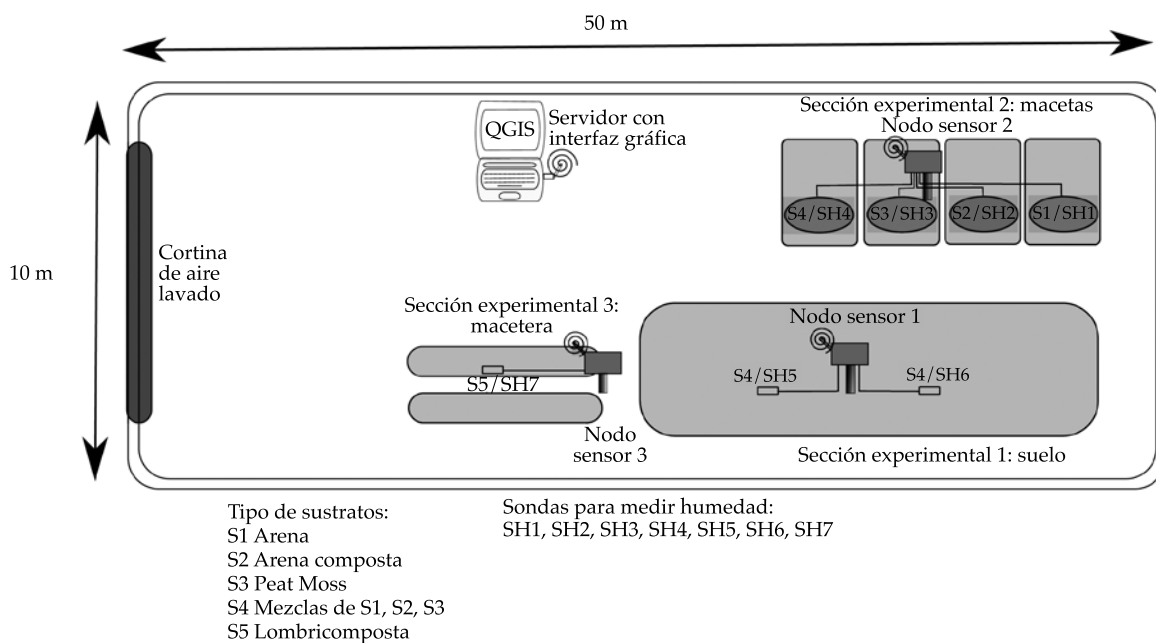


Figura 3. Esquema de instalación del sistema en invernadero de cultivo de caladio.

plantas se colocó la sonda SH5 y, en otro grupo, la sonda SH6. El nodo sensor 2 se instaló en la sección 2, donde se estaba realizando un estudio en cuatro grupos de macetas; cada grupo tenía un diferente tipo de sustrato. En una maceta de cada grupo se colocaron las sondas SH1, SH2, SH3 y SH4. El nodo sensor 3 está en una macetera de madera con medidas de 3 m x 40 cm, donde se tenía otro sustrato diferente a los anteriores. Todas las sondas se

instalaron en la superficie del sustrato, cerca de la raíz de la planta y alejadas de la salida de agua del sistema de riego para no afectar las lecturas.

Los paneles solares se colocaron en la parte superior de cada nodo a 23° de línea vertical con orientación hacia el sur, para aprovechar más la radiación solar. A unos metros de las secciones experimentales se conectó a una computadora un nodo coordinador, Waspnote Libelium

(Libelium, Zaragoza, España), donde se instaló el QGIS Lisboa v. 1.8 y la interfaz de usuario diseñada.

Se monitoreó humedad de suelo en los diferentes secciones, las 24 horas del día con eventos de datos cada 15 minutos por un periodo de seis días. El nodo sensor 3 se incorporó el segundo día del periodo experimental.

Resultados

La figura 4 muestra los nodos sensores instalados físicamente (figura 4a, 4b y 4c) y la forma en que se instalaron las sondas en la superficie del sustrato (figura 4d).

El cuadro 1 contiene los errores promedio antes y después del ajuste. También incluye los intervalos de confianza y el *offset* programado de cada sonda.

La figura 5 muestra el comportamiento de las sondas con calibración para cada uno de los nodos sensores.

La figura 6 muestra el monitoreo continuo de los tres nodos sensores durante el periodo de prueba.

