

## Estimation of plot surface irrigation efficiency in a module of Región Lagunera irrigation district 017

## Estimación de la eficiencia de riego superficial parcelario en un módulo del distrito 017 Región Lagunera

Carlos M. Ramos-Cruz<sup>1</sup>; Juan Estrada-Ávalos<sup>2\*</sup>; Gerardo Delgado-Ramírez<sup>2</sup>; Enrique Miguel-Valle<sup>2</sup>; Diego Domínguez Alemán<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental, General Terán, General Terán, Nuevo León. C. P. 67400.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Gómez Palacio, Durango. C. P. 35140.

\*Corresponding author: estrada.juan@inifap.gob.mx

### Abstract

Agriculture in Mexico uses 80 % of available water volume to irrigate 6.5 million ha with overall efficiencies of less than 40 %. Therefore, it is important to carry out actions that increase efficiency in the use of irrigation water. For this reason, the objective of this work was to determine efficiencies in the management of surface irrigation water in a module of Región Lagunera (region of lagoons) irrigation district 017 in order to identify areas of opportunity to increase the overall water use efficiency of the module. For this, conduction efficiencies of the distribution network were evaluated by means of the velocity area method. Also, the irrigation depths applied in each irrigation event were determined by gauging at the plot intake point. To determine plot efficiency, it was necessary to estimate crop water requirements using IRRINET software. The average conduction efficiency was 80.4 %; the highest conduction losses occurred in unlined inter-plot channels (20.1 L·s<sup>-1</sup>·100 m<sup>-1</sup>). Regarding plot surface efficiency, the average was 59.4 %, which indicates that the users are applying more water than required by the crops.

**Keywords:** Cuticle, permeability, stomatal density.

### Resumen

La agricultura en México utiliza 80 % del volumen de agua disponible para irrigar 6.5 millones de hectáreas con eficiencias globales menores al 40 %. Por lo tanto, realizar acciones que incrementen la eficiencia en el uso del agua de riego es importante. Por dicha razón, el objetivo de este trabajo fue determinar las eficiencias en el manejo del agua de riego superficial en un módulo del distrito de riego 017 Región Lagunera, con la finalidad de identificar áreas de oportunidad que permitan incrementar la eficacia global del módulo. Para esto, las eficiencias de conducción de la red de distribución se evaluaron por medio del método área velocidad. También, las láminas de riego aplicadas en cada evento de riego se determinaron mediante aforos en la bocatoma de la parcela. Para determinar la eficiencia parcelaria fue necesario estimar los requerimientos hídricos de los cultivos mediante el software IRRINET. La efectividad de conducción promedio fue de 80.4 %; las mayores pérdidas por conducción se presentaron en los canales interparcelarios no revestidos (20.1 L·s<sup>-1</sup>·100 m<sup>-1</sup>). Respecto a la eficiencia superficial parcelaria, el promedio fue de 59.4 %, lo cual indica que los usuarios están aplicando más agua de lo requerido por los cultivos.

**Palabras clave:** Eficiencia, conducción, aplicación, pérdidas.



## Introduction

Water is essential in natural ecosystems, with the food security and nutrition of present and future generations depending on them (WWAP, 2015a, b). Rapid population growth along with the spread of irrigated agriculture, industrial development and climate change influence water quantity and quality (Green et al., 2011; Chartzoulakis & Bertaki, 2015). Globally, the agricultural sector consumes more than 70 % of available water (Fischer, Tubiello, van Velthuizen, & Wiberg, 2007; Haddeland et al., 2014; Rehman, Chandio, Hussain, & Jingdong, 2017).

In Mexico, more than 80 % of water volume is used in agriculture (Martínez et al., 2017) to irrigate 6.5 million hectares, of which 3.3 million correspond to 86 irrigation districts (ID) and the rest to more than 40 thousand irrigation units (IU) (CNA, 2016). The IDs operate with an overall efficiency of less than 40 %, which indicates that 60 % of the available volume is lost during conduction and distribution (Exebio, Palacios, Mejía, & Ruiz, 2005; Catalán et al., 2012).

Inefficient use of irrigation water results in low productivity and poor-quality crops (Yaghi, Arslan, & Naoum, 2013). Thus, water is wasted, the risk of aquifer pollution is increased and production costs go up (Tun, Ramírez, Sánchez, Lomas, & Cano, 2011).

Therefore, agriculture as the main activity with a large consumption of water resources requires strategic actions that promote increased water use efficiency during the input-product transformation and also improve crop yields to generate higher agricultural production (Olvera, Behena, Alpuche, & García, 2014; Mancosu, Snyder, Kyriakakis, & Spano, 2015). The objective of the study was to determine efficiencies in the management of surface irrigation water in a module of Región Lagunera ID 017, from intake to application in the plot. With this, it is possible to generate a diagnosis that allows identifying areas of opportunity in order to increase overall irrigation efficiency and water productivity at module level.

