

Cotton and its response to different soil water conditions

El algodón y su respuesta a diferentes condiciones hídricas del suelo

Marco Antonio Inzunza-Ibarra*, Ignacio Sánchez-Cohen; Sergio Iván Jiménez-Jiménez; Mariana de Jesús Marcial-Pablo; Ernesto Sifuentes-Ibarra

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA, INIFAP). Margen derecha canal Sacramento km 6.5, Zona industrial Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, MÉXICO.

*Corresponding author: inzunza.marco@inifap.gob.mx, mainzunza@yahoo.com, tel. 871 149 5393.

Abstract

Introduction: One of the biggest problems in cotton farming in the Comarca Lagunera, Mexico, is the low efficiency of irrigation, since the large quantities of water used for this crop result in water shortages.

Objectives: To determine the response function of the cotton crop to different soil moisture contents, as well as the water use efficiency.

Methodology: Seven treatments were evaluated in the field: 40-40, 40-80, 60-60, 60-100, 80-40, 80-80 and 100-60 % of available moisture consumed (AMC) by the cotton plant at two phenological stages. Treatments were distributed in a randomized block design with four replications.

Results: The highest cotton yield ($8.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) was obtained with the treatment that developed under 63 and 62 % AMC at the first and second stages of development, respectively, by consuming 97 cm of water.

Limitation of the study: The models do not predict satisfactorily when extrapolating outside the range of moisture levels considered in the study.

Originality: No studies have been reported on extreme favorable and unfavorable conditions of soil moisture content in cotton to know its productive response.

Conclusions: The obtained model maximizes cotton production ($8.74 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) with a water deficit of 59 and 56 % AMC. The highest water productivity ($0.945 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) was obtained with 81 and 82 % AMC and 78 cm of water consumption.

Keywords: *Gossypium hirsutum*, yield function, water requirement, reflectometry.

Resumen

Introducción: Uno de los mayores problemas en la explotación del algodón en la Comarca Lagunera, México, es la baja eficiencia del riego, ya que requiere grandes cantidades de agua, lo cual provoca su escasez.

Objetivos: Determinar la función de respuesta del cultivo de algodón a diferentes contenidos de humedad en el suelo, así como la eficiencia de uso del agua.

Metodología: Se evaluaron siete tratamientos en campo: 40-40, 40-80, 60-60, 60-100, 80-40, 80-80 y 100-60 de humedad aprovechable consumida (HAC) por el algodonoero en dos etapas fenológicas. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones.

Resultados: La mayor producción de algodón ($8.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) se obtuvo con el tratamiento que se desarrolló bajo 63 y 62 % de la HAC en la primera y segunda etapa de desarrollo, respectivamente, al consumir 97 cm de agua.

Limitación del estudio: Los modelos no predicen en forma satisfactoria al extrapolar fuera del rango de los niveles de humedad considerados en el estudio.

Originalidad: No se han reportado estudios sobre condiciones favorables y desfavorables extremas de contenido de humedad del suelo en algodón para conocer su respuesta productiva.

Conclusiones: El modelo obtenido maximiza la producción de algodón ($8.74 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) con un déficit hídrico de 59 y 56 % de HAC. La mayor productividad del agua ($0.945 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) se obtuvo con 81 y 82 % de HAC y un consumo de 78 cm de agua.

Palabras clave: *Gossypium hirsutum*, función de rendimiento, requerimiento de agua, reflectometría.



Introduction

Irrigation water is increasingly scarce and of lower quality, due to climate change, environmental pollution and growing urban or industrial demand, hence the importance of using it more efficiently (Mohan & Ramsundram, 2014; Hatfield & Dold, 2019). The Comarca Lagunera, located in northern Mexico, has faced great challenges due to its arid and semi-arid climate, since it depends on water captured in two dams and groundwater. In this region, the main limiting factor in the agricultural sector is the scarcity of water for crop production. One strategy to solve this problem is to increase the efficiency of irrigation water use. This includes the management of water from its supply source to its optimal application to the crop on the farm (Inzunza-Ibarra et al., 2014).

In the Comarca Lagunera, cotton cultivation began before 1810, with an area of more than 90 000 ha by 1962. Currently, this area has been reduced to 16 737.9 ha due to water scarcity, the high incidence of pests, diseases, high cultivation costs, and the change in land use to fodder production (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2023). However, in recent years its production has increased due to its importance, since it generates jobs and is an option to replace alfalfa cultivation, which requires large amounts of water (Miranda-Wong, 2008). In this regard, Zonta et al. (2017) reported that the water deficit that causes the greatest losses in cotton yield is during the phenological periods of the first flowers and peak bloom, since the plant's water demand is greater and its water use efficiency is low.

Singh et al. (2010), in a two-year study on the effect of water deficit on cotton, reported that using drip irrigation at 100 % evapotranspiration resulted in a 43.1 % higher yield and a 26.9 % water saving compared to furrow irrigation. He et al. (2022), when subjecting cotton to different deficit irrigations, reported that the best treatment resulted from irrigating the crop to 75 % field capacity, obtaining a yield of 7 146.4 kg·ha⁻¹ and water use efficiency of 1.43 kg·m⁻³. Wang et al. (2014), in a three-year study of cotton grown with drip irrigation, concluded that the crop's most sensitive stage to deficit irrigation (70 % crop evapotranspiration) was early flowering. In that study, average yield ranged from 3.6 to 5.1 Mg·ha⁻¹, and irrigation water productivity was from 0.91 to 1.16 kg·m⁻³.

Du et al. (2008), in a two-year study conducted in an arid area of China, reported the effect of partial root-zone irrigation applied using drip irrigation on water use efficiency and cotton yield. Results showed that alternate drip irrigation had drier profiles and lower stomatal conductance values than conventional drip

Introducción

El agua de riego es cada vez más escasa y de menor calidad, esto debido al cambio climático, la contaminación ambiental y la creciente demanda urbana o industrial, de ahí la importancia de hacer un uso más eficientemente (Mohan & Ramsundram, 2014; Hatfield & Dold, 2019). La Comarca Lagunera, ubicada en México, ha enfrentado grandes desafíos debido a su clima árido y semiárido, ya que depende del agua captada en dos presas y del agua del subsuelo. En dicha región, el principal factor limitante en el sector agrícola es la escasez de agua para la producción de los cultivos. Una estrategia para solventar este problema es incrementar la eficiencia de uso del agua de riego. Esto incluye el manejo del agua desde su derivación de la fuente de abastecimiento hasta su óptima aplicación al cultivo en el predio agrícola (Inzunza-Ibarra et al., 2014).

