

## A function for hydrosystemic management: irrigation distribution planning, demand and canal conduction capacity

## Una función para la gestión hidrosistémica: programación de riegos, demanda y capacidad de conducción de canales

Mauro Íñiguez-Covarrubias<sup>1\*</sup>; Waldo Ojeda-Bustamante<sup>2</sup>;  
Jorge Flores-Velázquez<sup>1</sup>; Carlos Díaz-Delgado<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Riego y Drenaje. Paseo Cuauhnáhuac núm. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C. P. 62550, MÉXICO.

<sup>2</sup>Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación. Vicente Garrido núm. 106, Col. Amp. Maravillas, Cuernavaca, Morelos, C. P. 62230, MÉXICO.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua. Carretera Toluca-Atlaconulco km 14.5, Toluca, Estado de México, C. P. 50120, MÉXICO.

\*Corresponding author: mic@tlaloc.imta.mx, tel. 777 329 36 58.

### Abstract

**Introduction:** The management of irrigation areas aims to achieve an efficient use of resources for full user satisfaction.

**Objectives:** To propose a methodology for hydrosystemic management in which crop demand, irrigation planning in the allocation and distribution of water, as well as conduction capacity concur.

**Methodology:** A hydrosystemic management function was developed in which the variables of interest, consisting of six stages, concur and the “Santa Rosa” irrigation module of irrigation district 075, Sinaloa, Mexico, was evaluated. A maximum ten-day water demand requirement was estimated, with an established area of 22 518 ha and a maximum irrigation demand area of 13 548 ha.

**Results:** Irrigation distribution planning in the evaluated module requires a maximum flow of 27.18 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, being satisfied with the canal capacity (27.87 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>), and a maximum ten-day volume of 11 million m<sup>3</sup>.

**Study limitations:** Only the controlled demand distribution method was used, since it is employed in irrigation districts in Mexico.

**Originality:** The variables of an irrigation area are analyzed and implemented together, which will facilitate the integrated operation of large agricultural hydrosystems.

**Conclusions:** The application of the proposed management instrument will facilitate water delivery according to the controlled demand distribution method in Mexico’s irrigation districts.

### Resumen

**Introducción:** El manejo de zonas de riego tiene como objetivo alcanzar un uso eficiente de los recursos para la satisfacción plena de los usuarios.

**Objetivos:** Proponer una metodología para la gestión hidrosistémica en la que concurren la demanda de los cultivos, la programación en la asignación y la distribución del agua, así como su capacidad de conducción.

**Metodología:** Se desarrolló una función de gestión hidrosistémica en la que concurren las variables de interés, la cual consta de seis etapas, y se evaluó el módulo de riego “Santa Rosa”, del distrito de riego 075, Sinaloa, México. Se estimó un requerimiento hídrico de máxima demanda decenal, con superficie establecida de 22 518 ha y superficie en demanda máxima de riego de 13 548 ha.

**Resultados:** La programación de la distribución del agua en el módulo evaluado requiere un gasto máximo de 27.18 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, satisfaciéndose con la capacidad del canal (27.87 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>), y un volumen decenal máximo de 11 millones de m<sup>3</sup>.

**Limitaciones del estudio:** Únicamente se usó el método de distribución de demanda controlada, ya que es el empleado en los distritos de riego en México.

**Originalidad:** Las variables de una zona de riego son analizadas e instrumentadas en conjunto, lo que facilitará la operación integral de grandes hidrosistemas agrícolas.

**Conclusiones:** La aplicación del instrumento de gestión propuesto facilita la entrega de agua de acuerdo con el método de distribución de demanda controlada en los distritos de riego en México.

**Keywords:** irrigation demands, water distribution, integrated management, irrigation districts.

**Palabras clave:** demandas de riego, distribución del agua, manejo integrado, distritos de riego.



## Introduction

The irregular distribution and uncertainty of water resources, as well as the need to produce food in Mexico, has led to the opening of large irrigated areas in arid and semi-arid regions (Ojeda-Bustamante, Hernández-Barrios, & Sánchez-Cohén, 2008), since approximately 50 % of national agricultural production comes from irrigated areas (Ojeda-Bustamante et al., 2008). Most of the infrastructure built in Mexico's irrigation districts was sized under the criteria of the former *Secretaría de Recursos Hidráulicos* (SRH, 1973). The design method traditionally used to determine the capacity of canals was proposed by that Ministry; however, in other countries, different methods are used that generate more efficiency (Íñiguez-Covarrubias, de León-Mojarro, Prado-Hernández, & Rendón-Pimentel, 2007; Íñiguez-Covarrubias, Ojeda-Bustamante, & Rojano-Aguilar, 2011). It should be noted that, in recent years, the Irrigation District (ID) Management division of Mexico's *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA) has conducted several studies in the IDs called "Master Plans," in order to determine the need for and plan investments (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2007).

The dominant water distribution method in Mexico's irrigation areas is by weekly controlled demand, and consists of planning the volume of water withdrawal from the supply source by the distribution network for delivery to users within a period of seven days, this according to the irrigation requests received from users in the previous week (Arista-Cortes, González-Camacho, & Ojeda-Bustamante, 2009). According to the classification of distribution methods, the responsibility for controlling the distribution of dominant irrigation in Mexico is shared (User-Authority [CONAGUA]), and is known as controlled demand (Íñiguez-Covarrubias et al., 2007).

In the irrigation service delivery process, the average efficiencies of the water distribution system must be known. These efficiencies should be considered when planning water allocation. Consequently, it is vital to implement robust irrigation scheduling schemes, preferably in "near real time," to achieve efficient use of resources and operate, hydraulically, the canal network satisfactorily (Spare, Wang, & Hagan, 1980).

To obtain the reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) of the crop, in order to determine the capacity of the canal, it is recommended that irrigation area designers estimate it based on robust methods such as the Penman-Monteith method modified by FAO (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006), as well as use the concept of growing degree days ( $^{\circ}D$ ), since it is an adequate tool to predict the phenology and development of the crops, which will help to better adjust the irrigation supply to the water needs of

## Introducción

La distribución irregular e incertidumbre de los recursos hídricos, así como la necesidad de producir alimentos en México, ha ocasionado la apertura de grandes zonas de riego en regiones áridas y semiáridas (Ojeda-Bustamante, Hernández-Barrios, & Sánchez-Cohén, 2008), ya que, aproximadamente, el 50 % de la producción agrícola nacional proviene de las áreas bajo riego (Ojeda-Bustamante et al., 2008). La mayor parte de la infraestructura construida en los distritos de riego de México fue dimensionada bajo el criterio de la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH, 1973). El método de diseño utilizado tradicionalmente para determinar la capacidad de los canales fue propuesto por dicha Secretaría; sin embargo, en otros países se utilizan diferentes métodos que generan más eficiencia (Íñiguez-Covarrubias, de León-Mojarro, Prado-Hernández, & Rendón-Pimentel, 2007; Íñiguez-Covarrubias, Ojeda-Bustamante, & Rojano-Aguilar, 2011). Cabe señalar que en años recientes, la Gerencia de Distritos de Riego (DR) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México ha realizado diversos estudios en los DR denominados "Planes directores", con la finalidad de diagnosticar y planear inversiones (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2007).

El método de distribución de agua dominante en zonas de riego de México es por demanda controlada semanal, y consiste en programar el volumen de extracción de agua de la fuente de abastecimiento por la red de distribución para su entrega a los usuarios en un periodo de siete días, esto de acuerdo con las solicitudes de riego recibidas de los usuarios en la semana previa (Arista-Cortes, González-Camacho, & Ojeda-Bustamante, 2009). Según la clasificación de los métodos de distribución, la responsabilidad del control de la distribución del riego dominante en México es compartida (Usuario-Autoridad [CONAGUA]), y se conoce como demanda controlada (Íñiguez-Covarrubias et al., 2007).

