

Response of surface-irrigated corn to regulated deficit irrigation

Respuesta del maíz regado por gravedad al riego deficitario controlado

Cándido Mendoza-Pérez¹; Ernesto Sifuentes-Ibarra²; Waldo Ojeda-Bustamante^{3*}; Jaime Macías-Cervantes²

¹Programa de Riego por Gravedad Tecnificado-IMTA Distrito del Riego 075. Rio Fuerte, Ahome, Los Mochis, Sinaloa, C. P. 81369, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRNO-Campo Experimental Valle del Fuerte. Carretera México-Nogales km 1609, Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, México.

³Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnahuac núm. 8535, colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C. P. 62550, México. wojeda@tlaloc.imta.mx (*Corresponding author)

Abstract

Corn is the basic input of the Mexican diet. It is grown in one-third of the country, with Sinaloa being the leading producer of irrigated corn in Mexico, mainly by surface irrigation. It has become increasingly urgent to optimize the use of water due to competition from non-agricultural sectors for water resources, as well as the high spatial and temporal variability of annual volumes available for irrigation. An alternative in dry years is to apply regulated deficit irrigation. Therefore, the aim of this study was to evaluate this technique in surface-irrigated corn, with three deficit treatments and a control, to which the water requirement demanded by the crop was applied. The water deficit levels applied were: 10, 20, 30 and 0 %, for T1, T2, T3 and C (control), respectively. An irrigation scheduling system based on the concept of degree days was used. The effect of water deficit levels was evaluated in terms of application efficiency, water productivity and yield. The treatment with the highest deficit generated the best application efficiency and water productivity. Yields were statistically similar in the treatments and the control. Results indicated that using the deficit irrigation technique is a viable option in critical water availability conditions, by having a reduced effect on yields obtained in relation to conventional methods.

Keywords: furrow irrigation, efficiency in water use, water deficit, drought.

Resumen

El maíz es el insumo básico de la dieta del mexicano, el cual es cultivado en la tercera parte de la superficie nacional. Sinaloa es el principal productor de maíz bajo riego en México, regado principalmente por gravedad. Ante la competencia de los recursos hídricos por sectores no agrícolas, así como la variabilidad alta espacial y temporal de los volúmenes anuales disponibles para riego, es cada vez más urgente optimizar el uso del agua. Una alternativa en años secos es aplicar riego deficitario controlado. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar esta técnica en maíz regado por gravedad, con tres tratamientos deficitarios y un testigo, al que se le aplicó el requerimiento hídrico que demanda el cultivo. Los niveles de déficit hídrico aplicados fueron: 10, 20, 30 y 0 %, para T1, T2, T3 y TES, respectivamente. Para la programación de los riegos se utilizó un sistema de calendarización del riego que emplea el concepto de días grado. La evaluación del efecto de los niveles de déficit hídrico se realizó en términos de eficiencia de aplicación, productividad del agua y rendimiento. El tratamiento con mayor déficit generó la mejor eficiencia de aplicación y productividad del agua. Los rendimientos fueron estadísticamente similares en los tratamientos y el testigo. Los resultados indicaron que la aplicación de la técnica de riego deficitario es una opción viable en periodos críticos de disponibilidad de agua, al tener un efecto reducido en los rendimientos obtenidos con respecto de los convencionales.

Palabras clave: riego por surcos, eficiencia en el uso del agua, déficit hídrico, sequía.



Introduction

The global area under irrigation is about 20 %, mainly located in arid and semi-arid areas that show high spatial and temporal variability conditions in the available volumes of their sources of supply and that thus require irrigation to ensure commercial returns (Food and Agriculture Organization [FAO], 2011). In Mexico, irrigated agriculture is concentrated in coastal areas that are highly vulnerable to the effects of climate variability and change, particularly extreme weather events such as hurricanes, frost, drought, etc. (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Iñiguez-Covarrubias, & Montero-Martínez, 2011).

Corn is the basic input of the Mexican diet. Approximately 60 % of corn production is intended for human consumption, with a per-capita value of 127 kg·year⁻¹ (Nadal & Wise, 2005), and the area annually cultivated is 7 to 8.5 million hectares, where 85 % of this area is under rain-fed conditions and 15 % under irrigation (Muñoz-Pérez & Hernández-Rivera, 2004). However, irrigated corn is 3.5 times more productive than rain-fed corn.

In Mexico, the state of Sinaloa is the leading producer of irrigated corn, sowing 400 to 500 thousand hectares annually in its eight irrigation districts, with production of 3.5 to 5 million tons (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2015); however, although Mexico is one of the world's leading corn producers, its consumption of this grain is higher than its production, so it is one of the major importing countries, requiring more than 7 million tons per year (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2016).

In Mexico, the application of water at plot level is poor because surface irrigation is mainly used, usually in the form of furrows, without design, layout and monitoring in accordance with technological advances, so there is pressure to optimize on-farm irrigation (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Rojano-Aguilar, & Iñiguez-Covarrubias, 2012). It is estimated that less than 45 % of the water applied to the plots is productively used; the rest is lost by drainage and deep percolation, with the consequent loss of mobile fertilizers and soil (Ojeda-Bustamante et al., 2012). Restrictions on water use for irrigation are common in recurrent periods of low availability, inducing crops to water stress.

In corn, water deficiencies cause detrimental effects on yield in relation to their intensity and the crop's phenological stage (Claassen & Shaw, 1970). Cakir (2004) evaluated the effects of water stress on the vegetative stage of corn for three years, obtaining biomass reductions of 28 to 32 %, but reported no significant differences in yield of the treatments compared to the control (without water deficit).

Introducción

La superficie mundial bajo riego es del orden de 20 %, principalmente localizada en zonas áridas y semiáridas, que requieren del riego para asegurar rendimientos comerciales que muestran condiciones de alta variabilidad espacial y temporal en los volúmenes disponibles de sus fuentes de abastecimiento (Food and Agriculture Organization [FAO], 2011). En México, la agricultura bajo riego está concentrada en zonas costeras que son muy vulnerables a los efectos de la variabilidad y cambio climático, en particular los fenómenos meteorológicos extremos como ciclones, heladas, sequías, etc. (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Iñiguez-Covarrubias, & Montero-Martínez, 2011).

El maíz es el insumo básico de la dieta del mexicano. Aproximadamente 60 % de la producción de maíz se destina para consumo humano, con valor per cápita de 127 kg·año⁻¹ (Nadal & Wise, 2005), y la superficie anual cultivada es de 7 a 8.5 millones de hectáreas, donde 85 % de esta superficie se realiza bajo condiciones de temporal y 15 % bajo riego (Muñoz-Pérez & Hernández-Rivera, 2004). Sin embargo, el maíz bajo riego es 3.5 veces más productivo que el de secano.