Discusión

Sondas

Con el ajuste para cada una de las sondas, el error disminuyó de manera considerable, como puede observarse al comparar los errores promedio del cuadro 1. La sonda SH7 presentó el mayor de los errores incluso con el ajuste realizado. En la figura 5c se observa la saturación de la sonda SH7, presentando una respuesta menor de 50% VWC asegurada por el fabricante. También menciona que no se requiere de una calibración (Vegetronix Inc., n.d.), sin embargo estos resultados sugieren lo contrario, ya que muestran un error de desplazamiento diferente para cada sonda. Además, el error presentado por la sonda SH7 (cuadro 1) indica que el error de desplazamiento puede causar que una sonda no cubra el rango indicado por el fabricante de 0 a 50% VWC. Las sondas deben ser calibradas

acorde con el sustrato donde se va a emplear. Los datos obtenidos de la calibración de cada sonda deben ser ajustados y programados en el nodo sensor correspondiente, de esto depende que el sistema posea alta precisión en las lecturas. El proceso de calibración se realizó en un sustrato, pero debe ser realizado para cada sustrato.

Comparadas con otros métodos para obtener la humedad del suelo, las sondas VH400 mostraron mayor sensibilidad a los cambios de humedad. Esto permitió a los nodos sensores dar una lectura rápida y confiable después del ajuste de calibración, sin necesidad de afectar el área donde se quiere conocer la humedad de suelo. El precio es más económico que otras con el mismo principio de funcionamiento.

Monitoreo

El sistema RIS monitoreó humedad de suelo en forma continua y estable durante el periodo de prueba, como se puede observar en las gráficas de la figura 6. La sonda SH2 tuvo un problema técnico durante este periodo, por lo cual se perdieron las lecturas de uno de los grupos de la sección 2. El comportamiento de la humedad superficial en cada grupo es distinto, esto por las diversas características de los sustratos. Se observa que el comportamiento es cíclico en los diferentes días. La planta es regada por la mañana, presentando su máximo de humedad de día. Luego la humedad comienza a descender en las horas pico de temperatura. Por la tarde presenta la humedad más baja registrada en el día. Después la humedad comienza a ascender, manteniendo esa tendencia durante toda la noche.

Interfaz

La interfaz de usuario permitió observar los datos en el momento en que fueron transmitidos (figura 2). Con los datos almacenados se realizó el análisis y graficado en la hoja de cálculo Excel 2007 (Microsoft Office, Redmond, USA). Sin embargo, la interfaz gráfica se diseñó en el



a) Nodo sensor 1



b) Nodo sensor 2



c) Nodo sensor 3



d) Instalación superficial de sondas VH400

Figura 4. Instalación de sistema en invernadero de caladío.

