

Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real*

System to program and schedule the irrigation of crops in real time

Miguel Servín Palestina^{1§}, Leonardo Tijerina Chávez¹, Guillermo Medina García², Oscar Palacios Velez¹ y Héctor Flores Magdaleno¹

¹Posgrado de Hidrociencias-Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (tijerina@colpos.mx, medina.guillermo@inifap.gob.mx, mhector@colpos.mx, fpedraza@colpos.mx). ²Campo Experimental Zacatecas-INIFAP. (medina.guillermo@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia: servin.miguel@inifap.gob.mx.

Resumen

La actividad agrícola consume más de 70% del agua disponible a nivel mundial, se considera una gran consumidora de los recursos hídricos, esto se debe al desperdicio de agua que se presenta, aun en sistemas tecnificados ya que se desconocen los requerimientos hídricos de los cultivos. Este estudio se centra en la programación del riego, que es una técnica que consiste en determinar la cantidad de agua y el momento en que han de regarse los cultivos, es un instrumento fundamental para lograr un mejor uso del agua. Regularmente se realiza sin soporte técnico con base únicamente en la experiencia de los usuarios, razón por la cual se requiere mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarla de una manera adecuada. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un sistema en línea para que los usuarios de riego del estado de Zacatecas estimen las demandas de agua de los cultivos (ajo, chile, frijol y maíz) y programen sus riegos en tiempo real. Este sistema resuelve la tarea mediante un balance hídrico climático y con el uso de datos climáticos obtenidos de la red de 36 estaciones agroclimáticas automatizadas distribuidas en el estado de Zacatecas. Lo que permite estimar el consumo de agua a través del tiempo, y determinar el calendario de

Abstract

The agricultural activity consumes more than 70% of the water available worldwide, it is considered a great consumer of water resources, this is due to the waste of water that is presented, even in technical systems since the water requirements of crops are unknown. This study focuses on irrigation scheduling, which is a technique that determines the quantity of water and the time when crops are to be irrigated, is a fundamental instrument to achieve a better use of water. It is regularly performed without technical support based solely on the users experience, which is why it is necessary to systematize and disseminate the available techniques to perform it in an appropriate way. The objective of this research was to develop an online system for irrigation users in the state of Zacatecas to estimate the water demands of crops (garlic, pepper, beans and maize) and program their irrigation in real time. This system solves the task by means of a climatic water balance and the use of climatic data obtained from the network of 36 automated agroclimatic stations distributed in the state of Zacatecas. What allows to estimate the consumption of water over time, and to determine the calendar of irrigation of the crops; the program runs via the internet and was encoded in PHP language which, along with HTML, allows you to create dynamic web sites.

* Recibido: febrero de 2017
Aceptado: marzo de 2017

riegos de los cultivos; el programa se ejecuta vía internet y fue codificado en lenguaje PHP que, junto con HTML, permite crear sitios WEB dinámicos.

Palabras clave: agua-suelo, balance hídrico, cultivos, estaciones climáticas, evapotranspiración.

El agua es el elemento fundamental para el desarrollo de la actividad agrícola, la agricultura consume más del 70 por ciento del agua disponible a nivel mundial (WWAP, 2014). En México se utiliza 77%, con 6.3 millones de ha. bajo riego con eficiencias globales menores al 50% (Sánchez *et al.*, 2006). En el estado de Zacatecas en el ciclo 2008-2009 se sembraron 10 890 ha de riego (CNA, 2010). El estado se sitúa en zonas áridas y semiáridas con valores altos de déficit evapotranspirativo. El riego es la mejor opción para la producción de alimentos (Geerts y Raes, 2009). Apesar de su enorme importancia, la mala distribución y la contaminación hacen que este recurso sea cada día más escaso y costoso (Castro *et al.*, 2008).

