

PROTOTIPO PARA AUTOMATIZAR UN SISTEMA DE RIEGO MULTICULTIVO*

PROTOTYPE FOR AUTOMATING A MULTICROPPING IRRIGATION SYSTEM

Oziel Lugo Espinosa^{1§}, Abel Quevedo Nolasco¹, Juan R. Bauer Mengelberg¹, David Hebert del Valle Paniagua¹, Enrique Palacios Vélez¹ y Miguel Águila Marín¹

¹Posgrado de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. C. P. 56230. Tel. 01 595 9523488, 58045900. Ext. 1072, 1383, 1462, 1465 y 1174. (anolasco@colpos.mx), (jbauer@colpos.mx), (dhvallep@colpos.mx), (epalacios@colpos.mx), (fmaguila@yahoo.com).

[§]Autor para correspondencia: oziel@colpos.mx.

RESUMEN

El riego proporciona a la planta el agua imprescindible para su crecimiento y desarrollo; para garantizar el riego adecuado, pero aprovechando al máximo los caudales de agua disponibles, se pueden utilizar sistemas de riego con programación de control automático, para asegurar el suministro cuando y en la cantidad que la planta necesite, para evitar el desperdicio de agua. El presente trabajo se llevó a cabo en 2008 y tiene el propósito de mostrar un prototipo funcional, con base en la integración de tres tecnologías, computación, comunicaciones y electrónica para automatizar el control del riego para sistemas cerrados o abiertos. Se proporcionó información del suelo (porcentaje contenido de arena, arcilla, materia orgánica y densidad aparente): y de los cultivos (tipo, duración, funciones de crecimiento radicular y Kc). Con esta información se elabora un balance hídrico, el cual resulta en la decisión de regar o no alguno de los cultivos. Cuando, como resultado de la función de abatimiento del agua en el suelo en conjunción con el balance hídrico, se determina que se debe regar, el software envía señales digitales de salida por el puerto serial RS232 de una computadora hacia un dispositivo electrónico, para accionar los dispositivos físicos de riego y complementarios (v. gr. electroválvulas, ventiladores, lámparas.) Se integró un subsistema de comunicación bidireccional PC-Modem GSM-Celular, que permite encender/apagar un dispositivo

ABSTRACT

Irrigation provides to the plant the water essential to its growth and development; in order to ensure proper irrigation and maximizing the flow of available water, the irrigation systems with automatic programming can be used, for the purpose of ensuring supply when the plant needs it and in the proper amount, avoiding wasting water. This paper was carried out in 2008 and aims to show a working prototype, based on the integration of three technologies, computing, communications and electronics in order to automate the irrigation's control for closed or open systems. Soil information was provided (sand content percentage, clay, organic matter and bulk density) and crop's as well (type, duration, root growth functions and Kc). With this information a water balance is developed, which results in the decision to irrigate or not, any of the crops. When, as a result of the abatement of water in the soil function in conjunction with water balance, is determined to be watering, the software sends output digital signals by the RS232 serial port of a computer to an electronic device to operate the irrigation physical devices and supplementary (e. g. electrovalves, fans, lamps.) A bi-directional communication subsystem PC-GSM-cell Modem was integrated, which allows turning on/off a device, using remote commands from a cell phone, as well as sending alarms and warnings that

* Recibido: enero de 2011
Aceptado: septiembre 2011

mediante comandos remotos desde un teléfono celular, como también el envío de alarmas y avisos que indican el estado actual del sistema, por medio de mensajes de texto vía celular y correos electrónicos. El sistema de automatización se diseñó en módulos, que permite se adapte a diversas aplicaciones que sean susceptibles de automatización y control. Se describen los dispositivos y programas que componen el sistema, entradas, salidas y proceso que controlan el riego automatizado.

Palabras clave: automatización, balance hídrico, multicultivo, riego.

INTRODUCCIÓN

El riego proporciona a la planta el agua necesaria para su crecimiento y desarrollo. Dada la escasez de agua, es conveniente para la planta pero también para la protección del medio ambiente, que el riego se aplique con la mayor eficiencia. Una de las alternativas para lograr este objetivo es la utilización de sistemas de riego con programación de autocontrol: se trata de sistemas que establecen la ejecución automática de riegos mediante la valoración continua de uno o varios parámetros de control. Los factores de control pueden ser edáficos (como la humedad), indicadores compuestos que relacionan variables meteorológicas y el cultivo (como la demanda evapotranspirativa), y en general, variables que permitan determinar, en forma continua el momento y cantidad de agua necesaria para un cultivo, de tal forma que el sistema tome decisiones con el apoyo en estos indicadores en tiempo real. Es importante resaltar que la aplicación del agua en términos de cantidad y oportunidad, se debe realizar con precisión en tiempo real.

El objetivo de la presente investigación, es describir el desarrollo de un sistema-prototipo de riego automático, que integra: el componente de entrada, consistente en la información meteorológica que se obtiene de una estación meteorológica comercial (Campbell Scientific Inc.); el componente de control (de software, para la toma de decisiones); y el componente de salida, compuesto por dispositivos electrónicos que encienden/apagan periféricos. A esto se agrega una interface de potencia, para la cual los dispositivos pueden ser electroválvulas para la aplicación del riego, entre otros. El control se lleva a cabo por medio de un balance hídrico a partir de las variables meteorológicas, además de la información de los cultivos y suelos. Como

indicate the system status through text messages and emails via mobile phone. The automation system was designed in modules, which allows it to adapt to various applications amenable to automation and control. Devices and programs that make up the system, inputs, outputs and processes that control automated irrigation are described.

Key words: automation, irrigation, multicropping, water balance.

INTRODUCTION

Irrigation provides to the plant the water needed for its growth and development. Given the scarcity of water, it is suitable for the plant and for the environment protection, that irrigation is applied with the greatest efficiency. One alternative to achieve this objective is the use of irrigation systems with programmable automation controller: those are systems that provide automatic execution of irrigation through ongoing assessment of one or more control parameters. The control factors may be edaphics (e. g. moisture), composite indicators that relate weather variables and the crop (such as evapotranspiration demand), and in general, variables that allow to determine continuously, the timing and water amount needed for a crop, so that the system makes decisions with the support of these indicators in real time. It is important, that water application in terms of quantity and timing, must be performed accurately in real time.