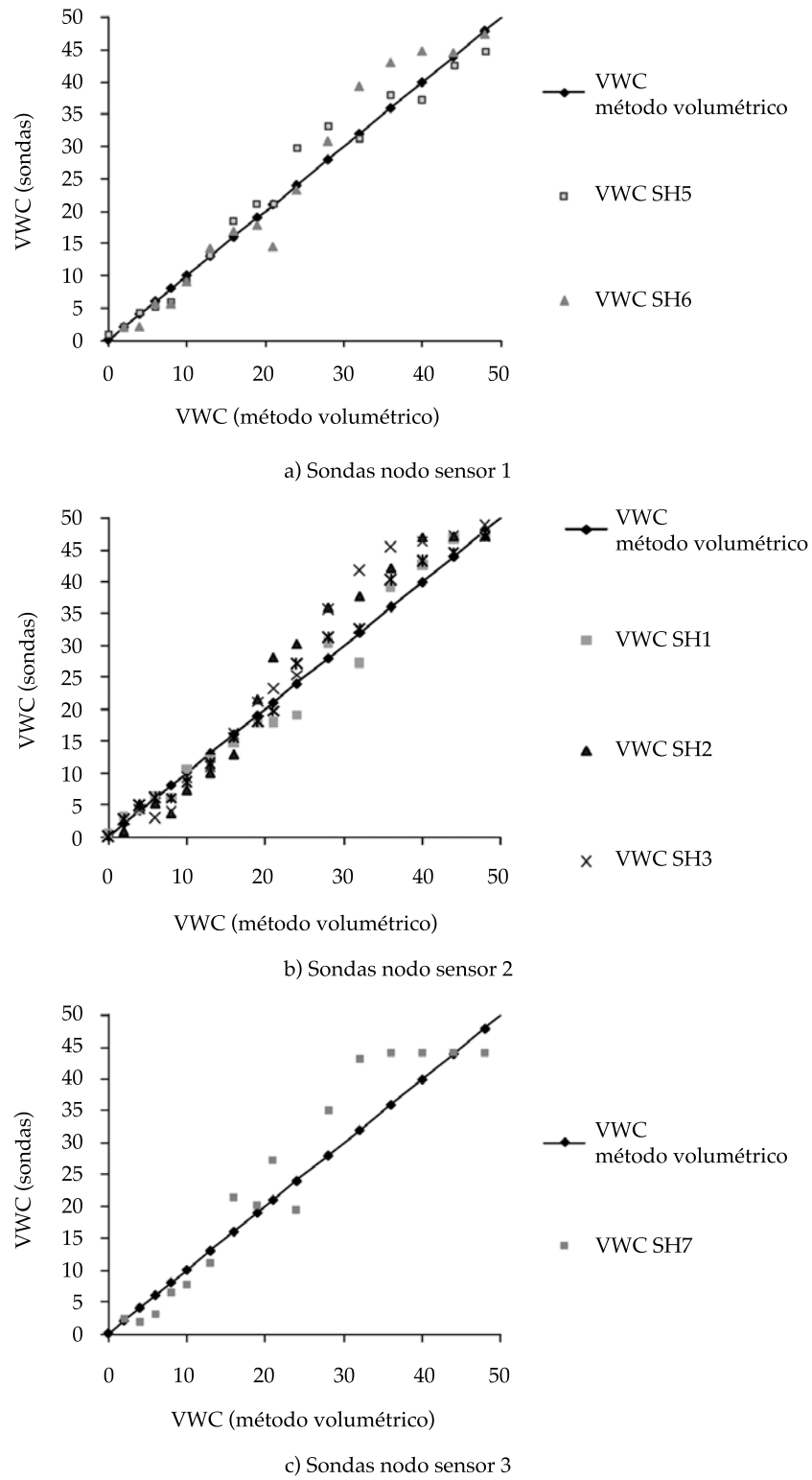
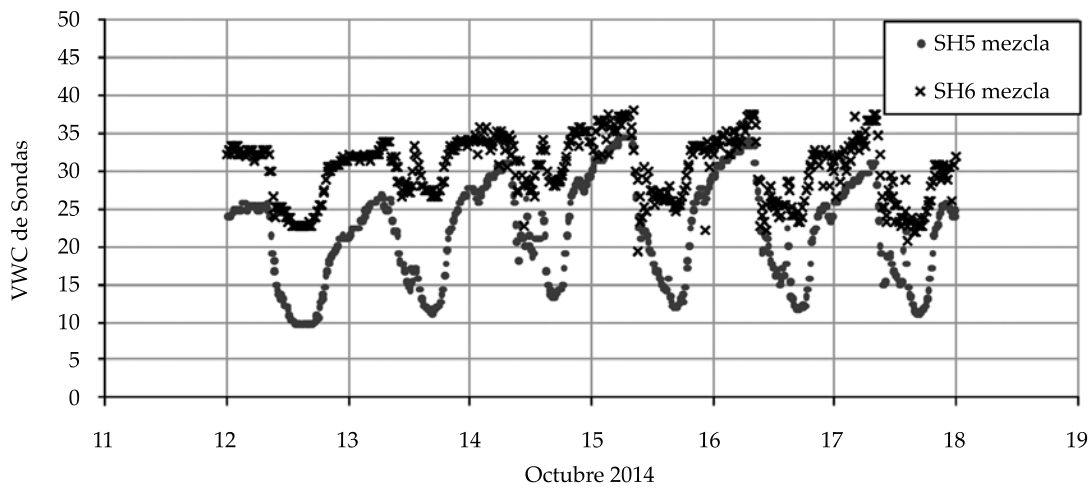
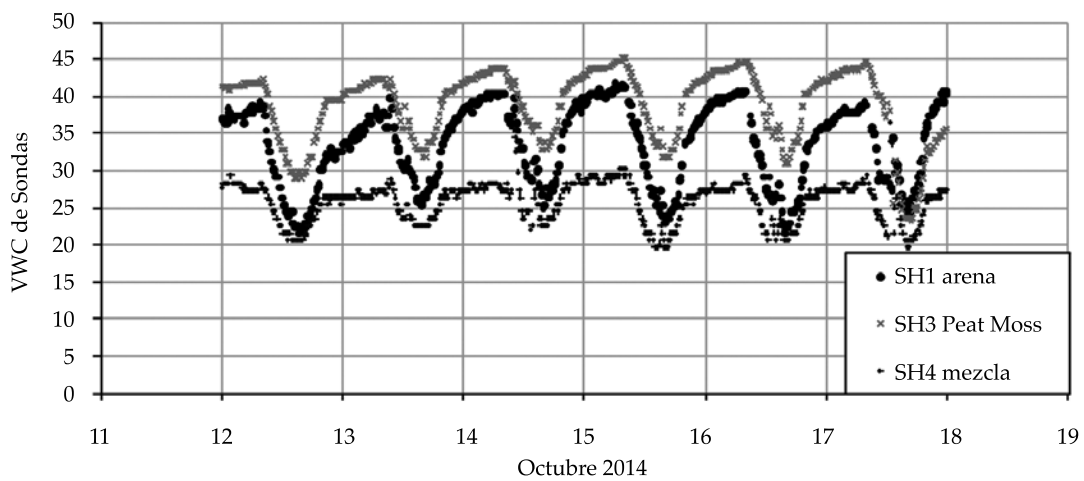