En la Comarca Lagunera, el cultivo de algodón inició desde antes de 1810, con una superficie superior a las 90 mil ha para 1962. Actualmente, esta superficie se ha reducido hasta 16 737.9 ha debido a la escasez de agua, la alta incidencia de plagas, las enfermedades, los altos costos de cultivo y al cambio de uso de suelo a la producción de forrajes (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2023). No obstante, en los últimos años ha incrementado su producción debido a su importancia, ya que genera empleos y es una opción para sustituir el cultivo de alfalfa, el cual requiere grandes cantidades de agua (Miranda-Wong, 2008). Al respecto, Zonta et al. (2017) reportaron que el déficit hídrico que causa mayores pérdidas en el rendimiento del algodón es durante los periodos fenológicos de las primeras flores y en su máxima floración, ya que su demanda de agua es mayor y su eficiencia de uso de agua es baja.

Singh et al. (2010) estudiaron durante dos años el efecto del déficit hídrico en algodón, y señalan que al irrigar con el 100 % de la evapotranspiración con goteo se obtuvo 43.1 % más rendimiento, con un ahorro de 26.9 % de agua con respecto al riego por surcos. Por su parte, He et al. (2022), al someter el algodón a diferentes riegos deficitarios, reportaron que el mejor tratamiento resultó al irrigar el cultivo con el 75 % de la capacidad de campo, al obtener una producción de 7 146.4 kg·ha⁻¹ y una eficiencia de uso del agua de 1.43 kg·m⁻³. Wang et al. (2014), en un estudio de algodón con riego por goteo durante tres años, concluyen que la etapa más sensible del cultivo al riego deficitario (70 % de la evapotranspiración del cultivo) fue la floración temprana. En dicho estudio, el rendimiento promedio varió de 3.6 a 5.1 Mg·ha⁻¹, y la productividad del agua de riego de 0.91 a 1.16 kg·m⁻³.

Du et al. (2008), en un estudio de dos años realizado en una zona árida de China, reportaron el efecto de irrigar parcialmente por goteo el área radical del algodón

irrigation at the same irrigation level. However, similar yields, greater water use efficiency and a 32 % irrigation water saving were obtained compared to conventional drip irrigation. In this sense, Farahani et al. (2008), in a three-year study with the same crop, reported that the crop coefficients cited by the FAO were 24 % higher than those obtained when adjusting them to local conditions, which overestimated the water requirements of cotton by up to 150 mm, equivalent to the application of two additional irrigations.

Zhou et al. (2016) determined the amount of water to apply and the irrigation initiation time (first squares, first bloom and mid-bloom) for cotton over a four-year study period in Tennessee, USA. Results showed that starting irrigation at mid-bloom, when the highest stress occurs, yields $1\,909\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of fiber, with 563 mm of water consumption. This yield is higher compared to the results obtained when irrigation was initiated at earlier stages and when a lower water deficit prevailed. Zhang et al. (2016) analyzed the effects of water deficit and plant density on the growth, yield, water use efficiency and fiber quality of cotton under field conditions. These authors found that with 400 mm of water and a high plant density, $6\,300\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ were obtained, which meant a water saving of 20 % by reaching $1.18\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ of use efficiency, the highest on average of the three years of study. Therefore, they suggest as a water-saving alternative to use high plant densities with water deficit to avoid reducing yield in arid regions.

Zhan et al. (2015), in a two-year study on the effect of deficit irrigation on cotton, reported that when compared with conventional irrigation (570 mm), deficit irrigation reduced leaf surface area in the upper canopy layer by 20 to 46 %. On the other hand, a slight water deficit (469 mm) decreased the leaf photosynthetic rate in the upper canopy layer by 24 %, but increased the photosynthetic rate in the mid-canopy layer by 23 % and in the lower canopy layer by 79 %. Therefore, Zhan et al. (2015) concluded that a slight water deficit had no significant effect on yield ($7\,970\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) when compared to conventional irrigation ($7\,640\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

In more recent studies, Chen et al. (2019) concluded that a plant density of 36 plants per m^2 and a water deficit of 495 mm generated yields and water use efficiency of $6\,154\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and $1.44\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively, equal to or greater than a treatment with more water. These authors point out that a higher plant density with deficit irrigation increased the efficiency of use of limited resources, such as light intensity and available water. Çeltin and Kara (2019) reported that the highest water productivity in cotton ($0.84\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) was achieved with subsurface drip irrigation at a 40-cm lateral pipe depth and with 528 mm of water.

sobre la eficiencia de uso del agua y el rendimiento del algodón. Los resultados mostraron que el riego por goteo alterno presentó perfiles más secos y valores de conductancia estomática más bajos que el riego por goteo convencional, con el mismo nivel de riego. Sin embargo, se obtuvieron rendimientos similares, mayor eficiencia de uso del agua y se ahorró el 32 % del agua de riego, comparado con el goteo convencional. En este sentido, Farahani et al. (2008), mediante un estudio de tres años con el mismo cultivo, señalaron que los coeficientes de cultivo citados por la FAO resultaron ser 24 % más altos que los obtenidos al ajustarlos a condiciones locales, esto sobreestimó los requerimientos hídricos del algodón en hasta 150 mm, o su equivalencia a la aplicación de dos riegos adicionales.