## Materials and methods

The study was carried out in a module of Región Lagunera irrigation district 017 during the 2013 agricultural cycle, encompassing the period March-July. The module is located in the southeast of the state of Coahuila, between 25° 45' 18" and 25° 38' 59" North, 102° 46' 0.6" and 103° 05' 54" West at an average elevation of 1,096 m.a.s.l. The module has a 144-km network of main channels, distributed in six irrigation sections. In addition, the irrigation area authorized by the ID was 1,862 ha. In this study, sections 91, 95 and 96 covering 394.5, 235.7 and

## Introducción

El agua es esencial en los ecosistemas naturales; de ellos depende la seguridad alimentaria y la nutrición de las generaciones presentes y futuras (WWAP, 2015a, b). El rápido crecimiento de la población junto con la extensión de la agricultura de riego, el desarrollo industrial y el cambio climático influyen sobre la cantidad y calidad del agua (Green et al., 2011; Chartzoulakis & Bertaki, 2015). A nivel mundial, el sector agrícola consume más del 70 % del agua disponible (Fischer, Tubiello, van Velthuizen, & Wiberg, 2007; Haddeland et al., 2014; Rehman, Chandio, Hussain, & Jingdong, 2017).

En México, más del 80 % del volumen de agua se utiliza en la agricultura (Martínez et al., 2017) para irrigar 6.5 millones de ha, de las cuales 3.3 millones corresponden a 86 distritos de riego (DR) y el resto a más de 40 mil unidades de riego (UR) (CNA, 2016). Los DR operan con una eficiencia global menor al 40 %, lo cual indica que el 60 % del volumen disponible se pierde durante su conducción y distribución (Exebio, Palacios, Mejía, & Ruiz, 2005; Catalán et al., 2012).

El uso ineficiente del agua de riego tiene como resultado una baja productividad y cultivos de mala calidad (Yaghi, Arslan, & Naoum, 2013). Por lo tanto, así se propicia el desperdicio del agua, se incrementa el riesgo de contaminación del acuífero y se aumentan los costos de producción (Tun, Ramírez, Sánchez, Lomas, & Cano, 2011).

Por lo anterior, la agricultura como principal actividad con un gran consumo de recursos hídricos requiere de acciones estratégicas que propicien el incremento de la eficiencia en el uso del agua durante la transformación insumo-producto y que, además, mejore los rendimientos de los cultivos para generar mayor producción agrícola (Olvera, Behena, Alpuche, & García, 2014; Mancosu, Snyder, Kyriakakis, & Spano, 2015). El objetivo del estudio fue determinar las eficiencias en el manejo del agua de riego superficial en un módulo del DR 017 Región Lagunera, desde la bocatoma hasta la aplicación en la parcela. Con ello es posible generar un diagnóstico que permita identificar áreas de oportunidad con el fin de incrementar la eficiencia global de riego y la productividad del agua a nivel módulo.

## Materiales y métodos

El estudio se realizó en un módulo del distrito de riego 017 Región Lagunera durante el ciclo agrícola 2013 que comprende el periodo marzo-julio. El módulo se localiza en el sureste del estado de Coahuila, entre 25° 45' 18" y 25° 38' 59" Latitud Norte, 102° 46' 0.6" y 103° 05' 54" Longitud Oeste a una altitud promedio de 1,096 m. El módulo cuenta con una red de canales principales de 144 km, distribuidos en seis secciones de riego. Además,

436.8 ha, respectively, were evaluated; the sum of these represents 57 % of the module's total irrigation area.

## Method

**Determination of channel network conduction efficiencies.** Gaugings of the evaluated sections were carried out upstream (USG) and downstream (DSG). Each cross-section was gauged using the area and velocity method. These variables were determined as follows:

In the main channels, the area of the section was determined with a total station (SOKKIA® model SET-620K). In addition, the following information was measured: channel bottom, slopes, margins and crowns. The area of each gauging section was calculated with AutoCAD software.

The water velocity in the channel was measured with a mechanical flow meter (OTT model C-20); this device has a measuring range of 0.025 to 10 m·s<sup>-1</sup> with an accuracy of ± 2%. To determine the area of the channel section, three segments were considered and the flow meter was introduced to a depth of 0.2 and 0.8 % of the hydraulic load in each segment. Therefore, the hydraulic flow rate (Q) was obtained through the continuity equation (CNA-IMTA, 2000; Sánchez, Velásquez, Esquivel, Bueno, & Pedroza, 2015):

$$Q = A * V \quad (1)$$

Where: Q = Hydraulic flow rate (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>); A = Hydraulic section area (m<sup>2</sup>); V = Flow velocity (m·s<sup>-1</sup>).

The upstream and downstream gaugings are necessary to determine conduction efficiency, which is defined as the ratio between the flow rate or volume delivered by the supply source at the plot intake point and the flow rate received at the inlet of the irrigation plots (FAO, 2001). This efficiency is calculated using the following equation:

$$Ec = \frac{Q_1}{Q_2} * 100 \quad (2)$$

Where: Ec = Conduction efficiency (%); Q<sub>1</sub> = Upstream flow rate (L·s<sup>-1</sup>); Q<sub>2</sub> = Downstream flow rate (L·s<sup>-1</sup>).