En México, el estado de Sinaloa es el principal productor de maíz bajo riego al establecer anualmente de 400 a 500 mil hectáreas en sus ocho distritos de riego, con producción de 3.5 a 5 millones de toneladas (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2015); sin embargo, aunque México es uno de los principales productores de maíz en el mundo, el consumo de este grano es superior a su producción, por lo que es uno de los principales países importadores del mismo con más de 7 millones de toneladas anuales (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2016).

En México, la aplicación del agua a nivel parcela es deficiente al utilizarse principalmente el riego por gravedad, generalmente en la modalidad por surcos, sin diseño y seguimiento acorde con los avances tecnológicos, por lo que existe presión para optimizar el riego parcelario (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Rojano-Aguilar, & Iñiguez-Covarrubias, 2012). Se estima que se aprovecha menos de 45 % del agua aplicada a las parcelas; el resto se pierde por drenaje y por percolación profunda, con la consiguiente pérdida de fertilizantes móviles y suelo (Ojeda-Bustamante et al., 2012). Es común la restricción de agua para riego ante la recurrencia de periodos de baja disponibilidad, generando estrés hídrico a los cultivos.

En maíz, la deficiencia hídrica causa efectos detrimentales en el rendimiento de acuerdo con su intensidad y etapas fenológicas de ocurrencia (Claassen & Shaw, 1970). Cakir (2004) evaluó los efectos del estrés hídrico en la etapa vegetativa de maíz durante

In corn, the flowering and grain filling stages are considered critical to ensure optimum yields (Pasquale, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012). Because of this, the presence of high temperatures, combined with periods of water stress, can affect the processes of pollination, fertilization and grain development (Bassetti & Westgate, 1993; Wilhelm, Mullen, Keeling, & Singletary, 1999; Suzuki, Tsukaguchi, Takeda, & Egawa, 2001). The phenological stage most sensitive to water stress is male flowering (Cakir, 2004), and it can reduce biomass production by 30 % and grain yield by 40 %.

During reproductive development, water stress reduces the number of grains due to a decrease in the rate of photosynthesis and the flow of assimilates to the developing organs of the crop (Schussler & Westgate, 1995). Flowering and the initial stages of grain filling in corn are considered critical in determining grain yield.

Pasquale et al. (2012) updated the Doorenbos and Kassam (1979) guide from experimental data published in various parts of the world on the response of crops to irrigation applied, based on their phenological stage. However, evaluation of the impact of water stress on crops must be done locally for its transfer and adoption to ensure production in an irrigated area.

Deficit irrigation is a technique studied and used in various regions of the world with water availability problems (Chai et al., 2016). This involves a reduction in irrigation, below potential crop water demands, which is applied during phenological stages with greater tolerance to water stress (Ojeda-Bustamante et al., 2012). This technique has shown advantages for its water-saving potential (Rázuri, Romero, Romero, Hernández, & Rosales, 2008; Chai et al., 2014).

Hargreaves and Samani (1984) indicated that deficit irrigation can provide better economic returns per unit area, equal to or greater than those obtained under full irrigation for maximum yield, which clearly generates greater efficiency in water use. Although this type of irrigation has been successfully applied in various parts of the world, its adoption requires local validation. In the case of Mexico, there is limited information on the response of different crops to deficit irrigation, although there have been reports on paprika, chili and peach by Rodríguez-Padrón, Rázuri-Ramírez, Sworowsky, and Rosales-Daboín (2014), Serna-Pérez and Zegbe (2012) and Tapia-Vargas et al. (2010), respectively.

Given the recurrent droughts and their intensification with climate change, which will impact the availability of water for irrigation, it is necessary to study the potential for applying deficit irrigation to generate water savings under current and future conditions in Mexico for crops of national importance (Ojeda-Bustamante et al., 2011).

tres años, obteniendo reducciones de biomasa de 28 a 32 %, pero no reportó diferencias significativas en el rendimiento de los tratamientos con respecto del testigo (sin déficit hídrico).

En el cultivo de maíz se considera que las etapas de floración y llenado de grano son críticas para asegurar rendimientos óptimos (Pasquale, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012). Debido a esto, la presencia de temperaturas altas, complementada con periodos de estrés hídrico, puede afectar los procesos de polinización, fecundación y desarrollo del grano (Bassetti & Westgate, 1993; Wilhelm, Mullen, Keeling, & Singletary, 1999; Suzuki, Tsukaguchi, Takeda, & Egawa, 2001). La etapa fenológica más crítica al estrés hídrico es la floración masculina (Cakir, 2004), y puede reducir la producción de biomasa en 30 % y el rendimiento del grano en 40 %.

Durante el desarrollo reproductivo, el estrés hídrico reduce el número de granos, debido a la caída en la tasa de fotosíntesis, y el flujo de asimilados hacia los órganos en desarrollo del cultivo (Schussler & Westgate, 1995). Se considera que la floración y las etapas iniciales de llenado de grano del cultivo de maíz son críticas para determinar el rendimiento del grano.

Pasquale et al. (2012) actualizaron la guía de Doorenbos y Kassam (1979) a partir de la información experimental publicada en varias partes del mundo sobre la respuesta de los cultivos al riego aplicado de acuerdo con su etapa fenológica. Sin embargo, la evaluación de los impactos, del estrés hídrico de los cultivos, debe ser localmente para su transferencia y adopción para asegurar la producción de una zona de riego.

El riego deficitario es una técnica estudiada y utilizada en diversas regiones del mundo con problemas de disponibilidad de agua (Chai et al., 2016). Este consiste en una reducción del riego, por abajo de las demandas hídricas potenciales, que se aplica durante las etapas fenológicas con mayor tolerancia al estrés hídrico (Ojeda-Bustamante et al., 2012). Dicha técnica ha mostrado ventajas por los volúmenes potenciales de ahorro de agua (Rázuri, Romero, Romero, Hernández, & Rosales, 2008; Chai et al., 2014).

Hargreaves y Samani (1984) indicaron que el riego deficitario puede proporcionar mejores retornos económicos por unidad de superficie, iguales o superiores que los obtenidos bajo riego completo para rendimiento máximo, lo que evidentemente produce eficiencia mayor en el uso del agua. Aunque la aplicación de este tipo de riego se ha empleado exitosamente en varias partes del mundo, su adopción requiere de validación local. Para el caso de México, existe información limitada referente a la respuesta de distintos cultivos al riego deficitario; aunque ya fueron reportados el pimentón, el chile y el melocotón,

It is possible to reduce irrigation depths if the crop is subjected to regulated water stress in phenological stages with water-stress tolerance, without substantially affecting potential yield. Therefore, the aim of this research was to evaluate the deficit irrigation technique in corn under furrow irrigation in an irrigation area of Mexico for practical application to help increase water-use efficiency. Three water deficit levels were used: 10, 20 and 30 %, labeled as T1, T2, T3, respectively, and the control treatment (C), wherein the irrigation requirement demanded by the crop was applied.