Zhou et al. (2016) determinaron la cantidad de agua a aplicar y el momento de inicio del riego (primeros cuadros, inicio de floración o al 50 % de floración) en el cultivo de algodón durante cuatro años en Tennessee, EUA. Los resultados mostraron que al iniciar el riego a la mitad de la floración, cuando se presentó un mayor estrés, se obtienen $1\,909\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fibra, con un consumo de 563 mm de agua. Este rendimiento es mayor en comparación con los resultados obtenidos cuando el riego se inició en las etapas más tempranas y al prevalecer un déficit hídrico menor. Zhang et al. (2016) analizaron los efectos del déficit hídrico y la densidad de plantas sobre el crecimiento, el rendimiento, el uso eficiente del agua y la calidad de la fibra del algodón bajo condiciones de campo. Estos autores encontraron que con 400 mm de agua y una alta densidad de plantas se obtuvieron $6\,300\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, lo cual significó un ahorro de agua de 20 % al alcanzar $1.18\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ de eficiencia de uso, la más alta en promedio de los tres años de estudio. Por ello, sugieren como una alternativa de ahorro de agua utilizar altas densidades de plantas con déficit hídrico, esto para evitar disminuir el rendimiento en regiones áridas.

Zhan et al. (2015) estudiaron el efecto del riego deficitario por dos años en algodón, y reportaron que al compararlo con el riego convencional (570 mm), el riego deficitario redujo la superficie foliar de su perfil superior en un 20 a 46 %. Por su parte, el riego deficitario ligero (469 mm) disminuyó la tasa fotosintética de las hojas del perfil superior del dosel en un 24 %, pero incrementó la tasa fotosintética en el perfil medio de las hojas en un 23 % y en el perfil inferior de la planta en un 79 %. Por lo anterior, Zhan et al. (2015) concluyeron que el déficit hídrico ligero no tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento ($7\,970\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), al compararlo con el riego convencional ($7\,640\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

En estudios más recientes, Chen et al. (2019) concluyeron que una densidad de 36 plantas por m^2 y un déficit hídrico de 495 mm generaron rendimientos y eficiencia de uso de agua de $6\,154\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y de $1.44\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente, igual o mayor que el tratamiento

Considering the regional and national purpose of improving water use efficiency in different crops, the objective of the present study was to determine the response function of the cotton crop to different soil moisture contents as well as water use efficiency.

Materials and methods

The study was carried out in an experimental plot of the National Center for Disciplinary Research on Water-Soil-Plant-Atmosphere Relationships belonging to the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research (CENID RASPA, INIFAP), located in the Comarca Lagunera, Gómez Palacio, Durango, México (103° 25' 57" WL and 25° 31' 57" NL, at 1 139 m a. s. l.), in the southeastern part of the state of Coahuila and the northwestern part of Durango, bordering the state of Chihuahua to the north and Zacatecas to the south.

The Comarca Lagunera has a desert-like climate classified as BW(h')hw(e) (García, 2004), with low atmospheric humidity, average annual rainfall of 200 to 300 mm in most of the region and 400 to 500 mm in the mountainous area to the west. Rainfall is mainly in summer, with some winter rains accounting for 5 to 10.2 % of the total. It has an average annual evaporation of 2 600 mm, and average annual and coldest month temperatures of 20 and 18 °C, respectively. The frost-free period is between April and October, and hailstorms may occur in May.

The physicochemical characterization of the experimental site's soil was carried out by means of a series of sampling pits in the form of a grid with four replications and three depths (from 30 to 90 cm). The main chemical characteristics determined were the availability of nitrates (NO₃; Kjeldahl method), phosphorus (P; Duval method) and potassium (K; spectrophotometry), total carbonates (CO₃; volumetry), electrical conductivity (EC; conductimetry), cation exchange capacity (CEC; with gypsum extraction) and the pH (saturation paste) (Table 1).

The soil's physical characteristics (Table 2) were determined using different techniques: organic matter

con más agua. Estos autores señalan que la mayor densidad de plantas con riego deficitario incrementó la eficiencia de uso de los recursos limitados, como la intensidad de la luz y el agua disponible. Çeltin y Kara (2019) reportaron que la mayor productividad del agua en algodónero (0.84 kg·m⁻³) se alcanzó al irrigar mediante riego por goteo enterrado a 40 cm y con 528 mm de agua.

Considerando el propósito regional y nacional de mejorar la eficiencia de uso del agua en los diferentes cultivos, el objetivo del presente estudio fue determinar la función de respuesta del cultivo de algodón a diferentes contenidos de humedad en el suelo, así como la eficiencia de uso del agua.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en un lote experimental del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA, INIFAP) ubicado en la Comarca Lagunera, Gómez Palacio, Durango, México (103° 25' 57" LO y 25° 31' 57" LN, a 1 139 m s. n. m.), en la parte sureste del estado de Coahuila y noroeste de Durango, al norte colinda con el estado de Chihuahua y al sur con Zacatecas.

El clima de la Comarca Lagunera es de tipo desértico, clasificado como BW(h')hw(e) (García, 2004), con escasa humedad atmosférica, precipitación pluvial promedio de 200 a 300 mm anuales en la mayor parte de la región y de 400 a 500 mm en la zona montañosa hacia el oeste. Las lluvias son en verano, con algunas lluvias invernales que van del 5 al 10.2 %. Presenta evaporación media anual de 2 600 mm, temperatura media anual y del mes más frío de 20 y 18 °C, respectivamente. El período libre de heladas se ubica entre abril a octubre, y se pueden presentar granizadas en mayo.

La caracterización fisicoquímica del suelo del sitio experimental se realizó mediante una serie de pozos de muestreo en forma de cuadrícula con cuatro repeticiones y tres profundidades (de 30 hasta 90 cm). Las principales características químicas determinadas

Table 1. Chemical characteristics of the experimental site's soil.

Cuadro 1. Características químicas del suelo del sitio experimental.

Depth (cm)/ Profundidad (cm)	NO ₃ (mg·kg ⁻¹)	P (mg·kg ⁻¹)	K (mg·kg ⁻¹)	CO ₃ (g·kg ⁻¹)	EC (dS·m ⁻¹)	CEC (cmol·kg ⁻¹)	pH
0-30	23.18	9.20	1045.83	53.0	0.79	24.4	8.47
30-60	37.27	8.23	912.50	68.0	1.07	23.5	8.30
60-90	43.42	9.67	833.30	86.6	1.03	23.4	8.15

NO₃ = available nitrates; P = available phosphorus; K = available potassium; CO₃ = total carbonates; EC = electrical conductivity; CEC = cation exchange capacity.