**Conduction losses.** Each of the gauging points was georeferenced with a GPS device (GARMIN® model Etrex 20). The coordinates were projected to estimate the length of the channel with QGIS software. With the following equation, channel conduction loss (Pc) was calculated (García et al., 2010):

$$Pc = \frac{Q_1 - Q_2}{\left(\frac{Lc}{100}\right)} \quad (3)$$

la superficie de riego autorizada por el DR fue de 1,862. En este estudio se evaluaron las secciones 91, 95 y 96 con superficies de 394.5, 235.7 y 436.8 ha, respectivamente; la suma de estas representa el 57 % de la superficie total de riego del módulo.

## Método

**Determinación de eficiencias de conducción de la red de canales.** Los aforos de las secciones evaluadas se realizaron aguas arriba (AAR) y aguas abajo (AAB). El aforo de cada sección transversal se realizó a través del método de área y velocidad. Estas variables se determinaron de la siguiente manera:

En los canales principales se determinó el área de la sección con una estación total (SOKKIA® modelo SET-620K). Además, la siguiente información fue medida: plantilla del canal, taludes, márgenes y coronas. El área de cada sección de aforo se calculó con el software AutoCAD.

La velocidad del agua en el canal se midió con un molinete mecánico (OTT modelo C-20); este aparato tiene un rango de medición de 0.025 a 10 m·s<sup>-1</sup> con una precisión de ± 2 %. Para determinar el área de la sección del canal se consideraron tres dovelas y el molinete se introdujo a una profundidad de 0.2 y 0.8 % del tirante hidráulico en cada dovela. Por lo tanto, el gasto hidráulico (Q) se obtuvo mediante la ecuación de continuidad (CNA-IMTA, 2000; Sánchez, Velásquez, Esquivel, Bueno, & Pedroza, 2015):

$$Q = A * V \quad (1)$$

Donde: Q = Gasto hidráulico (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>); A = área de la sección hidráulica (m<sup>2</sup>); V = Velocidad del flujo (m·s<sup>-1</sup>).

Los aforos AAR y AAB son necesarios para determinar la eficiencia de conducción, la cual se define como la relación entre el gasto o volumen entregado por la fuente de abastecimiento en la bocatoma de la parcela y el gasto recibido en la entrada de las parcelas de riego (FAO, 2001). Esta eficiencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Ec = \frac{Q_1}{Q_2} * 100 \quad (2)$$

Donde: Ec = Eficiencia de conducción (%); Q<sub>1</sub> = Gasto aguas arriba (L·s<sup>-1</sup>); Q<sub>2</sub> = Gasto aguas abajo (L·s<sup>-1</sup>).

**Pérdidas por conducción.** Cada uno de los puntos de aforo se georeferenció con un equipo GPS (GARMIN® modelo Etrex 20). Las coordenadas se proyectaron para estimar la longitud del canal con el software QGIS. Con la siguiente ecuación se calculó la pérdida por conducción del canal (Pc) (García et al., 2010):

Where:  $P_c$  = Channel conduction loss ( $L \cdot s^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ );  
 $L_c$  = Channel length between gaugings (m).

**Determination of the irrigation depths applied in the plots.** Irrigation depths were determined with the volume applied in each plot. This volume was determined by gauging intake during pre-seeding irrigation (in fodder and industrial crops) and transplanting and clearing (in vegetables), as well as in relief irrigation (three in fodder and industrial crops, and five in vegetables). Gauging was carried out with the velocity section method and the aid of a digital flow probe (Global Water Model FP-111), which has a measuring range of  $0.1$  to  $6.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Global Water, 2017). Measurements were made in the center of the section at a depth of  $0.6 \%$  of the hydraulic load.

The gauging section area was calculated using the following procedures: in lined channels, the channel bottom, load and water mirror were measured (Equation 4), whereas in unlined channels (ditches) it was necessary to measure the water mirror and divide it into four segments. Subsequently, the hydraulic load was measured in each segment and the area per segment was calculated using equations five and four. The area of the section is the sum of the four segments.

$$A = \frac{B+b}{2} * h, \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{b * h}{2}, \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} * b. \quad (6)$$

Where:  $B$  = Water mirror in the channel (m);  $b$  Channel bottom (m);  $h$  = Hydraulic load of the channel (m).

In addition to gauging the intakes, the irrigation advance times of the study plots were also measured. Based on this information, the volume of water applied in each irrigation event was calculated (equation 7), considering that the operation  $Q$  does not vary over time (Bolaños, Palacios, Scott, & Exebio, 2001):

$$V_a = Tr * Q \quad (7)$$

Where:  $V_a$  is the volume of water applied ( $\text{m}^3$ );  $Tr$  Irrigation time (h) and  $Q$  is the flow rate entering the plot ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

The irrigation depths applied in the plots were determined with the irrigation area, cycle schedule by module (this information was obtained through a geographic information system generated for this same study; Ramos, 2016) and the volume of water applied (Equation 8).

$$LrA = \frac{V_a}{S} \quad (8)$$

$$P_c = \frac{Q_1 - Q_2}{\left(\frac{L_c}{100}\right)} \quad (3)$$

Donde:  $P_c$  = Pérdida por conducción del canal ( $L \cdot s^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ );  
 $L_c$  = Longitud del canal entre los aforos (m).

