

Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario*

Water conservation techniques in surface irrigation at plantation level

Hilario Flores-Gallardo¹, Ernesto Sifuentes-Ibarra², Héctor Flores-Magdaleno³, Waldo Ojeda-Bustamante⁴ y Cristo R. Ramos-García⁵

¹Campo Experimental Valle del Guadiana- INIFAP. Carretera Durango-El Mezquital km 4.5, Durango, México. C. P. 34170. ²Campo Experimental Valle de Fuerte- INIFAP. Carretera Internacional México-Nogales km 1609, Guasave, Sinaloa, México. (sifuentes.ernesto@inifap.gob.mx). ³Programa de Hidrociencias-Colegio de Postgraduados. Carretera México- Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México. C. P. 56230. (mhector@colpos.mx). ⁴Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos, México. C. P. 62550. ⁵Universidad Autónoma de Sinaloa. Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte. Gral. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México (wojeda@tlaloc.imta.mx). ⁸Autor para correspondencia: flores.hilario@inifap.gob.mx.

Resumen

En México, la disponibilidad de agua en zonas áridas y semiáridas es altamente crítica. El sector agrícola requiere de grandes volúmenes de agua para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos. Apesar de la adquisición de sistemas de riego para tener un manejo eficiente del agua, la mayor parte de las zonas agrícolas cuentan con tecnología de riego inadecuada que genera pérdidas en la conducción y distribución del agua. El riego por gravedad a nivel parcelario tiene una baja eficiencia en su aplicación y además, no existe una programación y medición del riego para satisfacer las demandas de los cultivos en términos de oportunidad y eficiencia. La presente investigación se realizó en el norte de Sinaloa, México durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2006-2007, se sembró maíz (*Zea mays* L.) en el Campo Experimental Valle del Fuerte (INIFAP) y con un productor cooperante. Las técnicas de conservación del agua en riego por gravedad evaluadas fueron las siguientes: riego en camas, riego por reducción de gasto, riego por surcos alternos y riego convencional. La técnica de surcos alternos fue la mejor alternativa en términos de eficiencia de riego y rendimiento; obteniendo en el Campo Experimental 13.8 t ha⁻¹ en promedio, 83.65% de eficiencia de aplicación y 88.19% de uniformidad, y con el productor 11.86 t ha⁻¹ con 79% de eficiencia de aplicación y 83.42% de uniformidad.

Abstract

In Mexico, the availability of water in arid and semi-arid areas is highly critical. The agricultural sector requires large volumes of water to meet the water requirements of crops. Despite the acquisition of irrigation systems to have an efficient management of water, most of the agricultural areas have inadequate irrigation technology that generates conveyance losses and water distribution. Gravity irrigation at plantation level has a low efficiency in implementation and there is no measurement and irrigation scheduling to meet the demands of the crop in terms of timeliness and efficiency as well. This research was conducted in northern Sinaloa, Mexico during the autumn-winter 2006-2007 season, sowing maize (*Zea mays* L.) in the Fort Valley Experimental Field (INIFAP) and with a cooperating producer. The water conservation techniques in surface irrigation evaluated were: irrigation in beds, irrigation expenditure reduction, alternate furrow irrigation and conventional irrigation. Alternate furrow technique was the best alternative in terms of irrigation efficiency and performance, getting in the Experimental 13.8 t ha⁻¹ on average, 83.65% efficiency of application and 88.19% uniformity, and producer 11.86 t ha⁻¹ with 79% efficiency of application and 83.42% uniformity.

* Recibido: agosto de 2013
Aceptado: diciembre de 2013

Palabras clave: *Zea mays* L., eficiencia de riego, requerimiento hídrico.

Introducción

La superficie cultivada en el mundo es aproximadamente de 1 527 millones de hectáreas (FAO, 2011), de las cuales 19.71% corresponde a la agricultura de riego y gran parte de dicha superficie presenta problemas por incertidumbre en los volúmenes disponibles en sus fuentes de abastecimiento. Las grandes zonas agrícolas de México se ubican en las zonas áridas y semiáridas, las cuales requieren del riego para asegurar rendimientos comerciales. La agricultura desarrollada en estas zonas es vulnerable ante los efectos de la variabilidad climática, el cambio climático y a los fenómenos climatológicos extremos como ciclones, heladas, sequías, etc (Flores-Gallardo *et al.*, 2006; Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011).

Los cambios en los patrones climáticos actuales por efectos del cambio climático, demandará el uso frecuente de herramientas para conocer con mayor certidumbre la respuesta de los cultivos en condiciones climáticas contrastantes (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Los métodos de riego por gravedad son los más comunes para aplicar el agua en los terrenos agrícolas de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas a nivel mundial y en México no es la excepción (Benjamin *et al.*, 1994; González-Camacho *et al.*, 2006). Lo anterior es atribuible a la simpleza de su operación y al bajo consumo de energía (Cabrera, 1994). Es necesario e importante un manejo adecuado del riego a nivel parcelario mediante un seguimiento constante que permita realizar evaluaciones sobre la eficiencia y distribución del agua para mejorar la aplicación del riego (Flores-Gallardo *et al.*, 2012).

Debido a que la competencia por la disponibilidad de agua es cada vez más fuerte, existe la necesidad de generar un reconocimiento económico, social y ambiental al buen uso del agua. Por tal motivo, para que una calendarización y la supervisión del servicio de riego en grandes zonas sean efectivas, es importante el ajuste de la frecuencia y cantidad del riego con base en factores del suelo, ambiente, planta y manejo del riego, lo cual demanda de modelos de fácil implantación en los sistemas computacionales (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006).

Key words: *Zea mays* L., irrigation efficiency, water requirement.

Introduction

The cultivated area in the world is about 1527 million hectares (FAO, 2011), of which 19.71% is irrigated agriculture and much of the surface presents problems for uncertainty in the volumes available sources of supply. Large agricultural areas of Mexico are located in arid and semi-arid, which require irrigation to ensure commercial returns. Agriculture developed in these areas is vulnerable to the effects of climate variability, climate change and extreme weather events such as cyclones, frost, drought, etc., (Flores-Gallardo *et al.*, 2006; Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011).