Esto se debe a que desconocen los requerimientos hídricos de los cultivos (McCarthy *et al.*, 2013). Se debe entender la importancia de aplicar técnicas y métodos racionales y cuantitativos para mejorar en: programación, diseño y operación de los sistemas de riego. Varios software se han desarrollado para el mejoramiento de la programación del sistema riego. Cropwat (Cropwat, 1993). DRiego Ver 1.0. (Catalán *et al.*, 2007) Irrinet (Catalán *et al.*, 2013), Sistema Irriga® y SEPOR ver 2.1, los cuales se basan en la aplicación del principio de conservación de la masa, (Fernández, 1996). Resuelven el balance de agua en el suelo, mediante un balance hídrico climático (BHC) (Botey *et al.*, 2009).

Con apoyo de datos climáticos de estaciones agrometeorológicas automatizadas (Smith, 1991). El BHC se fundamenta no solo las características del suelo, sino también en la medición de todas las variables necesarias para el cálculo de la evapotranspiración (ETo) y de la precipitación efectiva (Pe). El modelo de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) para el cálculo de ETo muestra ventaja ante los otros modelos por que combina el balance de energía, factores aerodinámicos (temperatura, presión de vapor y velocidad del viento) y resistencia aerodinámica del cultivo (Jensen *et al.*, 1990).

Keywords: crops, evapotranspiration, water-soil, water balance, weather stations.

The water is essential for the development of agricultural activity element, agriculture consumes more than 70 percent of the water available worldwide (WWAP, 2014). In Mexico 77% is used, with 6.3 million ha. Under irrigation with global efficiencies less than 50% (Sánchez *et al.*, 2006). In the state of Zacatecas in the 2008-2009 cycle were seeded 10,890 has in irrigation (CNA, 2010). The state is located in arid and semiarid areas with high values of evapotranspiration deficit. The irrigation is the best choice for food production (Geerts and Raes, 2009). Despite its enormous importance, maldistribution and pollution make this resource is each day more scarce and expensive (Castro *et al.*, 2008).

This is because they do not know the water requirements of crops (McCarthy *et al.*, 2013). The importance of applying rational and quantitative techniques and methods to improve programming, design and operation of irrigation systems should be understood. Several software have been developed to support irrigation programming. Cropwat (Cropwat, 1993). DRiego Ver 1.0. (Catalán *et al.*, 2007) Irrinet (Catalán *et al.*, 2013) System Irriga®, SEPOR ver 2.1, which are based on the principle of conservation of mass, (Fernández, 1996). Solve the water balance in the soil, using a climatic water balance (BHC) (Botey *et al.*, 2009).

With support from weather data automated agrometeorological stations (Smith, 1991). The BHC is based not only on soil characteristics, but also on the measurement of all variables necessary for the calculation of evapotranspiration (ETo) and effective precipitation (Pe). The Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) for calculating ETo shows advantage over other models by combining the energy balance, aerodynamic factors (temperature, vapor pressure and wind speed) and drag the culture (Jensen *et al.*, 1990). The irrigation scheduling crop normally runs without support and greater systematization and dissemination of the techniques available to do it in a proper way is required (Catalán *et al.*, 2007). The objective of this research was to develop an online system to calculate the water demands and to schedule the irrigation of the crops (garlic, pepper, beans and maize) and to program the irrigation in real time.

La programación del riego en los cultivos normalmente se ejecuta sin soporte técnico y se requiere una mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarla de una manera adecuada (Catalán *et al.*, 2007). El objetivo de este trabajo de investigación fue desarrollar un sistema en línea vía internet para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos (ajo, chile, frijol y maíz) y programar el riego en tiempo real.

El trabajo de investigación se realizó en el Campo Experimental Zacatecas (CEZAC), Calera, Zacatecas, México. (22° 54' latitud norte, 102° 39' longitud oeste), a una altitud de 2 197 m, con temperatura media anual de 14.6 °C, precipitación media anual de 416 mm, y evaporación promedio anual de 1 700-2 200 mm. El CEZAC administra la información climática obtenida de una red con 36 estaciones climáticas automáticas distribuidas estratégicamente en el estado. Cada una cuenta con sensores para medir la temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, dirección y velocidad del viento, radiación solar y humedad de la hoja, cada 15 minutos las 24 horas del día. Esta red provee al estado de Zacatecas de información meteorológica en línea y en tiempo real, mediante una plataforma Adcon, (Servin, 2015).