**Determinación de las láminas de riego aplicadas en las parcelas.** Las láminas de riego se determinaron con el volumen aplicado en cada parcela. Este volumen se determinó a través de aforos en la bocatoma durante los riegos de presiembra (en forrajes e industriales) y trasplante y despeje (en hortalizas), así como en los riegos de auxilio (tres en forrajes e industriales, y cinco en hortalizas). El aforo se realizó con el método de sección velocidad y el apoyo de un molinete digital (Global Water Model FP-111), el cual tiene un rango de medición de  $0.1$  a  $6.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Global Water, 2017). Las mediciones se realizaron en el centro de la sección a una profundidad de  $0.6 \%$  del tirante hidráulico.

El área de la sección de aforo se calculó mediante los siguientes procedimientos: En canales revestidos se midieron plantilla, tirante y espejo de agua (Ecuación 4). En canales no revestidos (acequias) fue necesario medir el espejo de agua y dividirlo en cuatro dovelas. Posteriormente, el tirante hidráulico se midió en cada dovela y con las ecuaciones cinco y cuatro se calculó el área por dovela. El área de la sección es la suma de las cuatro dovelas.

$$A = \frac{B+b}{2} * h, \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{b * h}{2}, \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} * b. \quad (6)$$

Donde:  $B$  = Espejo del agua en el canal (m);  $b$  plantilla del canal (m);  $h$  = Tirante o carga hidráulica del canal (m).

Además de los aforos en las bocatomas, también se midieron los tiempos de avance de riego de las parcelas de estudio. Con esta información se calculó el volumen de agua aplicado en cada evento de riego (Ecuación 7); considerando que el  $Q$  de operación no varía a través del tiempo (Bolaños, Palacios, Scott, & Exebio, 2001):

$$V_a = Tr * Q \quad (7)$$

Donde:  $V_a$  es el volumen de agua aplicado ( $\text{m}^3$ );  $Tr$  Tiempo de riego (h) y  $Q$  es el gasto de ingresa a la parcela ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Las láminas de riego aplicadas en las parcelas se determinaron con la superficie de riego, programa en el ciclo por el módulo (esta información se obtuvo a través

Where:  $LrA$  = Applied irrigation depth ( $m^3$ );  $S$  = Plot area ( $m^2$ ).

**Estimation of crop water requirements.** Weather information from the Las Mercedes station was used. This station is located at  $25^\circ 41' 02''$  N and  $103^\circ 00' 04''$  W at an elevation of 1,099 m.a.s.l. and belongs to the climatological network administered by INIFAP. Also, IRRINET software generated by CENID-RASPA-INIFAP (Catalán et al., 2014) was used. This program determines the actual water consumption or evaporation of crops ( $E_{Tr}$ ) from the calculation of the reference evapotranspiration ( $E_{T_0}$ ) using the FAO Penman-Monteith method and the crop coefficient (FAO, 1998).

**Estimation of plot irrigation efficiencies.** Plot irrigation efficiency ( $E_{fa}$ ) measures the amount of water required by the crop in relation to that applied in the plots (Equation 9) (Flores, Sifuentes, Flores Magdaleno, Ojeda, & Ramos, 2014).

$$E_{fa} = \frac{LrR}{LrA} * 100 \quad (9)$$

Where:  $E_{fa}$  = Parcel irrigation efficiency (%);  $LrR$  = Irrigation depth required by the crop (cm);  $LrA$  = Applied irrigation depth (cm).

## Results and discussion

### Channel network conduction efficiencies

In section 91, the highest conduction efficiency values correspond to the Sacramento Main Channel (CPS), while the lowest values correspond to the unlined inter-plot channels. The average conduction efficiency of this section was 74.1 %, due to conduction losses from the main channel to the inter-plot one that was  $3.8 L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$  of channel length (Table 1). The estimated conduction efficiency in main channels ( $E_c = 96.2$  %) was similar to that reported in studies conducted in Argentina ( $E_c = 99$  %; (Demin et al., 2017)) and elsewhere in Mexico ( $E_c = 81.2$  %; (Pedroza & Hinojosa, 2014)). This is because infiltration losses in lined channels are lower (Ortega, Mejía, Palacios, Rendón, & Exebio, 2009).

**Table 1. Channel network conduction efficiencies in section 91.**

**Cuadro 1. Eficiencias de conducción de la red de canales de la sección 91.**

Channel/Canal	Distance between gaugings (m)/ Distancia entre aforos (m)	$E_c$ (%)	$P_c$ ( $L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$ )/	Technological level/ Nivel de tecnificación
CPS	5776.2	96.2	2.5	L
*LI 61+518	566.6	89.2	2.1	L
LI 61+518	1224.3	51.8	4.4	UI
TDD 5+625	657.7	59.2	6.1	UI

\* Left side channel; L = Lined; UI = Unlined. / \* Canal Lateral Izquierdo; R = Revestido; No-R = No Revestido

de un sistema de información geográfica generado para este mismo estudio; Ramos, 2016) y el volumen de agua aplicado (Ecuación 8).

$$LrA = \frac{Va}{S} \quad (8)$$

Donde:  $LrA$  = Lamina de riego aplicada ( $m^3$ );  $S$  = Superficie de la parcela ( $m^2$ ).