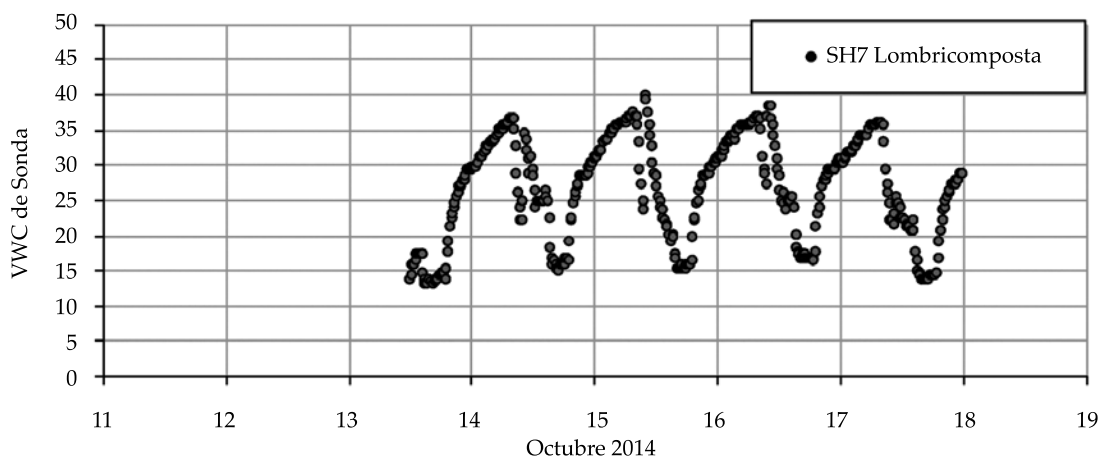
Figura 5. Respuesta de sondas con calibración.



a) Nodo sensor 1



b) Nodo sensor 2



c) Nodo sensor 3

Figura 6. Monitoreo continuo del sistema.

software de acceso libre QGIS. En la actualidad se está trabajando en una versión para acoplar trabajo realizado antes (Flores-Medina, Velasco-Martínez, Flores-García, & Cervantes-González, 2013) y ser validado en campo de cultivo. Esto permitirá visualizar y analizar la información con las herramientas de un SIG, almacenando la información en una base de datos PostGIS (Boluwade & Ferdinand, 2011; Steiniger & Hay, 2009).

Sistema

El ahorro de recursos no renovables como el agua es cada día más considerado en el ámbito científico y tecnológico. El enfoque del presente trabajo fue considerar y conocer la implementación de nuevas tecnologías que permitan mejorar precios, instalaciones y tiempos en la producción agrícola en la Laguna, para la administración de agua y otros recursos.