Método de balance hídrico climático

Según la ecuación del balance de agua en el suelo el contenido de agua del suelo en un día particular, θ_i , se estima con base en el contenido de agua del día previo, θ_{i-1} , tal como se muestra en la siguiente ecuación (Silva, 2001).

$$\theta_i = \theta_{i-1} + R_i + P_e - ET_c - D_i \quad 1)$$

Donde: R_i = riego del día particular; P_e = precipitación efectiva del día particular, ET_c = evapotranspiración del cultivo del día particular; D_i = drenaje de un día particular se considera "0", lo anterior expresado en (mm día⁻¹).

Para iniciar con el balance hídrico se requirió determinar el inicio del periodo de riego (fecha de siembra) y llevar a capacidad de campo, (humedad aprovechable (HA) al 100%) donde los valores de capacidad de campo (θ_{CC}) y punto de marchites permanente (θ_{PMP}) en (cm³ cm⁻³), se consultan en función de la textura del suelo (Saxton *et al.*, 1986) y Pr es la profundidad de exploración de las raíces en cm. Este será el punto de partida para iniciar el BHC que posteriormente se acumula continuamente la pérdida de agua por evapotranspiración del cultivo (ET_c) del día anterior, y

The research work was carried out at the Zacatecas Experimental Field (CEZAC), Calera, Zacatecas, Mexico. (22° 54' north latitude, 102° 39' west longitude), at an altitude of 2 197 m, with an annual average temperature of 14.6 °C, annual mean rainfall of 416 mm, and average annual evaporation of 1 700-2 200 mm. The CEZAC manages the climate information obtained from a network with 36 automatic climatic stations strategically distributed in the state. Each has sensors to measure air temperature, relative humidity, precipitation, direction and wind speed, solar radiation and leaf moisture, every 15 minutes 24 hours a day. This network provides the state of Zacatecas with on-line and real-time meteorological information using an Adcon platform (Servin, 2015).

Method climatic water balance

According to the equation of the water balance in the soil water content of soil on a particular day, θ_i , is estimated based on the water content of the previous day, θ_{i-1} , as is shown in the following equation (Silva, 2001).

$$\theta_i = \theta_{i-1} + R_i + P_e - ET_c - D_i \quad 1)$$

Where: R_i = irrigation of the particular day; P_e = effective precipitation of the particular day, ET_c = evapotranspiration of the crop of the particular day; D_i = draining a particular day it is considered "0", the above expressed in (mm day⁻¹).

To start with the water balance was required to determine the start of the watering period (sowing date) and lead to field capacity (soil moisture (HA) to 100%) where the values of field capacity (θ_{CC}) and point permanent wilting (θ_{PMP}) in (cm³ cm⁻³) are consulted depending on soil texture (Saxton *et al.*, 1986) and Pr is the depth of exploration of the roots in cm. This will be the starting point for initiating the BHC, which subsequently accumulates the evapotranspiration water loss (ET_c) of the previous day, and the amount is subtracted of effective precipitation (P_e) and irrigation (R). When the accumulated ET_c is equal or greater than the critical point (θ_c) (equation 2) should be watered down and return the amount of water previously lost due to evapotranspiration. Then the amount of water, net film (Ln) to be irrigated will depend on equation 3.

$$\theta_c = \theta_{CC} - \frac{FAM}{100} (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad \text{y } Ln = (\theta_{CC} - \theta_c) Pr \quad 2 \text{ y } 3)$$

Where: FAM is the maximum collapse fraction; that is, the amount of water leaving the system before applying the next irrigation.

se va restando la cantidad de precipitación efectiva (Pe) y de riego (R). Cuando la ETc acumulada es igual o mayor al punto crítico (θ_c) (ecuación 2) se debe regar y regresar al suelo la cantidad de agua que previamente se perdió debido a la evapotranspiración. Entonces la cantidad de agua, lámina neta (Ln) a regar estará en función de la ecuación 3.

$$\theta_c = \theta_{CC} - \frac{FAM}{100} (\theta_{CC} - \theta_{PMF}) \quad \text{y} \quad Ln = (\theta_{CC} - \theta_c) Pr \quad 2 \text{ y } 3)$$

Donde: FAM es la fracción de abatimiento máximo; es decir, la cantidad de agua que sale del sistema antes de aplicar el siguiente riego.