NO₃ = nitratos disponibles; P = fósforo disponible; K = potasio disponible; CO₃ = carbonatos totales; CE = conductividad eléctrica; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

Table 2. Physical characteristics of the experimental site's soil.
Cuadro 2. Características físicas del suelo del sitio experimental.

Depth (cm)/ Profundidad (cm)	OM (%)/ MO (%)	Sand (%)/ Arena (%)	Silt (%)/ Limo (%)	Clay (%)/ Arcilla (%)	Texture/ Textura	FC (%)/ CC (%)	PWP (%)/ PMP (%)	Da (g·cm ⁻³)
0-30	1.21	20.0	38.0	24.0	scl/frl	27.9	15.9	1.3
30-60	0.88	19.6	47.4	33.0	scl/frl	27.7	15.5	1.2
60-90	0.82	17.0	50.0	33.0	Loam/ Franco	27.9	15.2	1.3

OM = organic matter; FC = field capacity; PWP = permanent wilting point; Da = bulk density; scl = silty clay loam.

MO = materia orgánica; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; Da = densidad aparente; frl = franco arcillo limoso.

content (OM; Walkley and Black method), sand, silt and clay content (Robinson's pipette method), field capacity (FC; pot method), permanent wilting point (PWP; pressure membrane) and bulk density (Da; cylinder method) (Plenecassage et al., 1977). In general, the soil of the experimental site contained low nitrate availability, moderately low phosphorus availability and high potassium availability, as well as low contents of soluble salts, sodium and organic matter (Castellanos et al., 2000).

To determine the available moisture consumed (AMC), the methodology used by Inzunza-Ibarra et al. (2022) was applied, consisting of a two-factor study with four levels of AMC (40, 60, 80 and 100 %) at two phenological stages of the crop (germination to the onset of flowering and from there to physiological maturity). The San Cristobal two-factor treatment design was used, in which seven treatments are chosen from a total of 16 combinations (4×4) (Martínez-Garza, 1988). According to this design, seven different levels of soil AMC abatement in the first 90 cm of crop root depth were studied: 40-40, 40-80, 60-60, 60-100, 80-40, 80-80 and 100-60 % AMC.

The treatments were randomly distributed in the field based on a randomized block experimental design with four replications. The experimental plot was 4 m wide by 5 m long, giving an area of 20 m². To monitor soil moisture content and its variation throughout the crop cycle in each treatment, the time domain reflectometry (TDR) method was used with the aid of a Trime-Pico T3/IPH44 sensor (IMKO, Germany). Cotton was planted on March 25, with a planting density of 12 kg·ha⁻¹ (approximately 131,000 plants·ha⁻¹) and N-P-K fertilization (130-80-0). The cotton variety planted was Bayer FM 1740 B2RF.

The evaluated variables cotton yield (lint and seed (Mg·ha⁻¹), the amount of water consumed, water use efficiency (which relates grain yield to the amount of water consumed; kg·m⁻³) and the soil moisture content of each treatment.

fueron la disponibilidad de nitratos (NO₃; método de Kjeldahl), fósforo (P; método de Duval) y potasio (K; espectrofotometría), los carbonatos totales (CO₃; volumetría), la conductividad eléctrica (CE; conductimetría), la capacidad de intercambio catiónico (CIC; con extracción de yeso) y el pH (pasta de saturación) (Cuadro 1).

Las características físicas del suelo (Cuadro 2) se determinaron a partir de diferentes técnicas: contenido de materia orgánica (MO; método de Walkley y Black), contenido de arena, limo y arcilla (método de la pipeta de Robinson), capacidad de campo (CC; método de la olla), punto de marchitez permanente (PMP; membrana de presión) y densidad aparente (Da; método del cilindro) (Plenecassage et al., 1977). En general, el suelo del sitio experimental contenía baja disponibilidad de nitratos, moderadamente baja disponibilidad de fósforo y alta de potasio, así como bajo contenido de sales solubles, sodio y materia orgánica (Castellanos et al., 2000).

Para determinar la humedad aprovechable consumida (HAC), se aplicó la metodología empleada por Inzunza-Ibarra et al. (2022), la cual consiste en un estudio bifactorial con cuatro niveles de HAC (40, 60, 80 y 100 %) en dos etapas fenológicas del cultivo (germinación a inicio de floración, y de ésta a madurez fisiológica). Se utilizó el diseño de tratamientos San Cristóbal para dos factores, en el cual se eligen siete tratamientos de un total de 16 combinaciones (4×4) (Martínez-Garza, 1988). De acuerdo con este diseño, se estudiaron siete diferentes niveles de abatimiento de la HAC del suelo en los primeros 90 cm de profundidad radicular del cultivo: 40-40, 40-80, 60-60, 60-100, 80-40, 80-80 y 100-60 % de HAC.

Los tratamientos se distribuyeron de manera aleatoria en el campo con base en un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. La parcela experimental era de 4 m de ancho por 5 m de largo, dando una superficie de 20 m². Para monitorear el contenido de humedad del suelo y su variación a través del ciclo del cultivo en cada tratamiento, se utilizó el método de reflectometría en el dominio temporal

Results were subjected to an analysis of variance, comparison of means (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), regression analysis and optimization of variables, by deriving to maximize and minimize (Statistical Analysis System [SAS], 2003).

Results and discussion

Table 3 shows the values of the moisture levels to which the different cotton crop treatments were subjected. The AMC fluctuated from 42 % at the first growth stage in the 40-40 and 40-80 treatments (non-restrictive moisture conditions) to 100 % in the 100-60 and 60-100 treatments (extremely restrictive water conditions) at the first and second stages of cotton growth, respectively. In the case of actual evapotranspiration or amount of water consumed by the cotton plant, the highest water consumption (64 cm) in the first stage occurred in the 40-40 and 40-80 treatments, and the lowest water consumption (29 cm) was observed in the 100-60 treatment (low moisture content in the vegetative stage of cotton).