**Estimación de requerimientos hídricos de los cultivos.** La información climática de la estación Las Mercedes fue usada. Dicha estación está localizada en  $25^\circ 41' 02''$  Latitud Norte y  $103^\circ 00' 04''$  Longitud Oeste a una altitud de 1,099 m y pertenece a la red climatológica administrada por el INIFAP. También, el software IRRINET generado por el CENID-RASPA-INIFAP (Catalán et al., 2014) fue usado. Este programa determina el consumo de agua o evaporación real de los cultivos ( $E_{Tr}$ ) a partir del cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $E_{T_0}$ ) mediante el método FAO Penman-Monteith y el uso del coeficiente del cultivo (FAO, 1998).

**Estimación de eficiencias de riego parcelario:** La eficiencia de riego parcelario ( $E_{fa}$ ) mide la cantidad de agua requerida por el cultivo en relación con la aplicada en las parcelas (Ecuación 9) (Flores, Sifuentes, Flores Magdaleno, Ojeda, & Ramos, 2014).

$$E_{fa} = \frac{LrR}{LrA} * 100 \quad (9)$$

Donde:  $E_{fa}$  = Eficiencia de riego parcelario (%);  $LrR$  = Lámina de riego requerida por el cultivo (cm);  $LrA$  = Lámina de riego aplicada (cm).

## Resultados y discusión

### Eficiencias de conducción de la red de canales

En la sección 91, los valores mayores de eficiencia de conducción corresponden al Canal Principal Sacramento (CPS), en tanto que los valores menores corresponden a los canales interparcelarios no revestidos. La eficiencia de conducción promedio de esta sección fue de 74.1 %, debido a las pérdidas de conducción desde el

In sections 95 and 96, the highest conduction efficiency values were found in lined (98.7 %) and unlined (98.4 %) inter-plot channels; this result is contrary to what was observed in section 91, where the lowest conduction efficiency occurred in unlined inter-plot channels. The average efficiencies of these sections were 80.0 % (Section 95) and 83.7 % (Section 96) with conduction losses of 2.3 and 6.6  $L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$ , respectively (Tables 2 and 3). The greater efficiencies in unlined inter-plot channels are attributed to user maintenance (weeding and cleaning), lengths no greater than 400 m, compaction and adequate lines (Ramos, 2016).

The highest conduction losses in the sections occurred in inter-plot channels where the average was 0.8  $L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$  in lined channels and 6.5  $L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$  in unlined channels, having an average module efficiency of 80.4 % with a conduction loss of 4.8  $L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$ . The lower conduction efficiencies are attributed to the fact that more than 85 % of the inter-plot channels are unlined. Deficiencies were also detected in the operation of the distribution network, as well as inadequate control structures and little conservation of the hydro-agricultural structure. This can lead to network operating losses (Mejía, Palacios Vélez, Exebio, & Santos, 2002).

canal principal hasta el interparcelario que fue de 3.8  $L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$  de longitud del canal (Cuadro 1). La eficiencia de conducción estimada en canales principales ( $E_c = 96.2 \%$ ) fue similar a la reportada en estudios realizados en Argentina ( $E_c = 99 \%$ ; (Demin et al., 2017)) y México ( $E_c = 81.2 \%$ ; (Pedroza & Hinojosa, 2014)). Lo anterior se debe a que las pérdidas por infiltración en canales revestidos son menores (Ortega, Mejía, Palacios, Rendón, & Exebio, 2009).

En las secciones 95 y 96 los valores mayores de eficiencia de conducción se presentaron en los canales interparcelarios revestidos (98.7 %) y no revestidos (98.4 %); este resultado es contrario a lo observado en la sección 91, donde la eficiencia de conducción menor se presentó en los canales interparcelarios no revestidos. Las eficiencias promedio de estas secciones fueron de 80.0 % (Sección 95) y 83.7 % (Sección 96) con pérdidas de conducción de 2.3 y 6.6  $L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$ , respectivamente (Cuadros 2 y 3). Las eficiencias mayores en los canales interparcelarios no revestidos se atribuyen al mantenimiento por parte de los usuarios (deshierbe y limpieza), longitudes no mayores a los 400 m, compactación y trazos adecuados (Ramos, 2016).

**Table 2. Channel network conduction efficiencies in section 95.**

**Cuadro 2. Eficiencias de conducción de la red de canales de la sección 95.**

Input/Toma	Distance between gaugings (m)/ Distancia entre aforos (m)	$E_c$ (%)	$P_c$ ( $L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$ )	Technological level/ Nivel de tecnificación
TDD 9+605	1378.7	96.4	0.3	L/R
	306.6	96.8	1.3	UI/No-R
	667.6	67.2	5.4	UI/No-R
	2352.8	59.5	2.1	UI /N-R