Para estimar la ETc (Ecu 4) del cultivo, el programa utiliza el Kc específico de cada cultivo que reportó Bravo *et al.* (2006). Con fines de facilitar la codificación del sistema en línea se ajustaron los valores a un polinomio cúbico. (Cuadro 1). Ks es un coeficiente adimensional por efecto del agua residual almacenada en el suelo, por ser una zona de riego y se prevé que la plantas no se someta a estrés hídrico su valor es 1.

$$ETc = K_s * K_c * ETo \quad 4)$$

Con los valores de fracción de ciclo vegetativo eje de las X y el coeficientes de cultivo eje de las Y se realizó una gráfica para cada cultivo, y se suavizó la curva tomando 10 puntos a mano alzada para obtener el modelo del Kc. Que se ajustaron a un modelo polinomial de tercer grado con el método de mínimos cuadrados (SAS, 1999). Los modelos obtenidos para cada cultivo se muestran en el Cuadro 1.

Para obtener ETo el programa consulta la base de datos climatológicos de la estación agrometeorológica previamente seleccionada. El cálculo de la ETo se realiza diariamente de acuerdo al modelo de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006). El método de FAO Penman-Monteith para estimar ETo, se deriva de la ecuación original de Penman-Monteith y las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial, obteniéndose la ecuación 5.

$$ETo = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s + e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad 5)$$

Donde: ETo= evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹), R_n= radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹), G= flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹), T= temperatura media del aire a 2 m de altura (°C), u₂= velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹), e_s= presión de vapor de saturación (kPa), e_a= presión real de vapor (kPa),

To estimate the ETc (ecuación 4) of crop, the program uses the specific Kc of each crop which reported Bravo *et al.* (2006). In order to facilitate the coding of the online system, the values were adjusted to a cubic polynomial. (Table 1). Ks is a dimensionless coefficient due to the effect of the residual water stored in the soil, since it is an irrigation zone and it is expected that the plants will not be subjected to water stress, its value is 1.

$$ETc = K_s * K_c * ETo \quad 4)$$

With the fraction values of vegetative cycle in X axis and the crop coefficients in Y axis was made a graph for each crop, and the curve was smoothed by taking 10 freehand points to obtain the Kc model. They were fitted to a third-degree polynomial model with least squares method (SAS, 1999). The models obtained for each crop are shown in Table 1.

Cuadro 1. Modelos de Kc para diversos cultivos.
Table 1. Kc models for various crops.

Cultivo	Modelo	Coeficiente
Frijol	$y = -3.4829x^3 + 4.5973x^2 - 0.8725x + 0.3786$	R ² = 0.986
Maíz	$y = -3.4596x^3 + 4.6649x^2 - 0.7508x + 0.3504$	R ² = 0.9943
Ajo	$y = -3.6286x^3 + 5.1760x^2 - 1.2205x + 0.2901$	R ² = 0.9765
Chile	$y = -3.0109x^3 + 3.6200x^2 - 0.3941x + 0.359$	R = 0.9814

To obtain the ETo the program consults the climatological database of the agrometeorological station previously selected. The calculation of ETo is done daily of according to Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006). The FAO Penman-Monteith method for estimating ETo is derived from the original Penman-Monteith equation and the aerodynamic and surface resistance equations, obtaining equation 5.

$$ETo = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s + e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad 5)$$

Where: ETo= reference evapotranspiration (mm day⁻¹), R_n= net radiation at the culture surface (MJ m⁻² day⁻¹), G= floor heat flow (MJ m⁻² day⁻¹), T= mean air temperature at 2 m height (°C), u₂= wind speed at 2 m height (m s⁻¹), e_s= saturation vapor pressure (kPa), e_a= actual vapor pressure (kPa), (e_s - e_a)= vapor pressure deficit (kPa), Δ = slope of the vapor pressure curve (kPa °C⁻¹), γ = psychrometric constant (kPa °C⁻¹).