Materials and methods

The work was carried out during the 2012-2013 autumn-winter (A-W) crop cycle, at the Valle del Fuerte Experimental Station (CEVAF) operated by the National Institute for Forestry, Agricultural and Livestock Research (INIFAP) in the arid zone of northern Sinaloa, Mexico, with geographical coordinates of 25° 48' 39.6" north latitude, 109° 01' 30" west longitude and at 20 masl. The experiment was carried out in soil typical of the region: clayey texture, volumetric available moisture of 0.155 cm³.cm⁻³, bulk density of 1.15 g.cm⁻³ and organic matter content of 1 %. The plot is part of irrigation district 075, Rio Fuerte, Sinaloa, one of the largest irrigation districts in Mexico (CONAGUA, 2015). Annual cumulative rainfall in the study area is 350 mm, which is concentrated from July to September with 70 % of the annual cumulative total, while the amount that falls from February to May is negligible. The annual values of cumulative reference evapotranspiration (ET₀) range from 1600 to 1700 mm; this exceeds the precipitation throughout the year and, therefore, irrigation is required to ensure commercial returns.

The cumulative precipitation during the intermediate corn crop cycle, lasting 191 days after sowing (das), was 42.4 mm, with 37.8 mm concentrated in the month of December, which corresponds to the planting month, and was taken into account when estimating irrigation requirements. The average maximum, median and minimum temperatures in the cycle were 29.61, 20.30 and 11.83 °C, respectively. The growing season ET₀ was 947.7 mm with 1,898 cumulative degree days (°DA). These meteorological data were obtained from the automated weather station installed 100 meters from the experimental site.

For real-time irrigation scheduling, the IrriModel computer system, an improved version of the Spriter computer tool (Ojeda-Bustamante, González-Camacho, Sifuentes-Ibarra, & Rendón-Pimentel, 2007), was used. This software offers the following benefits: 1) calculates crop water demand, 2) generates irrigation programs under different water availability scenarios and types of irrigation systems, 3) predicts irrigation using a water balance model with a high level of accuracy,

por Rodríguez-Padrón, Rázuri-Ramírez, Sworowsky, y Rosales-Daboín (2014), Serna-Pérez y Zegbe (2012) y Tapia-Vargas et al. (2010), respectivamente.

Ante la recurrencia de sequías y su intensificación con el cambio climático, que impactarán la disponibilidad de volúmenes para riego, se requiere estudiar la aplicabilidad potencial de adaptación para el ahorro de agua en las condiciones actuales y futuras de México para cultivos de importancia nacional (Ojeda-Bustamante et al., 2011).

Es posible disminuir las láminas de riego si se aplica estrés hídrico controlado en etapas fenológicas con tolerancia a este, sin afectar sustancialmente el rendimiento potencial. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la técnica de riego deficitario en maíz bajo riego por surcos en una zona de riego de México para su aplicación práctica que contribuya a incrementar la eficiencia en el uso del agua. Para el desarrollo se trabajó con diferentes niveles de déficit hídrico: 10, 20 y 30 %, etiquetados como T1, T2, T3, respectivamente, y el tratamiento testigo (TES), al que se le aplicó el requerimiento de riego que demanda el cultivo.

Materiales y métodos

El trabajo se realizó durante el ciclo agrícola otoño-invierno (O-I) 2012-2013, en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) localizado en la zona árida del norte de Sinaloa, México, con coordenadas geográficas de 25° 48' 39.6" latitud norte, 109° 01' 30" longitud oeste y a 20 m de altitud. El experimento se estableció en suelo típico de la región: textura arcillosa, humedad volumétrica aprovechable de 0.155 cm³.cm⁻³, densidad aparente de 1.15 g.cm⁻³ y contenido de materia orgánica de 1 %. La parcela forma parte del distrito de riego 075, Rio Fuerte, Sinaloa, uno de los de mayor superficie de México (CONAGUA, 2015). La precipitación anual acumulada en la zona de estudio es de 350 mm y se concentra de julio a septiembre con 70 % de la precipitación acumulada en el año, mientras que de febrero a mayo es insignificante. Los valores anuales de la evapotranspiración de referencia acumulada (ET₀), varían de 1600 a 1700 mm; esta excede a la precipitación todo el año y, por lo tanto, se requiere de riego para asegurar rendimientos comerciales.

La precipitación acumulada durante el ciclo de cultivo de maíz intermedio, de 191 días de duración después de la siembra (dds), fue de 42.4 mm, concentrándose 37.8 mm en el mes de diciembre, que corresponde al mes de siembra, y fue considerada para estimar los requerimientos de riego. Los valores de las temperaturas máxima, media y mínima promedio en el ciclo fueron de 29.61, 20.30 y 11.83 °C, respectivamente. La ET₀ fue

according to the phenological development of the crop, using the concept of degree days ($^{\circ}\text{D}$), documented by Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, and Unland-Weiss (2006), and 4) facilitates tracking the irrigation on one or more plots in an agricultural season.

The total area of the experimental plot was 1.72 ha, in which four treatments (Tn) with five replications were established. The treatments consisted of reducing the applied irrigation depth, recommended by the IrriModel software, to generate irrigation deficit in the phenological stages less sensitive to water stress using surface irrigation (furrows). Each treatment had the same water deficit throughout its phenological stages except the flowering stage (R1), in which all treatments received normal irrigation. The water deficit levels applied were, respectively, 10, 20, 30 and 0 %, for T1, T2, T3 and C (Table 1). Monitoring of crop phenological stages was carried out in accordance with the work of Abendroth et al. (2009) and Ojeda-Bustamante et al. (2006).

Water deficit levels used in this study were similar to those used by Rázuri et al. (2008) in four treatments, which consisted of supplying different water volumes (depths), which corresponded to the recovery of 100, 80, 70 and 60 % of crop evapotranspiration (ETc) in tomato under localized irrigation, and they reported that there were no significant differences in yields between treatments, although the 80 % one presented better commercial fruit quality.

Optimal furrow length and flow were estimated with the RIGRAV 3.0 program developed by Rendón, Fuentes, and Magaña (1997), according to the conditions and variables of the experimental site. The main method of applying irrigation in the area is by furrows through siphon-shaped tubes at the head of each furrow. The inflow was applied in the furrows with siphons, for which the head to obtain the required flow was set, according to the head-flow curve of previously calibrated siphon tubes. In general, producers do not have rigorous control over the input head to the furrows, resulting in great variation in the flows and volumes applied to each one.

de 947.7 mm con acumulación de 1,898 grados día acumulado ($^{\circ}\text{DA}$). Estos datos meteorológicos fueron obtenidos en la estación meteorológica automatizada instalada a 100 metros del lugar del experimento.