Cotton yield with different irrigation treatments

Figure 1 shows the behavior of cotton seed yield ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) in response to different soil moisture conditions. The analysis of variance showed highly significant differences ($\alpha = 0.01$) among treatments (Table 4). The 60-60 AMC combination generated the highest average yield ($8.67 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). According to the comparison of means (Table 3), this yield was not statistically different from that achieved with the 40-40 treatment. Both treatments were significantly higher than the rest ($\alpha \leq 0.05$).

(TDR, por sus siglas en inglés) mediante un sensor Trime-Pico T3/IPH44 (IMKO, Alemania). El algodón se sembró el 25 de marzo, con una densidad de siembra de $12 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (aproximadamente 131 mil plantas $\cdot\text{ha}^{-1}$) y fertilización N-P-K (130-80-0). La variedad de algodón sembrada fue FM 1740 B2RF de Bayer.

Las variables evaluadas fueron el rendimiento de fibra en hueso ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), la lámina de agua consumida, la eficiencia de uso del agua (que relaciona el rendimiento de grano con la cantidad de agua consumida; $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) y el contenido de humedad del suelo de cada tratamiento.

Los resultados se sometieron a un análisis de varianza, comparación de medias (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), análisis de regresión y optimización de variables, al derivar para maximizar y minimizar (Statistical Analysis System [SAS], 2003).

Resultados y discusión

En el Cuadro 3 se presentan los valores de los niveles de humedad a los que se sometieron los diferentes tratamientos del cultivo de algodón. La HAC fluctuó de 42 % en la primera etapa de crecimiento en los tratamientos 40-40 y 40-80 (condiciones de humedad no restrictivas) hasta 100 % en los tratamientos 100-60 y 60-100 (condiciones hídricas restrictivas en extremo) en la primera y segunda etapa de crecimiento del algodón, respectivamente. Para el caso de la evapotranspiración actual o lámina consumida por el algodón, el mayor consumo de agua (64 cm) en la primera etapa se presentó en los tratamientos 40-40 y 40-80, y el menor consumo de agua (29 cm) se observó en el tratamiento 100-60 (bajo contenido de humedad en la etapa vegetativa del algodón).

Table 3. Average moisture contents, yields and water efficiency of the treatments.

Cuadro 3. Contenidos de humedad, rendimientos y eficiencia de agua promedios de los tratamientos.

Treatment / Tratamiento	AMC ₁ (%) / HAC ₁ (%)	AMC ₂ (%) / HAC ₂ (%)	ET ₁ (cm)	ET ₂ (cm)	Y ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) / R ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	WUE ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) / EUA ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
40-40	42	44	64	52	8.21 a	0.707
40-80	42	82	64	37	6.19 c	0.612
60-60	63	62	53	44	8.67 a	0.897
60-100	63	100	53	34	5.30 d	0.610
80-40	81	44	41	52	7.14 b	0.767
80-80	81	82	41	37	7.37 b	0.945
100-60	99	62	29	42	5.89 cd	0.830

HAC₁ and HAC₂ = available moisture consumed in the germination to onset of flowering stage and from there to physiological maturity of the cotton crop, respectively. ET₁ and ET₂ = actual evapotranspiration at the two stages; Y = cotton yield; WUE = water use efficiency. Means with the same letter in the yield column do not differ statistically (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

HAC₁ y HAC₂ = humedad aprovechable consumida en la etapa de germinación a inicio de floración y de esta a madurez fisiológica del cultivo de algodón, respectivamente; ET₁ y ET₂ = evapotranspiración actual en las dos etapas; R = rendimiento en hueso del algodón; EUA = eficiencia de uso del agua. Medias con la misma letra en la columna de rendimiento no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

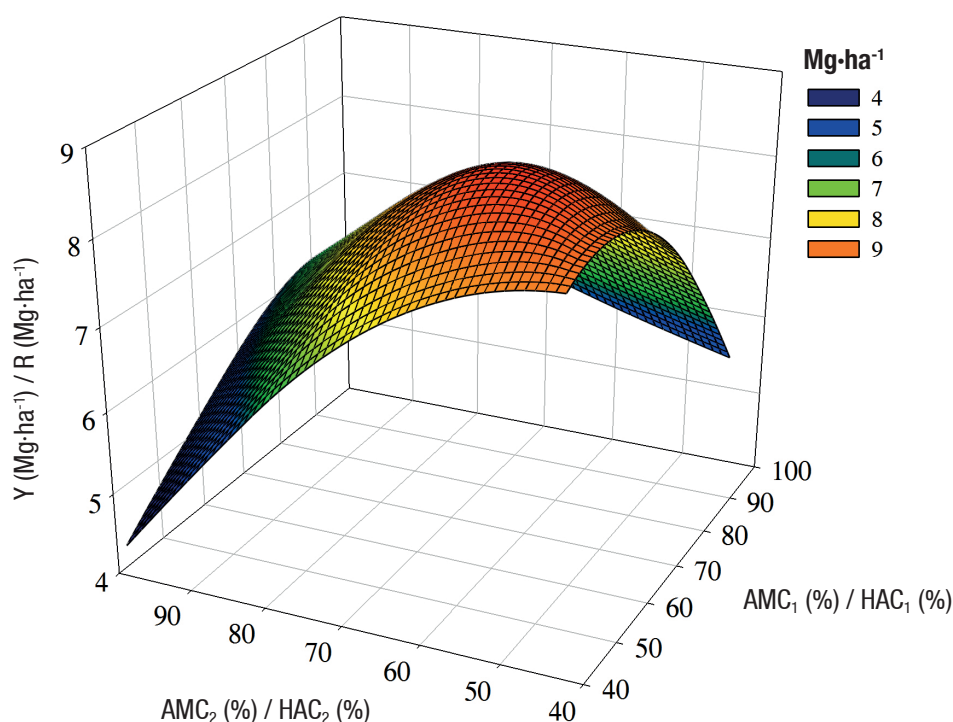


Figure 1. Response of the cotton crop to different soil water stress treatments. Y = yield; AMC₁ and AMC₂ = available moisture consumed in the germination to onset of flowering stage, and from there to physiological maturity, respectively.

Figura 1. Respuesta del cultivo de algodón a los diferentes tratamientos de estrés hídrico del suelo. R = rendimiento; HAC₁ y HAC₂ = humedad aprovechable consumida en las etapas de germinación a inicio de floración, y de ésta a madurez fisiológica, respectivamente.