Varios países como España (López-Fidalgo, 2010; Valdiviezo, 2009), Estados Unidos (Lea-Cox, Kantor, Anhalt, Ristvey, & Ross, 2007), Argentina (Mercado et al., 2012), India (Kar, De Sarkar, A., & Mukherjee, 2012), y otros (Arai, 2011; Ayday & Safak, 2009) han trabajado y planeado la administración de recursos de campo agrícola con la tecnologías RIS. En México se ha comenzado a estudiar e implementar esta tecnología para aplicación agrícola, como en el caso de la Universidad de Ensenada y la Universidad de Colima (Aquino-Santos, González-Potes, Edwards-Block, & Virgen-Ortiz, 2011; Aquino-Santos, Villaseñor-González, Rangel-Licea, Álvarez-Cárdenas, & Edwards-Block, 2010; Cárdenas-Tamayo, Lugo-Ibarra, & García-Macías, 2010). Considerando que en Ensenada poseen un clima similar al de la región Laguna (árido y caliente), la tecnología RIS ha dado buenos resultados, al igual que estos primeros pasos de investigación. Un sistema similar al de este estudio se está probando en La Paz, México (Gutiérrez, Villa-Medina, Nieto-Garibay, & Porta-Gándara, 2013). A diferencia del sistema propuesto, esa investigación va enfocada a enlazar los datos a un sitio Web.

Por otra parte, el sistema diseñado se enfoca al monitoreo de la variable humedad de suelo; sin embargo, los nodos sensores pueden trabajar con otros sensores para variables agrícolas o climáticas de interés, como en el caso del nodo sensor 1, que además de las sondas de humedad VH400 tiene implementado un sensor SHT11 de temperatura y otras variables. Se tiene la capacidad de instalar más sensores agrícolas en el mismo nodo sensor. Está preparado para trabajar no sólo en invernadero, que es un monitoreo a corta distancia, sino que se puede implementar en área de cultivo abierto a distancias más grandes, en diferentes cultivos y distintas condiciones agrícolas, siempre y cuando se considere la calibración de los sensores y los parámetros de comunicación de la RIS. Sin embargo, no se debe dejar de lado que es un instrumento para facilitar información a los especialistas, para el análisis de los eventos que ocurren en campo y darles elementos para la toma de decisiones.

Conclusiones

En la búsqueda de nuevas tecnologías para apoyar la optimación del uso de agua para la producción de cultivos, se encontró que el sistema propuesto basados en RIS es un instrumento que facilita el monitoreo de la medición de humedad del suelo, y puede formar parte de una nueva metodología para el monitoreo y administración del agua en la Comarca Lagunera. La descripción de la metodología de calibración de las sondas y obtención de parámetros de operación hacen que se pueda obtener una medición de la humedad de suelo confiable y rápida. La creación de una interfaz para visualizar y almacenar la información permitió tener la información disponible para su análisis y como un historial de eventos. El sistema proporcionó datos del contenido volumétrico de agua en tiempo real y de modo continuo, en condiciones controladas y presentando variaciones por los diferentes tipos de suelo. El sistema puede ser traspolado a campo con la debida calibración de los elementos y pretende ser un instrumento

que aporte información detallada y de precisión para observación de los aportes y pérdidas de agua que ocurren en los ciclos de riego. La información del monitoreo de humedad de suelo por el sistema RIS puede ser analizada y utilizada en la toma de decisiones por los expertos en el uso y manejo de agua en cultivos.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología, por becas para estudios de posgrado. A los Investigadores del INIFAP, por fomentar la creación de tecnología e innovación mexicana. Al propietario del invernadero, por hacer posible la implementación del sistema para su investigación, y a todo el equipo de trabajo que brindó alguna aportación en esta primera etapa de la investigación.