Changes in current weather patterns for climate change will require frequent use of tools to know with greater certainty the response of crops in contrasting climatic conditions (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). The gravity irrigation methods are the most common to apply water on agricultural land in arid, semi-arid and sub-humid worldwide and Mexico is no exception (Benjamin *et al.*, 1994; González-Camacho *et al.* 2006). This is attributable to the simplicity of its operation and low power consumption (Cabrera, 1994). It is necessary and important to proper management of irrigation at plantation level by constant monitoring that allows assessments of the efficiency and distribution of water to improve water application (Flores-Gallardo *et al.*, 2012).

Because competition for water availability is becoming stronger, there is a need to generate economic, social and environmental acknowledgment for water use. Therefore, for a scheduling and monitoring of irrigation service in large areas to be effective, it is important to adjust the frequency and amount of irrigation based on soil factors, environment, plant and irrigation management, which requires easy implementation models in computer systems (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006).

Irrigation beds were used to evaluate the distribution of nitrogen levels in corn but has been somewhat overcome by conventional irrigation (Patel *et al.*, 2006). However, Mexico has used this irrigation technique with more emphasis on the cultivation of melon (*Cucumis melo* L.) at the experimental

El uso del riego en camas se ha utilizado para evaluar la distribución de los niveles de nitrógeno en maíz aunque se ha visto ligeramente superado por el riego convencional (Patel *et al.*, 2006). Sin embargo, en México se ha utilizado esta técnica de riego con más énfasis en el cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) a nivel experimental (Robles *et al.*, 2005) y en el caso de la técnica de riego intermitente se ha implementado en melgas y no en surcos (Horst *et al.*, 2005; Quesada *et al.*, 2011).

Díaz *et al.* (2007) reportaron otro tipo de técnicas de riego como el riego con tubería multicompuertas y riego por goteo para evaluar el crecimiento de maíz con diferentes niveles de nitrógeno, aunque su implementación requiere de energía eléctrica para distribuir el agua de riego en la parcela. Chávez *et al.* (2010) usaron acondicionadores como la poliácridamida (PAM) y el yeso aplicados al suelo para ayudar a reducir la cantidad de agua utilizada pero como consecuencia de la degradación de los acondicionadores por efectos de la luz solar e interrupción mecánica, su efecto es temporal.

A pesar de las ventajas de las diferentes técnicas de conservación del agua en riego por gravedad para los diferentes tipos de suelo, su aplicación en México no ha sido analizada a detalle para las condiciones locales de varios distritos de riego, en especial para las condiciones del riego por gravedad porque existen estudios implementando tubería multicompuertas (Arellano *et al.*, 2001; Rosano-Méndez *et al.*, 2001). Gran parte de la aplicación del riego se realiza de acuerdo al criterio que el agricultor ha adquirido como experiencia y al manejo que ofrece cada parcela, ya que la programación científica del riego en la mayoría de los casos se realiza aplicando los procedimientos propuestos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) debido a que existe nula o escaso material bibliográfico generado localmente (Sifuentes y Ojeda, 2005).

Como resultado de las bajas eficiencias de aplicación del riego por gravedad en los distritos y módulos de riego del país, es necesario estudiar diferentes alternativas de manejo del riego como el caso de las técnicas de conservación del agua en riego por gravedad en el cultivo de maíz. El objetivo del presente trabajo fue evaluar las siguientes técnicas: a) riego por surcos alternos; b) riego por reducción de gasto; y c) riego en camas para las condiciones del distrito de riego 075 "Río Fuerte", Sinaloa. La evaluación de dichas técnicas se realizó con respecto a la aplicación del riego convencional por surcos en el área de influencia del distrito de riego 075.

level (Robles *et al.*, 2005) and in the case of intermittent irrigation technique; two fullows have been implemented instead of furrows (Horst *et al.*, 2005; Quesada *et al.*, 2011).

Díaz *et al.* (2007) reported other irrigation techniques such as irrigation tubing and drip irrigation multi-gates to evaluate the growth of corn with different levels of nitrogen, but its implementation requires electricity for irrigation water distribution in the plot. Chávez *et al.* (2010) used conditioners as polyacrylamide (PAM) and the gypsum applied to the soil to help reduce the amount of water used but due to the degradation of air conditioners on effects of sunlight and mechanical disruption, its effect is temporary.

Despite the advantages of the different conservation techniques in surface irrigation water for different soil types, their application in Mexico has not been analyzed in detail for local conditions in several irrigation districts, especially for conditions gravity irrigation pipe because there multi-gates implementing studies (Arellano *et al.* 2001; Rosano-Méndez *et al.*, 2001). Much of the irrigation application is done according to the criteria such as, the farmer acquiring management experience and offered each plot, as the scientific program of irrigation in most cases is done by applying the procedures proposed by the Food and Agriculture Organization (FAO) because there is no or little locally generated bibliography (Sifuentes and Ojeda, 2005).

Because of the low efficiency of application of gravity irrigation districts and irrigation modules of the country, it is necessary to study different irrigation management alternatives as the case of water conservation techniques in surface irrigation in maize. The aim of this study was to evaluate the following techniques: a) alternate furrow irrigation; b) reduced irrigation costs and; c) beds irrigation conditions irrigation district 075 "Río Fuerte", Sinaloa. The evaluations of these techniques are performed with respect to the application of conventional furrow irrigation in the area of influence of the irrigation district 075.

Materials and methods

This study was conducted in the irrigation district 075 "Río Fuerte" during the season autumn-winter 2006-2007 located in the arid zone of northern Sinaloa, Mexico with geographic coordinates of 25° 48' 53" north latitude, 109° 1' 32" west longitude and an average elevation of 20 m. The irrigation

Materiales y métodos

El presente estudio se desarrolló en el distrito de riego 075 “Río Fuerte” durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2006-2007, localizado en la zona árida del norte de Sinaloa, México con unas coordenadas geográficas de 25° 48’ 53” latitud norte, 109° 1’ 32” longitud oeste y una altitud promedio de 20 m. Este distrito de riego es de los más grandes en cuanto a superficie se refiere en México, donde el maíz ocupa 57% en promedio de la superficie anual cosechada (CONAGUA, 2012). De acuerdo con el plan de cultivos típico en dicho distrito de riego, el maíz es el principal cultivo establecido en el ciclo agrícola otoño- invierno con una superficie de 65.8% y en el ciclo primavera-verano con 33.8% (Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2011).