$(e_s - e_a)$ = déficit de presión de vapor (kPa), Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹), γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Para el cálculo de la precipitación efectiva (P_e) se multiplica la precipitación por un factor de corrección de acuerdo a las condiciones climáticas (0.75) cuando esta es mayor a 5 mm. y si es menor la $P_e = 0$ (Serna *et al.*, 2011). Para definir el tiempo y la lámina de riego bruta (L_b) en (mm). Que se va a aplicar al sistema de riego, L_r se divide entre la eficiencia de aplicación (E_a) que es la relación entre el agua aplicada por el sistema de riego y el agua almacenada en zona de raíces considerando un rango de 0.85 a 0.95 para riego por goteo y 0.45 a 0.65 para riego por multicompuertas expresada en (%).

Para el cálculo de tiempo de riego (T_r) expresada en horas, en necesario calcular la tasa horaria (TH) que se refiere a la cantidad de agua en milímetros que sirve el sistema en una hora (mm h⁻¹). En el sistema de riego por goteo con cintilla, TH se estima con base al gasto del emisor en lph, (Q_e), al espaciamiento entre emisores en m, (E_e), y espaciamiento entre líneas regantes en m, (EL_r), (ecuación 6). Para riego por multicompuerta se toma en cuenta el gasto de entrada a la sección de riego en lps (Q_{sec}) y la superficie que se desea regar en ha (S_{ha}) (ecuación 7).

$$TH_{cinta} = \frac{Q_e}{E_e * EL_r} \quad y \quad TH_{multi} = \frac{Q_{sec} * 3.6}{S_{ha}} \quad 6 \text{ y } 7)$$

El tiempo de riego en horas (T_r) es la relación que hay entre la lámina bruta de riego a aplicar entre la TH lo cual indica el número de horas que se regará. Al regar se lleva al θ_c al 100% de HA, y se reinicia el cálculo hasta llegar al fin del ciclo del cultivo obtenido un balance de agua en el suelo a través del tiempo.

Lenguajes de programación: para el desarrollo del sistema en plataforma WEB se utilizó PHP y HTML. Juntos son: un lenguaje de programación muy potente que permite crear sitios web dinámicos. Este sistema permite obtener de manera integral el calendario de riego que consta de fecha de riego, lamina de riego y tiempo de aplicación de agua para cubrir los requerimientos hídricos del cultivo. Para acceder al sistema para la programación de riegos es necesario ingresar al sitio de internet <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/riego>, con lo cual aparecerá la pantalla de acceso y registro. Al entrar al sistema se muestra el mapa de la red de estaciones agroclimáticas, donde el usuario seleccionará la estación más cercana a su predio.

For the calculation of the effective precipitation (P_e), the precipitation is multiplied by a correction factor according to the climatic conditions (0.75) when this is greater than 5 mm. and if under the $P_e = 0$ (Serna *et al.*, 2011). To define the time and the gross watering sheet (L_b) in mm. To be applied to the irrigation system, L_r is divided by the application efficiency (E_a), which is the relation between the water applied by the irrigation system and the water stored in the root zone, considering a range of 0.85 to 0.95 for drip irrigation and 0.45 to 0.65 for multi-door irrigation expressed in (%).

To calculate watering time (T_r) expressed in hours, necessary to calculate the hourly rate (TH) refers to that amount of water in the system serving millimeters in one hour (mm h⁻¹), in the system of drip irrigation with belt, TH is estimated based on the emitter's expenditure in lph, (Q_e), the spacing between emitters in m, (E_e), and spacing between irrigation lines in m, (EL_r), (ecuation 6). The multigate for irrigation is taken into account spending entrance to the irrigation section lps (Q_{sec}) and the surface to be irrigated in ha (S_{ha}) (ecuation 7).

$$TH_{cinta} = \frac{Q_e}{E_e * EL_r} \quad y \quad TH_{multi} = \frac{Q_{sec} * 3.6}{S_{ha}} \quad 6 \text{ y } 7)$$

The irrigation time in hours (T_r) is the relationship between the gross irrigation sheet to be applied between the TH which indicates the number of hours to be irrigated. When watering is carried to θ_c to 100% of HA, and the calculation is restarted until the end of the crop cycle obtained a water balance in the soil over time.