Referencias

- Aqeel-ur-Rehman, Azafar-Abbasi, A., Islam, N., & Ahmed-Shaikh, Z. (2014). A Review of Wireless Sensors and Networks' Applications in Agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36(2), 263-270, doi:10.1016/j.csi.2011.03.004.
- Aqeel-ur-Rehman, Shaikh, Z. A., Yousuf, H., Nawaz, F., Kirmani, M., & Kiran, S. (2010). Crop Irrigation Control using Wireless Sensor and Actuator Network (WSAN). In *International Conference Information and Emerging Technologies (ICIET)* (pp. 1-5), doi:10.1109/ICIET.2010.5625669.
- Aquino-Santos, R., González-Potes, A., Edwards-Block, A., & Virgen-Ortiz, R. A. (2011). Developing a New Wireless Sensor Network Platform and its Application in Precision Agriculture. *Sensors*, 11(1), 1192-211, doi:10.3390/s110101192.
- Aquino-Santos, R., Villaseñor-González, L. A., Rangel-Licea, V., Álvarez-Cárdenas, O., & Edwards-Block, A. (2010). Performance Analysis of Routing Strategies for Wireless Sensor Networks. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 52, 185-195.
- Arai, K. (2011). Wireless Sensor Network for Tea Estate Monitoring in Complementally Usage with Satellite Imagery Data Based on Geographic Information System (GIS). *International Journal of Ubiquitous Computing (IJUC)*, 1(2), 12-21.
- Ayday, C., & Safak, S. (2009). Application of Wireless Sensor Networks with GIS on the Soil Moisture Distribution Mapping. In *Symposium GIS Ostrava 2009 - Seamless Geoinformation Technologies* (pp. 1-6). Ostrava, Czech Republic. Retrieved from http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2009/sbornik/Lists/Papers/040.pdf
- Boluwade, A., & Ferdinand, A. (2011). The Design and Development of Spatial Database Management Systems (SDMS) for Hydrographic Studies using Coupled Open-Source GIS and Relational Database. Conceptual Design Logical Database design Physical Database Design Database Implementation. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 12(1), 286-291.
- Capraro, F., Tosetti, S., Vita, F., Patiño, D., Schugurensky, C., & Fullana, R. (2008). Sistema de monitoreo continuo de la humedad en suelo para el control de riego en un olivar (*Olea europaea* L.) empleando LabVIEW (pp. 28-42). In *37° JAIIO. Jornadas de Inf. Ind. - Agroinformática (JII 2008 Agroinfo)*, Santa Fe, Argentina.
- Cárdenas-Tamayo, R. A., Lugo-Ibarra, M. G., & García-Macías, J. A. (2010). Better Crop Management with Decision Support Systems Based on Wireless Sensor Networks. In *7th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE 2010)* (pp. 412-417). Tuxtla Gutiérrez.
- Chaudhary, D. D., Nayse, S. P., & Waghmare, L. M. (2011). Application of Wireless Sensor Network for Greenhouse Parameter Control in Precision Agriculture. *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, 3(1), 140-149. doi:10.5121/ijwmn.2011.3113 140.
- Escolar-Díaz, S., Carretero-Pérez, J., Calderón-Mateos, A., Marinescu, M.-C., & Bergua-Guerra, B. (2011). A Novel Methodology for the Monitoring of the Agricultural Production Process Based on Wireless Sensor Networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 252-265, doi:10.1016/j.compag.2011.02.004
- Florentino, A. (2006). Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. *Venesuelos*, 14, 48-70.
- Flores-Medina, M. de J., Velasco-Martínez, V. D., Flores-García, F. G., & Cervantes-González, G. (2013). Sistema de Monitoreo y Análisis Basado en una Red Inalámbrica de Sensores y SIG para el Campo Agrícola. In A. Espinoza, J. L. Meza, M. F. J. Cepeda, & G. D. Guerrero (Eds.), *5º Encuentro Regional de Investigadores y 4º Encuentro de Jóvenes Investigadores*. (pp. 491-500). Torreón Coahuila: Rucerhall. Retrieved from <http://www.cieslag.org/>.
- García, M., Bri, D., Sendra, S., & Lloret, J. (2010). Practical Deployments of Wireless Sensor Networks: A Survey. *International Journal on Advances in Networks and Services*, 3(1 & 2), 170-185.
- Gopalakrishna-Moorthy, K., Yaashuwanth, C., & Venkatesh, K. (2013). A Wireless Remote Monitoring of Agriculture Using Zigbee. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2(8), 72-74.
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. Á. (2013). Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module.