En el proceso de entrega del servicio de riego, se requieren conocer las eficiencias promedio del sistema de distribución de agua. Estas eficiencias deben considerarse al momento de realizar la programación de la distribución de agua. En consecuencia, resulta vital la puesta en marcha de esquemas de calendarización robusta del riego, de preferencia en "casi tiempo real", para lograr un uso eficiente de los recursos y operar, hidráulicamente, en forma satisfactoria la red de canales (Spare, Wang, & Hagan, 1980).

Para obtener la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) del cultivo, con fines de determinar la capacidad del canal, se recomienda a los diseñadores de zonas de riego estimarla con base en métodos robustos como el de Penman-Monteith modificado por la FAO (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006); además, utilizar el concepto de

crops. Íñiguez-Covarrubias et al. (2011) used this methodology to determine canal capacity. To do this, they estimated evapotranspiration in an irrigation area ( $ET_{ia}$ ) in five steps. Additionally, it is important to consider that the calculation of irrigation depths corresponds to the useful storage capacity of the soil within the root depth (SRH, 1973).

Currently, with the innovation and application of computer tools, which facilitate the handling of large volumes of information on different useful variables, it is possible to perform laborious numerical calculations. An example of this is the estimation of the irrigation requirements that are important to match the water demands of the crops with the application of irrigation through the hydraulic infrastructure (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Íñiguez-Covarrubias, & Montero-Martínez, 2011). However, the current conservative idea of operation limits the natural evolution of irrigation areas and the updated information of the variables of interest, which prevents improving the service and generates large water losses due to deficient operation in periods of peak irrigation demand (Íñiguez-Covarrubias et al., 2007, 2011).

Today, one of the main challenges for researchers related to the management of large irrigation areas, divided into several irrigation modules or sections, is to efficiently perform the calculations and generate accurate and timely recommendations. With this, there is no doubt that large irrigation systems can be designed and operated more efficiently (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, & Unland-Weiss, 2006; Ojeda-Bustamante et al., 2008).

Based on the bibliographical review carried out for the development of this paper, and on the works carried out by the authors in several IDs, for the Irrigation User's Civil Associations (ACURs), the ACUR federations called SRLs and CONAGUA, it is known that there is no explicit, integrated procedure to implement hydrosystemic management with application in complex irrigation systems that have different crops, varieties, soils, planting dates and agricultural seasons. A Mexican ID may have one or more SRLs, which are responsible for executing the works and activities that are common to two or more ACURs.

Therefore, the objective of this work was to propose and analyze a function in which three variables converge: crop evapotranspiration (ET), water distribution planning, and canal capacity. Subsequently, the aim was to develop a proposal for hydrosystemic management in which the variables are combined with the greatest degree of flexibility to satisfy the user and meet the expectations for the use of water resources. To this end, it is important to consider the agronomic, soil and climatic conditions and the type of irrigation infrastructure.

grados día desarrollo ( $^{\circ}D$ ), ya que es una herramienta adecuada para predecir la fenología y desarrollo de los cultivos, lo que ayudará a ajustar mejor la oferta del riego a las necesidades hídricas de los cultivos. Íñiguez-Covarrubias et al. (2011) utilizaron esta metodología para determinar la capacidad de canales. Para ello, estimaron la evapotranspiración en una zona de riego ( $ET_{zi}$ ) en cinco pasos. Adicionalmente, es importante considerar que el cálculo de láminas de riego corresponde con la capacidad útil de almacenamiento del suelo dentro de la profundidad radicular (SRH, 1973).

Actualmente, con la innovación y aplicación de herramientas informáticas, que facilitan el manejo de la información de diferentes variables útiles, es posible realizar cálculos numéricos laboriosos. Un ejemplo de esto es la estimación de los requerimientos de riego que son importantes para acoplar las demandas hídricas de los cultivos con la aplicación del riego a través de la infraestructura hidráulica (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Íñiguez-Covarrubias, & Montero-Martínez, 2011). No obstante, la idea conservadora de operación actual limita la evolución natural de las zonas de riego y la información actualizada de las variables de interés, lo que impide mejorar el servicio y genera grandes pérdidas de agua por operación deficiente en periodos de máxima demanda de riego (Íñiguez-Covarrubias et al., 2007, 2011).

Hoy en día, uno de los principales retos para los investigadores relacionados con la gestión de grandes zonas de riego, dividida en varios módulos o secciones de riego, es realizar de manera eficiente los cálculos y generar recomendaciones certeras y oportunas. Con ello, sin duda alguna, los grandes sistemas de riego se pueden diseñar y operar de forma más eficaz (Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, & Unland-Weiss, 2006; Ojeda-Bustamante et al., 2008).

Con base en la revisión bibliográfica efectuada para el desarrollo del presente documento, y en los trabajos realizados por los autores en varios DR, para las Asociaciones Civiles de Usuarios (ACURs), las federaciones de ACURs llamadas SRLs y la CONAGUA, se sabe que no existe un procedimiento explícito, e integrado, para implementar una gestión hidrosistémica con aplicación en sistemas de riego complejos que tienen diferentes cultivos, variedades, suelos, fechas de siembra y ciclos agrícolas. Un DR en México puede tener una o más SRLs, las cuales tienen la responsabilidad de ejecutar las obras y actividades que son comunes a dos o más ACURs.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue proponer y analizar una función en la que converjan tres variables: evapotranspiración (ET) de los cultivos, programación de distribución del agua y capacidad de los canales. Posteriormente, desarrollar una propuesta de gestión hidrosistémica en la que se conjuguen las variables con el mayor grado de flexibilidad para

## Materials and methods

### Study area

The study was conducted in the "Santa Rosa" module which is part of the ID-075 located in Valle del Fuerte, Sinaloa, Mexico. In this region, the rainy season is concentrated mainly in the months of September and October, often of cyclonic origin. The evaluated irrigation module covers an area of 34316 ha, has a crop repetition factor in the spring-summer (S-S) season of up to 27 % and stands out as the largest module of ID-075.

The procedure for the allocation of irrigation (delivery-receipt) in the "Santa Rosa" module is based on a weekly irrigation schedule. The operation of the headworks (storage dam) is the responsibility of the federal authority (CONAGUA). Irrigation frequency is scheduled in each ACUR and the duration is agreed upon by the User-ACUR binomial. The delivered flow is limited by the farm's intake capacity (120 L·s<sup>-1</sup> on average). With these operating conditions, the irrigation module reports an overall annual operating efficiency of 51.4 %, a value that reflects the water distribution method used in ID-075.

It is important to point out that in ID-075 there is a culture of systematization of agricultural and hydrometric information. The "Santa Rosa" module has a very complete database with information from the last 17 agricultural years, which has been generated with the "Spriter" real-time irrigation forecast system developed by Ojeda-Bustamante (1999). The historical weather information used corresponds to the monthly average values of the 1961-1990 period of the "Los Mochis" weather station, located in the center of the irrigation district. Because the study area is in a semi-arid region, precipitation was not considered, since the period of maximum irrigation demand occurs in the dry periods of the year.

### Crop plan

The standard irrigation plan of the irrigated area was considered, which includes planting dates and areas per crop. The most important crops in ID-075 are corn, sorghum, bean, fruit trees, sugar cane, fodder (mainly alfalfa) and vegetables (tomato and potato). The net depths were considered at the farm intake level (where ACUR delivers water to the users) and the gross is at the control point level (where ACUR receives water from the ID's SRL).

Crop water demands were established for annual planning purposes. For this, data were taken from the study conducted by Mendoza-Robles and Macías-Cervantes (2003) on corn, one of the main crops of

satisfacer al usuario y cumpla con las expectativas de aprovechamiento de los recursos hídricos. Para ello, es importante considerar las condiciones agronómicas, edáficas, climáticas y tipo de infraestructura del riego.