The objective of this research is to describe the development of a prototype-system of automatic irrigation, which includes: the input component, consisting of weather information obtained from a commercial weather station (Campbell Scientific Inc.); the control component (software for decision-making) and the output component, consisting of electronic devices that turn on/turn off peripherals. A power interface is added, for which the devices can be electrovalves for irrigation application, among others. The control is carried out through a water balance from meteorological variables and information of crops and soils. As part of the system a bidirectional communication subsystem was coupled via modem-cellphone, allowing both turning on/off any device such as sending messages to any cell or email account, to report any action taken by the system.

parte del sistema se acopló un subsistema de comunicación bidireccional por medio de un modem-celular, que permite tanto activar/desactivar algún dispositivo como el envío de mensajes hacia algún celular, o una cuenta de correo electrónico, para informar alguna acción que realiza el sistema.

La presentación se hace en forma secuencial; es decir, se indica cómo se inicio el desarrollo el sistema de control y las tecnologías de comunicación que se usaron para cumplir el propósito. Una introducción sobre los sistemas existentes de control de riego precede a dicha descripción.

Algunos modelos sobre el control del riego

En la búsqueda de la eficiencia en el uso de agua, Bralts *et al.* (1986) desarrollaron un programa de cómputo (SCS-Scheduler) para el manejo del riego. Los datos de entrada se programaron en un datalogger. El programa contempla estados del sistema, secciones de riego, control y encendido y apagado de dispositivos. En el mismo sentido, Wessels *et al.* (1995) desarrollaron un sistema automático para el riego controlado por computadora, el cual usa información meteorológica para calcular la evapotranspiración. Xin *et al.* (1995) desarrollaron un prototipo de sistema experto (CIMS) para el manejo del riego en tiempo real, la protección de heladas y el control de la fertirrigación en cítricos. Usaron como datos de entrada, información del contenido de humedad del suelo, además de datos obtenidos de una estación meteorológica automatizada.

Moreno *et al.* (1996) desarrollaron un programa de cómputo (AUTRI Versión 1.0) para la automatización de un sistema de riego localizado. El programa implementa estrategias para determinar el momento del riego mediante el balance hídrico, calculado a partir de variables meteorológicas, datos de suelo y cultivo y mediante el monitoreo de la humedad del suelo a través de un electrotensiómetro. Con el mismo propósito, Carrillo (1999) desarrolló un programa de cómputo con fines de control, programación y aplicación del fertirriego en tiempo real y control de temperatura al interior del invernadero.

Águila (2003) desarrolló un sistema automatizado para el manejo del riego en tiempo real. En el programa se utilizan varios algoritmos que procesan la información meteorológica, del suelo y cultivo, y resultan en diferentes estrategias de riego. Todos estos datos se procesan por medio

The presentation is done sequentially; i. e., it is demonstrated how the control system under development was started and the communication technologies that were used to accomplish the purpose. An introduction about existing systems of irrigation control precedes the description.

Some models of irrigation control

In the search for efficiency in water use, Bralts *et al.* (1986), developed a computer program (SCS-Scheduler) for irrigation management. The input data are programmed in a datalogger. The program includes system state, irrigation sections, control and turning on-off of devices. Likewise, Wessels *et al.* (1995), developed an automatic irrigation system controlled by computer, which uses weather data to calculate evapotranspiration. Xin *et al.* (1995), developed a prototype of expert system (CIMS) for irrigation management in real time, frost protection and control of fertigation on citrus. As input data they used information of soil moisture content, as well as data from an automated weather station.

Moreno *et al.* (1996), developed a computer program (AUTRI Version 1.0) for the automation of a drip irrigation system. The program implements strategies to determine the time of irrigation by water balance, which is calculated from meteorological variables, soil and crop data and by monitoring soil moisture through an electro-tensiometer. For the same purpose, Carrillo (1999), developed a computer program for control purposes, as well as programming and implementation of fertigation in real time and temperature control inside the greenhouse.

Águila (2003), developed an automated system for irrigation management in real time. The program uses several algorithms that process weather, soil and crop information and result in different irrigation strategies. All these data are processed by a datalogger of Campbell Scientific Inc. company, which through its control ports, activates the water distribution system, until the crop's needs are covered.

Castro (2008) implemented an automation system in real time, with verification of irrigation by using information technologies (internet and mobile devices). He compared different irrigation management's strategies (water balance, micro lysimeter and direct sensor of soil moisture by a TDR). Based on these data, the datalogger automates the process of reading data and the device control's action.

de un datalogger de la compañía Campbell Scientific Inc., que a través de sus puertos de control, activa el sistema de distribución del agua, hasta que se cubren los requerimientos del cultivo.

Castro (2008) implementó un sistema de automatización en tiempo real, con la verificación del riego por medio de las tecnologías de información (internet y dispositivos móviles). Comparó diferentes estrategias de control de riego (balance hídrico, micro lisímetro y el sensor directo de la humedad del suelo mediante un TDR). A partir de los datos obtenidos, el datalogger automatiza el proceso de lectura de datos y acción del control de dispositivos.

La computadora y los sistemas de comunicación electrónica

Las computadoras electrónicas, que permiten realizar los cálculos matemáticos complejos que se requieren para tomar decisiones, funcionan con bajos niveles de energía eléctrica, esto hace que no tengan la capacidad para activar directamente alguna interface que encienda o apague un dispositivo de control. Es por ello que se necesita una interface (electrónica de potencia), que eleve los niveles de energía a los necesarios para accionar los mencionados dispositivos. Las diferentes partes de los sistemas de control deben transmitir información (que puede ser mediciones de sensores, valores de referencia, señales de activación de salidas y comunicación) entre los elementos internos del sistema (Morais y Boaventura, 2000).

Aquí la comunicación de datos implica que la información es digital tanto en la fuente como en el destino, aunque la transmisión puede ser en forma digital o analógica. Esto quiere decir que se pueden utilizar canales analógicos (como la modulación en amplitud o frecuencia) para transmitir información digital (Tomasi, 2003). Noergaard (2005) refiere que todos los sistemas de comunicaciones electrónicas tienen que lidiar con problemas de ruido eléctrico (cualquier energía eléctrica indeseable que cae dentro de la banda útil de la señal de interés), por lo que se debe considerar el aislamiento para el circuito, que evitará comportamientos extraños del sistema.