Programming languages: For the development of the system in WEB platform PHP and HTML were used. Together they are: a very powerful programming language that allows you to create dynamic websites. This system allows to obtain in an integral way the irrigation schedule that consists of irrigation date, irrigation sheet and time of application of water to cover the water requirements of the crop. To access the system for irrigation scheduling is necessary to enter the website <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/riego>, which the login screen and log appears. When entering the system the map of the network of agroclimatic stations is shown, where the user will select the station closest to his property.

And followed by that will be requested input data divided into three sections 1) general and crop data; 2) soil data and irrigation criteria; and 3) data on the irrigation system (Figure 1). To facilitate the use of the program, help texts

Y seguido de ese se solicitarán los datos de entrada divididos en tres secciones 1) datos generales y de cultivo; 2) datos de suelo y criterio de riego; y 3) datos sobre el sistema de riego (Figura 1). Para facilitar el uso del programa se incluyen textos de ayuda que describen conceptos y variables de entrada y salida. 1) datos generales y de cultivo: estación, nombre de la parcela, coordenadas de la parcela, cultivo, fecha de siembra o trasplante, ciclo del cultivo; 2) datos de suelo y criterio de riego: textura, profundidad radicular, criterio de riego: a) abatimiento; b) por días; y 3) datos sobre el sistema de riego: en esta sección se seleccionará el tipo de sistema de riego a) multicompuertas; y b) cintilla. Al seleccionar el tipo de riego a utilizar se deben llenar los siguientes datos para el cálculo de la tasa horaria: a) multicompuertas: gasto del sistema, superficie de riego; y b) cintilla: gasto del emisor, espaciamiento entre emisores, espaciamiento entre líneas regantes, eficiencia de aplicación.

El reporte principal de esta aplicación es mostrado en la Figura 2 iniciando con la fechas de siembra o trasplantes y muestra tres columnas con: fecha de riego. Lámina neta y tiempo de riego.

describing input and output concepts and variables are included. 1) general and crop data: season, plot name, plot coordinates, crop, date of planting or transplant, crop cycle; 2) soil data and irrigation criteria: texture, root depth, irrigation criterion: a) depletion or b) by days; 3) data on the irrigation system: this section will select the type of irrigation system a) multigates; and b) belt. When selecting the type of irrigation to use, the following data must be filled in to calculate the hourly rate: a) multigates: system expenditure, irrigation surface; and b) belt: issuer expenditure, spacing between emitters, spacing between irrigation lines, application efficiency.

The main report of this application is shown in Figure 2 beginning with the dates of planting or transplants and shows three columns with: date of irrigation. Net sheet and irrigation time.

Figura 1. Datos de entrada.
Figure 1. Input data.

Reporte de Riego			
Ir Reporte Completo			
Fecha	Lámina bruta (mm)	Tiempo	
2016-03-15	76.40	11 h 37 m	
2016-04-05	47.75	7 h 16 m	
2016-04-26	46.75	7 h 07 m	
2016-05-09	49.98	7 h 36 m	
2016-05-24	50.81	7 h 43 m	
2016-06-04	47.35	7 h 12 m	
2016-06-16	49.08	7 h 28 m	
2016-07-01	49.33	7 h 30 m	
2016-07-14	49.02	7 h 27 m	
2016-07-24	49.33	7 h 30 m	
2016-08-12	46.22	7 h 02 m	
Suma Lámina Neta	562.03		

Figura 2. Reporte de riego.
Figure 2. Irrigation report.

In the Figure 3 shows the water balance in the soil over time graphically from the sowing or transplant to the crop harvest.

The runs were performed for growing chili and the result was 557.5 mm (5 575 m³ ha⁻¹) total irrigation depth throughout the cycle. Serna and Zegbe (2012) reported average volumes of water applied in three years, growing of pepper 5 010 ± 821 m³ ha⁻¹. Khah *et al.* (2007) determined a total volume of 5 560 m³ ha⁻¹ as the right to get the most business performance in drip irrigation.