Se establecieron tratamientos en el Campo Experimental Valle del Fuerte y con un productor cooperante (nivel comercial) para evaluar diferentes técnicas de riego: riego en camas (se construyen camas mediante bordos de 1.6 m de ancho y 20 cm de altura), riego por reducción de gasto (generalmente se utilizan gastos altos al 75% de avance del riego pero en este experimento se utilizaron dos sifones con lo cual se redujo el gasto quitando un sifón), riego por surcos alternos (se construyen surcos normales pero no se riega un surco, el cual se alterna en el siguiente riego; lo cual implica que se riegue el surco que no se usó al momento del siguiente riego) y el riego convencional (se riegan todos los surcos) (Figura 1). La superficie total de las dos parcelas (Campo Experimental Valle del Fuerte y con el productor cooperante) donde se establecieron los tratamientos fue de 3 hectáreas en cada una de las parcelas; 7 500 m² por cada técnica de conservación del agua y el riego convencional.

Los parámetros para el diseño de riego por gravedad se obtuvieron con el modelo RIGRAV (Figura 2) desarrollado por Rendón-Pimentel *et al.* (1995) y poder determinar los parámetros hidráulicos en promedio para el Valle del Fuerte, ya que para este tipo de diseños sólo se aplican como apoyo los determinados por las ecuaciones 1 y 2 desarrolladas por Green y Ampt (1911); Rawls y Brakensiek (1983). Es importante señalar que sólo para el riego convencional no se aplicó un diseño de riego por gravedad, lo cual fue con fines comparativos entre las técnicas evaluadas con el manejo que utiliza cualquier productor de la región.

$$\theta_{cc} = 0.3486 - 0.0018 (\text{arena}) + 0.0039 (\text{arcilla}) + 0.0228 (\text{MO}) - 0.0738 (\rho_a) \quad (1)$$

district is the largest in area refers Mexico, where maize is 57% in average annual area harvested (CONAGUA, 2012). According to the typical crop plan said irrigation district, maize is the main crop plantation established in the autumn-winter cycle with an area of 65.8% and in the spring-summer with 33.8% (Iniguez-Covarrubias *et al.*, 2011).

The treatments were established in the Fort Valley Experimental Field and with a cooperating producer (commercially) to evaluate different techniques of irrigation: irrigation in beds (beds are made by furrows of 1.6 m wide and 20 cm high), reduced irrigation spending (generally used at 75% higher cost of irrigation advance but in this experiment, two siphons thereby removing a reduced expenditure siphon) alternate furrow irrigation (normal furrows are constructed but not watered a furrow, which is alternated in the following irrigation implying that water the furrow was not used when the next watering) and conventional irrigation (all furrows are irrigated) (Figure 1). The total area of both plots (Fort Valley Experimental Field and the cooperating producer) which set the treatments was 3 acres in each of the plots; 7 500 m² for each water conservation technique and conventional irrigation.

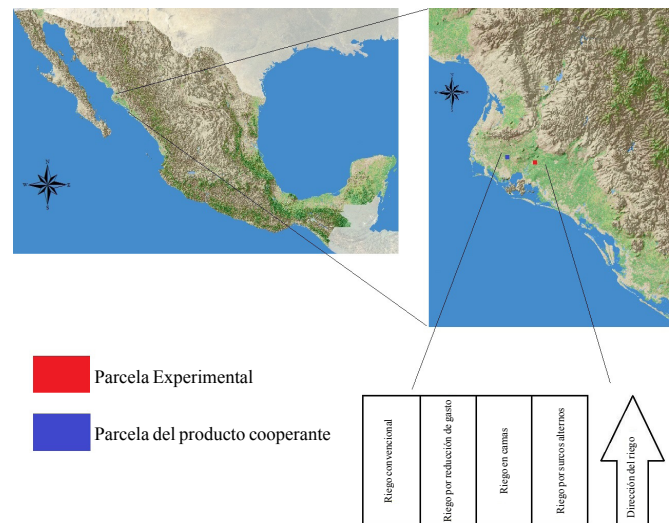


Figura 1. Establecimiento de los tratamientos en el Campo Experimental Valle del Fuerte y con el productor cooperante.

Figure 1. Establishment of treatments in the Fort Valley Experimental Field and the cooperating producer.

Design parameters for gravity irrigation were obtained with RIGRAV model (Figure 2) developed by Rendón-Pimentel *et al.* (1995) and to determine the hydraulic parameters on average for the Fort Valley Experimental Field, since for this type of design we apply only to support those determined

$$\theta_{PMP} = 0.0854 - 0.0004 (\text{arena}) + 0.0044 (\text{arcilla}) + 0.0122 (\text{MO}) - 0.0182 (\rho_a) \quad (2)$$

Donde: θ_{CC} es la capacidad de campo (%); θ_{PMP} es el punto de marchitez permanente (%); MO es la materia orgánica del suelo (%); y ρ_a es la densidad aparente (g cm^{-3}).

Una vez colectadas las muestras necesarias de suelo en la parcela establecida en el Campo Experimental Valle del Fuerte y con el productor cooperante, se obtuvieron los datos de θ_{CC} , θ_{PMP} , MO, ρ_a , arcilla, limo y arena (Cuadro 1).

Para un buen uso del modelo RIGRAV, se deben comprender las fases de riego que dicho modelo considera para generar un diseño de riego por gravedad a nivel parcelario: a) fase de avance (inicia cuando se introduce el agua de riego en la cabecera superior del surco y termina cuando el frente de avance alcanza el extremo inferior); b) fase de almacenamiento (inicia cuando el agua llega al final del surco y concluye cuando se corta el suministro de agua en la parte superior del surco); c) fase de consumo (es el tiempo que transcurre entre el corte del agua y la desaparición del tirante de agua en el inicio del surco); y d) fase de recesión (inicia a partir de que el tirante de agua desaparece en el inicio del surco y termina cuando el tirante de agua desaparece de la superficie del surco).

Cuadro 1. Datos de suelo obtenidos en el Campo Experimental Valle del Fuerte y con el productor cooperante.
Table 1. Soil data obtained in the Fort Valley Experimental Field and the cooperating producer.