Table 4. Analysis of variance and F test for yield and water use efficiency (WUE) in the cotton crop.

Cuadro 4. Análisis de varianza y prueba de F para el rendimiento y eficiencia de uso del agua (EUA) en el cultivo de algodón.

Source of variation/ Fuente de variación	df/ gl	Yield (Mg·ha ⁻¹)/ Rendimiento (Mg·ha ⁻¹)	WUE (kg·m ⁻³)/ EUA (kg·m ⁻³)
Blocks/Bloques	3	0.1817	0.0025
Treatments/Tratamientos	6	6.1167**	0.0698**
Error	18	0.0893	0.0014
CV (%)		4.29	4.86

df = degrees of freedom; CV = coefficient of variation; ** = highly significant ($\alpha \leq 0.001$).

gl = grados de libertad; CV = coeficiente de variación; ** = altamente significativo ($\alpha \leq 0.001$).

The highest cotton yield was obtained when applying irrigation at 63 and 62 % (Figure 1) AMC; this occurred when the soil presented a tension of -0.48 and -0.46 MPa to extract soil moisture in the first and second stages of cultivation, respectively. The yields obtained are similar to those reported by Singh et al. (2010), and 38 % higher than those achieved by Li et al. (2019).

The lowest yields were observed in the 60-100 and 100-60 treatments (5.30 and 5.89 Mg·ha⁻¹, respectively), which had in common water stress conditions close to the PWP at one of their stages (Figure 1). According

Rendimiento del algodón con los diferentes tratamientos de riego

La Figura 1 muestra el comportamiento del rendimiento en hueso del algodón (Mg·ha⁻¹), como respuesta a las diferentes condiciones de humedad del suelo. El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas ($\alpha = 0.01$) entre los tratamientos (Cuadro 4). La combinación de la HAC de 60-60 generó el rendimiento promedio más alto (8.67 Mg·ha⁻¹). De acuerdo con la comparación de medias (Cuadro 3), dicho rendimiento no fue estadísticamente diferente al alcanzado con

to the comparison of means (Table 3), these treatments turned out to be statistically lower in cotton yield compared to the rest, but with no significant differences among them. Liu et al. (2017) report yields lower than 3.1 Mg·ha⁻¹ under similar soil stress conditions.

These results allow concluding that there is no linear response of cotton yield under different soil moisture regimes. That is, a negative effect on yield was observed, both for water stress levels and for very wet levels in the soil that can produce prolonged anaerobiosis conditions (Liu et al., 2018).

Cotton production model considering the soil moisture regime

By means of regression analysis, the observed cotton yield (Y) data were fitted as the dependent variable and AMC at the time of irrigation as the independent variable, which generated the following function:

$$R = 1.0017 + 0.1489 \times HAC_1 + 0.1197 \times HAC_2 - 0.0020 \times HAC_1^2 - 0.0019 \times HAC_2^2 + 0.0015 \times HAC_1 \times HAC_2 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.94 \quad CV = 4.5 \%$$

where the regression coefficients of each of the effects (linear, quadratic and interaction) were highly significant and contribute to explaining the cotton yield. According to the coefficient of determination (R²) and the coefficient of variation (CV), the model obtained satisfactorily explains the phenomenon represented. By using the theory of maxima and minima of differential and integral calculus (Hasser et al., 1982), it is deduced that the maximum cotton yield (8.7 Mg·ha⁻¹) is obtained when irrigating until the soil reaches, on average, 59 and 56 % AMC at the growth and reproductive stages, respectively. These critical values are equivalent to 0.46 and 0.36 MPa soil moisture tension, respectively.

Cotton yield model considering evapotranspiration or the amount of water consumed

When relating the yield and evapotranspiration of the cotton crop of each treatment, a quadratic type relationship was observed (Figure 2), which resulted in Equation 2, where the estimated regression coefficients were significant and contributed to explaining the relationship of the variables under study.

$$R = -36.8385 + 0.2521 \times ET_1 + 1.6736 \times ET_2 - 0.0050 \times ET_1^2 - 0.0216 \times ET_2^2 + 0.0062 \times ET_1 \times ET_2 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.90 \quad CV = 6.2 \%$$

el tratamiento 40-40. Ambos tratamientos fueron significativamente más altos al resto ($\alpha \leq 0.05$).

La mayor producción de algodón se obtuvo al aplicar el riego al 63 y 62 % (Figura 1) de la HAC; esto ocurrió cuando el suelo presentó una tensión de -0.48 y -0.46 MPa para extraer la humedad del suelo en la primer y segunda etapa del cultivo, respectivamente. Los rendimientos obtenidos son similares a los reportados por Singh et al. (2010), y 38 % superiores a los alcanzados por Li et al. (2019).

Los rendimientos más bajos se observaron en los tratamientos 60-100 y 100-60 (5.30 y 5.89 Mg·ha⁻¹, respectivamente), los cuales tuvieron en común condiciones de estrés hídrico cercanas al PMP en una de sus etapas (Figura 1). De acuerdo con la comparación de medias (Cuadro 3), estos tratamientos resultaron ser estadísticamente inferiores en el rendimiento de fibra en hueso con respecto al resto, pero sin diferencias significativas entre sí. Liu et al. (2017) reportan rendimientos inferiores a 3.1 Mg·ha⁻¹ bajo condiciones similares de estrés en el suelo.

Estos resultados permiten concluir que no hay una respuesta lineal del rendimiento de algodón bajo diferentes regímenes de humedad del suelo. Es decir, se observó un efecto negativo sobre el rendimiento, tanto para niveles de estrés hídrico como para niveles muy húmedos en el suelo, que pueden producir condiciones de prolongada anaerobiosis (Liu et al., 2018).