## Materiales y métodos

### Zona de estudio

El estudio se realizó en el módulo "Santa Rosa" del DR-075 localizado en el Valle del Fuerte, Sinaloa, México. En esta región, el periodo de lluvias se concentra principalmente en los meses de septiembre y octubre, muchas veces de origen ciclónico. El módulo de riego evaluado cuenta con una superficie de 34316 ha, tiene un factor de repetición de cultivos en el ciclo primavera-verano (P-V) de hasta 27 % y se destaca como el más grande del DR-075.

El procedimiento para la asignación del riego (entrega-recepción) en el módulo "Santa Rosa" es con base en una programación de riegos semanal. La operación de la obra de cabeza (presa de almacenamiento) es responsabilidad de la autoridad federal (CONAGUA). La frecuencia del riego es programada en cada ACUR y la duración es acordada por el binomio Usuario-ACUR. El caudal entregado es limitado por la capacidad de toma granja (120 L·s<sup>-1</sup> en promedio). Con estas condiciones de funcionamiento, el módulo de riego reporta una eficiencia global de operación anual de 51.4 %, valor que refleja el método de distribución del agua utilizado en el DR-075.

Es importante señalar que en el DR-075 existe una cultura de sistematización de la información agrícola e hidrométrica. El módulo "Santa Rosa" cuenta con una base de datos muy completa con información de los últimos 17 años agrícolas, la cual ha sido generada con el sistema de pronóstico de riego en tiempo real "Spriter" desarrollado por Ojeda-Bustamante (1999). La información climatológica histórica utilizada corresponde con los valores promedio mensual del periodo 1961-1990 de la estación meteorológica "Los Mochis", localizada en el centro del distrito de riego. En virtud de que la zona de estudio se encuentra en una región semiárida, no se consideró la precipitación, ya que el periodo de máxima demanda de riego se presenta en los periodos secos del año.

### Plan de cultivos

Se consideró el plan de riegos tipo de la zona, el cual incluye fechas y superficies de siembra por cultivo. Los cultivos más importantes en el DR-075 son maíz, sorgo, frijol, frutales, caña de azúcar, forrajes (principalmente alfalfa) y hortalizas (jitomate y papa). Las láminas netas se consideraron a nivel toma granja (donde entrega el agua la ACUR a los usuarios) y la bruta es a nivel del

the “Santa Rosa” module. These authors indicate the optimal planting date in relation to the probable yield loss in final production ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), as well as the planting date, season length (days),  $ET_o$  (mm), potential evapotranspiration ( $ET_p$ ) (mm) and number of irrigations.

The determination of canal hydraulic capacity was carried out using the Clement method (Íñiguez-Covarrubias et al., 2011). For design purposes, farm application efficiency ( $\eta$ ) was 70 % for gravity irrigation, as well as for conduction and distribution in earth-lined canals (SRH, 1973). The overall efficiency for design is estimated as  $\eta_{\text{overall}} = \eta_{\text{conduction}} \times \eta_{\text{application}}$ , which is 49 % for the earthen canals, as reported for the “Emilio Grivel” canal. In addition, for serving large cultivated areas, the time of the irrigation service is considered to be 24 hours a day.

The development of the methodological proposal for hydrosystemic management is summarized in the following six stages:

**Stage 1.** The  $ET_o$  is estimated and the  $ET_p$  is calculated by crop and planting date. The concept of accumulation of °D is used as an alternate criterion to express the duration of the phenological cycle of crops and thus estimate the crop coefficient based on the °D according to the equations of Ojeda-Bustamante et al. (2006 and 2008). In this case, an  $ET_p$  curve is constructed for each planting date, which integrates the planting period, in the irrigation area. The  $ET_p$  of a crop (assumed as the maximum ET without water, nutritional, thermal or phytosanitary stress problems), from the planting date (PD) to the harvest date (HD), is given by the following equation:

$$ET_p = \sum_{i=PD}^{HD} K_{c-i} ET_{o-i} \quad (1)$$

where  $K_{c-i}$  and  $ET_{o-i}$  are the crop coefficient and reference  $ET_o$ , respectively, for day  $i$ .  $ET_r$  is the actual evapotranspiration under field conditions or stress ( $ET_p \geq ET_r$ ).

To estimate the  $ET_p$ , the historical climatology and a cropping plan that includes the proposed crops with dates, planting areas and agricultural season are required. Since rainfall during the period of peak demand is minimal in Mexico’s irrigation districts, it is assumed that the ET is equivalent to the crop’s irrigation requirements. In the case where effective precipitation is important during a crop’s period of peak demand, it should be subtracted from the daily ET. For more information on the methodology used, consult the work of Íñiguez-Covarrubias et al. (2011).

**Stage 2.** Irrigation is scheduled for each planting date of each crop. To determine the irrigation depth, it is

punto de control (donde recibe el agua la ACUR de la SRL del DR).

Las demandas hídricas de los cultivos se establecieron con fines de planeación anual. Para ello, se tomaron datos del estudio realizado por Mendoza-Robles y Macías-Cervantes (2003) en maíz, uno de los cultivos principales del módulo “Santa Rosa”. Estos autores presentan la fecha de siembra óptima en relación con la probable pérdida de rendimiento en la producción final ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), así como la fecha de siembra, duración del ciclo (días),  $ET_o$  (mm), evapotranspiración potencial ( $ET_p$ ) (mm) y número de riegos.

La determinación de la capacidad hidráulica de canales se realizó bajo el método de Clement (Íñiguez-Covarrubias et al., 2011). Con fines de diseño, la eficiencia de aplicación ( $\eta$ ) parcelaria fue de 70 % para riego por gravedad, así como para la conducción y distribución en los canales con revestimiento de tierra (SRH, 1973). La eficiencia global para diseño se estima como  $\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{conducción}} \times \eta_{\text{aplicación}}$ , la cual es de 49 % para los canales de tierra, tal como se reporta para el canal “Emilio Grivel”. Además, por servir a grandes extensiones cultivadas, se considera que el tiempo del servicio de riego es durante las 24 h del día.

El desarrollo de la propuesta metodológica para la gestión hidrosistémica se resume en las seis etapas siguientes:

**Etapa 1.** Se estima la  $ET_o$  y se obtiene la  $ET_p$  por cultivo y fecha de siembra. Se utiliza el concepto de acumulación de °D como criterio alternativo para expresar la duración del ciclo fenológico de los cultivos y así estimar el coeficiente del cultivo en función de los °D de acuerdo con las ecuaciones de Ojeda-Bustamante et al. (2006 y 2008). En este caso, se construye una curva de la  $ET_p$  para cada fecha de siembra, que integra el periodo de siembra, en la zona de riego. La  $ET_p$  de un cultivo (asumida como la máxima ET sin problemas de estrés hídrico, nutricionales, térmicos o fitosanitarios), a partir de la fecha de siembra (FS) a la fecha de cosecha (FC), está dada por la siguiente ecuación:

$$ET_p = \sum_{i=FS}^{FC} K_{c-i} ET_{o-i} \quad (1)$$

donde  $K_{c-i}$  y  $ET_{o-i}$  son el coeficiente del cultivo y la  $ET_o$ , respectivamente, para el día  $i$ . La  $ET_r$  es la evapotranspiración real bajo condiciones de campo o estrés ( $ET_p \geq ET_r$ ).

Para estimar la  $ET_p$  se requiere la climatología histórica y un plan que incluya los cultivos propuestos con fechas, superficies de siembra y ciclos agrícolas. En virtud de que la precipitación durante el periodo de máxima demanda es mínima en los distritos de riego

necessary to know the type of soil, bulk density, field capacity, permanent wilting point, depth of the roots of the crops (for different stages of development) and the irrigation practice used for each crop.

**Stage 3.** Based on the results of applying Equation 1, the cumulative ET curve ( $ET_c$ ) is constructed for each crop, which will be referred to as  $ET_{1c}$  to indicate an integrated curve of several planting dates of a crop in an agricultural season: autumn-winter (A-W), spring-summer (S-S) and perennial crops. Irrigations are specified according to each crop, until obtaining the  $ET_{1c}$  in cm for the established multicrop area. At this stage, partial results are obtained for the number of hectares established, irrigation schedules, and the flow required to satisfy demand is compared with the flow available in the canal for each delivery point. Ojeda-Bustamante and Flores-Velázquez (2015) point out that  $ET_c \approx ET_p$  for minimum stress conditions. It should be noted that, for each day  $i$ ,  $ET_{1c} = f_j \times ET_{ci}$ , where  $f_j$  is the weight of each planting date  $j$  (Íñiguez-Covarrubias et al., 2011).