Para la calendarización del riego en tiempo real se empleó el sistema computacional IrriModel, una versión mejorada del sistema Spriter (Ojeda-Bustamante, González-Camacho, Sifuentes-Ibarra, & Rendón-Pimentel, 2007). Este *software* ofrece los siguientes beneficios: 1) calcula la demanda hídrica del cultivo, 2) genera planes de riego bajo diferentes escenarios de disponibilidad de agua y tipos de sistemas de riego, 3) pronostica el riego usando un modelo de balance hídrico con alto nivel de precisión, de acuerdo con el desarrollo fenológico del cultivo, utilizando el concepto de grados día ($^{\circ}\text{D}$), documentado por Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, y Unland-Weiss (2006), y 4) facilita realizar el seguimiento del riego de una o más parcelas en un ciclo agrícola.

La superficie total del lote experimental fue de 1.72 ha, en el cual se establecieron cuatro tratamientos (Tn) con cinco repeticiones, mismos que consistieron en reducir la lámina de riego aplicada, recomendada por el *software* IrriModel, para generar déficit en las etapas fenológicas menos críticas al estrés hídrico utilizando riego por gravedad (surcos). Cada tratamiento tuvo el mismo déficit hídrico a lo largo de sus etapas fenológicas a excepción de la etapa de floración (R1), en la cual los tratamientos recibieron riego normal. Los niveles de déficit hídrico aplicados fueron, respectivamente, 10, 20, 30 y 0 %, para T1, T2, T3 y TES (Cuadro 1). El seguimiento de las etapas fenológicas del cultivo se realizó de acuerdo con los trabajos de Abendroth et al. (2009) y Ojeda-Bustamante et al. (2006).

Los niveles de déficit hídrico utilizados en este trabajo fueron similares a los aplicados por Rázuri et al. (2008) en cuatro tratamientos, que consistieron en el suministro de diferentes volúmenes de agua (láminas), los cuales correspondieron a la reposición de 100, 80, 70 y 60 % de la evapotranspiración del cultivo (ETc) en tomate bajo riego localizado, y reportaron que no hubo diferencias significativas en rendimientos entre los

Table 1. Application of irrigations in phenological stage in which the treatments were subjected to water stress. Cuadro 1. Aplicación de los riegos en etapa fenológica en que los tratamientos se sometieron a estrés hídrico.

Irrigation / Riego	Phenological stage / Etapas fenológica	Water deficit treatments (%) / Tratamientos de déficit hídrico (%)			
		T1	T2	T3	C / TES
1	V6	10	20	30	0
2	R1	0	0	0	0
3	R2	10	20	30	0
4	R3	10	20	30	0

V6 = six true leaves, R1 = flowering, R2 = aqueous grain, R3 = milky grain.

V6 = seis hojas verdaderas, R1 = floración, R2 = grano acuoso, R3 = grano lechoso.

The corn crop was planted on a dry basis on December 12, 2012 using a precision seeder, and the next day germination irrigation was applied. The intermediate-cycle DK-3000 corn variety was planted. In T1, T2 and T3, prior to planting, fertilizer based on 250 kg·ha⁻¹ of physical mixture of 30-10-12 of N-P-K, respectively, was applied, while 450 kg·ha⁻¹ of the same product was supplied to C, in accordance with the practices of the leading producers in the area. During the appearance of the fifth true leaf (V5), supplementary fertilization consisting of 100 kg·ha⁻¹ urea (46-00-00) was applied in all treatments, including the control. The seeding density was 100,000 seeds·ha⁻¹, with plants spaced 12.5 cm apart. When the crop reached 50 cm in height, the furrows were mechanically weeded and opened simultaneously to apply auxiliary irrigations based on the water deficit treatments.

For the initial irrigation the volumetric moisture of the soil was estimated with a calibrated Time Domain Reflectometry (TDR) sensor, after which the irrigation depth required to bring the soil to field capacity (FC) was calculated. For the rest of the auxiliary irrigations, IrriModel software was used to estimate the date and net irrigation depths (L_n), according to the deficit treatments, using the methodology presented by Ojeda-Bustamante et al. (2006).

The irrigations were assessed in terms of application efficiencies (E_a , %), using the formula $E_a = 100 (L_n / L_b)$, where L_n is the net depth required and L_b the gross or applied depth (m) (Bolaños-González, Palacios-Vélez, Scott, & Exebio-García, 2001). The estimation of L_b (m) was calculated using the equation $L_b = QT / A$, where Q is the irrigation flow applied to the plot (m³·s⁻¹), T is the irrigation time (s) and A is the irrigated area (m²) (Martin, 2001).

Water productivity (WP) and yield (Y) of the treatments were also estimated. The former indicates the ratio of the total production obtained (RC, kg) with respect to the total volume of water applied (AV, m³) (Bessembinder, Leffelaar, Dhindwal, & Ponsioen, 2005) and the latter the production obtained in kg·ha⁻¹.

Harvesting took place on June 20, 2013, corresponding to 191 das or 1,898 °DA, from sowing to harvest, in accordance with the work of Ojeda-Bustamante et al. (2006). Five samplings were performed to estimate yield in representative sites located in the two central furrows of each treatment in a 7.6 m² area, per replicate. This procedure was performed in all treatments, including the control.

To determine the significant difference in the yields, analysis of variance for comparison of means was performed with the Tukey test ($P \leq 0.05$), using a

tratamientos, aunque el de 80 % fue el que presentó mejor calidad de fruto comercial.

La longitud y gasto óptimos del surco fueron estimados con el programa RIGRAV 3.0 desarrollado por Rendón, Fuentes, y Magaña (1997); de acuerdo con las condiciones y variables del sitio experimental. El principal método de aplicación del riego en la zona es por surcos a través de tubos en forma de sifón en la cabecera de cada surco. Se aplicó el gasto en los surcos con sifones, para lo cual se estableció la carga para obtener el gasto requerido, de acuerdo con la curva carga-gasto de los sifones previamente calibrados. Por lo general, los productores no tienen control riguroso de la carga de entrada a los surcos, teniendo gran variación en los gastos y volúmenes aplicados a cada uno.

El cultivo de maíz se sembró en seco el 12 de diciembre de 2012 usando una sembradora de precisión, y al día siguiente se aplicó el riego de germinación. Se sembró la variedad DK-3000 de ciclo intermedio. En los T1, T2 y T3 se aplicó, previo a la siembra, fertilizante a base de 250 kg·ha⁻¹ de mezcla física de 30-10-12 de N-P-K, respectivamente; mientras que al TES se le suministró 450 kg·ha⁻¹ del mismo producto, de acuerdo con prácticas de productores líderes de la zona. Durante la aparición de la quinta hoja verdadera (V5) se aplicó la fertilización complementaria de 100 kg·ha⁻¹ de urea (46-00-00) en todos los tratamientos, incluyendo el TES. La densidad de siembra fue de 100,000 semillas·ha⁻¹, con separación entre plantas de 12.5 cm. Cuando el cultivo alcanzó 50 cm de altura, se procedió a cultivar y abrir surcos en forma simultánea para aplicar los riegos de auxilio con base en los tratamientos hídricos deficitarios.