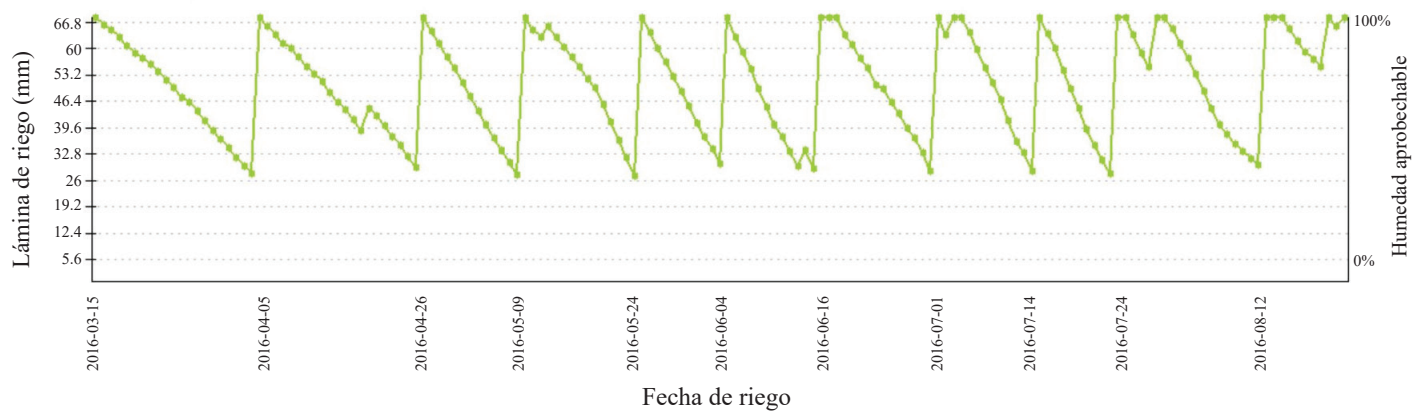


Figura 3. Gráfico de balance de humedad en el suelo.
Figure 3. Graph of soil moisture balance.

En la Figura 3 se muestra el balance de agua en el suelo a través del tiempo de manera gráfica de la siembra o trasplante hasta la cosecha del cultivo.

Se realizaron corridas para el cultivo de chile y el resultado fue 557.5 mm ($5\,575\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$) de lámina total de riego en todo el ciclo. Serna y Zegbe (2012) reportaron volúmenes promedio de agua aplicados en tres años, en el cultivo de chile de $5\,010 \pm 821\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$. Khah *et al.* (2007) determinó un volumen total de $5\,560\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ como el adecuado para obtener el mayor rendimiento comercial en riego por goteo.

La programación y calendarización del riego en tiempo real, da un acercamiento muy preciso del comportamiento real de la humedad en el suelo, lo cual auxilia en la toma de decisiones con respecto a cuándo y cuánto regar con mayor precisión. Este sistema en línea es una herramienta útil para la mayoría de los usuarios del riego, que no realizan algún tipo de medición del estado hídrico del suelo o las plantas para decidir cuándo y cuánto regar sus cultivos.

Conclusiones

Esta aplicación puede utilizarse con fines didácticos por maestros y estudiantes, para entender los principios teóricos involucrados en su desarrollo; así como por investigadores para establecer acciones de investigación orientadas hacia la definición de tratamientos de riego o al mejoramiento de las técnicas utilizadas. Se recomienda para la siguiente versión agregar sistemas de control y dispositivos móviles de comunicación vía radio o mensajería MSN para automatizar el sistema de riego y obtener mayor provecho de esta aplicación.

The program and scheduling of irrigation in real time, gives a very accurate approach to the actual behavior of moisture in the soil, which helps in making decisions regarding when and how much watering more accurately. This online system is a useful tool for most irrigation users, who do not perform some measure of the water status of the soil or plants to decide when and how much to irrigate their crops.

Conclusions

This application can be used for didactic purposes by teachers and students, to better understand the theoretical principles involved in their development; as well as by researchers to help establish possible research actions oriented towards the definition of irrigation treatments or towards the improvement of the techniques used. It is recommended for the next version to add control systems and mobile communication devices via radio or MSN messaging to efficiently automate the irrigation system and obtain greater performance and profit from this application.