Comunicación celular-módem-computadora

Para el desarrollo se usó la comunicación celular-modem-PC, donde un módem GSM es un dispositivo que se conecta a la red GSM para enviar/recibir información. La red GSM es

Computer and electronic communication systems

The electronic computers that allow complex mathematical calculations required to make decisions, operate with low energy levels, because of this, they do not have the ability to directly activate an interface that turns on/off a control device. That is why it is necessary an interface (power electronics), which raises energy levels to those necessary to operate those devices. The different parts of the control systems, required to transmit information (which may be sensor measurements, benchmarks, output activation signals and communication) between the internal elements of the system (Morais and Boaventura, 2000).

Here, the data communication implies that the information is digital in both the source and destination, although the transmission may be digital or analog. This means that analog channels can be used (such as amplitude or frequency modulation) in order to transmit digital information (Tomasi, 2003). Noergaard (2005), reports that all electronic communications systems have to deal with problems of electrical noise (any undesirable electrical energy that falls within the useful signal band of interest), so the isolation for the circuit should be considered, which will avoid strange behavior of the system.

Communication cellphone-computer-modem

For the development, a cell-modem-PC communication was used, where a GSM modem is a device that connects to the GSM network to send/receive information. The GSM is a digital network, so an analog modem is not needed (analog modem is an adapter that performs an analog-digital conversion MODulator-DEModulator): it is enough to use an adapter that fits the data flow from the PC, the data flow used in digital link between the cellphone and the GSM network.

The PC to MODEM communication model was established through the serial port of the PC. The modem works through a set of instructions that are called AT commands, where the main software controls the sending and receiving of these commands and the subsequent treatment of responses.

Short Message Service (SMS)

It's a system for sending and receiving text messages from mobile phones. The SMS was created as part of the GSM standard mobile telephony phase 1 in 1992. Within the

una red digital, por lo que no se necesita un módem analógico (adaptador que realiza una conversión analógico-digital MODulador-DEModulador): basta usar un adaptador que se ajusta al flujo de datos provenientes del PC, al flujo de datos que se utiliza en el enlace digital entre el teléfono y la red GSM.

El modelo de comunicación PC a MODEM se estableció mediante el puerto serial de la PC. El módem funciona mediante un conjunto de instrucciones que se denominan comandos AT, donde el software principal controla el envío y recepción de estos comandos y posterior tratamiento de las respuestas.

Servicio de mensajes cortos (SMS)

Es un sistema para enviar mensajes de texto y recibir mensajes de teléfonos móviles. El SMS fue creado como una parte del estándar de telefonía móvil GSM fase 1 en 1992. Dentro del SMS hay varias características que adhieren al estándar referido: a) un mensaje corto puede tener una longitud de hasta 160 caracteres, que consisten de palabras, números o una combinación alfanumérica, aunque también se pueden utilizar mensajes cortos basados en No-texto (por ejemplo, en formato binario); b) los mensajes cortos no se envían directamente del remitente al receptor, sino que se transmiten a través de un centro de SMS; y c) los mensajes cortos se pueden enviar y recibir simultáneamente con voz, datos y llamadas del fax. Esto se debe por el uso de un canal de radio dedicado durante la llamada: los mensajes cortos viajan sobre un canal dedicado a señalización independiente de los de tráfico.

Celular con sistema operativo windows mobile

Para algunas fases del desarrollo se usó Windows Mobile® que es un sistema operativo compacto, con una suite de aplicaciones básicas para dispositivos móviles con base en la librería de programación (API) Win32 de Microsoft®. Los dispositivos que llevan Windows Mobile® son Pocket PC, Smartphones y Media Center portátil, que se han diseñado para ser similares a las versiones de escritorio de Windows®. Un sistema operativo en un celular permite realizar interfaces de usuario en el propio celular, lo que simplifica al usuario los procesos de acción. Por ejemplo, se puede construir un mensaje de texto con apretar un sólo botón, o mostrar información de forma gráfica.

SMS, there are several features that are attached to the referred standard: a) a short message can have a length of 160 characters that consist of words, numbers or an alphanumeric combination, although short messages based on Non-text can also be used (for example, in binary format); b) short messages are not sent directly from sender to receiver, they are transmitted through an SMS center; and c) short messages can be sent and received simultaneously with voice, data and fax calls. This is because of the use of a dedicated radio channel during the call: short messages travel over a channel dedicated to signaling which is independent from those of traffic.

Cell Phone with Windows Mobile OS

For some development phases Windows Mobile® was used, which is a compact operating system with a suite of basic applications for mobile devices, based on the programming library (API) Win32 of Microsoft®. Devices that have Windows Mobile® are Pocket PC, Smartphones and Portable Media Center, which are designed to be similar to desktop versions of Windows®. An operating system in a mobile allows carrying out user's interfaces in the cellphone itself, simplifying the action processes to the user. For example, a text message can be done with the push of a button, or display information graphically.

MATERIALS AND METHODS

The irrigation prototype development, involved the use of software, electronic devices (for the control of output devices and two-way communication), weather information (input), and soil(s) and crop's(s) information.

The software development tool, was the "NetBeans IDE 6.7.1" (Java application development platform, trademark of Sun Microsystems), which allowed the creation of intelligent automatic irrigation software (IAI) for communication and irrigation's control. In addition the suite Visual Studio 2008® was used (Microsoft Corporation), for the development of the mobile device's software (cellphone), plus a laptop for the IAI's development and installation. For the bidirectional output communication, an electronic device was developed which uses the RS232 serial port of a computer) and a modem-cellphone (commercial use) that was installed via USB.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del prototipo de riego implicó el uso de software, dispositivos electrónicos (para el control de los dispositivos de salida y de comunicación bidireccional), información meteorológica (de entrada), e información del suelo (s) y cultivo (s).

La herramienta de desarrollo de software fue el entorno "NetBeans IDE 6.7.1" (plataforma de desarrollo de aplicaciones Java, Marca registrada de Sun Microsystems), que permitió la creación del software riego inteligente automático (RAI) para la comunicación y el control del riego. Además se usó la suite Visual Studio 2008® (Microsoft Corporation) para desarrollar el software del dispositivo móvil (celular), además de una computadora portátil para el desarrollo e instalación del RAI. Para la comunicación bidireccional de salida, se desarrolló un dispositivo electrónico que usa el puerto serial RS232 de una computadora) y un modem-celular (de uso comercial) que se instaló por USB.