**Table 3. Channel network conduction efficiencies in section 96.**

**Cuadro 3. Eficiencias de conducción de la red de canales de la sección 96.**

Channel/Canal	Input/Toma	Distance between gaugings (m)/ Distancia entre aforos (m)	$E_c$ (%)	$P_c$ ( $L \cdot s^{-1} \cdot 100 m^{-1}$ )	Technological level/ Nivel de tecnificación
LD 57+839		5190.2	88.5	4.1	L/R
	D.I. 14+394	444.73	65.2	13.8	UI/No-R
*SLD 10+977		7203.1	59.0	3.7	L/R
	D.I. 2+947	354.6	98.4	1.6	UI/No-R
	D.I. 4+495	411.2	98.7	1.3	L/R
	D.D. 4+694	180.4	98.4	1.6	UI/No-R
**RD 6+486		785.1	81.6	6.5	L/R
	D.D. 7+151	204.2	79.9	20.1	UI/No-R

\*Right Sub-lateral Channel; \*\* Right Branch Channel. / \*Canal Sub-lateral Derecho; \*\* Canal Ramal Derecho.

### Irrigation depths applied to study plots

The greatest irrigation depths were in section 96, whereas the lowest were in section 95 (Table 4). This is because the most influential factors in the variability of applied irrigation depths are terrain relief (levelling) (Bolaños et al., 2001) and surface irrigation design (width and length as a function of the unit flow rate at the entrance of the melga) (Saucedo, 2013). The unit flow rate should be  $6.0 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$  to ensure an efficiency greater than 90 % in distribution uniformity (Delgado, Estrada, Rivera, Catalán, & Esquivel, 2014). Due to the fact that in the present study lower flow rate values were estimated, poor water distribution is favored and, therefore, lower efficiency in distribution uniformity and an increase in irrigation depth.

LrA-T = Waterlogging irrigation depth; LD = first post-transplant Irrigation

### Plot irrigation efficiencies

The highest plot irrigation efficiencies (72.2 and 64.1 %) are associated with section 95, while the lowest plot irrigation efficiencies (52.2 and 51.2 %) correspond to section 96 (Table 5). This is attributed to the fact that the section 91 users have greater access to technology and greater investment power. The average application efficiency in the module was 59.4 %; this indicates that a greater volume of water is being applied in the module than required by the crops. This may be due

Las mayores pérdidas por conducción en las secciones se presentaron en canales interparcelarios donde el promedio fue de  $0.8 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 100 \text{ m}^{-1}$  en canales revestidos y  $6.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 100 \text{ m}^{-1}$  en canales no revestidos, teniendo una eficiencia promedio del módulo de 80.4 % con una pérdida por conducción de  $4.8 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 100 \text{ m}^{-1}$ . Las eficiencias de conducción menores se atribuyen a que más del 85 % de los canales interparcelarios no están revestidos. Asimismo, lo evidenciado fueron deficiencias en la operación de la red de distribución, así como estructuras inadecuadas de control y poca conservación de la estructura hidroagrícola. Lo anterior puede favorecer las pérdidas de operación de la red (Mejía, Palacios Vélez, Exebio, & Santos, 2002).

### Láminas de riego aplicadas a las parcelas de estudio

Las láminas mayores de riego se realizaron en la sección 96. Las láminas menores se realizaron en la sección 95 (Cuadro 4). Esto se debe a que los factores más influyentes en la variabilidad de las láminas de riego aplicadas son el relieve del terreno (nivelación) (Bolaños et al., 2001) y el diseño de riego por superficie (ancho y longitud en función del gasto unitario en la entrada de la melga) (Saucedo, 2013). El gasto unitario debe ser de  $6.0 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$  para garantizar una eficiencia mayor al 90 % en la uniformidad de distribución (Delgado, Estrada, Rivera, Catalán, & Esquivel, 2014). Debido a que en el presente estudio fueron estimados valores menores de gasto unitario, lo que se propicia es una mala distribución del agua y, por ende, una eficiencia menor

**Table 4. Average depths applied to crops per irrigation section.**

**Cuadro 4. Láminas promedio aplicadas a los cultivos por sección de riego.**

Section/ Sección	Crop/Cultivo	LrA-T (cm)	LD (cm)	Lr 1 <sup>er</sup> Aux (cm)	Lr 2 <sup>do</sup> Aux (cm)	Lr 3 <sup>er</sup> Aux (cm)	Lr 4 <sup>o</sup> Aux (cm)	Lr 5 <sup>o</sup> Aux (cm)	LrA (cm)
91	Walnut/Nogal	31.9		32.1	32.3	31.8			128.1
	Cotton/algodón	32.1		32.9	31.8	31.1			127.8
	Broomcorn/S. escobero	28.7		34.0	32.7	29.4			124.7
	Watermelon/Sandía	18.6	15.3	19.3	18.4	18.5	19.2	18.2	127.5
	Cantaloupe/Melón	18.7	15.2	18.8	18.8	18.4	20.0	17.6	127.4
95	Walnut/Nogal	25.0		28.0	29.1	26.3			108.4
	Forage sorghum	24.0		26.4	27.7	25.7			103.8
96	Walnut/Nogal	32.0		33.6	33.1	31.9			130.6
	Cotton/Algodón	30.0		32.8	33.0	32.6			128.4
	Forage sorghum/S. forrajero	32.1		33.2	32.2	32.3			129.7
	Broomcorn/S. escobero	30.9		33.8	32.6	33.8			131.1
	Watermelon/Sandía	19.2	14.7	20.4	18.5	18.6	19.2	18.8	129.4
	Cantaloupe/Melón	18.8	14.9	19.0	18.9	18.8	19.1	18.7	128.1

LrA-T = Waterlogging irrigation depth; LD = first post-transplant Irrigation / LrA-T = Lámina de riego Aniego y Transplante; LD = Riego de Despegue.