Dato de suelo	Campo Experimental	Productor cooperante
Capacidad de campo (θ_{CC})	0.403%	0.367%
Punto de marchitez permanente (θ_{PMP})	0.253%	0.225%
Materia orgánica (MO)	1.0%	1.1%
Densidad aparente (ρ_a)	1.2 g cm^{-3}	1.2 g cm^{-3}
Arcilla (R)	42.52%	36.7%
Limo (L)	32.25%	29.14%
Arena (A)	25.23%	34.16%

Para generar el diseño del riego por gravedad para la parcela del Campo Experimental Valle del Fuerte y del productor cooperante, se calibraron los parámetros en el riego de asiento, primer y segundo riego de auxilio para generar las fases de avance, recesión y de almacenamiento, midiendo las fases de avance y recesión desde el inicio hasta el fin del surco. Por lo tanto, se tomó en cuenta el gasto óptimo a utilizar en el momento que se deba regar de acuerdo con los parámetros hidráulicos del suelo y los datos generales requeridos por el modelo RIGRAV (Cuadro 2).

by equations 1 and 2 developed by Green and Ampt (1911), Rawls and Brakensiek (1983). It is important to note that only conventional irrigation is not performed a gravity irrigation, which was for comparison between management; techniques evaluated using any producer in the region.

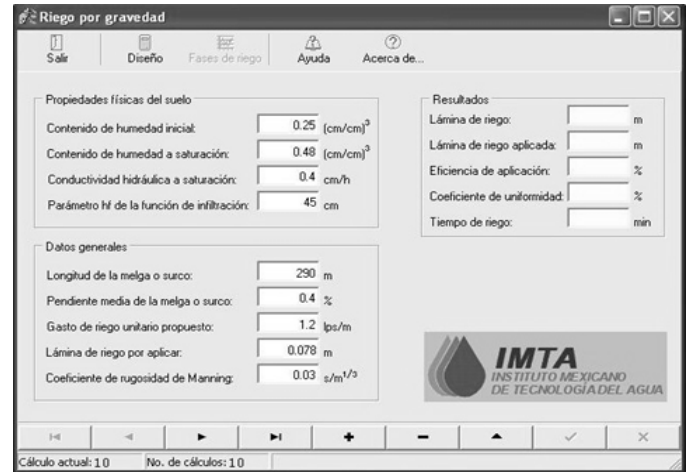


Figura 2. Pantalla principal para capturar datos en el modelo RIGRAV.

Figure 2. Main Screen to capture data in the model RIGRAV.

$$\theta_{CC} = 0.3486 - 0.0018 (\text{arena}) + 0.0039 (\text{arcilla}) + 0.0228 (\text{MO}) - 0.0738 (\rho_a) \quad (1)$$

$$\theta_{PMP} = 0.0854 - 0.0004 (\text{arena}) + 0.0044 (\text{arcilla}) + 0.0122 (\text{MO}) - 0.0182 (\rho_a) \quad (2)$$

Where: θ_{CC} is the field capacity (%), θ_{PMP} is the permanent wilting point (%), MO is the soil organic matter (%), and ρ_a is the bulk density (g cm^{-3}).

Once collected the necessary samples of soil in the plot established in the Fort Valley Experimental Field and producer cooperating data were obtained θ_{CC} , θ_{PMP} , MO, ρ_a , clay, silt and sand (Table 1).

Cuadro 2. Datos generales requeridos por el modelo RIGRAV para el diseño de riego por gravedad.
Table 2. General information required by the model RIGRAV for gravity irrigation design.

Dato generales requeridos por el modelo RIGRAV	Campo Experimental			Productor cooperante		
	RC	RSA	RRG	RC	RSA	RRG
Longitud del surco (m)	100	100	100	100	100	100
Pendiente del surco (%)	0.019	0.019	0.019	0.130	0.130	0.130
Gasto de riego unitario propuesto (L s ⁻¹)	0.52	0.56	1.26 y 0.63	0.52	0.52	1.25 y 0.62
Lámina de riego por aplicar (cm)	10.55	10.55	10.55	9.92	9.92	9.92
Coefficiente de rugosidad de Manning (s m ^{1/3})	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

RC= riego en camas; RSA= riego por surcos alternos; RRG= riego por reducción de gasto.

También debe considerarse el arreglo topológico como el espaciamiento entre surcos para establecer un determinado cultivo y el trazo de los surcos de acuerdo a la pendiente para tener un manejo adecuado del agua logrando una mejor distribución de la humedad en el suelo con mejores eficiencia de aplicación (Stone y Nofziger, 1993; Arellano *et al.*, 2001).

Para complementar los atributos de cada tratamiento, se realizaron evaluaciones en términos de eficiencias de aplicación y distribución mediante aforo de sifones y mediciones de la humedad del suelo con un sensor denominado Time Domain Reflectometry (TDR), un medidor de carga hidráulica así como muestreos de suelo con barrena para determinar el volumen de agua en el suelo con el método gravimétrico. El criterio para aplicar los subsecuentes riegos en cada parcela fue con base en el pronóstico y el calendario de riego mediante la programación integral del riego en maíz (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006), la cual utiliza la fenología del cultivo así como datos de suelo para generar los requerimientos de riego en maíz con un ajuste automático a la variabilidad climática (ecuaciones 3, 4, 5 y 6).

$$\begin{aligned} \textcircled{D} &= T_a - T_{c-\min}, T_a < T_{c-\max}; \\ \textcircled{D} &= T_{c-\max} - T_{c-\min}, T_a \geq T_{c-\max}; \\ \textcircled{D} &= 0, T_a \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (3)$$

Donde= \textcircled{D} son los grados día desarrollo; T_a es la temperatura ambiental diaria; $T_{c-\max}$ y $T_{c-\min}$ son las temperaturas máximas y mínimas del aire, respectivamente y las cuales son los umbrales en que se desarrolla la planta de maíz (30 y 10 °C).

$$K_c = K_{\max} \operatorname{erfc} \left\{ \left(\frac{X - X_{\max}}{\alpha_1} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

Si $K_c < K_{c_0}$, entonces $K_c = K_{c_0}$

Donde= K_c es el coeficiente del cultivo; K_{\max} es el coeficiente de cultivo máximo; K_{c_0} es el coeficiente de cultivo inicial= X es una variable auxiliar que depende de los grados

For satisfactory use of the RIGRAV model, we need to understand the phases of the model considers irrigation to generate a gravity irrigation design at plot level: a) advance phase (starts when you enter the irrigation water in the top header of the furrow and ends when the advancing front reaches the lower end); b) storage phase (start when the water reaches the end of the furrow and ends when cutting the water supply in the upper row); c) phase consumption (the time that elapses between water cut and the disappearance of the water depth at the beginning of the furrow); and d) recession phase (start from the disappearing water depth at the beginning of the furrow and ends when the water depth away from the surface of the furrow).