A continuación se describe la integración de todos los componentes, tras presentar las partes del prototipo del sistema de control. La parte de control se realizó con base en el balance hídrico a partir de la información meteorológica, suelo y cultivo. El balance se realiza entre las salidas y entradas de agua al sistema, donde se compensan de una forma eficiente las pérdidas de agua en el sistema a partir de una función de abatimiento de agua en el suelo. El balance hídrico fue la herramienta para la toma de decisiones en la verificación de la disponibilidad de agua en el sistema cultivo-suelo.

Es un método ampliamente usado en los estudios de zonificación agrícola, influencia de la deficiencia hídrica en la productividad de los cultivos (Calvache *et al.*, 1997), y en diseño e implementación y monitoreo de sistemas de riego y drenaje. Silva (2001) señala que el balance hídrico se puede utilizar para establecer las comparaciones entre las condiciones hídricas de localidades distintas. Incluso, se aplica a diferentes escalas de tiempo en función de la disponibilidad de información. El balance del contenido de humedad del suelo se determina con la ecuación:

$$W_i = W_{i-1} + Pe_i - ETr_i \quad 1)$$

The following describes the integration of all components, after presenting the parts of the prototype control system. The control section was made based on the water balance from the weather, soil and crop information. The balance is made between inputs and outputs of water to the system, where water losses in the system are efficiently compensated from a function of abatement water in the soil. Water balance was the tool for decision-making in the verification of the availability of water in the crop-soil system.

It is a widely used method in studies of agricultural zoning, the influence of water deficiency on crop's productivity (Calvache *et al.*, 1997) and in design, implementation and monitoring of irrigation and drainage systems. Silva (2001), points out that the water balance can be used to establish comparisons between the water conditions of different localities. It is also applied to different time scales depending on the information availability. The balance of soil moisture content is determined by the equation:

$$W_i = W_{i-1} + Pe_i - ETr_i \quad 1)$$

Where: w_i = soil moisture at the time i , (mm); w_{i-1} = soil moisture at the time $i-1$, (mm); Pe_i = effective rainfall, (mm); ETr_i = actual crop evapotranspiration, (mm).

The actual crop evapotranspiration is estimated with the following equation.

$$ETr = ET_0 Kc \quad 2)$$

Where: ETr = actual crop evapotranspiration, ($mm\ h^{-1}$); ET_0 = reference evapotranspiration, ($mm\ h^{-1}$); Kc = coefficient of crop's development.

In order to estimate the ET_0 , the method of Penman-Monteith (1990) was used and it is described by the equation:

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma^*)} + \frac{\gamma^* M_w (e_a - e_d)}{R \Theta r_v (\Delta + \gamma^*)} \quad 3)$$

Where: ET_0 = reference evapotranspiration ($mm\ h^{-1}$); Δ = saturation vapor pressure gradient ($Pa\ ^\circ C^{-1}$); R_n = Net radiation ($kW\ m^{-2}$); λ = latent heat of vaporization of water ($2450\ kJ\ kg^{-1}$); G = soil heat flux ($kW\ m^{-2}$); γ^* = apparent psychrometric constant ($Pa\ ^\circ C^{-1}$); M_w = molecular mass of water ($0.018\ kg\ mol^{-1}$); $e_a - e_d$ = vapor pressure deficit (kPa); R = ideal gas constant ($8.31 \cdot 10^{-3}\ kJ\ mol^{-1}\ K^{-1}$); Θ = temperature in Kelvin degrees ($293\ K$); r_v = resistance of the crop's leaf area ($s\ m^{-1}$).

Donde: w_i = humedad del suelo en la hora i , (mm); w_{i-1} = humedad del suelo en la hora $i-1$, (mm); Pe_i = precipitación efectiva, (mm); ET_r = evapotranspiración real del cultivo, (mm).

La evapotranspiración real del cultivo se estima con la siguiente ecuación.

$$ET_r = ET_0 Kc \quad 2)$$

Donde: ET_r = evapotranspiración real del cultivo, (mm h^{-1}); ET_0 = evapotranspiración de referencia, mm h^{-1}); Kc = coeficiente de desarrollo del cultivo.

Para estimar la ET_0 se usó el método de Penman-Monteith (1990) que se describe con la ecuación:

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma^*)} + \frac{\gamma^* M_w (e_a - e_d)}{R \Theta r_v (\Delta + \gamma^*)} \quad 3)$$

Donde: ET_0 = evapotranspiración de referencia (mm h^{-1}); Δ = gradiente de saturación de presión de vapor (Pa $^{\circ}C^{-1}$); R_n = radiación neta (kW m^{-2}); λ = calor latente de vaporización del agua (2450 kJ kg^{-1}); G = flujo de calor del suelo (kW m^{-2}); γ^* = constante psicométrica aparente (Pa $^{\circ}C^{-1}$); M_w = masa molecular del agua (0.018 Kg mol^{-1}); $e_a - e_d$ = déficit de presión de vapor del aire (kPa); R = constante de gas ideal (8.31 $\cdot 10^{-3}$ kJ mol^{-1} K^{-1}); Θ = temperatura en grados Kelvin (293 K); r_v = resistencia del área foliar del cultivo (s m^{-1}).

La precipitación efectiva se ajustó con el siguiente modelo (Palacios y Exebio, 1989):

$$Pe = Lluvia_{total} - (0.05 Lluvia_{total})^2 \quad 4)$$

Donde: Pe = precipitación efectiva (mm)

Para determinar las propiedades del suelo, estimación de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), se usaron las siguientes ecuaciones (Rawls *et al.*, 1983):

$$PMP = 0.0854 - 0.0004(X) + 0.0044(Y) + 0.0122(Z) - 0.0182(D) \quad 5)$$

$$CC = 0.3486 - 0.0018(X) + 0.0039(Y) + 0.0228(Z) - 0.0738(D) \quad 6)$$

Donde: X, Y, Z= porcentajes de arena, arcilla y materia orgánica respectivamente; D= densidad aparente del suelo (g cm^{-3}).

Effective precipitation was adjusted with the following model (Palacios and Exebio, 1989):

$$Pe = Rain_{total} - (0.05 Rain_{total})^2 \quad 4)$$

Where: Pe = effective rainfall (mm).

In order to determine soil properties, estimation of field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP), the following equations were used (Rawls *et al.*, 1983):

$$PWP = 0.0854 - 0.0004X + 0.0044(Y) + 0.0122(Z) - 0.0182(D) \quad 5)$$

$$FC = 0.3486 - 0.0018(X) + 0.0039(Y) + 0.0228(Z) - 0.0738(D) \quad 6)$$

Where: X, Y, Z = percentages of sand, clay and organic matter respectively; D = soil bulk density (g cm^{-3}).