**Stage 4.** At this stage, the unique curve of hectares established for the crop (in this case corn) per season is constructed, which is composed of the hectares of the different planting dates. It should begin with the first ten days of the agricultural year (in this case on Julian day 281), until reaching the total planting of the crop; the cropping area per planting date is taken into account. In this part of the process, the number of hectares with scheduled irrigations for each ten-day period (irrigated hectares) is obtained.

**Stage 5.** The area and the ET are integrated for each agricultural season ( $ET_{season}$ ), considering the per-crop occupation of each season (S-S, A-W and perennial). In this way, the  $ET_{season}$ , the quantity and the specific location of hectares with irrigations scheduled for each ten days are partially obtained, which facilitates the estimation of the necessary and available flow in the canal at the specific water delivery points.

**Stage 6.** The joint general function of the three seasons (S-S, A-W, and perennial) for the agricultural year is obtained, thus obtaining the area variable with the total irrigation requirement in the zone and for ten-day periods. The information matrix obtained based on Table 1 has  $n$  columns. The filling in of the matrix begins in column  $n(i=1)$ , season and the initial day (Julian day: Day), which is from the planting date per crop until the last day of the phenological stage. The "Crop" column is filled with the result in tabular form of the  $ET_p$  per day for each planting date of stage 1, the area (number of hectares) and, finally, the corresponding irrigation dates for the crop. Column  $n(i=2)$  is for crop 2, and the filling in is repeated as in column  $n(i=1)$ , only that the results are placed as the beginning on the subsequent days that separate the planting from the beginning of

de México, se asume que la ET es equivalente a los requerimientos de riego de los cultivos. Para el caso donde la precipitación efectiva sea importante en el periodo de máxima demanda de los cultivos, ésta se le debe restar a la ET diaria. Para mayor información de la metodología empleada, consultar el trabajo de Íñiguez-Covarrubias et al. (2011).

**Etapa 2.** Se programa el riego para cada fecha de siembra de cada cultivo. Para la determinación de la lámina de riego, es necesario conocer el tipo de suelo, la densidad aparente, la capacidad de campo, el punto de marchitamiento permanente, la profundidad de las raíces de los cultivos (para diferentes etapas de desarrollo) y la práctica de riego de cada cultivo.

**Etapa 3.** Con base en los resultados de la aplicación de la Ecuación 1, se construye la curva de la ET acumulada ( $ET_c$ ) para cada cultivo, la cual se referenciará como  $ET_{1c}$  para indicar una curva integrada de varias fechas de siembra de un cultivo en un ciclo agrícola: otoño-invierno (O-I), primavera-verano (P-V) y cultivos perennes. Se especifican los riegos de acuerdo con cada cultivo, hasta conseguir la  $ET_{1c}$  en cm para la superficie establecida de policultivos. En esta etapa se obtienen los resultados parciales de la cantidad de hectáreas establecidas, láminas de riego y programación del riego, y se compara el gasto necesario para satisfacer la demanda con el gasto disponible en el canal para cada punto de entrega. Ojeda-Bustamante y Flores-Velázquez (2015) señalan que  $ET_c \approx ET_p$  para condiciones de mínimo estrés. Cabe señalar que, para cada día  $i$ ,  $ET_{1c} = f_j \times ET_{ci}$ , donde  $f_j$  es el peso de cada fecha de siembra  $j$  (Íñiguez-Covarrubias et al., 2011).

**Etapa 4.** En esta etapa se construye la curva única de hectáreas establecidas para el cultivo (en este caso del maíz) por ciclo, la cual está compuesta por las hectáreas de las diferentes fechas de siembra. Se debe iniciar con la primera decena del año agrícola (en este caso el día juliano 281), hasta llegar a la siembra total del cultivo; se toma en cuenta la superficie sembrada por fecha de siembra. En esta parte del proceso, se obtienen la cantidad de hectáreas con programación de riego para cada decena (hectáreas riego).

**Etapa 5.** Se integra la superficie y la ET para cada ciclo agrícola ( $ET_{ciclo}$ ), considerando la ocupación por cultivo de cada ciclo P-V, O-I y perennes. De esta manera, se obtienen, parcialmente, la  $ET_{ciclo}$ , la cantidad y la ubicación específica de hectáreas con programación del riego para cada decena, lo cual facilita la estimación del gasto necesario y disponible en el canal en los puntos específicos de entrega hídrica.

**Etapa 6.** Se obtiene la función general conjunta de los tres ciclos (P-V, O-I y perennes) para el año agrícola, con lo que se obtiene la variable superficie con el

crop 1. In this way, column  $n(i=3)$  is for crop 3, and the filling in is repeated as in columns  $n(i=1)$  and  $n(i=2)$ , placed on the Julian days subsequent to the Julian start of the planting date of crop  $n$ , and so on until all the crops are completed with their planting dates of the A-W, S-S and perennial seasons. There will be as many columns  $n(i)$  as the number of crop planting dates. Each line of column 6(a) lists the area with crop every day of the year, which is the sum of the areas of each crop by planting date, and column 6(b) lists the areas per ten days with irrigation, at the end of each day of the ten.

The complete matrix provides the number of hectares with water requirement, the irrigation depths, which when multiplied by the hectares yields the daily ten-day volume (includes total efficiencies), and the flow needed to satisfy the water demand with the available flow in the distribution canal for each delivery point. As can be seen, at this stage the irrigation demand, irrigation distribution planning, and hydraulic capacity of the canals are integrated into a joint function.

Due to the large number of calculations involved, the algorithms for estimating the ET of the crops in an irrigation area, according to the methodology proposed by Íñiguez-Covarrubias et al. (2011), were coded in Java language, in a program developed by the authors called IntegraRR, based on the CROPWAT program (Clarke, Smith, & El-Askari, 1998), but which uses the concept of growing degree days. This program was also used to integrate the functional matrix in Table 1 for each crop, by season and by agricultural year.

**Results and discussion**

The results are presented on the basis of the development of the six stages of the methodological proposal for hydrosystemic management. In this way, the  $ET_0$  was estimated and the  $ET_p$  per crop and the planting date were obtained according to Equation 1. Figures 1 and 2 show the distribution of the cropped area established per