In order to generate the gravity irrigation design for the Fort Valley Experimental Field and the cooperating producer, the parameters were calibrated to irrigate seat, first and second supplemental irrigation to generate the phases of advance, recession and storage measuring the advance and recession phases from the beginning to the end of the furrow. Therefore, it took into account the optimal spending to use at the time it is due to water according to soil hydraulic parameters and general data RIGRAV required by the model (Table 2).

It is also necessary to consider the topological arrangement as the spacing between rows to set a particular crop and the stroke of the furrows according to the slope to have a proper water management achieving a better distribution of soil moisture with better application efficiency (Stone and Nofziger, 1993; Arellano *et al.*, 2001).

For complementing the attributes of each treatment, evaluations in terms of application and distribution efficiencies by siphoning capacity and measurements of soil moisture with a sensor called Time Domain Reflectometry (TDR), hydraulic loading meter and sampling soil auger

día acumulados ($\sum^{\circ}D$); X_{\max} es el valor adimensional normalizado x cuando se presenta el valor máximo K_{\max} ; erfc es una función complementaria del error y α_1 es un parámetro de regresión.

$$R_d = R_{do} + (R_{d\max} - R_{do}) \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{(\sum^{\circ}D)^2}{\alpha_1} \right) \right\} \quad (5)$$

Donde: R_d es la profundidad radicular de acuerdo a los a acumulación de $\sum^{\circ}D$; R_{do} es la profundidad inicial de la raíz; $R_{d\max}$ es la profundidad máxima de la raíz; α_2 es un parámetro de regresión y $\sum^{\circ}D$ son los grados día acumulados.

$$MDP = \alpha_3 + \alpha_4 K_c \quad (6)$$

Donde: MDP es el máximo déficit permitido o factor de abatimiento; α_3 y α_4 son parámetros de regresión, respectivamente.

Para una estimación en tiempo real, se apoyó en información meteorológica de la red de estaciones agrometeorológicas automatizadas del distrito de riego 075 "Río Fuerte" y la cual se fusionó en tiempos recientes con la red nacional de estaciones estatales agroclimatológicas de la Coordinadora Nacional de las Fundaciones Produce (COFUPRO) y del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Lo ideal en el riego por gravedad a nivel parcelario es que todas las plantas reciban la misma cantidad de agua, lo cual equivale a una aplicación uniforme de la lámina de riego en toda la longitud del surco y para evaluar dicha uniformidad se aplica la siguiente ecuación del coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) adaptado para riego por gravedad (Christiansen, 1942):

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |I_i - \bar{I}|}{n \bar{I}} \times 100 \quad (7)$$

Donde: I_i es la lámina de riego infiltrada en el punto i ; \bar{I} es la lámina de riego infiltrada media y n es el número de puntos considerados para el cálculo de la uniformidad. Generalmente se considera un CUC mayor o igual a 80% como aceptable en riego por gravedad.

En cuanto a la eficiencia de aplicación (EA) del riego (ecuación 8), tiene diferentes connotaciones porque se puede utilizar para el diseño de zonas de riego o para evaluar el riego por gravedad a nivel parcelario (Walker y Skogerboe, 1987).

$$EA = \frac{V_r}{V_a} \times 100 \quad (8)$$

to determine the volume of water on the floor with the gravimetric method. The criterion for subsequent irrigations applied in each plot was based on the prognosis and watering schedule by scheduling corn irrigation integral (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006), which uses crop phenology and data ground to generate corn irrigation requirements with automatic climate variability (equations 3, 4, 5 and 6).

$$\begin{aligned} \circ D &= T_a - T_{c-\min}, T_a < T_{c-\max}; \\ \circ D &= T_{c-\max} - T_{c-\min}, T_a \geq T_{c-\max}; \\ \circ D &= 0, T_a \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (3)$$

Where: $\circ D$ are the degree-day development, T_a is the daily temperature, $T_{c-\max}$ and $T_{c-\min}$ are the maximum and minimum temperatures of the air, respectively, and which are the thresholds at which the plant develops corn (30 to 10 °C).

$$K_c = K_{\max} \text{erfc} \left\{ \left(\frac{X - X_{\max}}{\alpha_1} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

Si $K_c < K_{co}$, entonces $K_c = K_{co}$

Where: K_c is the crop coefficient, K_{\max} is the maximum crop coefficient, K_{co} is the initial crop coefficient = X is an auxiliary variable that depends on the degree days accumulated ($\sum^{\circ}D$), X_{\max} is the dimensionless value normalized x when K_{\max} has the maximum value, erfc is a complementary error function and α_1 is a regression parameter.

$$R_d = R_{do} + (R_{d\max} - R_{do}) \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{(\sum^{\circ}D)^2}{\alpha_1} \right) \right\} \quad (5)$$

Where: R is the root depth d according to a buildup of $\sum^{\circ}D$, R_{do} is the initial depth of the root, $R_{d\max}$ is the maximum depth of the root; α_2 is a regression parameter and $\sum^{\circ}D$ are accumulated day degrees.

$$MDP = \alpha_3 + \alpha_4 K_c \quad (6)$$

Where: MDP is the maximum allowed deficit or depletion factor, α_3 and α_4 are regression parameters, respectively.

For an estimate in real-time weather information relied on network agro-meteorological stations automated irrigation district 075 "Río Fuerte" and which merged in recent times with the national network of state agro-climatic stations of the National Coordinator of the Produce Foundations (COFUPRO) and the National Research Institute for Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP). Ideally in gravity irrigation plantation level is that all plants receive the same amount of water, which is equivalent to a uniform

Donde: V_r es el volumen de agua requerido para satisfacer las necesidades en la zona de raíces del cultivo, y V_a es el volumen aplicado de agua al suelo.

Resultados y discusión

En las parcelas donde se evaluaron las técnicas de riego a nivel parcelario, se obtuvieron valores de los parámetros hidráulicos para el diseño de riego por gravedad (Cuadro 3). Dichos valores son aplicables para la mayoría de los suelos del Valle del Fuerte debido a que las características edáficas son similares, ya que predomina una textura arcillosa con una pendiente de 0 a 0.02%.

Cuadro 3. Parámetros hidráulicos del suelo para diseño de riego por gravedad en suelos arcillosos del Valle del Fuerte.