Para el riego inicial se estimó la humedad volumétrica del suelo, con un sensor calibrado de reflectometría tipo TDR (Time Domain Reflectometry), posteriormente se calculó la lámina de riego para llevar el suelo a capacidad de campo (CC). Para el resto de los riegos de auxilios se utilizó el *software* IrriModel para estimar la fecha y la lámina de riego neta (L_n), de acuerdo con los tratamientos deficitarios, usando la metodología presentada por Ojeda-Bustamante et al. (2006).

La evaluación de los riegos se realizó en términos de eficiencia de aplicación (E_a , %), utilizando la fórmula $E_a = 100 (L_n / L_b)$, donde L_n es la lámina neta requerida y L_b lámina bruta o aplicada (m) (Bolaños-González, Palacios-Vélez, Scott, & Exebio-García, 2001). La estimación de L_b (m) se calculó mediante la ecuación $L_b = QT / A$, donde Q es el gasto de riego aplicado a la parcela (m³·s⁻¹), T es el tiempo de riego (s) y A es la superficie regada (m²) (Martin, 2001).

Se estimó también la productividad del agua (PA) y el rendimiento (R) de los tratamientos. La primera indica

randomized block design and the Statistical Analysis System statistical package version 9.2 (SAS, 1999).

The relative difference Δ in the four response variables of interest of the treatments (ΔY , ΔL_b , ΔEa and ΔWP), with respect to the control, corresponding, respectively, to Y in $t\cdot ha^{-1}$, L_b in cm, Ea in percentage and WP in $kg\cdot m^{-3}$, was calculated using the following general relationship:

$$\Delta = \frac{T_n - C}{C} \times 100 \quad (1)$$

where T_n is the treatment n , C is the value obtained from the control.

As an example, for the case of the relative difference in yield, the equation for ΔY would be:

$$\Delta Y = \frac{Y_n - Y_c}{Y_c} \times 100 \quad (2)$$

where Y_n is the yield of treatment n and Y_c is the yield obtained in the control.

Results and discussion

Five irrigations were applied to each treatment. The initial depths were 10.9, 10.0, 10.0 and 14.7 cm, for T1, T2, T3 and C, respectively.

Irrigations applied to T1 (10 % water deficit) throughout the crop cycle are presented in Table 2. It can be seen that the auxiliary irrigations, in terms of L_n , fluctuated between 11.3 and 14.8 cm L_b , applying a cumulative depth of 63 cm, representing 2,792 m^3 with 63 % Ea , throughout the crop cycle. Reducing irrigation depth applied by deficit irrigation improves the efficiency of water use in corn throughout the crop season. Reducing the irrigation depth applied by deficit irrigation improves the efficiency of water use in corn, as reported by Chai et al. (2016).

la relación de la producción total obtenida (RC, kg) con respecto del volumen de agua total aplicada (VA, m^3) (Bessembinder, Leffelaar, Dhindwal, & Ponsioen, 2005) y la segunda la producción obtenida en $kg\cdot ha^{-1}$.

La cosecha de los tratamientos se realizó el 20 de junio de 2013, que corresponde con 191 dds o 1,898 °DA, de siembra hasta la cosecha, de acuerdo con el trabajo de Ojeda-Bustamante et al. (2006). Se realizaron cinco muestreos para estimar el rendimiento en sitios representativos localizados en los dos surcos centrales de cada tratamiento en una área de 7.6 m^2 , por cada sitio. Este procedimiento se realizó en todos los tratamientos, incluyendo el testigo.

Para determinar la diferencia significativa de los rendimientos, se realizó un análisis de varianza para comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), usando un diseño de bloques al azar, utilizando el paquete estadístico *Statistical Analysis System*, ver. 9.2 (SAS, 1999).

Se estimó la diferencia relativa Δ de las cuatro variables de respuesta de interés de los tratamientos (ΔR , ΔL_b , ΔEa y ΔPA), con respecto del testigo, que corresponden, respectivamente, al R en $t\cdot ha^{-1}$, L_b en cm, Ea en porcentaje y PA en $kg\cdot m^{-3}$, utilizando la siguiente relación general:

$$\Delta = \frac{T_n - TES}{TES} \times 100 \quad (1)$$

donde T_n es el tratamiento n , TES es el valor obtenido del testigo.

Como ejemplo, para el caso de la diferencia relativa del rendimiento, la ecuación para ΔR sería:

$$\Delta R = \frac{R_n - R_{TES}}{R_{TES}} \times 100 \quad (2)$$

donde R_n es el rendimiento del tratamiento n y R_{TES} es el rendimiento obtenido en el testigo.

Table 2. Irrigation scheduling applied for T1.

Cuadro 2. Calendario de riego aplicado para el T1.

NI/NR	Start/ Inicio	Time (h)/ Tiempo (h)	Inflow (L·s ⁻¹)/ Gasto (L·s ⁻¹)	Area (ha)/ Superficie (ha)	Volume (m ³)/ Volumen (m ³)	L_n (cm)	L_b (cm)	Ea (%)
1	12/12/2012	3.2	42	0.4332	553	5.5	10.9	50
2	01/03/2013	2.3	59	0.4332	487	6.75	11.25	60
3	24/03/2013	3.0	34	0.4332	498	8.1	11.50	70
4	09/04/2013	4.5	25	0.4332	615	9.95	14.20	70
5	27/04/2013	2.5	43	0.4332	639	9.72	14.75	66
Total					2,792	40	63	63

NI: number of irrigations, L_n : net depth, L_b : gross depth, Ea : application efficiency.

NR: número de riegos, L_n : lámina neta, L_b : lámina bruta, Ea : eficiencia de aplicación.

Irrigations applied to T2 (20 % water deficit) are presented in Table 3. It can be seen that the auxiliary irrigations fluctuated between 10.5 and 13.5 cm L_b , applying 57 cm of cumulative depth, representing 2,460 m³ of total volume with 65 % Ea . It is also observed that from the second auxiliary irrigation the application efficiency increases. The depth applied in this treatment coincides with the results obtained by (Rivetti, 2006), with a gross consumption of 57 cm throughout the corn crop season.

Irrigations applied to T3 (30 % water deficit) are presented in Table 4. The auxiliary irrigations fluctuated between 8.5 and 11.5 cm L_b , applying 50 cm of cumulative gross depth, representing 2,150 m³ of total volume with 69 % Ea . Reducing irrigation depth increases plot efficiency and possibly the use of nutrients available in the soil, thereby increasing grain yield as reported by Hargreaves and Samani (1984).

Gross irrigations applied to C fluctuated between 14.3 and 15.6 cm L_b , applying 73.5 cm of cumulative gross depth, representing 3,159 m³ of total volume with 58 % Ea (Table 5). The irrigations and depths supplied in this

Resultados y discusión

En cada tratamiento se aplicó un total de cinco riegos. Las láminas iniciales fueron 10.9, 10.0, 10.0 y 14.7 cm, para T1, T2, T3 y TES, respectivamente.