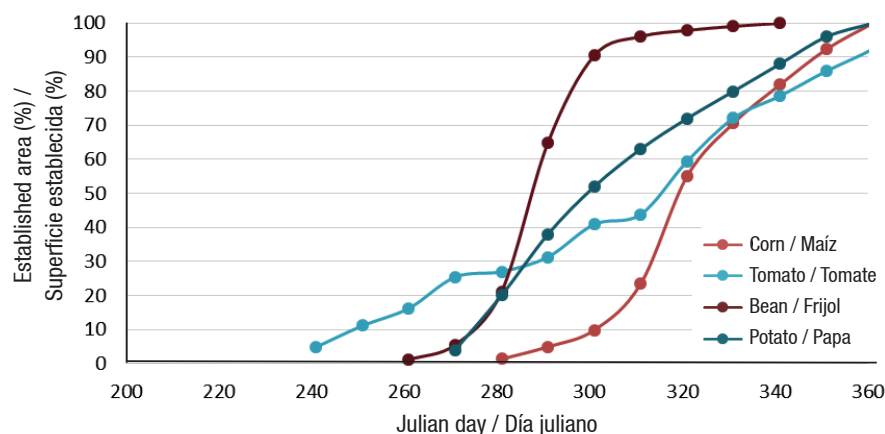
requerimiento de riego total en la zona y por decena. La matriz de información obtenida con base en el Cuadro 1 cuenta con  $n$  columnas. El llenado de la matriz inicia en la columna  $n(i=1)$ , ciclo y el día inicial (día juliano: Día), que es desde la fecha de siembra por cultivo hasta el día del término de la etapa fenológica. La columna “Cultivo” se llena con el resultado en forma tabular de la  $ET_p$  por día para cada fecha de siembra de la etapa 1, el área (número de hectáreas) y, por último, las fechas correspondientes de riego para el cultivo. La columna  $n(i=2)$  es para el cultivo 2, y se repite el llenado como el de la columna  $n(i=1)$ , solo que los resultados se colocan como inicio los días subsecuentes que separan la siembra de inicio del cultivo 1. De esta manera, la columna  $n(i=3)$  es para el cultivo 3, y se repite el llenado como en las columnas  $n(i=1)$  y  $n(i=2)$ , colocadas los días julianos subsecuentes al inicio juliano de la fecha de siembra del cultivo  $n$ , y así hasta completar todos los cultivos con sus fechas de siembra de los ciclos O-I, P-V y perennes. Existirán tantas columnas  $n(i)$  como número de fechas de siembra de cultivos. En cada línea de la columna 6(a) se anota la superficie con cultivo de todos los días del año, que es la suma de las áreas de cada cultivo por fecha de siembra, y en la columna 6(b) se anotan las superficies por decena con riego, al final de cada día de decena.

Con la matriz completa se obtienen la cantidad de hectáreas con requerimiento hídrico, las láminas de riego, que al multiplicarlas por las hectáreas se obtiene el volumen diario decenal (incluye las eficiencias totales), y el gasto necesario para satisfacer la demanda hídrica con el gasto disponible en el canal de distribución para cada punto de entrega. Como se observa, en esta etapa se logran integrar en una función conjunta la demanda de riego, la programación de la distribución y la capacidad hidráulica de los canales.

Por la gran cantidad de cálculos involucrados, los algoritmos para estimar la ET de los cultivos de una zona de riego, de acuerdo con la metodología propuesta por Íñiguez-Covarrubias et al. (2011), se codificaron en

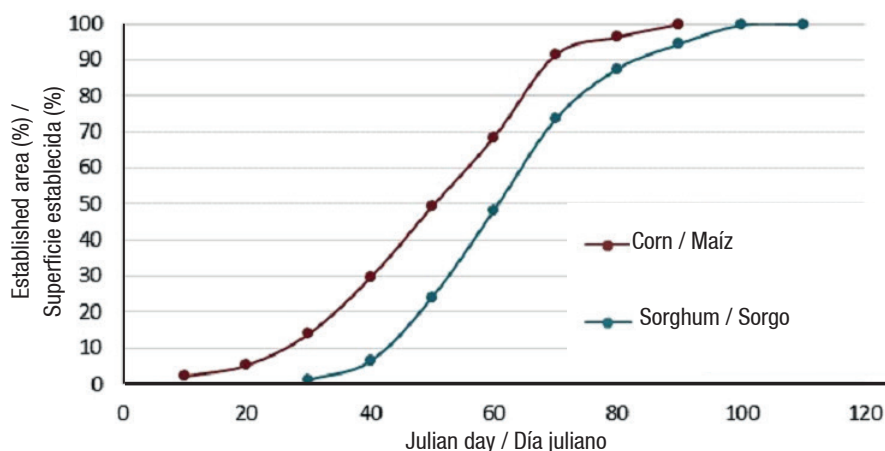
**Table 1. Functional matrix that integrates the participation of each planting ten-day period for a crop per season. Cuadro 1. Matriz funcional que integra la participación de cada siembra-decena para un cultivo por ciclo.**

1	2	3	4	5	6	7
Day/ Día	Crop $n(i=1)$ / Cultivo $n(i=1)$	Crop $n(i=2)$ / Cultivo $n(i=2)$	Crop $n(i=3)$ / Cultivo $n(i=3)$	Crop $n(i=1+n)$ / Cultivo $n(i=1+n)$	Area (ha)/ Superficie (ha)	Volume demanded (1000 m <sup>3</sup> )/ Volumen demandado (1000 m <sup>3</sup> )
					(a) (b)	(a) (b)
$ET_p = \sum_{i=PD}^{HD} K_{c-i} ET_{0-i}$ (mm)/	Area (A) (ha) Irrigation date (I)/	ETp, A, I/	...	...	Established/ Establecida	Daily/ Diario
$ET_p = \sum_{i=FS}^{FC} K_{c-i} ET_{0-i}$ (mm)	Área (A) (ha) Fecha de riego (R)	ETp, A, R			Ten-day irrigation/ Regada decenal	Ten-day period/ Decenal



**Figure 1. Distribution of planting dates in the autumn-winter season. Source: Author-made with data from the Mexican Institute of Water Technology (IMTA, 2007).**

**Figura 1. Distribución de fechas de siembra en el ciclo otoño-invierno. Fuente: Elaboración propia con datos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2007).**



**Figure 2. Distribution of planting dates in the spring-summer season. Source: Author-made with data from the Mexican Institute of Water Technology (IMTA, 2007).**

**Figura 2. Distribución de fechas de siembra en el ciclo primavera-verano. Fuente: Elaboración propia con datos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2007)**

Julian day (%) for each crop in the A-W and S-S seasons, respectively, in ID-075 (IMTA, 2007). In the curve of each crop, the planting date considered to generate the curves is indicated with a dot.

The irrigation depths are applied per crop according to the irrigation policy and where the number of irrigations is variable, since the following irrigation is applied when the maximum allowed water depletion is consumed according to the crop and the phenological stage. The net depth applied to the crops is of the order of 10 cm for relief irrigation, except for tomato, which requires a net depth of the order of 8 cm. For its part, the gross depth is affected by the efficiency reported by the “Santa Rosa” module for the A-W, S-S and perennial seasons.

lenguaje Java, en un programa desarrollado por los autores llamado IntegraRR, basado en el programa CROPWAT (Clarke, Smith, & El-Askari, 1998), pero que utiliza el concepto de días grado desarrollo. Este programa también se utilizó para integrar la matriz funcional en el Cuadro 1 para cada cultivo, por ciclo y por año agrícola.

## Resultados y discusión

Los resultados se presentan de acuerdo con el desarrollo de las seis etapas de la propuesta metodológica para la gestión hidrosistémica. De esta manera, se estimó la  $ET_0$  y se obtuvo la  $ET_p$  por cultivo y la fecha de siembra de acuerdo con la Ecuación 1. En las Figuras 1 y 2 se muestra la distribución de la superficie establecida



Figure 1 shows that the planting period for corn is from the first days of October to the end of December, for bean from the end of September to mid-November, for potato from the end of September to the end of December and for tomato from the beginning of September to the end of December. In addition, it can be seen that the tomato crop does not have any period with all the established area, as it has a long planting period, so the first harvests are presented in the overall planting period considered. In the case of bean, potato and corn, planting ends before the first harvests, so they have a period where the established area is 100 %.

Since corn is the most representative crop in the area, the results of applying Equation 1 are shown for this crop (stage 1). Figure 3 shows the daily  $ET_p$  curve of corn for a planting date (Julian day 350, ten-day planting 8), in which five irrigations with accumulated  $ET_p$  of 50.62 cm were supplied. The area established in the ten days was 1 135.51 ha, which represented 10.4 % of the corn planting in the A-W season.

The irrigation distribution system in this proposal is a ten-day period; the first irrigation takes place on day 1, and subsequent irrigations on days 67, 87, 107 and 125. The irrigation depth is 10 cm per event and the minimum irrigation interval is 17 days. The canal flow is  $1.87 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , which is necessary due to the conditions of the canal with 49 % efficiency.

