

# Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego

## Methodology for estimation of integrated evapotranspiration and canal capacity in an irrigation zone

Mauro Íñiguez-Covarrubias <sup>1</sup>

Waldo Ojeda-Bustamante <sup>1</sup>

Abraham Rojano-Aguilar <sup>2</sup>

*Originales: Recepción: 24/02/2011 - Aceptación: 17/10/2011*

### RESUMEN

La capacidad de la red de canales en un sistema de riego depende de satisfacer la demanda hídrica máxima de los cultivos. Los métodos para determinar la capacidad del canal requieren de la estimación de la variable agronómica: evapotranspiración de los cultivos. En grandes áreas de riego, con un padrón diversificado de cultivos, diferentes fechas de siembra y varios ciclos agrícolas no existe un procedimiento integrado para estimar esta variable agronómica, lo cual genera incertidumbre al ser requerida en los métodos. En este trabajo se desarrolla una propuesta para estimar dicha variable para grandes zonas de riego. La propuesta inicia con el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos por fecha de siembra, y termina con la obtención de una curva general integral para un año agrícola, encontrándose la variable evapotranspiración de una zona de riego ( $ET_{zr}$ ). Esta metodología se aplicó para el canal principal del módulo de riego Santa Rosa, Distrito de Riego 075, Sinaloa, México en que la  $ET_{zr}$  resultó de 4,1 mm d<sup>-1</sup>. Por los resultados se concluye la veracidad de la propuesta en determinar la evapotranspiración para el cálculo en la capacidad del canal.

### ABSTRACT

Capacity of irrigation networks needs to satisfy peak crop water demands. The methods to size canal capacity require the estimation of an agronomic variable: crop evapotranspiration. There is not an integrated procedure to estimate crop evapotranspiration for large irrigation zones with a diversified crop pattern, different planting dates, and several crop seasons. Not having this procedure generates uncertainty in methods for canal capacity estimations. This paper presents a methodological proposal to estimate the ET variable for large irrigation zones. The procedure starts with calculating the ET for each planting date per crop and season. Next, it integrates a general ET curve for the water year that finds the evapotranspiration for the irrigation zone ( $ET_{zr}$ ). The methodology was applied to size the main canal that supplies the "Santa Rosa" Water Irrigation Association in the 075 Irrigation District located in the state of Sinaloa, Mexico. A value of 4.1 mm d<sup>-1</sup> was estimated for  $ET_{zr}$ . The results indicate the proposed method's accuracy to estimate the ET variable to size irrigation canals.

1 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Jiutepec, Morelos, México 62550. wojeda@tlaloc.imta.mx

2 Universidad Autónoma Chapingo. Km 38,5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, México 5630.

### Palabras clave

dimensionamiento de canales • requerimientos hídricos • distritos de riego

### Keywords

canal sizing • crop water requirements • irrigation districts

## INTRODUCCIÓN

La función de los sistemas de riego es la aplicación programada del agua a los cultivos para la producción de alimentos, con una gestión integrada de los recursos y en armonía con el medio ambiente. La mayoría de las zonas de riego de México se localizan en regiones áridas y semiáridas, abasteciéndose de una o varias presas de almacenamiento. Las presas permiten almacenar el agua que se usa fuera del periodo de lluvias y así garantizar el suministro de riego a los cultivos para disminuir el riesgo asociado a la variabilidad de los ciclos naturales anuales e interanuales de la precipitación. El éxito en la operación y planeación de los sistemas de riego depende de la cuantificación espacial y temporal, de las demandas de riego para de la distribución de su suministro para cumplir con la demanda hídrica de los cultivos (2). La red de conducción y distribución de un sistema de riego es el medio para transportar el agua desde las fuentes de abastecimiento hacia las parcelas, por lo que su buen dimensionamiento es vital para suministrar el riego durante el periodo de máxima demanda de los cultivos.

La determinación de la capacidad del sistema de riego es compleja ya que depende de la demanda máxima de riego de los cultivos considerando la climatología histórica, el comportamiento de los productores y el plan de cultivos de una zona de riego (6). El problema inicial más importante para el proyectista de sistemas de riego es calcular el gasto o capacidad para cualquier tramo de la red de distribución (1). El U. S. Bureau of Reclamation recomienda determinar la capacidad para cada zona en particular ya que la estimación de las demandas de riego depende en gran parte de la evapotranspiración de los cultivos ( $ET_c$ ), en condiciones no limitantes, dado un plan de cultivos (1). La  $ET_c$  con fines de planeación es estimada por la siguiente ecuación:

$$ET_c = K_c ET_o$$

donde:

$K_c$  es el coeficiente de cultivo promedio en función del tipo y etapa de cultivo

$ET_o$  es la evapotranspiración del cultivo de referencia

Para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ) con fines de planeación de zonas de riego, se utilizaban principalmente el método de Blaney-Criddle, el método de Thornthwaite y el método del tanque evaporímetro usando datos climáticos monitoreados por estaciones meteorológicas. Con la instalación masiva de estaciones meteorológicas automatizadas, la disponibilidad y oportunidad de datos por períodos largos ha mejorado en las zonas de riego, lo anterior propicia el uso de métodos más robustos para estimar la evapotranspiración de referencia, actualmente el método más recomendable para estimarla es el de Penman-Montieth modificado por FAO (FAO-PM) (1).

Adicionalmente se ha realizado un gran esfuerzo en obtener y calibrar los coeficientes de cultivo de los diferentes cultivos agrícolas por etapa fenológica. Existen tablas de  $K_c$  en función de la etapa y su duración en días en diversas fuentes bibliográficas, entre las que destaca el manual 56 de la FAO (1), que se ha tomado como la referencia para la estimación de la evapotranspiración y los requerimientos de riego de los cultivos. Sin embargo, existe el inconveniente que los coeficientes de cultivo están expresados en función de días después de siembra o transplante. Bajo este enfoque se requiere actualizar manualmente la duración en días de las fases fenológicas cuando las condiciones ambientales se apartan del clima normal de una región. Una revisión detallada de los métodos para estimar la evapotranspiración potencial de los cultivos se presenta en Allen *et al.* (1) y Ojeda-Bustamante *et al.* (15).

Para superar esta limitante, es posible expresar el tiempo transcurrido como unidades de desarrollo en términos de "tiempo fisiológico" en lugar de tiempo cronológico, usualmente en la forma de tiempo térmico, así surge el concepto de Grados-Día ( $^{\circ}D$ ), definido para un período específico, como los grados acumulados sobre un intervalo de temperaturas cardinales donde el cultivo se desarrolla. El concepto de Grados Día Desarrollo ( $^{\circ}D$ ) es una de las herramientas más usadas para predecir la fenología y desarrollo de los cultivos (11), al compararlo con otras alternativas como días después de siembra o porcentaje de desarrollo fenológico. El concepto  $^{\circ}D$  integra en forma indirecta, a través de la temperatura, la energía calorífica acumulada en las diferentes etapas de desarrollo fenológico de los cultivos. La estimación diaria de los ( $^{\circ}D$ ) requiere del conocimiento de la temperatura media ambiental diaria ( $T_a$ ) de acuerdo con las siguientes ecuaciones (13):

$$\begin{aligned} ^{\circ}D &= T_a - T_{c-\min}, & T_a < T_{c-\max} \\ ^{\circ}D &= T_{c-\max} - T_{c-\min}, & T_a \geq T_{c-\max} \\ ^{\circ}D &= 0, & T_a \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad [1]$$

donde:

$T_{c-\min}$  y  $T_{c-\max}$  son las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente, dentro del cual un cultivo se desarrolla y varían para cada cultivo según la zona de estudio.

Es posible expresar el coeficiente de cultivos en función de los días grado acumulados de acuerdo con las ecuaciones propuestas por Ojeda (13).

Existen una variedad de modelos para estimar la demanda hídrica de cultivos individuales para una fecha de siembra (10), pero la estimación de la evapotranspiración de una zona de riego se complica cuando se tiene un plan de cultivos diverso con un amplio periodo de siembras y cosechas. Pulido-Calvo *et al.* (16) mencionaron la importancia de estimar la evolución temporal de los requerimientos hídricos durante el desarrollo de un año agrícola con fines de diseño y manejo de sistemas de distribución del riego basados en la demanda.

La mayor incertidumbre que enfrentan los proyectistas de sistemas de riego es estimar el gasto de conducción de la red de distribución (6, 7, 9). Los procedimientos más utilizados en México para determinar la capacidad de los canales (8) son el método

de los Coeficientes Unitarios de Riego (CUR), (SRH, 1973), el método probabilístico de Clément (3) y el método de las áreas de rotación de Clemmens (4). Para el método de los CUR se requiere definir las demandas mensuales de riego para un patrón de cultivos propuesto e identificar el mes de máxima demanda (17), por lo que la evapotranspiración se estima mensualmente para cada cultivo utilizando métodos con fines de planeación. Para los métodos de Clément y de Clemmens es necesario determinar la evapotranspiración integrada de los cultivos de una zona de riego ( $ET_{zr}$ ) ya que la evapotranspiración está relacionada con el gasto continuo y esta variable es la base para la determinación de la capacidad de conducción del canal (8). Todos los métodos de dimensionamiento de canales requieren estimar la evapotranspiración pico de una zona de riego dado un plan de cultivos.