Table 3. Soil hydraulic parameters for gravity irrigation design in clay soils at Fort Valley.

Parámetro	Valor	Unidad
Contenido de humedad inicial (θ_o)	0.320	cm ³ cm ⁻³
Contenido de humedad a saturación (θ_s)	0.490	cm ³ cm ⁻³
Conductividad hidráulica a saturación (K_s)	0.004	cm h ⁻¹
Parámetro de la función de infiltración (h_f)	158	cm

Es importante mencionar que el modelo RIGRAV requerirá de modificaciones para poder aceptar los parámetros obtenidos en cuanto se refiere a los parámetros hidráulicos del suelo en el presente estudio, ya que sus rangos permitidos de datos están por debajo de los datos obtenidos en campo.

De acuerdo a las condiciones climáticas y agronómicas en el Campo Experimental Valle del Fuerte, se obtuvo un requerimiento total de 44.6 cm (Ln) incluyendo dos lluvias mediante la programación integral del riego en maíz, se consideró una eficiencia de aplicación de 80% en el diseño y manejo del riego con el modelo RIGRAV y se aplicó una lámina bruta de 53.32 cm. A continuación se presentan los requerimientos hídricos y aplicación de láminas de riego para la técnica de riego por surcos alternos (Cuadro 4).

application of irrigation depth throughout the length of the furrow and to evaluate such uniformity the following equation applies the Christiansen uniformity coefficient (CUC) adapted to gravity irrigation (Christiansen, 1942):

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |I_i - \bar{I}|}{n \bar{I}} \times 100 \quad (7)$$

Where: I_i is the depth of water infiltrated at point i ; \bar{I} is the average depth of water infiltration and n is the number of points for calculation of uniformity. CUC is generally considered a greater than or equal to 80% as acceptable in surface irrigation.

Regarding the application efficiency (EA) of irrigation (equation 8) has different connotations because it can be used to design irrigation areas or to evaluate gravity irrigation at plot level (Walker and Skogerboe, 1987).

$$EA = \frac{V_r}{V_a} \times 100 \quad (8)$$

Where: V_r is the volume of water required to meet the needs in the root zone of the crop, and V_a is the volume of water applied to the soil.

Results and discussion

In the plots where irrigation techniques assessed at plot level, hydraulic parameter values were obtained for the design of surface irrigation (Table 3). These ratings are applicable for most Fort Valley soils because soil characteristics are similar, and dominated by a clay texture with a gradient from 0 to 0.02% Pacific.

It is noteworthy that the model RIGRAV required modifications in order to accept the parameters obtained as regards soil hydraulic parameters in the present study because their data allowed ranges are below the data obtained in the field.

According to climatic and agronomic conditions in the Fort Valley Experimental Field we obtained a total requirement of 44.6 cm (Ln) including two rain by scheduling corn

Cuadro 4. Calendario de riego para maíz con riego por surcos alternos en el Campo Experimental Valle del Fuerte con una fecha de siembra del 05 de diciembre de 2006.

Table 4. Irrigation schedule for corn, alternate furrow irrigation in Fort Valley Experimental Field with a planting date on December 5, 2006.

NR	Fecha	DDS	IR	Ln (cm)	Lb (cm)	$\Sigma^{\circ}D$	Etapa fenológica
Riego de asiento	15/11/2005	-20	-20	14.6	18.25	0	
Lluvia	26/01/2006	52		0.12	0.12	403.28	4-8 hojas (V4-V8)
Lluvia	05/02/2006	63		1.3	1.3	462.58	4-8 hojas (V4-V8)
2	04/03/2006	90	110	7.92	9.90	663.91	Flor masculina (VT)
3	30/03/2006	116	26	10.55	11.12	905.21	Jiloteo-grano acuoso (R1-R2)
4	19/04/2006	136	20	10.11	12.63	1110.80	Grano masoso (R4)
Total		-	-	44.6	53.32	-	-

NR= número de riego; DDS= días después de siembra; IR= intervalo de riego expresado en días; Ln= lámina neta; Lb= lámina bruta; $\Sigma^{\circ}D$: grados día acumulados.

Se midió la aplicación de las láminas de riego, se calculó la eficiencia de aplicación y la uniformidad a los 116 días después de la siembra para las diferentes técnicas de conservación del agua utilizadas, de las cuales sobresalió el riego por surcos alternos con 94.87% (Figura 3).

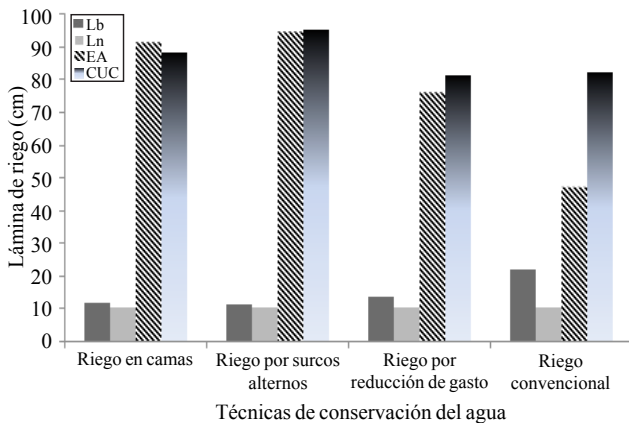


Figura 3. Láminas de riego aplicadas, eficiencia de aplicación y uniformidad por cada técnica de conservación del agua en el Campo Experimental Valle del Fuerte.

Figure 3. Irrigation depths applied; application efficiency and; uniformity for each water conservation technique in the Fort Valley Experimental Field.

Para las condiciones predominantes de la parcela del productor cooperante, se obtuvo un requerimiento total de 37.16 cm (Ln) incluyendo también dos lluvias, se consideró una eficiencia de aplicación de 80% en el diseño y manejo del riego con el modelo RIGRAV y se aplicó una lámina bruta de 46.97 cm. Al igual que en la parcela experimental, se presentan los datos de los requerimientos hídricos y la aplicación de láminas de riego para la técnica de riego por surcos alternos (Cuadro 5).

irrigation considered an efficiency of 80% implementation of the design and management of irrigation and the RIGRAV model was applied gross depth of 53.32 cm. Below are the water requirements and irrigation application sheets for technical alternate furrow irrigation (Table 4).