The calculation of the total moisture readily available in the root zone (HuFaAp, equation 7), requires the rooting depth (ProRaíz, equation 8) and an abatement factor of allowable moisture (FaAbHuPer, equation 9). The models of rooting depth and the abatement factor for the zucchini grey summer squash crop (*Cucurbita* spp.), were proposed by Castro (2008).

$$HuFaAp = HA * ProRaíz * FaAbHuPer \quad 7)$$

Where: HuFaAp= readily available total moisture in the root zone (scalar); HA = available moisture; ProRaíz = rooting depth; FaAbHuPer = abatement factor of allowable moisture.

Role of root's development

Allen *et al.* (1998), mentioned for zucchini grey summer squash (*Cucurbita* spp.), a maximum rooting depth of 0.6 to 1 m. However, for the planning of irrigation a depth of 0.6 m is suggested. As an initial value of rooting depth, it was taken a 0.1 m value, which corresponds to the length of seedling' roots when planting; the subsequent values are calculated with a curve similar to the plant's development represented by Kc curve (equation 10).

$$ProRaíz = 0.020395275 + 0.0027690429X + 0.00020960909X^2 - 0.0000034621581X^3 + 0.000000014608712X^4 \quad 8)$$

El cálculo de la humedad total fácilmente aprovechable dentro de la zona radicular (HuFaAp, ecuación 7), necesita la profundidad de las raíces (ProRaíz, ecuación 8) y un factor de abatimiento de la humedad permisible (FaAbHuPer, ecuación 9). Los modelos de profundidad radicular y del factor de abatimiento para el cultivo de calabaza zucchini grey (*cucurbita* spp.), fueron propuestos por Castro (2008).

$$HuFaAp = HA * ProRaíz * FaAbHuPer \quad 7)$$

Donde: HuFaAp= humedad fácilmente aprovechable total dentro de la zona radicular (escalar); HA= humedad aprovechable; ProRaíz= profundidad de la raíz; FaAbHuPer= factor de abatimiento de la humedad permisible.

Función de desarrollo radicular

Allen *et al.* (1998) mencionan para calabaza zucchini grey (*cucurbita* spp.) una profundidad máxima de raíces de 0.6 a 1 m. Sin embargo, sugiere para la planeación del riego una profundidad de 0.6 m. Como valor inicial de profundidad de raíces se tomó un valor de 0.1 m, que corresponde a la longitud de las raíces de las plántulas a la hora de la plantación; los valores subsecuentes se calculan con una curva semejante al desarrollo vegetativo de la planta representado por la curva Kc (ecuación 10).

$$ProRaíz = 0.020395275 + 0.0027690429 * X + 0.00020960909 * X^2 - 0.0000034621581 * X^3 + 0.000000014608712 * X^4 \quad 8)$$

Donde: X= día juliano del total de la duración del cultivo en días (cero - último día de duración).

El factor de abatimiento está dado por la ecuación:

$$FaAbHuPer = 0.350546158672458 - 0.001495941458749 * X + 0.000165169025107 * X^2 - 0.000006529893935 * X^3 + 0.000000075165292 * X^4 - 0.000000000266580 * X^5 \quad 9)$$

Donde: X= día juliano del total de la duración del cultivo en días (cero - último día de duración).

En el FAO-paper No 56 “CropEvapotranspiration” se presentan valores Kc para tres etapas de desarrollo, designadas como Kcini, Kcmed y Kcfin. Para calabaza zucchini grey (*cucurbita* spp.), se tomaron valores de 0.52, 0.9, 0.9 y 0.7 para las etapas B, C, D, y E que se muestran en la Figura 1. Para estimar Kc se usó el modelo propuesto por Castro (2008), como:

Where: X = Julian day of the total crop’s time in days (zero - last day).

The abatement factor is given by the equation:

$$FaAbHuPer = 0.350546158672458 - 0.001495941458749X + 0.000165169025107X^2 - 0.000006529893935X^3 + 0.000000075165292X^4 - 0.000000000266580X^5 \quad 9)$$

Where: X = Julian day of the total crop’s time in days (zero - last day).

The FAO-paper No. 56 “CropEvapotranspiration”, Kc values are given for three stages of development, designated as Kcini, Kcmed and Kcfin. For grey zucchini summer squash (*Cucurbita* spp.), there were taken values of 0.52, 0.9, 0.9 and 0.7 for stages B, C, D and E shown in Figure 1. For estimating Kc, the model proposed by Castro (2008) was used, as:

$$Kc = 0.41470218 - 0.00034576721X + 0.00065725214X^2 - 0.000011333138X^3 + 0.000000049443828X^4 \quad 10)$$

Where: X= crop’s time in days (90 days were considered for the duration of the entire crop’s cycle) and Kc is the crop’s coefficient.

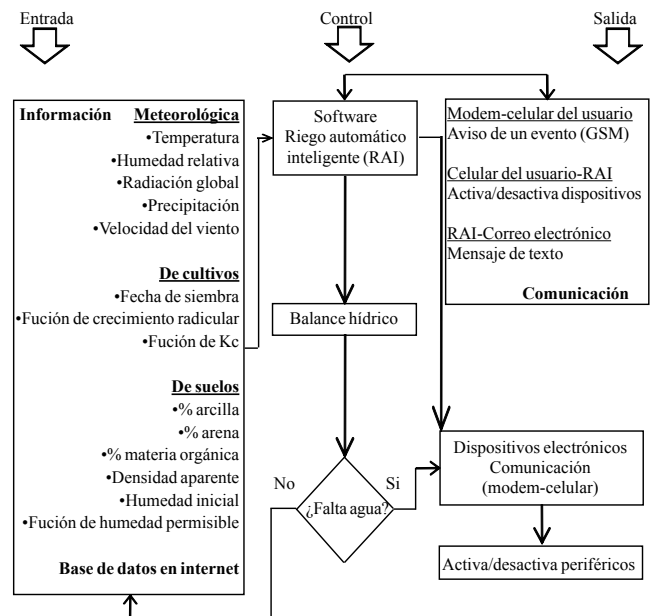


Figura 1. Diagrama general del sistema de riego automático inteligente.
Figure 1. General diagram of intelligent automatic irrigation system.

$$K_c = 0.41470218 - 0.00034576721 * X + 0.00065725214 * X^2 - 0.000011333138 * X^3 + 0.000000049443828 * X^4 \quad (10)$$

Donde: X= duración del cultivo en días (se consideraron 90 días para la duración de todo el ciclo del cultivo) y Kc representa el coeficiente del cultivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se describe primero el sistema de automatización de riego, que se integra en el software que se denominó riego automático inteligente (RAI). El sistema se subdividió en tres partes: la entrada, el control, y la salida. Éstas se complementan con la comunicación. En la Figura 1, se indica la integración de estos elementos y la interacción entre los mismos. En la Figura 2 se indica el cuadro de diálogo principal del software.