**Table 5. Application efficiencies per irrigation section.**  
**Cuadro 5. Eficiencias de aplicación por sección de riego.**

Section/ Sección	Crop/Cultivo	LrA (cm)	LrR (cm)	Efa (%)
91	Walnut/Nogal	128.1	77.2	60.3
	Cotton/Algodón	127.8	68.6	53.7
	Broomcorn/Sorgo escobero	124.7	66.9	53.6
	Watermelon/Sandía	127.5	74.2	58.2
	Cantaloupe/Melón	127.4	68	53.4
95	Walnut/Nogal	108.4	78.3	72.2
	Forage sorghum/Sorgo Forrajero	103.8	66.5	64.1
96	Walnut/Nogal	130.6	77.2	59.1
	Cotton/Algodón	128.4	68.5	53.3
	Forage sorghum/Sorgo Forrajero	129.7	66.4	51.2
	Broomcorn/Sorgo escobero	131.1	68.8	52.5
	Watermelon/Sandía	129.4	73.5	56.8
	Cantaloupe/Melón	128.1	67.3	52.5

LrA = Lámina de riego aplicada; LrR= Lámina de riego requerida; Efa= Eficiencia de aplicación.

LrA = Applied irrigation depth; LrR= Required irrigation depth; Efa= Application efficiency.

to the fact that users do not consider technical aspects such as: the slope of the terrain, widths and lengths of melgas, unit flow rate and irrigation scheduling based on crop requirements (Tun et al., 2011; Sifuentes et al., 2016).

### Conclusions

Based on the data obtained in this study, it is concluded that surface irrigation efficiencies in the module are reduced. This indicates that there is a waste of water resources mainly due to irrigation management, reduced conduction efficiencies in inter-plot channels and poor surface irrigation designs. Therefore, the recommendation is to carry out irrigation scheduling based on crop water requirements, as well as the technification of surface parcel irrigation, land leveling and training both managers and water users in the irrigation modules in order to increase efficiency in the use of the resource.

en la uniformidad de distribución y un incremento de la lámina de riego.

### Eficiencias de riego parcelario

Las eficiencias mayores de riego parcelario (72.2 y 64.1 %) se asocian a la sección 95; mientras que las eficiencias menores de riego parcelario (52.2 y 51.2 %) corresponden a la sección 96 (Cuadro 5). Ello se atribuye a que los usuarios de la sección 91 tienen acceso mayor a tecnología y un poder mayor de inversión. La eficiencia de aplicación promedio en el módulo fue de 59.4 %; esto indica que en el módulo se está aplicando mayor volumen de agua que lo requerido por los cultivos. Lo anterior puede deberse a que los usuarios no consideran aspectos técnicos tales como: la pendiente del terreno, anchos y longitudes de melgas, gasto unitario y programación del riego con base en los requerimientos del cultivo (Tun et al., 2011; Sifuentes et al., 2016).

### Conclusiones

Con base en los datos obtenidos en este estudio se concluye que las eficiencias de riego superficial en el módulo son reducidas. Ello nos indica que existe un derroche del recurso agua principalmente por el manejo del riego, eficiencias reducidas de conducción en canales interparcelarios y diseños malos de riego por superficie. Por lo tanto, la recomendación es realizar una programación del riego con base en los requerimientos hídricos de los cultivos, así como,