Modelo de producción de algodón considerando el régimen de humedad del suelo

Mediante el análisis de regresión, se ajustaron los datos observados del rendimiento (R) de algodón como variable dependiente y la HAC al momento del riego como variable independiente, lo cual generó la siguiente función:

$$R = 1.0017 + 0.1489 \times HAC_1 + 0.1197 \times HAC_2 - 0.0020 \times HAC_1^2 - 0.0019 \times HAC_2^2 + 0.0015 \times HAC_1 \times HAC_2 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.94 \quad CV = 4.5 \%$$

donde los coeficientes de la regresión de cada uno de los efectos (lineal, cuadrático e interacción) fueron altamente significativos, y contribuyen a explicar el rendimiento de algodón. De acuerdo con el coeficiente de determinación (R²) y el coeficiente de variación (CV), el modelo obtenido explica de forma satisfactoria el fenómeno representado. Al utilizar la teoría de máximos y mínimos del cálculo diferencial e integral (Hasser et al., 1982), se deduce que el rendimiento en hueso máximo (8.7 Mg·ha⁻¹) se obtiene cuando se riega hasta que el suelo

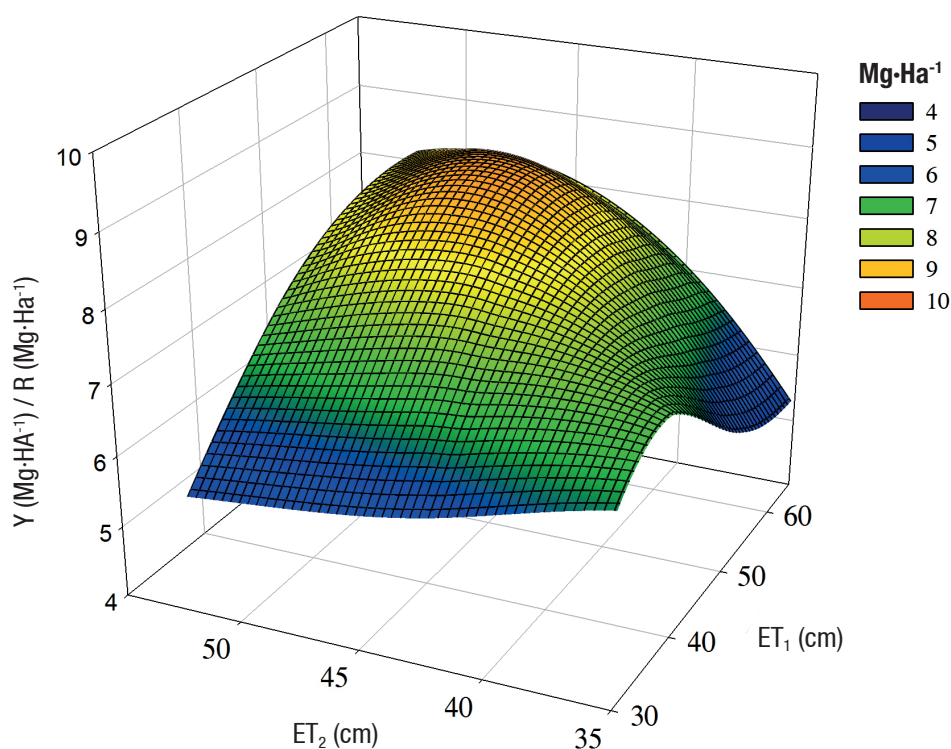


Figure 2. Response of the cotton crop to different water consumption levels. Y = yield; ET₁ and ET₂ = water consumption of cotton in the germination to onset of flowering stage and from there to physiological maturity, respectively.

Figura 2. Respuesta del cultivo de algodón a diferentes niveles de consumo de agua. R = rendimiento; ET₁ y ET₂ = consumo de agua del algodón en la etapa de germinación a inicio de floración y de ésta a madurez fisiológica, respectivamente.

According to the statistical parameters found, the model presents a satisfactory predictive capacity for these types of complex biological relationships, where several plant, soil and environmental factors are involved.

Conclusions

According to the generated model, which relates cotton yield and soil moisture levels, the crop maximizes its production ($8.74 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) when it develops with a soil water deficit of 59 and 56 % AMC at the vegetative and reproductive stages, respectively. Optimization of the function that related yield to the amount of water consumed showed that the maximum yield occurs when the crop consumes 54.3 and 46.6 cm of water during the vegetative and reproductive stages, respectively. The highest water use efficiency ($0.945 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) was observed under water conditions of 81 and 82 % AMC, and water consumption of 41 and 37 cm at the vegetative and reproductive stages, respectively. It is inferred that the response of cotton to different soil moisture contents is not linear, but rather obeys an optimum, which is of great importance in the planning of water resources in the arid and

alcanza, en promedio, 59 y 56 % de la HAC en la etapa de crecimiento y la reproductiva, respectivamente. Estos valores críticos equivalen a 0.46 y 0.36 MPa de tensión de humedad en el suelo, respectivamente.

Modelo de producción de algodón considerando la evapotranspiración o la lámina de agua consumida

Al relacionar el rendimiento y la evapotranspiración del cultivo de algodón de cada tratamiento, se observó una relación de tipo cuadrática (Figura 2), que resultó en la Ecuación 2, donde los coeficientes de regresión estimados fueron significativos y contribuyeron a explicar la relación de las variables bajo estudio.

$$R = -36.8385 + 0.2521 \times ET_1 + 1.6736 \times ET_2 - 0.0050 \times ET_1^2 - 0.0216 \times ET_2^2 + 0.0062 \times ET_1 \times ET_2 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.90 \quad CV = 6.2 \%$$

De acuerdo con los parámetros estadísticos encontrados, el modelo presenta una capacidad de predicción satisfactoria para este tipo de relaciones biológicas complejas, donde intervienen diversos factores de la planta, el suelo y el ambiente.

semi-arid regions of the country, since it represents water savings. This study allows applying the deficit irrigation concept, by analyzing the proximity of the optimal response function and observing the decrease in the amount of water applied to the crop without significantly affecting yield.