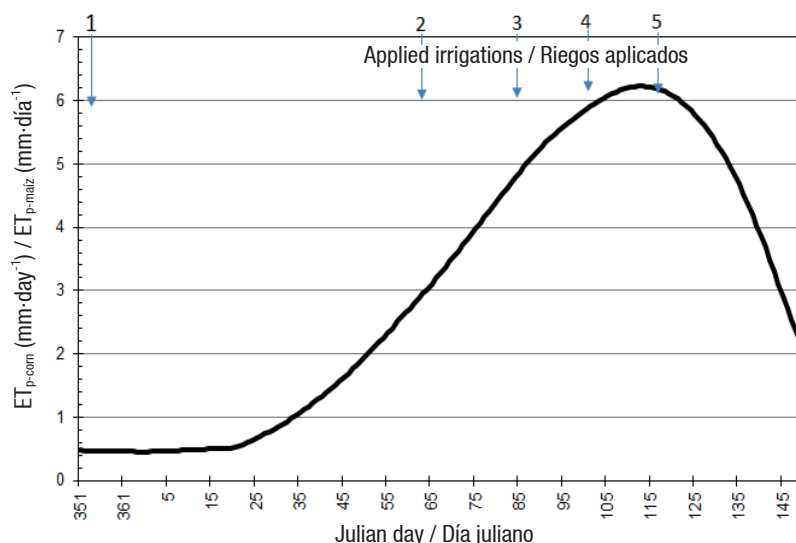
Figure 4 (stage 4) shows the curve of the established cumulative area of corn for the A-W season, as well as the irrigation hectares for the ten-day periods, starting with the first period on Julian day 281 until reaching the last

por día juliano (%) para cada cultivo en el ciclo O-I y P-V, respectivamente, en el DR-075 (IMTA, 2007). En la curva de cada cultivo se indica con un punto la fecha de siembra considerada para generar las curvas.

Las láminas de riego se aplican por cultivo de acuerdo con la política de riego y donde el número de riegos es variable, ya que el siguiente riego se aplica al consumirse el déficit de humedad permisible de acuerdo con el cultivo y la etapa fenológica. La lámina neta aplicada a los cultivos es del orden de 10 cm para los riegos de auxilio, excepto para el tomate, el cual requiere una lámina neta del orden de 8 cm. Por su parte, la lámina bruta es afectada por la eficiencia reportada por el módulo “Santa Rosa” para los ciclos O-I, P-V y perennes.

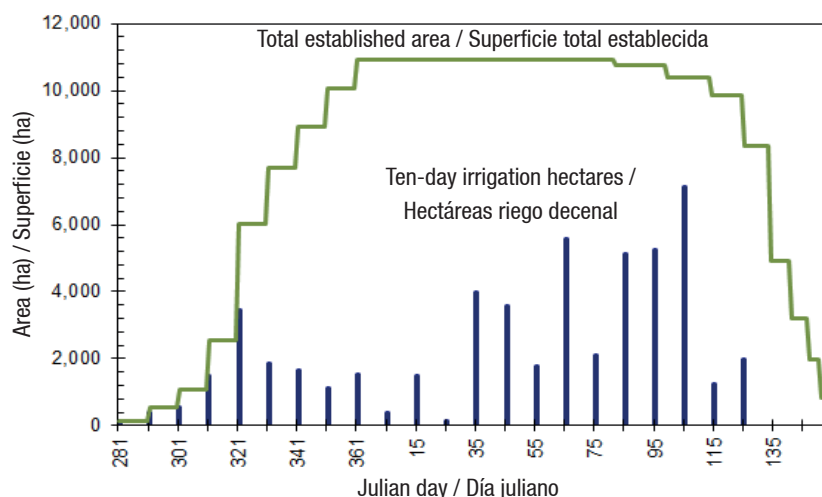
En la Figura 1 se observa que el periodo de siembra del maíz es desde los primeros días de octubre a finales de diciembre, el de frijol es de finales de septiembre a mediados de noviembre, el de papa es de finales de septiembre a finales de diciembre y el de jitomate es de principios de septiembre a finales de diciembre. Además, se observa que el cultivo de jitomate no presenta ningún ciclo con toda la superficie establecida, ya que tiene un periodo amplio de siembra, por lo que las primeras cosechas se presentan en el periodo global de siembra considerado. Para el caso del frijol, la papa y el maíz, la siembra termina antes de las primeras cosechas, por lo que presentan un ciclo donde la superficie establecida es de 100 %.

Por ser el maíz el cultivo más representativo de la zona, se muestran los resultados de la aplicación de



**Figure 3. Daily potential evapotranspiration ( $ET_p$ ) of corn for the 10-day planting date 8 (December 16, 2004) with five irrigations.**

**Figura 3. Evapotranspiración potencial ( $ET_p$ ) diaria del maíz para la fecha de siembra decenal 8 (16 de diciembre de 2004) con cinco riegos.**



**Figure 4. Total established area and ten-day irrigation hectares for corn in the autumn-winter season.**

**Figura 4. Superficie total establecida y hectáreas de riego decenal para el maíz en el ciclo otoño-invierno.**

period to have a total established area of 10918 ha. The maximum volume required for corn in the A-W season was estimated at  $557\,134.56\text{ m}^3\cdot\text{day}^{-1}$ , which is demanded on Julian day 99 (April 9, 2005), corresponding to the maximum  $ET_{1c}$  of  $5.3\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$  and an established area of 10383.36 ha (Figure 4). The programmed ten-day area is 7129.8 ha, with a design capacity flow in the canal of  $8.18\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , required flow of  $8.17\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  and a 16-day interval, this for a weekly irrigation distribution system with delivery on Monday or Thursday, and overall efficiency of 63 %. By increasing conduction efficiency from 70 to 90 %, a 10-day interval is achieved.

Figure 5 shows the process of integrating ET curves, first by planting dates for a crop ( $ET_{1c}$ ), then by agricultural season ( $ET_{\text{season}}$ ), which corresponds to the ET of each season analyzed ( $ET_{A-W}$ ,  $ET_{S-S}$  and  $ET_{P-E}$ ), and finally the integrated curve for the irrigation zone ( $ET_{Iz}$ ) (Íñiguez-Covarrubias et al., 2011).

Figure 6 (corresponding to stage 5) integrates the  $ET_{1c}$  curves of all the crops in the A-W season to obtain the  $ET_{A-W}$ . The values for the A-W season are highlighted with the peak volume required for Julian day 105 (April 15, 2005), with a maximum volume demanded of  $672\,200.7\text{ m}^3\cdot\text{day}^{-1}$ ,  $ET_{A-W}$  of  $5.172\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ , area of 11643.0 ha established (potato with 1051.33 ha, corn with 10383.36 ha and tomato with 208.42 ha), 10-day programmed area of 7416.8 ha, capacity flow in the canal of  $8.18\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , required flow of  $8.17\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  and a 16-day interval, this for a weekly irrigation distribution with delivery on Monday or Thursday, and an overall efficiency of 63 %. In this case, the capacity of the entire canal is already available; that is, there is no capacity restriction.

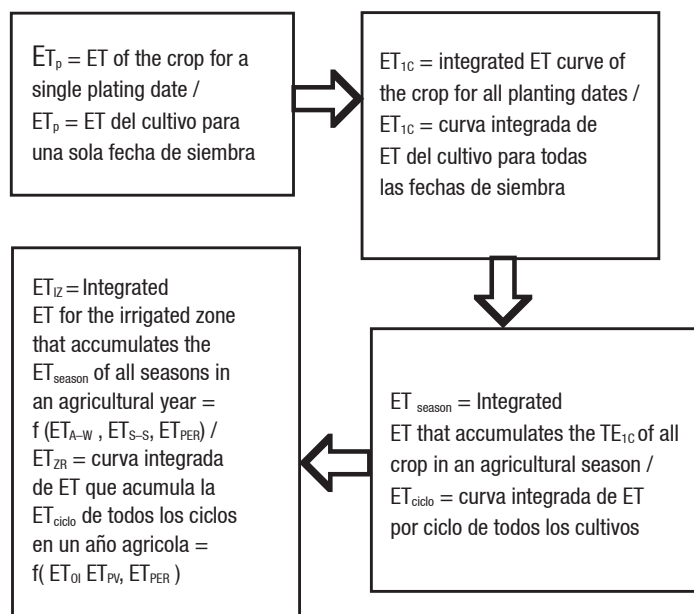
Finally, upon completion of the methodology proposed in stage 6, the integrated general matrix of the three

la Ecuación 1 en este cultivo (etapa 1). En la Figura 3 se puede observar la curva de la  $ET_p$  diaria del maíz para una fecha de siembra (día juliano 350, siembra decena 8), en la cual se suministraron cinco riegos con  $ET_p$  acumulada de 50.62 cm. La superficie establecida en la decena fue de 1135.51 ha, lo que representó el 10.4 % de la siembra de maíz en el ciclo O-I.