*End of English version*

## Referencias/Referencias

- Bolaños, M., Palacios, E., Scott, C., & Exebio, A. (2001). Estimación del volumen de agua usado en una zona de riego mediante una imagen de satélite e información complementaria. *Agrociencia* 36: 589-597.
- Catalán, E., Villa, M. M., Inzunza, M., Román, A., & González, J. (2012). Cálculo de demandas de agua y programación del riego de cultivos en Coahuila. *AGROFAZ* 12 (3): 123-131.
- Catalán, E., Villa, M. M., Inzunza, M., Román, A., González, J., & Delgado, G. (2014). Pronóstico del riego en línea y tiempo real para Durango. *AGROFAZ* 14: 101-110.
- Chartzoulakis, K., & Bertaki, M. (2015). Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4: 88-98. Doi: 10.1016/j.aaspro.2015.03.011.
- Comisión Nacional del Agua (CNA) - Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2000). "Dotación Volumétrica," 2A/Ed. Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Comisión Nacional del Agua (CNA) (2016). Estadísticas del agua en México, Edición 2016. Comisión Nacional del Agua, Coyoacán, México.
- Delgado, G., Estrada, J., Rivera, M., Catalán, E., & Esquivel, G. (2014). Evaluación y diseño del riego por melgas mediante un modelo de simulación. *AGROFAZ* 14: 45-51.
- Demin, P., Belén, M., Assán, M., Delgado, E., Baravalle, F., Maris, S., Curarello, J. (2017). Eficiencia de conducción del sistema de riego del embalse las pirquitas en la provincia de Catamarca, Argentina. *Revista Estudios Ambientales* 5 (1): 48-60.
- Exebio, A., Palacios, E., Mejía, E., & Ruiz, V. (2005). Metodología para estimar pérdidas por infiltración en canales de tierra. *Terra Latinoamericana* 23 (2): 213-223.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1998). "Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56." Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2001). Capítulo 3: Eficiencia de riego. En: Manual de riego parcelario. Desarrollo de Tierras y Aguas. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación., Santiago de Chile. pp. 39-53.
- Fischer, G., Tubiello, F., van Velthuisen, H., & Wiberg, D. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. *Technological Forecasting and Social Change* 74 (7): 1083-1107. Doi:10.1016/j.techfore.2006.05.021.
- Flores, H., Sifuentes, E., Flores Magdaleno, H. C., Ojeda, W., & Ramos, C. R. (2014). Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5 (2): 41-252.
- la tecnificación del riego parcelario superficial, la nivelación de tierras y capacitar tanto administradores como usuarios del agua en los módulos de riego con la finalidad de incrementar la eficiencia en el uso del recurso.

### Fin de la versión en español

- García, M. Y., Sánchez, I., García, G., Moreno, L., Trejo, R., & Hernández, M. A. (2010). Evaluación de la eficiencia de riego en el Módulo IV del Distrito de Riego 017 Comarca Lagunera, México. *Rev. Chap. Ser. Zonas Áridas* 9: 99-106.
- Global Water (2017). FP111-FP211-FP311 Global Water Flow Probe User's Manual. Publication Number 38330112.
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology* 405 (3): 532-560. Doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.002.
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Wissler, D. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (9): 3251-3256. Doi.org/10.1073/pnas.1222475110.
- Mancosu, N., Snyder, R., Kyriakakis, G., & Spano, D. (2015). Water scarcity and future challenges for food production. *Water* 7: 975-992. Doi:10.3390/w7030975.
- Martínez, E., Espitia, E., Villaseñor, H., Hortelano, R., Muñis, E., & Zamudio, A. (2017). Calidad industrial del trigo harinero en función del número de riegos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8 (7): 1497-1508.
- Mejía, E., Palacios Vélez, E., Exebio, A., & Santos, A. L. (2002). Problemas operativos en el manejo del agua en Distritos de Riego. *Terra* 20 (2): 217-225.
- Olvera, M., Behena, G., Alpuche, Ó., & García, F. (2014). La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos. Estudio de caso en Chihuahua, México. *Revista Ambiente y Desarrollo* 18: 23-36. Doi:10.11144/Javeriana.AyD18-35.trea
- Ortega, D., Mejía, E., Palacios Vélez, E., Rendon, L., & Exebio, A. (2009). Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego. *Terra Latinoamericana* 27 (3): 219-226.
- Pedroza, E. & Hinojosa, G. A. (2014). "Manejo y distribución del agua en distritos de riego: breve introducción didáctica." Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos. México.
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) (2015a). Agua para un Mundo sostenible: datos y cifras. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos. Secretaría del Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos división de Ciencias del Agua, UNESCO, Colombella, Perusa, Italia.

- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) (2015b), "Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015: Agua para un mundo sostenible. Resumen ejecutivo," Cololbella, Perugia, Italia.
- Ramos, C. M. (2016). Productividad del agua en un módulo del distrito 017 Región Lagunera, Universidad Juárez del Estado de Durango., Venecia, Dgo.
- Rehman, A., Chandio, A. A., Hussain, I., & Jingdong, L. (2017). Fertilizer consumption, water availability and credit distribution: Major factors affecting agricultural productivity in Pakistan. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. Doi.org/10.1016/j.jssas.2017.08.002.
- Sánchez, I., Velásquez, M., Esquivel, G., Bueno, P., & Pedroza, A. (2015). Minimum hydrologic characterization for research in experimental watersheds with limited availability of information in arid lands. *Rev. Chap. Ser. Zonas Áridas XIV*: 185-208. Doi: 10.5154/r.rchsza.2015.07.007.
- Saucedo, H. (2013). Gasto óptimo en riego por melgas. Congreso IMTA 2013. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 99-106.
- Sifuentes, E., Macías, J., Ojeda, W., González, V., Salinas, D., & Quintana, J. (2016). Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México. *Tecnología y Ciencias del Agua VII (2)*: 149-168.
- Tun, J., Ramírez, G., Sánchez, I., Lomas, C., & Cano, A. (2011). Diagnóstico y evaluación de sistemas de riego en el Distrito 048 Ticul, Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp. (1)*: 5-18.
- Yaghi, T., Arslan, A., & Naoum, F. (2013). Cucumber (*Cucumis sativus*, L.) water use efficiency (WUE) under plastic mulch and drip irrigation. *Agricultural Water Management* 128: 149-157. Doi.org/10.1016/j.auhn - ,m bnm,-gwat.2013.06.002