- Instrumentation and Measurement, IEEE*, 63(1), 166-176, doi:10.1109/TIM.2013.2276487.
- Guzmán-Soria, E., García-Salazar, A., Mora-Flores, S., Fortis-Hernández, M., Valdivia-Alcalá, R., & Portillo-Vázquez, M. (2006). La demanda de agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia*, 40(6), 793-804.
- Hema, L. K., Murugan, D., & Chitra, M. (2012). Wireless Sensor Networks ' Emergence And Growth- A Survey. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, 2, 217-224.
- Hwang, J., Shin, C., & Yoe, H. (2010). A wireless sensor network-based ubiquitous paprika growth management system. *Sensors*, 10(12), 11566-11589. doi:10.3390/s101211566.
- Kar, S., De Sarkar, A., & Mukherjee, N. (2012). An Integrated Framework in Geographic Information System using Wireless Sensor Network. *International Journal of Computer Applications, iRAFIT*(2), 13-18. doi:Issn: 09758887.
- Kasaei, S. H., Kasaei, S. M., & Kasaei, S. A. (2011). Design and Development a Control and Monitoring System for Greenhouse Conditions Based-On Multi Agent System. *BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, 2(4), 28-35.
- Khan, R., Ali, I., Suryani, M. A., Ahmad, M., & Zakarya, M. (2013). Wireless Sensor Network Based Irrigation Management System for Container Grown Crops in Pakistan. *World Applied Sciences Journal*, 24(8), 1111-1118, doi:10.5829/idosi.wasj.2013.24.08.1151.
- Kotamäki, N., Thessler, S., Koskiaho, J., Hannukkala, A. O., Huitu, H., Huttula, T., ... Järvenpää, M. (2009). Wireless In-Situ Sensor Network for Agriculture and Water Monitoring on a River Basin Scale in Southern Finland: Evaluation from a Data User's Perspective. *Sensors*, 9(4), 2862-2883, doi:10.3390/s90402862.
- Kumar, A. A., Øvsthus, K., & Kristensen, L. M. (2014). An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks - A Survey of Requirements, Protocols and Challenges. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 16(3), 1391-1412, doi:10.1109/SURV.2014.012114.00058.
- Lea-Cox, J. D., Kantor, G., Anhalt, J., Ristvey, A., & Ross, D. S. (2007). A Wireless Sensor Network for the Nursery and Greenhouse Industry. In *Proceedings of Southern Nursery Association Research Conference* (Vol. 52, pp. 454-458). TX, USA. Retrieved from [http://sensornet.umd.edu/Publications/Lea-Cox et al., 2007 SNA 52_454-458.pdf](http://sensornet.umd.edu/Publications/Lea-Cox%20et%20al.,%202007%20SNA%2052_454-458.pdf).
- López-Fidalgo, A. (2010). Redes de sensores sin cables para agricultura de precisión en regiones minifundistas (pp. 1-26). In *CONAMA10 Congreso Nacional del Medio Ambiente*, Galicia, España.
- Luo, Z. (2012). Overview of Applications of Wireless Sensor Networks. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 1(4), 4-6.
- Majone, B., Viani, F., Filippi, E., Bellin, A., Massa, A., Toller, G., ... Salucci, M. (2013). Wireless Sensor Network Deployment for Monitoring Soil Moisture Dynamics at the Field Scale. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 426-435, doi:10.1016/j.proenv.2013.06.049.
- Mathurkar, S. S., & Chaudhari, D. S. (2013). A Review on Smart Sensors based Monitoring System for Agriculture. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2(4), 76-78.
- Matijevis, I., & János, S. (2010). Control of the Greenhouse's Microclimatic Condition Using Wireless Sensor Network. *IPSI Journal*, 6(2), 35-38. Retrieved from <http://www.internetjournals.net/journals/tir/2010/July/Paper05.pdf>.
- Mercado, G., Borgo, R., Antivilo, F. G., Uriburu, G. O., Diedrichs, A., Tromer, S., ... Pérez, S. (2012). Red de Sensores SIPIA (pp. 69-73). In *XIV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, Posadas, Argentina.
- Muñoz-Arboleda, F. (2009). Importancia del agua en la nutrición de los cultivos. *Cenicaña. Carta Trimestral*, 31(3-4), 16-18.
- Ortiz-Sanchez, A., Gonzales-Cervantes, G., Alvarez-Reynal, V., Potisek-Talavera, M., Chavez-Simentel, J., & Valenzuela-Nunez, L. (2013). *Inducción de crecimiento en raíz y tubérculo mediante la aplicacion de productos orgánicos y hormonales (estudio de caso Caladium bicolor)*. In *Agricultura Organica: Sexta Parte*. (pp. 61-75). Torreón, México: Red Internacional de Agricultura Orgánica, SEP.
- Patil, S. S., Davande, V. M., & Mulani, J. J. (2014). Smart Wireless Sensor Network for Monitoring an Agricultural Environment. *International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT)*, 5(3), 3487-3490.
- Pfister, S., Bayer, P., Koehler, A., & Hellweg, S. (2011). Projected Water Consumption in Future Global Agriculture: Scenarios and Related Impacts. *Science of the Total Environment*, 409(20), 4206-4216, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.07.019.
- Rawat, P., Singh, K. D., Chaouchi, H., & Bonnin, J. M. (2014). Wireless Sensor Networks: A Survey on Recent Developments and Potential Synergies. *The Journal of Supercomputing*, 68(1), 1-48, doi:10.1007/s11227-013-1021-9.
- Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L., Barreiro, P., & Robla, J. I. (2009). A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art And Current Trends. *Sensors*, 9(6), 4728-4750, doi:10.3390/s90604728.
- Salcedo-Pérez, E., Galvis-Spinola, A., Hernández-Mendoza, T. M., Rodríguez-Macias, R., Zamora-Natera, F., Bugarin-Montoya, R., & Carrillo-González, R. (2007). La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 419-425.
- Santhosh, S., & K-Paulose, J. (2012). Development and Deployment of Wireless Sensor Network in Paddy Fields of Kuttanad. *International Journal of Engineering and*