Información de entrada

El sistema usa la información meteorológica que se genera de una estación meteorológica Campbell con los siguientes sensores: temperatura del ambiente, radiación global, precipitación, velocidad del viento y humedad relativa, en intervalos de cada hora.

Apartir de esta información se determina la evapotranspiración. Por parte de los cultivos se obtiene el tipo de cultivo, y tres funciones: el coeficiente del cultivo Kc, de desarrollo radicular y la duración del cultivo en días. En cuanto a las características del suelo, se necesitan conocer los porcentajes de arcilla, arena, materia orgánica y densidad aparente. Todos estos datos (meteorológicos, propiedades del suelo e información de los cultivos) se almacenan en una base de datos. En la Figura 3 se indica el cuadro diálogo con el que se introducen todos los datos que necesita el sistema.

Sistema de control: riego automático inteligente (RAI)

A partir de la información meteorológica, de los cultivos y de los suelos, se hace un balance hídrico. Para un cultivo, se parte de la información del suelo: se calculan la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, a partir de los cuales se determina la humedad aprovechable, usando la densidad aparente y la profundidad (como una función del crecimiento radicular

RESULTS AND DISCUSSION

The irrigation automation system is first described, which is integrated into the software called intelligent automatic irrigation (IAI). The system was subdivided into three parts: input, control and output. These are complemented by the communication. Figure 1, indicates the integration of these elements and the interaction between them. Figure 2, shows the main dialog of the software.

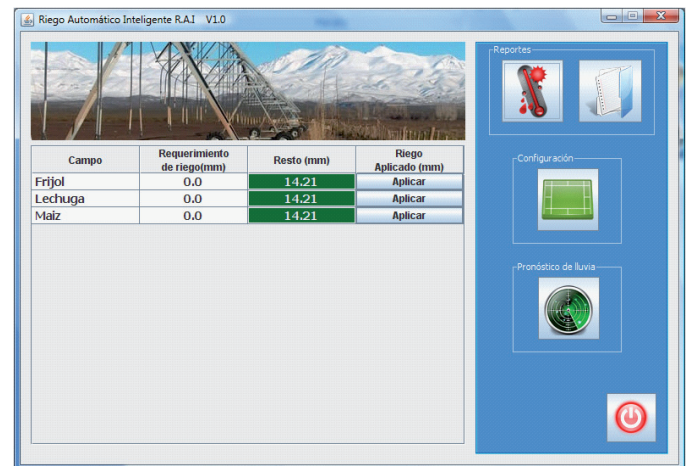


Figura 2. Diálogo principal de riego automático inteligente (RAI).

Figure 2. Main dialogue intelligent automatic irrigation (IAI).

Input information

The system uses weather data that is generated from a Campbell weather station with the following sensors: air temperature, global radiation, precipitation, wind speed and relative humidity at hourly intervals.

From this information, evapotranspiration is determined. From the crops, the type of crop and three functions are obtained: the Kc crop's coefficient, root's development and growth duration in days. From the soil's characteristics it's necessary to know: the percentages of clay, sand, organic matter and bulk density. All these data (meteorological, soil's properties and crop's information) are stored in a database. Figure 3 shows the dialog box with which is enter all data needed by the system.

del cultivo). Para el cálculo del balance hídrico se parte de la humedad inicial del suelo, haciendo uso de la ecuación (1). Se activa el riego si el contenido de humedad resulta menor que un nivel de humedad definido previamente por el usuario (que dentro del software se define por la función de abatimiento permisible). Periódicamente, en intervalos definidos en el sistema, se realiza la recuperación de datos, almacenamiento, cálculos necesarios para cada cultivo y la toma de decisiones para regar.

Los datos almacenados en la base de datos de información meteorológica permiten revisar los datos actuales (Figura 4a), los históricos (Figura 4b) o bien hacer una consulta de alguna variable meteorológica (Figura 4c). La consulta comienza por la selección de una variable y a continuación se especifican los criterios de búsqueda (con los operadores mayor, menor, o igual que un valor), en un periodo determinado.

Sistemas de salida (acciones de los sistemas de control)

Este componente consiste de tres partes: una interface de comunicación electrónica que se vincula con una interface de potencia, y un módem celular. En forma conjunta activan los dispositivos, que pueden ser electroválvulas, ventiladores, calefactores, entre otros.



Figura 3. Diálogo de captura de información de cultivo y suelo.
Figure 3. Capture dialogue of crop and soil information.

Control system: intelligent automatic irrigation (IAI)

A water balance is made from the information obtained from the weather, the crops and the soils. For a crop, it all starts from the soil information: field capacity and wilting point are calculated, from which the available moisture is determined using bulk density and depth (as a crop’s root growth function). The water balance calculation starts with the initial soil moisture, using the equation 1. Irrigation is activated if the moisture content falls below a level of humidity defined by the user (which inside the software is

	Temperatura	N/D	°C
	Radiación Global:	N/D	Wm ⁻²
	Humedad Relativa:	N/D	%
	Velocidad del viento	N/D	ms ⁻¹
	ETo acumulada hoy	N/D	mm
	Precipitación acumulada hoy	N/D	mm

CP		COLEGIO DE POSTGRADUADOS SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE V. 1.0				
ACTUAL	FECHA (Año-Día-Hora)	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Global (Wm ⁻²)	Velocidad del viento (ms ⁻¹)	
Datos	2008 - MAY13 - 24	18	78	1	2.5	
Históricos	2008 - MAY13 - 23	17	78	1	2.5	
	2008 - MAY13 - 15	17	78	1	2.5	
	2008 - MAY13 - 3	18	78	1	2.5	
Consultas	2008 - MAY13 - 2	17	78	1	2.5	

a)

b)

c)

Figura 4. Diálogos para mostrar la información meteorológica. a) datos actuales; b) datos históricos; y c) consulta de variables meteorológicas.