La programación del suministro hídrico en esta propuesta es decenal; el día 1 se da el primer riego, y riegos subsecuentes los días 67, 87, 107 y 125. La lámina de riego es de 10 cm por evento y el intervalo de riego mínimo es de 17 días. El gasto en el canal es de  $1.87\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , el cual es necesario por las condiciones del canal con eficiencia de 49 %.

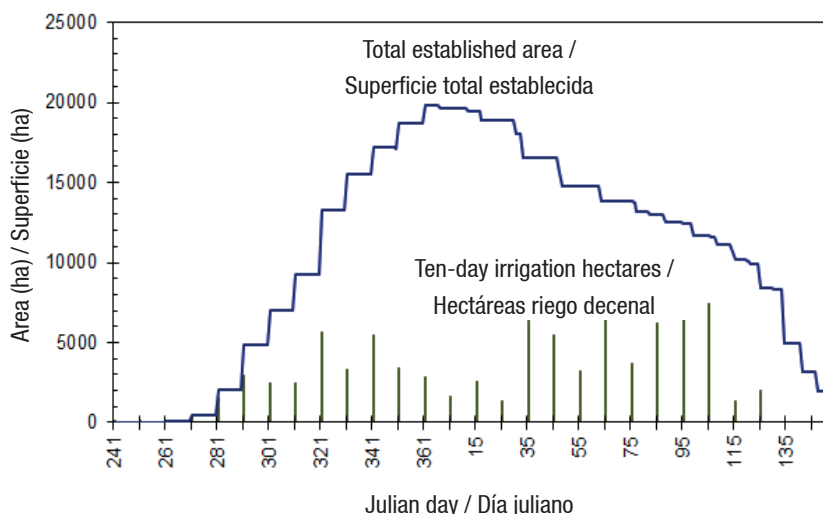
En la Figura 4 (etapa 4) se muestra la curva de la superficie establecida acumulada del maíz para el ciclo O-I, además presenta las hectáreas de riego para los periodos decenales, iniciando con la primera decena el día juliano 281 hasta llegar a la última decena, para tener una superficie establecida total de 10918 ha. El volumen máximo requerido por el maíz en el ciclo O-I fue estimado en  $557\,134.56\text{ m}^3\cdot\text{día}^{-1}$ , lo cual se demanda en el día juliano 99 (9 de abril de 2005), que corresponde a la  $ET_{1c}$  máxima de  $5.3\text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  y a una superficie establecida de 10383.36 ha (Figura 4). La superficie programada decenal es de 7129.8 ha, con un gasto de capacidad de diseño en el canal de  $8.18\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , gasto necesario de  $8.17\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  e intervalo de 16 días, esto para una programación semanal con entrega lunes o jueves, y eficiencia global de 63 %. Al aumentar la eficiencia de conducción de 70 a 90 % se alcanza un intervalo de 10 días.

En la Figura 5 se presenta el proceso de integración de las curvas de ET; primero por fechas de siembra para un cultivo ( $ET_{1c}$ ), después por ciclo agrícola ( $ET_{\text{ciclo}}$ ), que



**Figure 5. Integration process of evapotranspiration (ET) from a planting until its integration by crop, season and irrigation area.**

**Figura 5. Proceso de integración de la evapotranspiración (ET) desde una siembra hasta su integración por cultivo, ciclo y zona de riego.**



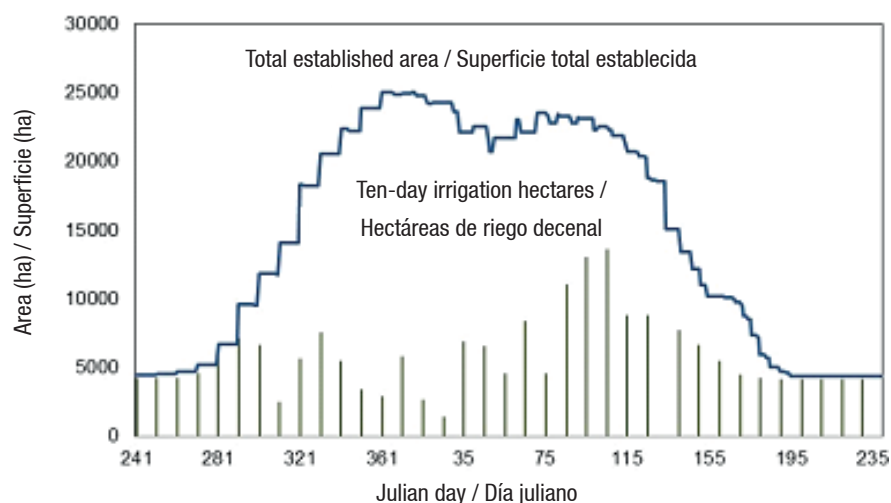
**Figure 6. Total established area and ten-day irrigation hectares for the autumn-winter season crops.**

**Figura 6. Superficie total establecida y hectáreas de riego decenal para los cultivos del ciclo otoño-invierno.**

seasons (S-S, A-W and perennial) for the agricultural year is obtained. Figure 7 shows the relationship of the hectares established for each day for the entire irrigation area, in addition to the hectares with 10-day irrigation requirements for all ten-day periods of the year. The highest value occurs on Julian day 105 (April 15, 2005), with a maximum volume of 918487.63 (m<sup>3</sup>·day<sup>-1</sup>), peak  $ET_{IZ}$  of 4.07892 mm·day<sup>-1</sup> and an area of 22 518.0 ha established. For the ten days from 105 to 115, with an overall design efficiency of 51.3 %, a flow of 21.70 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. would be required.

corresponde a la ET de cada ciclo analizado ( $ET_{OI}$ ,  $ET_{PV}$  y  $ET_{PER}$ ), y por último la curva integrada para la zona de riego ( $ET_{IZ}$ ) (Íñiguez-Covarrubias et al., 2011).

En la Figura 6 (correspondiente a la etapa 5) se integran las curvas  $ET_{1c}$  de todos los cultivos del ciclo O-I para obtener la  $ET_{OI}$ . Se destacan los valores para el ciclo O-I con el volumen pico requerido para el día juliano 105 (15 de abril de 2005), con un volumen máximo demandado de 672200.7 m<sup>3</sup>·día<sup>-1</sup>,  $ET_{OI}$  de 5.172 mm·día<sup>-1</sup>, superficie de 11 643.0 ha establecidas



**Figure 7. Total established area and ten-day irrigation hectares for the three agricultural seasons (autumn-winter, spring-summer and perennial).**

**Figura 7. Superficie total establecida y hectáreas de riego decenal para los tres ciclos agrícolas (otoño-invierno, primavera-verano y perennes).**

The ten-day period with maximum demand on the irrigation system is from Julian day 101 to 111 (April 11 to 21, 2005), with an area of 13548 ha, of which 1985 ha are of the S-S season, 7416 ha of the A-W season and 4146 ha of the perennial season. Here again, the full capacity of the canal is available, so there are no restrictions and the flow of  $27.185 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  is available. The flow in the design of the canal with Clement's method is  $27.86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , which is greater than the flow required for the maximum ten-day period.