- Innovative Technology (IJEIT)*, 2(1), 84-88. Retrieved from http://ijeit.com/vol2/Issue1/IJEIT1412201207_15.pdf.
- Santos-Pereira, L., De-Juan-Valero, J. A., Picornell-Buendía, M. R., & Martín-Benito, J. M. (2010). *El riego y sus tecnologías*. Albacete: CREA-UCLM.
- Seah, W. K. G., Eu, Z. A., & Tan, H.-P. (2009). Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) - Survey and Challenges. In *2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology* (pp. 1-5). Aalborg: Ieee. doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2009.5172411.
- Steiniger, S., & Hay, G. J. (2009). Free and Open Source Geographic Information Tools for Landscape Ecology. *Ecological Informatics*, 4(4), 183-195, doi:10.1016/j.ecoinf.2009.07.004.
- Valdiviezo, D. V. (2009). *Diseño de una Red de Sensores Inalámbrica para Agricultura de Precisión*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Vegetronix Inc. (n.d.). Retrieved from http://www.buscagro.com/detalles/Evaluacion-del-comportamiento-de-sensores-de-humedad-de-suelo-del-tipo--FDR--de-..._35922.html.
- Vita-Serman, F., Schugurensky, C., Carrión, R., & Rodríguez, S. (2006). Evaluación del comportamiento de sensores de humedad de suelo del tipo (FDR) de desarrollo local, en relación al contenido de agua y a la textura de suelo (p. 6). In *III Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego*, Mendoza, Argentina.
- Wang, N., Zhang, N., & Wang, M. (2006). Wireless Sensors in Agriculture and Food Industry - Recent Development and Future Perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(1), 1-14, doi:10.1016/j.compag.2005.09.003.
- Yu, X., Pute, W., Han, W., & Zhang, Z. (2013). A Survey on Wireless Sensor Network Infrastructure for Agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 35(1), 59-64, doi:10.1016/j.csi.2012.05.001.
- Zhang, R., Guo, J., Zhang, L., Zhang, Y., Wang, L., & Wang, Q. (2011). A Calibration Method of Detecting Soil Water Content based on the Information-Sharing In Wireless Sensor Network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 161-168, doi:10.1016/j.compag.2011.01.010.

Dirección institucional de los autores

M.C. María de Jesús Flores Medina

Instituto Tecnológico de la Laguna
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Blvd. Revolución s/n esq. con Av. Cuauhtémoc
27000 Torreón, Coahuila, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 7051 331, extensión 515
mary_rosch@hotmail.com

Dr. Francisco Flores-García

Instituto Tecnológico de la Laguna
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Blvd. Revolución y Calzada Cuauhtémoc s/n
27000 Torreón, Coahuila, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 7051 331, extensión 515
francisco.floresgarcia@gmail.com

M.C. Víctor Velasco-Martínez

Instituto Tecnológico de la Laguna
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Blvd. Revolución y Calzada Cuauhtémoc s/n
27000 Torreón, Coahuila, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 7051 331, extensión 515
yoalieh@gmail.com

Dr. Guillermo González Cervantes

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en
Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera CENID-RASPA
INIFAP
Km 6.5 margen derecha, Canal Sacramento
35140 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 1590 105
gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx

Dr. Francisco Jurado Zamarripa

Profesor Investigador
Instituto Tecnológico de la Laguna
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Blvd. Revolución y Calzada Cuauhtémoc s/n
27000 Torreón, Coahuila, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 7051 331, extensión 515
fjurado@itlalaguna.edu.mx