Los riegos aplicados al T1 (10 % de déficit hídrico) durante todo el ciclo agrícola se presentan en el Cuadro 2. Se observa que los riegos de auxilio, en términos de L_n , fluctuaron entre 11.3 y 14.8 cm de L_b , aplicando una lámina acumulando de 63 cm, que representa 2,792 m³ con Ea de 63 %, durante todo el ciclo agrícola. La reducción de lámina de riego aplicada mediante el riego deficitario permite mejorar la eficiencia en el uso del agua en maíz, como lo reportado por Chai et al. (2016).

Los riegos aplicados al T2 (20 % de déficit hídrico) se presentan en el Cuadro 3. Se observa que los riegos de auxilio fluctuaron entre 10.5 y 13.5 cm de L_b , aplicando 57 cm de lámina acumulada, que representa 2,460 m³ de volumen total con Ea de 65 %. También se observa que a partir del segundo riego de auxilio incrementa la eficiencia de aplicación. La lámina aplicada en este

Table 3. Irrigation scheduling applied for T2.

Cuadro 3. Calendario de riego aplicado para el T2.

NI/NR	Start/ Inicio	Time (h)/ Tiempo (h)	Inflow (L·s ⁻¹)/ Gasto (L·s ⁻¹)	Area (ha)/ Superficie (ha)	Volume (m ³)/ Volumen (m ³)	L_n (cm)	L_b (cm)	Ea (%)
1	13/12/2012	3.2	43	0.43	430	5.5	10.0	55
2	28/02/2013	2.5	59	0.43	452	6.0	10.5	57
3	24/03/2013	2.6	38	0.43	439	7.2	10.2	71
4	09/04/2013	4.6	29	0.43	558	10.0	13.0	77
5	27/04/2013	2.5	58	0.43	581	8.6	13.5	64
Total					2,460	37.3	57	65

NI: number of irrigations, L_n : net depth, L_b : gross depth, Ea : application efficiency.

NR: número de riegos, L_n : lámina neta, L_b : lámina bruta, Ea : eficiencia de aplicación.

Table 4. Irrigation scheduling applied for T3.

Cuadro 4. Calendario de riego aplicado para el T3.

NI/NR	Start/ Inicio	Time (h)/ Tiempo (h)	Inflow (L·s ⁻¹)/ Gasto (L·s ⁻¹)	Area (ha)/ Superficie (ha)	Volume (m ³)/ Volumen (m ³)	L_n (cm)	L_b (cm)	Ea (%)
1	13/12/2012	3.2	43	0.43	430	5.5	10.0	55
2	28/02/2013	2.3	40	0.43	366	5.3	8.5	62
3	24/03/2013	2.3	40	0.43	387	7.2	9.0	80
4	09/04/2013	4.7	30	0.43	495	9.7	11.5	85
5	27/04/2013	3.0	60	0.43	473	6.9	11.0	62
Total					2,150	34.6	50	69

NI: number of irrigations, L_n : net depth, L_b : gross depth, Ea : application efficiency.

NR: número de riegos, L_n : lámina neta, L_b : lámina bruta, Ea : eficiencia de aplicación.

Table 5. Irrigation scheduling applied for C.
Cuadro 5. Calendario de riego aplicado para el TES.

NI/NR	Start/ Inicio	Time (h)/ Tiempo (h)	Inflow (L·s ⁻¹)/ Gasto (L·s ⁻¹)	Area (ha)/ Superficie (ha)	Volume (m ³)/ Volumen (m ³)	L_n (cm)	L_b (cm)	E_a (%)
1	12/12/2012	8.0	22	0.43	631	5.5	14.7	37
2	28/02/2013	7.9	26	0.43	671	7.8	15.6	50
3	24/03/2013	4.5	29	0.43	559	9.0	14.5	69
4	09/04/2013	6.9	23	0.43	602	9.8	14.4	70
5	27/04/2013	5.0	29	0.43	602	10.8	14.3	77
Total					3,159	42.9	73.5	58

NI: number of irrigations, L_n : net depth, L_b : gross depth, E_a : application efficiency.

NR: número de riegos, L_n : lámina neta, L_b : lámina bruta, E_a : eficiencia de aplicación.

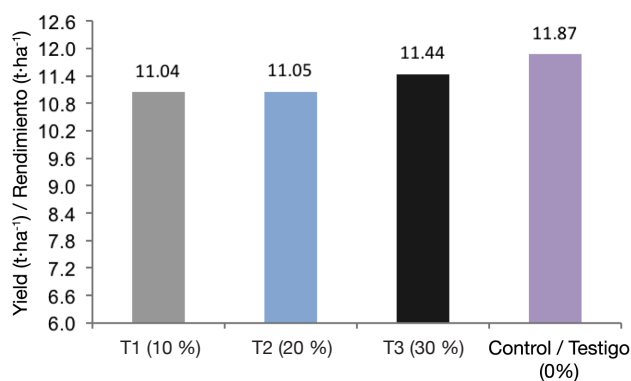


Figure 1. Yield results obtained in the treatments.
Figura 1. Resultados del rendimiento obtenido en los tratamientos.

treatment were based on conventional application and management techniques followed by the agricultural leaders in the study area. These data are similar to those reported by Ojeda-Bustamante et al. (2006) in corn, where the greatest losses occurred due to runoff and percolation.

Figure 1 compares the average yields obtained in each treatment, which were: 11.04, 11.05 and 11.44 t·ha⁻¹, for T1, T2 and T3, respectively. For C the yield was 11.87 t·ha⁻¹. No significant difference between treatments with respect to C was found, despite the fact that in C an additional 200 kg·ha⁻¹ of fertilizer was applied, in accordance with local practice. The results of this research work are similar to those reported by Farré and Faci (2006) in corn under deficit irrigation.

Figure 2 shows the water productivity obtained for each treatment. T3 had the highest productivity with 2.29 kg·m⁻³ of grain, compared with C that had the lowest value with 1.61 kg·m⁻³. This indicates that the water deficit technique is viable if reduced or avoided at critical crop stages such as flowering. These results are similar to those reported by Rivetti (2006) in corn in deficit irrigation research.

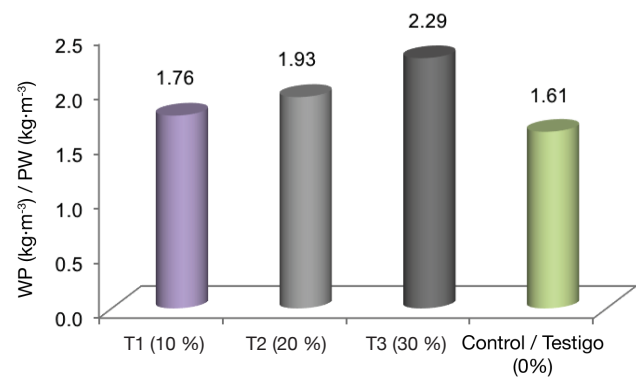


Figure 2. Water productivity results in the treatments.
Figura 2. Resultados de productividad del agua en los tratamientos.

tratamiento coincide con los resultados obtenidos por (Rivetti, 2006) con un consumo bruto de 57 cm durante todo el ciclo agrícola del maíz.