End of the English version



Literatura citada

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. FAO, Roma. 2006. 56-323 pp.

- Botey, R. J.; Moreno, V. y Pérez, J. 2009. Monitorización de la humedad del suelo en tres observatorios meteorológicos (campana 2007-2008). AEMET. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 102 p.
- Bravo, L. A. G.; Salinas, G. H. y Velasco, V. I. 2006. Importancia del fenómeno de la sequía. *In*: sequía: vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el norte-centro de México. Bravo, L. A. G.; Salinas, G. H. y Rumayor, R. A. F. (Ed.). Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP. Calera de V. R. Zac. Libro técnico Núm. 4. 180 p.
- Castro, P. M.; Aguilar, M. F. M.; Quevedo, N. A.; Kleisinger, S.; Tijerina, C. L. y Mejía, S. E. 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.
- Catalán, V. E. A.; Sánchez, C. I.; Villa, C. M. M.; Inzúnza, I. M. A. y Mendoza, M. S. F. 2007. Programa para calcular demandas de agua calendarizar el riego de los cultivos. Folleto técnico 7. INIFAP-CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. 28 p.
- Catalán, V. E. A.; Villa, C.; Inzúnza, M. M. I., Román, L. A.; González, M. A. y Delgado, R. G. B. 2013. Irrinet: sistema en línea para el pronóstico del riego en tiempo real en Coahuila. *Agrofaz.* 13: 59-68.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2010. Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F. 643 p.
- CROPWAT, 1993. Programa de ordenador para planificar y manejar el riego. Servicio de fomento y ordenación de recursos hídricos. FAO, Roma. 46 p.
- Fernández, G. F. 1996. Manual de climatología aplicada. Madrid, España.
- Geerts, S. y Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agric. Water Manage.* 96 (9):1275-1284.
- Jensen, M. E.; Burman, R. D. and Allen, R. G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American society of civil engineers. Irrigation water requirements committee of the irrigation and drainage division. Manuals and Reports on Engineering Practice Núm. 70. New York. 332 p.
- Khah, E. M.; Koukoufikis, A. G.; Mavromatis, D.; Chachalis, K. and Goulas, C. K. 2007. The effect of different techniques on plant performance and seed quality in relation to fruit maturation and storage of different genotypes of pepper (*Capsicum annuum* var. *annuum* L.). *J. Food Agric. Environ.* 5:159-163.
- McCarthy, A. C.; Hancock, N. and Raine, H. 2013. Advanced process control of irrigation: the current state and an analysis to aid future development *Irrigation Sci.* 1-10 p.
- Medina, G. G.; Báez, G. A. D. y Ramos, G. J. L. 2007. Red de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas. INIFAP, Campo Experimental Zacatecas, México. Desplegable informativa Núm. 15. 14 p.
- Sánchez, C.; Catalán, I. V. and Villa, C. M. M. 2006. Evapotranspiration modeling for irrigation purposes. Chapter book. *In*: modeling and remote sensing applied to agriculture. USA-México. USDA ARS - INIFAP. 71- 89 pp.
- SAS. 1999. SAS® Procedures guide, Versión 8. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 1 643 p.
- Saxton, K.; Rawls, W.; Romberger, J. S. and Papendick, R. I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1031-1036.
- Serna, P. A.; Zegbe, J. A. y Mena, C. J. 2011. Rendimiento y calidad de chile seco Mirasol cultivado bajo riego parcial de la raíz. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 17(1):19-24.
- Serna A.P. y Zegbe J.A. 2012. Rendimiento, calidad de fruto y eficiencia en el uso del agua del chile 'Mirasol' bajo riego deficitario *Rev. Fitotec. Mex.* 35(5):53-56.
- Silva, V. M. A. 2001. Meteorología e climatología. Brasilia: INMET, Gráfica y Editora Pax.
- Servín P. M. 2015. Sistema para programar y calendarizar el riego en los cultivos en tiempo real. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados, México. 532 p.
- Smith, M. 1991. Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. FAO. Rome, Italy. 64 p.
- WWAP. 2014. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos- UNESCO. 754 p.