End of English version

References / Referencias

- Castellanos, R. J., Uvalle, B. S., & Aguilar, S. A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura
- Chen, Z., Niu, Y., Zhao, R., Han, Ch., Han, H., & Luo, H. (2019). The combination of limited irrigation and high plant density optimizes canopy structure and improves the water use efficiency of cotton. *Agricultural Water Management*, 218, 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.037>
- Çeltin, O., & Kara, A. (2019). Assessment of water productivity using different drip irrigation systems for cotton. *Agricultural Water Management*, 223, 105693. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105693>
- Du, T., Kang, S., Zhang, J., & Li, F. (2008). Water use and yield responses of cotton to alternate partial root-zone drip irrigation in the arid area of north-west China. *Irrigation Science*, 26, 147-159. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0081-0>
- Farahani, H. J., Oweis, T. Y., & Izzi, G. (2008). Crop coefficient for drip-irrigated cotton in a Mediterranean environment. *Irrigation Science*, 26(5), 375-383. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0101-0>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Hasser, N. B., LaSalle, J. P., & Sullivan, J. A. (1982). *Análisis Matemático 1. Curso de introducción*. Editorial Trillas.
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 10, 103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- He, P., Yu, S., Zhang, F., Ma, T., Ding, J., Chen, K., Chen, X., & Dai, Y. (2022). Effects of soil water regulation on the cotton yield, fiber quality and soil salt accumulation under mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. *Agronomy*, 12(5), 1246. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051246>
- Inzunza-Ibarra, M. A., Catalán-Valencia, E. A., Villa-Castorena, M., Sánchez-Cohen, I., Sifuentes-Ibarra, E., & Román-López, A. (2014). Modelos de predicción de rendimiento de canola en función del contenido de humedad disponible en el suelo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(1), 49-58. <https://doi.org/10.35196/rfm.2014.1.49>
- Inzunza-Ibarra, M. A., Sánchez-Cohen, I., Jiménez-Jiménez, S. I., Catalán-Valencia, E. A., & Marcial-Pablo, M. J. (2022). Soil moisture depletion rates on sunflower yield. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 14(1), 51-62. <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.09.105>

Conclusiones

De acuerdo con el modelo generado, que relaciona el rendimiento de algodón y los niveles de humedad del suelo, el cultivo maximiza su producción (8.74 Mg·ha⁻¹) cuando se desarrolla con un déficit hídrico en el suelo de 59 y 56 % de la HAC en las etapas vegetativa y reproductiva, respectivamente. La optimización de la función que relacionó el rendimiento con la cantidad de agua consumida arrojó que el máximo rendimiento se presenta cuando el cultivo consume 54.3 y 46.6 cm de agua durante las etapas vegetativa y reproductiva, respectivamente. La mayor eficiencia de uso del agua (0.945 kg·m⁻³) se observó bajo condiciones hídricas de 81 y 82 % de la HAC, y un consumo de agua de 41 y 37 cm en las etapas vegetativa y reproductiva, respectivamente. Se infiere que la respuesta del algodónero a los diferentes contenidos de humedad en el suelo no es lineal, sino que obedece a un óptimo, lo cual es de gran importancia en la planeación de los recursos hídricos en las regiones áridas y semiáridas del país, ya que representa ahorro de agua. Este estudio permite aplicar el concepto del riego deficitario, al analizar las proximidades del óptimo de la función de respuesta y observar la disminución de la cantidad de agua aplicada al cultivo sin afectar, en forma significativa, el rendimiento.

Fin de la versión en español

- Li, M., Du, Y., Zhang, F., Bai, Y., Fan, J., Zhang, J., & Chen, S. (2019). Simulation of cotton growth and soil water content under film-mulched drip irrigation using modified CSM-CROPGRO-cotton model. *Agricultural Water Management*, 218, 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.041>
- Liu, H., Gao, Y., Sun, J., Wu, X., Jha, M., Zhang, H., Gong, X., & Li, Y. (2017). Responses of yield, water use efficiency and quality of short-season cotton to irrigation management: interactive effects of irrigation methods and deficit irrigation. *Irrigation Science*, 35, 125-139. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0526-4>
- Liu, R., Abdelraouf, E. A., Bicego, B., Joshi, V. R., & García-García, A. (2018). Deficit irrigation: a viable option for sustainable confection sunflower (*Helianthus annuus* L.) production in the semi-arid US. *Irrigation Science*, 36, 319-328. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0588-6>
- Martínez-Garza, A. (1988). *Diseños experimentales: Métodos y elementos de teoría*. Trillas.
- Miranda-Wong, R. (2008). Caracterización de la producción del cultivo de algodónero (*Gossypium hirsutum* L.) en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 23, 696-705. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14102313>
- Mohan, S., & Ramsundram, N. (2014). Climate change and its impact on irrigation water requirements on temporal scale. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, 3(1), 1-8. <https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000118>

- Plenecassage, A., Romero-Fierro, E., & López-Borrego, C. (1997). *Manual de laboratorio. Análisis de suelos y aguas*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023, February 10). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Singh, Y., Rao, S. S., & Regar, P. L. (2010). Deficit irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in shallow soils of semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 97(7), 965-970. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.028>
- Statistical Analysis System (SAS). (2003). *User's guide* (ver. 9.1) [software]. SAS Institute Inc.
- Wang, Z., Yin, M., Simunek, J., & van Genuchten, M. T. (2014). Evaluation of mulched drip irrigation for cotton in arid Northwest China. *Irrigation Science*, 32, 15-27. <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0409-x>
- Zhan, D., Zhang, C., Yang, Y., Luo, H., Zhang, Y., Tang, W., & Zhang, W. (2015). Water deficit alters cotton canopy structure and increases photosynthesis in the mid-canopy layer. *Agronomy Journal*, 107(5), 1947-1957. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0426>
- Zhang, D., Luo, Z., Liu, S., Li, W., & Dong, H. (2016). Effects of deficit irrigation and plant density on the growth, yield and fiber quality of irrigated cotton. *Field Crops Research*, 197, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.06.003>
- Zhou, X. V., Boyer, C., Larson, J. A., Leib, B., & Gwathmey, O. (2016). Profit-maximizing irrigation for cotton on high available water holding capacity soils. *Agronomy Journal*, 108, 1571-1580. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0602>
- Zonta, J. H., Neiva, B. Z., da Silva, R. J., & Sofiatti, I. V. (2017). Cotton response to water deficits at different growth stages. *Revista Caatinga*, 30(4), 980-990. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n419rc>