Los riegos aplicados al T3 (30 % de déficit hídrico) se presentan en el Cuadro 4. Los riegos de auxilio fluctuaron entre 8.5 y 11.5 cm de L_b , aplicando 50 cm de lámina bruta acumulada, que representa 2,150 m³ de volumen total con E_a de 69 %. La reducción de lámina de riego aumenta la eficiencia parcelaria y posiblemente el aprovechamiento de nutrientes disponibles en el suelo, por lo tanto, aumenta el rendimiento del grano como lo reportado por Hargreaves y Samani (1984).

Los riegos brutos aplicados al TES fluctuaron entre 14.3 y 15.6 cm de L_b , aplicando 73.5 cm de lámina bruta acumulada, que representa 3,159 m³ de volumen total con E_a de 58 % (Cuadro 5). Los riegos y láminas suministrados en este tratamiento se basaron en la forma convencional de aplicación y manejo de los agricultores líderes de la zona de estudio. Estos datos son similares a los reportados por Ojeda-Bustamante et al. (2006) para el cultivo de maíz, encontrándose las mayores pérdidas por efecto de escurrimiento y percolación.

Table 6. Results of comparison of means obtained per treatment for five replications.**Cuadro 6. Resultados de comparación de medias obtenidas por tratamiento para las cinco repeticiones.**

Treatments / Tratamientos	R1	R2	R3	R4	R5
T1 (10 %)	10.56 a	10.79 a	10.62 a	11.82 a	11.38 a
T2 (20 %)	10.07 a	12.2 a	10.23 a	11.17 a	11.58 a
T3 (30 %)	11.47 a	10.92 a	11.07 a	11.88 a	11.86 a
C/TES (0 %)	11.59 a	11.91 a	11.95 a	11.56 a	12.36 a

Note: Means indicated with the same letter in a column are not significantly different according to the Tukey test ($P \leq 0.05$), with a coefficient of variation of 4.5.

Nota: Medias indicadas con la misma letra en una columna no difieren significativamente, de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), con coeficiente de variación de 4.5.

Table 7. Results of the relative differences in percentage of the treatments for the variables studied with respect to the control.**Cuadro 7. Resultados de las diferencias relativas en porcentaje de los tratamientos para las variables estudiadas con respecto del testigo.**

Treatments / Tratamientos	ΔY	ΔL_b	ΔEa	ΔWP
T1 (10 %)	-7.0	-14.3	8.6	9.3
T2 (20 %)	-6.9	-22.5	12.1	19.9
T3 (30 %)	-3.6	-32.0	19.0	42.2

Table 6 shows the statistical comparison of yields and, as can be seen, there was no significant difference in yield in the five replications of the three treatments and the control.

Table 7 shows the relative differences in the variables ΔY , ΔL_b , ΔEa and ΔWP . It is observed that increasing the water deficit levels increases the ΔEa and ΔWP , and reduces the ΔL_b , without drastically affecting yields. The results indicate that regulated deficit irrigation is a viable way to improve efficiency and productivity through better use of water, as has been similarly reported by Chai et al. (2016).

Conclusion

For the full-irrigation control, although an additional 200 kg of nitrogen fertilizer were applied to it, no significant differences in yield with respect to the water deficit treatments were found. It turned out that the treatment with the greatest water deficit, T3 (30 % water deficit), was the best treatment, from the point of view of efficiency, savings, water productivity and yield. This indicates that regulated deficit irrigation in corn under furrow irrigation is an alternative that helps increase efficiency in water use in agriculture. It is also an option to deal with the scenario of water scarcity in the irrigation area studied.

Deficit irrigation is an easy technique to apply and manage when there is enough field information to generate robust irrigation scheduling. However, one

La Figura 1 compara los rendimientos promedio obtenidos en cada tratamiento, los cuales fueron: 11.04, 11.05 y 11.44 t·ha⁻¹, para T1, T2 y T3, respectivamente. Para el TES el rendimiento fue de 11.87 t·ha⁻¹. No se encontró diferencia significativa entre tratamientos con respecto del TES, a pesar de que al TES se le aplicó 200 kg·ha⁻¹ adicionales de fertilizante de acuerdo con prácticas locales. Los resultados de este trabajo de investigación son similares a los reportados por Farré y Faci (2006) en maíz bajo riego deficitario.

La Figura 2 presenta la productividad del agua obtenida para cada tratamiento. El T3 presentó la mayor productividad con 2.29 kg·m⁻³ de grano, en comparación con el TES que fue el de menor valor con 1.61 kg·m⁻³. Lo anterior indica que la técnica de déficit hídrico es viable si se reduce o evita en etapas críticas del cultivo como la floración. Estos resultados son similares a los reportados por Rivetti (2006) en trabajos de riego deficitario en maíz.

El Cuadro 6 presenta la comparación estadística de los rendimientos y se observa que no hubo diferencia significativa de rendimiento en las cinco repeticiones de los tres tratamientos y el testigo.

El Cuadro 7 presenta las diferencias relativas de las variables ΔR , ΔL_b , ΔEa y ΔPA . Se observa que al incrementar los niveles de déficit hídrico aumenta la ΔEa y la ΔPA , y reduce la ΔL_b , sin afectar drásticamente los rendimientos. Los resultados indican que el riego deficitario controlado es una técnica viable para

cannot generalize the use of treatments for different types of soils; it is therefore recommended to locally validate its application for each irrigation area and specific crop.