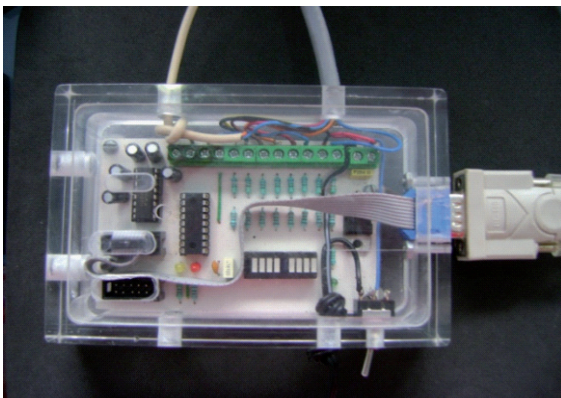
Figure 4. Dialogs to display weather information. a) current data; b) historic data; and c) meteorological variables query.

Comunicación de salida (PC-SERIAL)

La comunicación de salida se realiza con un dispositivo electrónico integrado por circuitos electrónicos, cuya función es enviar información digital (bits) por medio de la comunicación serial. Para la comunicación entre la computadora y el circuito electrónico, se utilizó el microcontrolador PIC18F88 de Microchip®, que se programó con el compilador CCS-C, que permitió codificar en lenguaje C el problema, y que generó los archivos en código máquina que se graban físicamente en el dispositivo (Figura 5a). Dado que la señal que se transmite no puede encender/apagar un dispositivo, se utilizó una interfaz electrónica de potencia.

Dispositivo de potencia

La función de las interfaces de potencia es proporcionar la corriente eléctrica necesaria para que las señales lógicas generadas por el controlador puedan actuar sobre los elementos físicos. Es decir, se usan para transportar energía, integrada por optoacopladores y relés, quedando a disposición del usuario la elección de estos últimos, ya que depende del voltaje de los dispositivos que se tengan que controlar (Figura 5b).



defined by the abatement allowable function). Periodically at intervals defined in the system, there are performed: data recovery, storage, calculations required for each crop and the decision to irrigate.

The data stored in the database of meteorological information, allow reviewing the current data (Figure 4a), historic data (Figure 4b) or query for any weather variable (Figure 4c). The consultation begins by selecting a variable and then the searching criteria are specified (with operators more, less, or equal to a value) in a given period.

Output systems (actions of control systems)

This component consists of three parts: an electronic communication interface that is linked to a power interface and a cellphone modem. Together they activate devices, which may be electrovalves, fans, and heaters, among others.

Communication output (PC-SERIAL)

The output communication is done with an electronic device comprising electronic circuits, whose function is to send digital information (bits) using serial communication. For

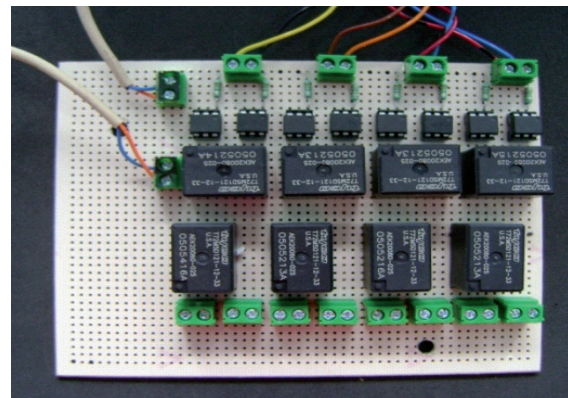


Figura 5. Dispositivos. a) interface de comunicación de salida de la PC; y b) Interface de potencia.
Figure 5. Devices. a) communication interface of the PC output; and b) power interface.

Comunicación RAI, modem-celular y celular

El software RAI se puede configurar para encender/apagar dispositivos a partir del celular. Se parte de configurar el módem-celular que se instala en la computadora. Hecho esto, se pueden activar o desactivar los dispositivos que se conectan a algún puerto. La aplicación que proporciona esta funcionalidad se desarrolló para Windows Móvil®. En

communication between the computer and the electronic circuit a PIC18F88 microcontroller from Microchip® was used, which was programmed with the CCS-C compiler, allowing codifying in C language the problem and generated files in machine code which are recorded physically on the device (Figure 5a). Since the transmitted signal cannot turn on/off a device, a power electronics interface was used.

la Figura 6a se indica el cuadro de diálogo principal, con el que se puede hacer una consulta, enviar comandos para activar los dispositivos, definir alarmas y avisos vía correo electrónico, mensajes SMS y llevar a cabo la configuración del software.

Para configurar la aplicación, se especifica el número telefónico del módem celular, y se indica si se desea que se confirme - o no - el mensaje SMS (Figura 6b). La opción de consulta ofrece un campo en el que se pueden pedir las condiciones actuales para un cultivo establecido o bien de un puerto; es decir, el estado (encendido o apagado) de algún dispositivo de riego de los que controlan el sistema (Figura 6c). La interfaz que permite el envío de comandos para encender/apagar un dispositivo asociado a un puerto, se ilustra en la Figura 6d. Con las alarmas (Figura 6e) se visualizan los datos enviados por la computadora a través del módem GSM, dando los informes de la situación actual del cultivo en particular, y con los correos electrónicos e-mail y mensajes SMS, se puede a partir del celular, enviar un mensaje a alguna cuenta de correo electrónico (Figura 6f).

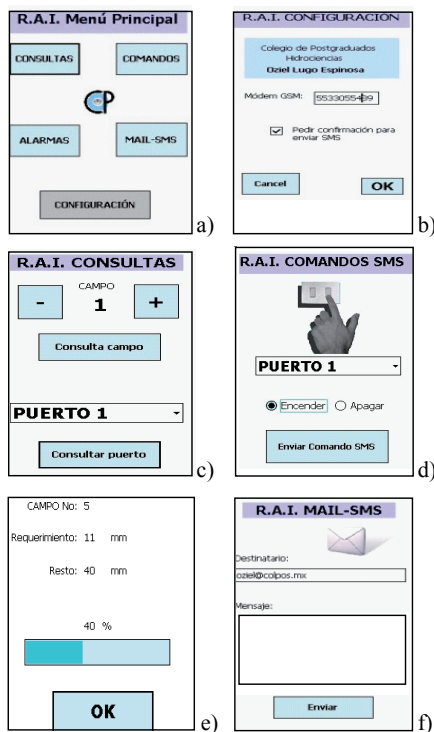


Figura 6. Diálogo principal de RAI en el celular, bajo Windows Móvil. a) configuración de RAI; b) consultas de campos o de puertos; c) envío de comandos; d) alarmas; y e) avisos del celular a una cuenta de correo electrónico (f).