Application was measured irrigation depths were calculated application efficiency and uniformity at 116 days after planting for different water conservation techniques used, of which excelled alternate furrow irrigation with 94.87% (Figure 3).

For the prevailing conditions of the cooperating producer plot, we obtained a total requirement of 37.16 cm (Ln) including two rain also was considered an efficiency of 80% application in the design and management of irrigation and the RIGRAV model applying a gross sheet of 46.97 cm. As in the experimental plot, data are presented water requirements and irrigation application sheets for technical alternate furrow irrigation (Table 5).

The application of water depths at 109 days after planting by the different techniques used had an application efficiency above 80% but excelled alternate furrow irrigation with 90.18% (Figure 4).

As for the yields obtained for each plot and water conservation technique, better results were obtained in the plot of the Fort Valley Experimental and alternate furrow irrigation (Table 6). It is worth mentioning that he had better control in this plot because the plot was producer lower efficiencies in the application of irrigation due to handling exercised by the sprinklers during the implementation of water conservation techniques.

Cuadro 5. Calendario de riego para maíz en la parcela del productor cooperante con una fecha de siembra del 08 de noviembre de 2007 usando el riego por surcos alternos.

Table 5. Irrigation schedule for maize in the cooperating producer plot with planting date of November 8, 2007 using alternate furrow irrigation.

NR	Fecha	DDS	IR	Ln (cm)	Lb (cm)	$\Sigma^{\circ}D$	Etapas fenológicas
Riego de asiento	23/10//2007	-16	-16	14.3	20.00	0	
2	05/01/2008	59	75	4.04	5.05	496.00	8 hojas (V8)
Lluvia	05/02/2008	90		0.62	0.62	739.70	Flor masculina-jiloteo (VT-R1)
Lluvia	12/02/2008	97		0.22	0.22	792.00	Flor masculina-jiloteo (VT-R1)
3	24/02/2008	109	50	9.92	11.00	893.88	Jiloteo-Grano acuoso (R1-R2)
4	17/03/2008	130	21	8.06	10.08	1085.90	Grano lechoso (R3)
Total				37.16	46.97		

NR= número de riego; DDS= días después de siembra; IR= intervalo de riego expresado en días; Ln= lámina neta; Lb= lámina bruta; $\Sigma^{\circ}D$: grados día acumulados.

La aplicación de las láminas de riego a los 109 días después de siembra mediante las diferentes técnicas utilizadas, tuvieron una eficiencia de aplicación por arriba de 80% pero sobresalió el riego por surcos alternos con 90.18% (Figura 4).

En cuanto a los rendimientos obtenidos para cada parcela y técnica de conservación del agua, se obtuvieron mejores resultados en la parcela del Campo Experimental Valle del Fuerte así como el riego por surcos alternos (Cuadro 6). Cabe mencionar que se tuvo mejor control en esta parcela porque en la parcela del productor hubo eficiencias más bajas en la aplicación de los riegos debido al manejo ejercido por los regadores durante la aplicación de las técnicas de conservación del agua.

Como consecuencia de un mal manejo del riego convencional, es importante la capacitación del personal de campo (regadores en especial) y técnicos para obtener un mejor uso del agua y evitar percolaciones de fertilizantes nitrogenados a los mantos acuíferos, evitando la contaminación del ambiente y reduciendo los costos de producción.

Conclusiones

Las técnicas de conservación del agua en riego por gravedad son alternativas adecuadas para afrontar los periodos de escasez de agua e incrementar la eficiencia en su uso. Las técnicas de conservación del agua de riego por surcos alternos y riego en camas fueron las que presentaron mejores beneficios para reducir las láminas de riego hasta 40%, utilizando el riego convencional se aplican 10 000 m³ ha⁻¹ y con las técnicas de conservación del agua más sobresalientes, que fueron surcos alternos y riego en camas se redujo el volumen a 6 000 m³ ha⁻¹.

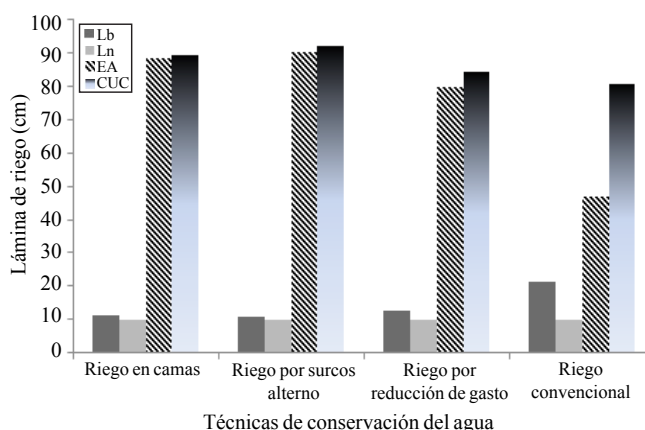


Figura 4. Láminas de riego aplicadas, eficiencia de aplicación y uniformidad por cada técnica de conservación del agua en la parcela del productor cooperante.

Figure 4. Irrigation depths applied; application efficiency and uniformity for each water conservation technique in the plot of the cooperating producer.

Cuadro 6. Rendimiento promedio de maíz en las dos parcelas utilizadas con cada técnica de conservación del agua en riego por gravedad.

Table 6. Average corn yield in both plots used for each water conservation technique in surface irrigation.

Técnica de conservación del agua	Campo Experimental (t ha ⁻¹)	Productor cooperante (t ha ⁻¹)
Riego en camas	12.10	11.18
Riego por surcos alternos	13.80	11.86
Riego por reducción de gasto	11.90	11.10
Riego convencional	11.30	11.00

As a consequence of the mismanagement of the conventional irrigation, it is important training of field staff (especially irrigators) and technicians for better use of water and

El riego por surcos alternos registro 2.5 y 0.86 t ha⁻¹ sobre el rendimiento obtenido con el riego convencional a nivel experimental y comercial, respectivamente. En el caso del riego en camas se registró una diferencia de 0.8 y 0.18 t ha⁻¹, respectivamente. Lo anterior se atribuye a que la técnica de surcos alternos y riego en camas tuvieron mejores eficiencias de aplicación y uniformidad en sus riegos, logrando mantener las condiciones óptimas de humedad en el suelo.

Para la aplicación de esta técnicas a nivel comercial, se requiere de capacitaciones adecuadas para los involucrados en el manejo del agua; módulos de riego, técnicos de campo, productores agrícolas y regadores.