End of English version

References / Referencias

- Abendroth, L., Elmore, R., Hartzler, R. G., McGrath, C., Mueller, D. S., Munkvold, G. P., Pope, R., Rice, M. E., Robertson, A. E., Sawyer, J. E., Schaefer, K. J. P., Tollefson, J. J., & Tylka, G. L. (2009). Corn Field Guide (pp. 4-9). Iowa: Iowa State University. Retrieved from <http://www.agronext.iastate.edu/corn/docs/corn-field-guide.pdf>
- Bassetti, P., & Westgate M. E. (1993). Water deficit affects receptivity of maize silks. *Crop Science*, 33(2), 279-282. doi: 10.2135/cropsci1993.0011183X003300020013x
- Bessembinder, J. E., Leffelaar, P. A., Dhindwal, A. S., & Ponsioen, T. C. (2005). Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agricultural Water Management*, 73(2), 113-130. doi: 10.1016/j.agwat.2004.10.004
- Bolaños-González, M., Palacios-Vélez, E., Scott, C., & Exebio-García, A. (2001). Estimación del volumen de agua usado en una zona de riego mediante una imagen satélite e información complementaria. *Agrociencia*, 35(6), 589-597. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/302/30200602.pdf>
- Cakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of com. *Field Crops Research*, 89(1), 1-16. doi: 10.1016/j.fcr.2004.01.005
- Chai, Q., Gan, Y., Turner, N. C., Zhang, R. Z., Yang C., Niu, Y., & Siddique, K. H. (2014). Water-saving innovations in Chinese agriculture. *Advances in Agronomy*, 126, 147-197. doi: 10.1016/B978-0-12-800132-5.00002-X
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R. M., Niu, Y., & Siddique, K. H. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(3), 1-21. doi: 10.1007/s13593-015-0338-6
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2013/14* (pp. 290). México: Author. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGIH-5-14A.pdf>
- Claassen, M. M., & Shaw, R. H. (1970). Water deficit effects on corn: II Grain components. *Agronomy Journal*, 62(5), 652-655. doi: 10.2134/agronj1970.00021962006200050032x
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). *Crop yield response to water*. Italy: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/nr/water/docs/irrigationdrainage66.pdf>
- Farré, I., & Faci, J. M. (2006). Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *mejorar la eficiencia y la productividad con el mejor aprovechamiento del agua, similar a lo reportado por Chai et al. (2016).*

Conclusión

Para el testigo con riego completo, a pesar de que se le adicionó 200 kg más de fertilizante nitrogenado, no se encontraron diferencias significativas en rendimiento con respecto de los tratamientos con déficit hídrico. Resultando que el tratamiento con mayor déficit hídrico, T3 (30 % de déficit hídrico), fue el mejor tratamiento, desde el punto de vista de eficiencia, ahorro, productividad del agua y rendimiento. Lo que indica que el riego deficitario controlado en maíz bajo riego por surcos es una alternativa que contribuye a incrementar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. Además, es una opción para afrontar el escenario de escasez de agua en la zona de riego estudiada.

El riego deficitario es una técnica de fácil aplicación y manejo cuando se cuenta con suficiente información de campo para generar una calendarización robusta de riego. Sin embargo, no se puede generalizar el uso de los tratamientos para los diferentes tipos de suelos; por eso se recomienda validar localmente su aplicación para cada zona de riego y cultivo específico.

Fin de la versión en español

- Agricultural Water Management*, 83, 135-143. doi: 10.1016/j.agwat.2005.11.001
- 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* (pp.294). Rome and Earthscan, London: Author. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/015/i1688e/i1688e00.pdf>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1984). Economic considerations of deficit irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 100(4), 343-358. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1984\)110:3A4\(343\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9437(1984)110:3A4(343))
- Martin, E. (2001). Methods of determining when to irrigate (pp. 7). Arizona: The University of Arizona. Retrieved from <http://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1220s.pdf>
- Muñoz-Pérez, D., & Hernández-Rivera, G. (2004). *Situación actual y perspectiva del maíz* (pp. 136). México: Sistema de información y estadística agroalimentaria y pesquera (SIAP-SAGARPA). Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/97933/maiz90-04.pdf>
- Nadal, A., & Wise, T. A. (2005). Los costos ambientales de la liberación agrícola: el comercio de maíz entre México y EE.UU. en el marco del NAFTA. In: Blanco, H., Togeiro-de Almeida, L., & Gallagher, K. P. (Eds.), *Globalización y medio ambiente: lecciones desde las*

- Américas (pp. 49-92). Santiago, Chile: RIDES-GDAE. Retrieved from <https://ase.tufts.edu/gdae/Pubs/rp/wg/ParteI.pdf>
- Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J. M., Sifuentes-Ibarra, E., & Rendón-Pimentel, L. (2007). Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agricultural Water Management*, 89(1-2), 81-88. doi: 10.1016/j.agwat.2006.11.002
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Ñíguez-Covarrubias, M., & Montero-Martínez, M. J. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimiento hídrico de los cultivos. *Agrociencia*, 45, 1-11. Retrieved from <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2011/ene-feb/art-1.pdf>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Rojano-Aguilar, A., & Ñíguez-Covarrubias, M. (2012). Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. In: Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (Eds.), *Adaptación al cambio climático* (71-117). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Retrieved from http://gia.imta.mx/geoportal/docs/Efectos_Cambio_Clim%C3%A1tico_IV_IMTA-2012.pdf
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., & Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencia*, 40, 13-25. Retrieved from <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2006/ene-feb/art-2.pdf>
- Pasquale, S. P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e.pdf>
- Rázuri, L., Romero, D. G., Romero, C. E. R., Hernández, D. J., & Rosales, J. G. (2008). Efecto del riego deficitario controlado en la producción del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo riego localizado. *Agricultura Andina*, 14, 31-48. Retrieved from <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/29369/1/articulo3.pdf>
- Rendón, L., Fuentes, C., & Magaña, G. (1997). *Diseño del riego por gravedad. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas* (pp. 1-86). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rivetti, A. R. (2006). Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina, I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 38(2), 25-36. Retrieved from <http://bdigital.uncu.edu.ar/1309>
- Rodríguez-Padrón, R. A., Rázuri-Ramírez, L., Sworowsky, A., & Rosales-Daboín, J. (2014). Efecto del riego deficitario y diferentes frecuencias en la producción del cultivo de pimentón. *Revista Interciencia*, 39(8), 591-596. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33931820009>
- Schussler, J. R., & Westgate, M. E. (1995). Assimilate flux determines kernel set at low water potential in maize. *Crops Science*, 35(4), 1075-1080. doi: 10.2135/cropsci1995.0011183X003500040026x
- Serna-Pérez, A., & Zegbe, J. (2012). Rendimiento, calidad de fruto y eficiencia en el uso del agua del chile 'mirasol' bajo riego deficitario. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35, 53-56. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000500011
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2016). Información estadística de la producción agropecuaria y pesquera mexicana. México: Author. Retrieved from <http://www.siap.gob.mx/>
- Suzuki, K., Tsukaguchi, T., Takeda, H., & Egawa, Y. (2001). Decrease of pollen stainability of green bean at high temperatures and relationship tolerance. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(5), 571-574. Retrieved from <http://journal.ashspublications.org/content/126/5/571.full.pdf+html?sid=9ea84947-fbcd-4ff4-b4ca-f56a8f0015c0>
- Tapia-Vargas, M., Larios-Guzmán, A., Abrisqueta-Villena, I., Mounzer, O., Vera-Muñoz, J., Abrisqueta-García, J. M., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2010). Riego deficitario en melocotonero. Análisis del rendimiento y de la eficiencia en el uso del agua. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(4), 89-93. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000500018
- Wilhelm, E. P., Mullen, R. E., Keeling, P. L., & Singletary, G. (1999). Heat stress during filling in maize: effects on kernel growth and metabolism. *Crop Science*, 39(6), 1733-1741. doi: 10.2135/cropsci1999.3961733x