With respect to the planned irrigation volume to be used under the crop plan, ACUR reports a gross planned volume (without efficiency at the control point at the beginning of the module) of 226480 thousand  $\text{m}^3$ , and the volume estimated by integrating the curve in Figure 7 is 154544.00 thousand  $\text{m}^3$ , which is 47 % less than that the irrigation volume planned for delivery to the users. The above is a real indicator of the overall efficiency of the hydrosystem, that is, of the ID under the hydrosystem management proposal.

## Conclusions

The ten-day systematization of crop water demand facilitates knowledge of the area associated with the irrigation requirement from the beginning of the first planting of each crop and for each season until the last irrigation demanded in an irrigation area. With the temporal knowledge of the hectares with irrigation requirements, the weekly distribution of water through the network is adjusted; it also estimates the required daily flow to apply for all seasons, this when knowing the date and required irrigation in the ten-day period.

(papa con 1051.33 ha, maíz con 10383.36 ha y jitomate con 208.42 ha), superficie programada decenal de 7416.8 ha, gasto de capacidad en el canal de  $8.18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , gasto necesario de  $8.17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  y un intervalo de 16 días; esto para una programación semanal con entrega lunes o jueves, y una eficiencia global de 63 %. Para este caso ya se dispone de la capacidad de todo el canal; es decir, no existe restricción por capacidad.

Finalmente, al completar la metodología propuesta en la etapa 6, se obtiene la matriz general integrada de los tres ciclos (P-V, O-I y perennes) para el año agrícola. En la Figura 7 se muestra la relación de las hectáreas establecidas para cada día para toda la zona de riego, además de las hectáreas con requerimiento de riego decenal para todas las decenas del año. El valor más alto se presenta el día juliano 105 (15 de abril de 2005), con un volumen máximo de  $918487.63 (\text{m}^3 \cdot \text{día}^{-1})$ ,  $ET_{ZR}$  pico de  $4.07892 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  y una superficie de 22518.0 ha establecidas. Para la decena del 105 al 115, con una eficiencia global de diseño de 51.3 %, se necesitaría un gasto de  $21.70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

La decena con máxima demanda al sistema de riego es del día juliano 101 al 111 (del 11 al 21 de abril de 2005), con superficie de 13548 ha, de las cuales 1985 ha son del ciclo P-V, 7416 ha de O-I y 4146 ha de perenne. En este caso también se dispone de toda la capacidad del canal, por lo que no existen restricciones y se dispone del gasto de  $27.185 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . El gasto en el diseño del canal con el método de Clement es de  $27.86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , el cual es mayor al gasto necesario en la decena máxima.

Con respecto al volumen programado utilizado bajo el plan de los cultivos, la ACUR reporta un volumen

In this case, it is concluded that the capacity of the canal, in any irrigation section, is not a limitation for applying the irrigation plan. This implies that for any other irrigation plan, the proposed hydrosystemic management methodology would have to be repeated, in which the three main variables of the large irrigation areas concur; that is, the water demand of the crops, the water distribution planning and the determination of the hydraulic capacity of the canals.

Regarding the irrigation service, it can be said that full user satisfaction depends solely on the proper management of the Irrigation User's Association, since for the infrastructure and for the conditions of the irrigation plan there are no limitations as long as the irrigations are programmed, on the basis of a mutual agreement between the Authorities and Users.

Based on the results obtained, implementing a hydrosystemic management system, such as the one proposed herein, is widely recommended for any ID, according to the technological advances in computing, measurement, communication and control. Therefore, support programs and trained personnel are required for water management in complex, large-scale irrigation systems with different crops, planting dates, types of irrigation application systems, agricultural seasons and different irrigation modules or sections.

#### *End of English version*

#### References / Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization. Retrieved from <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Arista-Cortes, J, González-Camacho, J. M., & Ojeda-Bustamante, W. (2009). Algoritmo recursivo para mejorar la integración de la demanda diaria de riego de una red de distribución. *Agrociencia*, 43(8), 841-850. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952009000800007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000800007)
- Clarke, D., Smith, M., & El-Askari, K. (1998). *Cropwat for Windows: user Guide*. Southampton, UK: University of Southampton.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2007). *Plan director distrito de riego 087, Rosario Mezquite*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Íñiguez-Covarrubias, M., de León-Mojarro, B., Prado-Hernández, J. V., & Rendón-Pimentel, L. (2007). Análisis y comparación de tres métodos para determinar la capacidad de conducción de canales, aplicados en el distrito de riego

bruto programado (sin eficiencia en el punto de control al inicio del módulo) de 226480 millares de m<sup>3</sup>, y el volumen estimado al integrar la curva de la Figura 7 es de 154544.00 millares de m<sup>3</sup>, esto es 47 % menor al programado por los usuarios. Lo anterior constituye un indicador real de la eficiencia global del hidrosistema, es decir, del DR bajo la propuesta de gestión hidrosistémica.

#### Conclusiones

La sistematización decenal de la demanda hídrica de los cultivos facilita el conocimiento de la superficie asociada con el requerimiento de riego desde el inicio de la primera siembra de cada cultivo y para cada ciclo hasta el último riego demandado en una zona de riego. Con el conocimiento temporal de las hectáreas con requerimiento de riego se ajusta la distribución semanal del agua por la red; asimismo, se estima el gasto necesario diario por aplicar para todos los ciclos, esto al conocer la fecha y decena requerida.

En este caso, se concluye que la capacidad del canal, en cualquier sección de riego, no es limitante para aplicar el plan de riego. Esto implica que para cualquier otro plan de riego se tendría que repetir la metodología de gestión hidrosistémica propuesta, en la que concurren las tres principales variables de las grandes zonas de riego; es decir, la demanda hídrica de los cultivos, la programación de distribución del agua y la determinación de la capacidad hidráulica de los canales.

Con respecto al servicio de riego, se puede decir que la satisfacción plena del usuario depende únicamente de la correcta administración de la Asociación de Usuarios de Riego, ya que por la infraestructura y por las condiciones del plan de riego no existen limitantes siempre que se programen los riegos, esto de común acuerdo Autoridades - Usuarios.

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda, ampliamente, la implementación de una gestión hidrosistémica como la propuesta para cualquier DR, acorde con los adelantos tecnológicos en materia de computación, medición, comunicación y control. Por ello, necesariamente se requiere de programas de apoyo y personal capacitado para la gestión del agua en complejos sistemas de riego de gran extensión con diferentes cultivos, fechas de siembra, tipos de sistemas de aplicación del riego, ciclos agrícolas y diferentes módulos o secciones de riego.

#### *Fin de la versión en español*

- La Begoña. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(2), 81-90. Retrieved from <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/192>
- Íñiguez-Covarrubias, M., Ojeda-Bustamante, W., & Rojano-Aguilar, A. (2011). Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 43(2), 175-191. Retrieved from [http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/4320/iniguez-evotranspiracion.pdf](http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/4320/iniguez-evotranspiracion.pdf)
- Mendoza-Robles, J. L., & Macías-Cervantes, J. (2003). *Tecnología para mejorar la productividad del maíz en el norte de Sinaloa y su impacto económico*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Ojeda-Bustamante, W. (1999). *Pronóstico de riego en tiempo real*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Retrieved from <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1660>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., & Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13-25. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1405-31952006000100013&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-31952006000100013&lng=es&nrm=iso)
- Ojeda-Bustamante, W., Hernández-Barrios, L., & Sánchez-Cohén, I. (2008). *Requerimientos de riego de los cultivos. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*. Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., & Montero-Martínez, J. M. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1), 1-21. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952011000100001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000100001)
- Ojeda-Bustamante, W., & Flores-Velázquez, J. (2015). *Calendarización del riego: Teoría y práctica*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Spare, D. P., Wang, J., & Hagan, E. (1980). Sizing rice irrigation canals. *Transaction of the ASAE*, 23(4), 914-918.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). (1973). *Proyecto de zonas de riego. Dirección de proyectos de grande irrigación*. México: SRH.