Literatura citada

- Arellano, G. M. A.; Silva, C. F. J. y De León, M. J. R. 2001. Uso eficiente del agua a nivel parcelario mediante trazo de riego y tubería de compuertas. INIFAP-CIRNE-Campo Experimental Anáhuac. Folleto técnico Núm. 3. 20 p.
- Benjamin, J. G.; Havis, H. R.; Ahuja, L. R. and Alonso, C. V. 1994. Leaching and water flow patterns in every-furrow and alternate-furrow irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58(5):1511-1517.
- Chávez, C.; Fuentes, C. y Ventura, R. E. 2010. Uso eficiente del agua de riego por gravedad utilizando yeso y poliacrilamida. *Terra Latinoamericana*. 28(3):231-238.
- Christiansen, J. E. 1942. Irrigation by sprinkling. Bulletin 670. University of California. 124 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2012. Base de datos de las estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Gerencia de distritos de riego. México, D.F.
- Díaz, V.T.; Pérez, D. N. W.; Páez, O. F.; López, G. A. y Partidas, R. L. 2007. Evaluación del crecimiento de maíz (*Zea mays* L.) en función de dos técnicas de riego y diferentes niveles de nitrógeno. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 16(4):84-87.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2011. The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)-managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London. 294 p.
- Flores-Gallardo, H.; Ojeda-Bustamante, W. y Sifuentes-Ibarra, E. 2006. Estudio retrospectivo de la sequía en el norte de Sinaloa. *multi-Ciencia*. 1(3):15-20.
- Flores-Gallardo, H.; Ojeda-Bustamante, W.; Flores-Magdaleno, H.; Mejía-Sáenz, E. y Sifuentes-Ibarra, E. 2012. Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana*. 30(1):59-67.
- Flores-Gallardo, H.; Ojeda-Bustamante, W.; Flores-Magdaleno, H.; Sifuentes-Ibarra, E. y Mejía-Sáenz, E. 2013. Simulación del rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia* 47(4):347-359.
- González-Camacho, J. M.; Muñoz-Hernández, B.; Acosta-Hernández, R. y Mailhol, J. C. 2006. Modelo de la onda cinemática adaptado al riego por surcos cerrados. *Agrociencia*. 40(6):731-740.
- Green, W. A. and Ampt, G. A. 1911. Studies on soils physics: 1. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4(1):1-24.

nitrogen fertilizer to prevent seepage into the groundwater, preventing pollution and reducing environmental production costs.

Conclusions

The water conservation techniques in surface irrigation are suitable alternatives to address water scarcity periods and increase efficiency in their use. The techniques of irrigation water conservation and alternate furrow irrigation in beds were the best benefits presented to reduce water depths up to 40% using conventional irrigation applied 10 000 m³ ha⁻¹ and conservation techniques outstanding water, which were alternate furrow irrigation in beds and the volume was reduced to 6 000 m³ ha⁻¹.

The alternate furrow irrigation recorded 2.5 and 0.86 t ha⁻¹ over the performance obtained with conventional irrigation experimental and commercial level, respectively. In the case of irrigation in beds, there was a difference of 0.8 and 0.18 t ha⁻¹, respectively. This is attributed to the technique of alternate furrows and beds had better irrigation application efficiency and uniformity in their risks, achieving maintain optimum soil moisture.

For the application of these techniques in commercial, proper training is required for those involved in water management, irrigation modules, field technicians, farmers and irrigators.

End of the English version



- Horst, M. G.; Shamutalov, S. S.; Pereira, L. S. and Gonçalves, J. M. 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin. *Agric. Water Manage.* 77:210-231.
- Iñiguez-Covarrubias, M.; Ojeda-Bustamante, W. y Rojano-Aguilar, A. 2011. Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Rev. Fca Uncuyo*. 43(2):175-191.
- Ojeda-Bustamante, W.; Sifuentes-Ibarra, E. y Unland-Weiss, H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*. 40(1):13-25.
- Ojeda-Bustamante, W.; Sifuentes-Ibarra, E.; Iñiguez-Covarrubias, M. y Montero-Martínez, M. J. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*. 45(1):1-11.
- Patel, J. B.; Patel, V. J. and Patel, J. R. 2006. Influence of different methods of irrigation and nitrogen levels on crop growth rate and yield of maize (*Zea mays* L.). *Indian J. Crop Sci.* 1(1-2):175-177.

- Quezada, C.; Hernaiz, S.; Stolpe, N. y Saludes, A. 2011. Efecto del método de riego intermitente en componentes de rendimiento y manejo del agua en once genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.). Chilean J. Agric. Anim. Sci. 27(2):105-115.
- Rawls, W. J. and Brakensiek, D. L. 1983. A procedure of predict Green and Ampt infiltration parameters. *In: proceedings of the national conference on advances in infiltration.* Am. Soc. Agric. Eng. 102-112.
- Rendón-Pimentel, L.; Fuentes-Ruiz, C. y Magaña-Sosa, G. 1995. Diseño simplificado de riego por gravedad. *In: Memorias del VI Congreso Nacional de Irrigación.* Chapingo, México. 385-391 pp.
- Robles, T. R.; Rodríguez, L. J. S. y Martínez, S. J. 2005. Desarrollo vegetativo de melón (*Cucumis melo* L.) establecido por trasplante, con guiado vertical y acolchado plástico en la comarca lagunera. *Rev. Chapingo Serie Zonas Áridas.* 4:15-20.
- Rosano-Méndez, L.; Rendón-Pimentel, L.; Pacheco-Hernández, P.; Etchevers-Barra, J. D.; Chávez-Morales, J. y Vaquera-Huerta, H. 2001. Calibración de un modelo hidrológico aplicado en el riego tecnificado por gravedad. *Agrociencia.* 35(6):577-588.
- Sifuentes, I. E. y Ojeda, B. W. 2005. Métodos de conservación del agua en riego superficial: una alternativa para incrementar la eficiencia en el uso del agua. *In: Memorias del XIII Congreso Nacional de Irrigación.* Acapulco, Guerrero, México.
- Stone, J. F. and Nofziger, D. L. 1993. Water use and yields of cotton grown under wide-space furrow irrigation. *Agric. Water Manag.* 24(1):27-38.
- Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. 1987. Surface irrigation "theory and practice". Prentice-Hall, Inc. Utah State University. Logan, UT, USA. 386 p.