Figure 6. IAI's main dialog in the Windows Mobile phone. a) Setting of IAI; b) fields or ports queries; c) sending commands; d) alarms; and e) notices from the phone to an email account (f).

Power device

The role of the power interfaces is to provide the necessary electrical power for the logic signals generated by the controller, so that it can act on physical elements. That is, they are used to transport energy, composed by optocouplers and relays, being available to the user to choose the latter ones, as it depends on the voltage of devices that need to be controlled (Figure 5b).

IAI communication, modem-cell phone and cell phone

IAI's software can be configured to turn on/off devices from cell phones. It starts with configuring the modem-cell phone, installed on the computer. Once this is done, the devices that are connected to a port can be enabled or disabled. The application that provides this functionality was developed for Windows Mobile®. Figure 6a, shows the main dialog box with which a query can be made, commands to activate the devices can be send, setting the alarms and warnings via email, SMS messages and perform the software configuration.

For configuring the application, the number of the cell phone modem has to be specified and it has to be indicated if the confirmation of the SMS message is wished (Figure 6b). The query option provides a field where the actual conditions of an established crop or a port can be asked for, i.e., the state (on or off) of a watering device controlled by the system (Figure 6c). The interface for sending commands to turn on/off a device associated with a port is illustrated in Figure 6d. With alarms (Figure 6e), data sent by the computer are displayed through the GSM modem, giving the reports of the current situation of a particular crop and with emails and SMS messages, messages to any email account can be sent from the cell phone as well (Figure 6f).

CONCLUSIONS

There was achieved to turn on/off any device through the mobile phone, enabling the automation of irrigation in real time, based on variables of soil, climate and cultivation, in order to achieve greater efficiency in the implementation of water, a limited resource.

The use of communication technologies such as mobile phones provides tracking and even the system's control in real time, obtaining system status information

CONCLUSIONES

Se logró encender/apagar algún dispositivo por medio de teléfonos celulares, que a su vez posibilita la automatización del riego, en tiempo real, a partir de variables de suelo, clima y cultivo, con el fin de alcanzar una mayor eficiencia en la aplicación del limitado recurso agua.

La utilización de tecnologías de comunicación como teléfonos celulares, facilita un seguimiento e incluso el control del sistema en tiempo real, al obtener información del estado del sistema y enviar comandos u órdenes de ejecución, lo que se traduce en beneficios inmediatos en cuanto a la aplicación del riego.

Para que el prototipo realice los cálculos adecuados (cantidad de agua y momento adecuado) para cada cultivo, es necesario introducir en el sistema los parámetros del suelo donde se establece cada cultivo y los datos característicos de cada cultivo (Kc).

AGRADECIMIENTOS

El autor principal agradece a las siguientes personas su apoyo para el desarrollo del prototipo: Luis Carlos Miranda Trujillo, Ricardo Luna, Pedro Ríos González, Ricardo Campos, Arturo Gamalier, Gilberto Lugo, entre otros.

LITERATURA CITADA

- Águila, M. F. 2003. *Entwicklungeinesvollautomatischen Bewässerungsregelungssystemsfür den Freilandgemüsebau*. Verlag Grauer, Beuren. Stuttgart, Alemania.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. and Smith, M. 1998. *Cropevapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization FAO, Irrigation and Drainage. Paper Núm. 56. 300 p.
- Bralts, V. F.; Driscoll, M. A. and Kelly, S. F. 1986. *Microcomputer based irrigation management and control system*. ASAE, St Joseph, MI. USA. Paper Núm. 86. 1223 p.

and sending commands or orders of execution, which results in immediate benefits in terms of irrigation implementation.

In order that prototype performs the appropriate calculations (water quantity and timing) for each crop, is needed to introduce in the system's parameters of the soil where each crop is established and characteristic data for each crop (Kc).

End of the English version



- Carrillo, F. G. 1999. *Sistema automático de fertirriego para cultivos ornamentales bajo condiciones de invernadero*. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 75 p.
- Castro, P. M. 2008. *Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro*. Agric. Téc. Méx. 34(4):459-470.
- Calvache, M.; Reichard, K. y Bacchi, O. 1997. *Efecto de épocas de deficiencia hídrica en evapotranspiración actual de cultivo*. Congreso brasileiro de agrometeorología. 668-670 p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2009. Morelos, México. URL: <http://www.imta.gob.mx/>.
- Monteith, J. L. and Unsworth, M. H. 1990. *Principles of environmental physics*. 2nd Ed. Edward Arnold. London, UK. 291 p.
- Moraís, R. and Boaventura, J. 2000. *Agritronics: a distributed data acquisition and control network for agriculture environments*. Acta Hort. 534:319-325.
- Moreno, A. S.; Tijerina. Ch. L.; Acosta, H. R.; Ruiz, C. V. M.; Zazueta, R. F. S. y Crespo, P. G. 1996. *Automatización de un sistema de riego localizado aplicado a una plantación de durazno*. Agrociencia. 33(2):191-197.
- Noergaard, T. 2005. *Embedded systems architecture. A comprehensive guide for engineers and programmers*. Elsevier. USA. 642 p.
- Palacios, V. E. y Excebio, A. 1989. *Introducción a la teoría de la operación de distritos de riego*. Segunda reimpresión corregida. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. D. F., México.

- Rawls, W. J.; Brakensiek, D. L. and Sony, B. 1983. Agricultural management of soil water properties, part I: soil water retention and green-ampt infiltration parameters. *Trans. ASAE*. 26(6):1751-1754.
- Silva, V. M. A. 2001. *Meteorología e climatología*. Brasilia: INMET, Gráfica y Editora Pax. 532 p.
- Tomasi, W. 2003. *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Educación. México. 976 p.
- Wessels, W. P. J.; Steyn, W. H. and Moolman, J. H. 1995. Automatic microirrigation and salt injection system for research and commercial applications. *Proceeding of the fifth international microirrigation Congress*. Orlando Fl., USA. ASAE. 116-122 pp.
- Xin, J. N.; Zazueta, F. S.; Smajstrla, A. G. and Wheaton, T. A. 1995. Real time expert system for citrus microirrigation management. *Proceeding of the Fifth International Microirrigation Congress*. Orlando, Florida, USA. ASAE. 787-791 pp.