Para las zonas de riego en las cuales el principal sistema de riego es por gravedad, se debe suministrar volúmenes de riego para suplir las demandas hídricas de varios días, en consecuencia los canales exigen un gasto mayor al gasto teórico de demanda continua. Los avances tecnológicos y metodológicos actuales facilitan la estimación detallada de los requerimientos hídricos de los cultivos pero necesitan del apoyo de sistemas computacionales ante la gran cantidad de cultivos y fechas de siembra asociadas a los planes de cultivos de grandes zonas de riego. Los proyectistas de zonas de riego requieren de un método detallado para estimar las demandas hídricas de los cultivos para disminuir la incertidumbre y homogenizar la metodología para el dimensionamiento de canales de riego.

En virtud de que no existe un procedimiento integrado para estimar la evapotranspiración global, lo cual genera incertidumbre al ser requerida en los métodos para determinar la capacidad de un canal, en este trabajo se desarrolla y se aplica una propuesta de innovación tecnológica para determinar esta variable agronómica considerando sus condiciones agronómicas, climáticas locales y tipo de distribución del riego.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se presenta la metodología para estimar la evapotranspiración integrada; esta propuesta consta de cuatro pasos, al final del apartado se describen brevemente los métodos para el dimensionamiento de canales.

### **Estimación de la evapotranspiración de una zona de riego ( $ET_{zr}$ )**

El procedimiento para estimar la variable ET es el siguiente: Definición de un plan de riegos de la zona que incluye cultivos propuestos con fechas, superficies de siembra y ciclos agrícolas.

#### **Paso 1**

Se realiza la estimación de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) y se obtiene la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) por cultivo y fecha de siembra, se utiliza el concepto de acumulación de Grados Día Desarrollo ( $^{\circ}D$ )

como criterio alternativo para expresar la duración de días del ciclo fenológico de los cultivos y así estimar el coeficiente del cultivo de acuerdo con las ecuaciones de Ojeda-Bustamante *et. al.* (13). En este caso se identifica una curva de la  $ET_c$  para cada una de varias fechas de siembra que integra el periodo de siembra en la zona de riego. Se obtienen los °D usando las ecuaciones 1 y con los parámetros de los cultivos se estima el coeficiente de cultivo en función de los °D. La evapotranspiración de un cultivo a partir de la fecha de siembra (FS) a la fecha de cosecha (FC) está dada por la ecuación 2.

$$ET_c = \sum_{i=FS}^{FC} K_{c-i} ET_{o-i} \quad [2]$$

donde:

$K_{c-i}$  y  $ET_{o-i}$  son el coeficiente de cultivo y la evapotranspiración de referencia, respectivamente, para el día  $i$ .

### Paso 2

Se genera una curva única que integra la evapotranspiración por cultivo bajo diferentes fechas de siembra, las curvas  $ET_c$  del cultivo se ponderan considerando la superficie sembrada por fecha de siembra y se obtiene la evapotranspiración ponderada de un cultivo ( $ET_{1c}$ ) que integra la  $ET_c$  para las fechas de siembra del cultivo para un ciclo agrícola. La evapotranspiración de un cultivo ( $ET_{1c}$ ) para un día  $i$  está dada por las contribuciones de la evapotranspiración de cada fecha de siembra estimada para el día  $i$ , ponderada por su superficie sembrada.

$$ET_{1c-i} = \sum_{j=1}^{NS} f_{i,j} ET_{c-i,j} = \sum_{j=1}^{NS} f_{i,j} K_{c-i,j} ET_{o-i} \quad [3]$$

donde:

$j$  es el número de siembras a considerar en el cálculo de la curva integrada de ET por cultivo, esto es, para cada día  $i$  intervienen varias siembras (NS)

$i$  es el día bajo análisis en el periodo de desarrollo del cultivo que cubre desde el día de la fecha de la primera siembra (PS) hasta el día de la última cosecha (UC)

NS es el número total de siembras para el cultivo analizado

$f_{i,j}$  es factor de la superficie sembrada para el día  $i$  para el número de siembra  $j$  dada por la ecuación 4

$$f_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{S_{t-i}}, \text{ para cada día } \sum f_{i,j} = 1 \quad [4]$$

donde:

$S_{i,j}$  es la superficie establecida en el día  $i$  del cultivo con la fecha de siembra  $j$

$S_{t-i}$  es la superficie total del cultivo analizado para el día  $i$ , estimado con la ecuación 5:

$$S_{t-i} = \sum_{j=1}^{NS} S_{i,j} \quad [5]$$

### Paso 3

En esta etapa de la metodología se integra la evapotranspiración para cada ciclo agrícola ( $ET_k$ ) considerando la superficie por cultivo en la zona de riego, ya sea primavera verano, otoño-invierno y perennes. Por ejemplo, la evapotranspiración de los cultivos del ciclo agrícola  $k$  puede estimarse con la ecuación 6.

$$ET_k = \sum_{i=PS}^{UC} \sum_{j=1}^{N_c} f_{i,j} ET_{1C-i,j} \quad [6]$$

donde:

$N_c$  es el número de cultivos del ciclo OI

PS es la fecha de primera siembra

UC es la fecha de última cosecha

$f_{ij}$  es el factor de ponderación del cultivo j para el día i de acuerdo con la siguiente relación:

$$f_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{S_{t-i}}, \text{ para cada día } \sum f_{i,j} = 1 \quad [7]$$

donde:

$S_{ij}$  es la superficie establecida en el día i del cultivo j en el ciclo analizado

$S_{ti}$  es la superficie establecida para el día i del ciclo analizado  $S_{t-i} = \sum_{j=1}^{N_c} S_{i,j}$ .

#### Paso 4

Finalmente, se obtiene una curva general integrada de los ciclos encontrándose la variable evapotranspiración ponderada de una zona de riego ( $ET_{zr}$ ). El valor de la  $ET_{zr}$  para un día i, es la suma de la  $ET_k$  de cada ciclo, si se tienen tres ciclos agrícolas ( $N_{ca}=3$ ):

$$ET_{zr} = \sum_{i=PS}^{UC} \sum_{k=1}^{N_{ca}} f_{i,k} ET_{i,k} = \sum_{i=PS}^{UC} f_{OI-i} ET_{OI-i} + \sum_{i=PS}^{UC} f_{PER-i} ET_{PER-i} + \sum_{i=PS}^{UC} f_{PV} ET_{PV-i} \quad [8]$$

La estimación del factor de ponderación ( $f_{i,k}$ ), día i y ciclo agrícola k se realiza de la siguiente manera.

$$f_{i,k} = \frac{S_{i,k}}{S_{t-i}} \quad [9]$$

donde:

$S_{i,k}$  es la superficie establecida en el día i de los cultivos del ciclo agrícola k

$S_{ti}$  es la superficie establecida en el día i de todos los ciclos agrícolas

La suma de los factores de ponderación de los ciclos agrícolas para cada día debe ser 1.

$$\sum_{k=1}^{N_{ca}} f_{i,k} = f_{i-OI} + f_{i-PER} + f_{i-PV} = 1 \quad [10]$$

El valor máximo de  $ET_{zr}$  de la curva general integrada es el que se toma como el valor de la variable evapotranspiración ponderada de una zona de riego en los métodos para determinar la capacidad de canales. Por la gran cantidad de cálculos involucrados, los algoritmos para estimar la evapotranspiración de los cultivos de una zona de riego de acuerdo con la metodología propuesta fueron programados en lenguaje de programación Java usando la metodología anterior. Dado que la precipitación durante el periodo de máxima demanda es mínimo en los distritos de

riego de México, se asume en el trabajo que la evapotranspiración es equivalente a los requerimientos de riego de los cultivos. Para el caso en el cual la precipitación sea importante en el periodo de máxima demanda de los cultivos, la precipitación efectiva debe ser restada de la evapotranspiración diaria.

### Capacidad del canal por los métodos de Clément y Clemmens

Con la determinación de la variable agronómica  $ET_{zr}$  propuesta de innovación tecnológica, se procede a estimar la capacidad de canales utilizando los métodos de Clément y de Clemmens.

El gasto de diseño con el método de Clément  $Q_{diseño} = mN$ , es función del número total de tomas abiertas ( $N$ ) y del gasto modular de la toma alimentada por el canal ( $m$ ). La aplicación del método necesita algunas consideraciones: se aplica la ecuación 11 para determinar  $N$  cuando el área por abastecer tiene un número total de tomas menor que 100 y la ecuación 12 cuando el número total de tomas es mayor que 100.

$$N = (Rp + U(P_q)\sqrt{Rpq}) \quad [11]$$

$$N = (Rp + \frac{U' * H(U')}{P_a}) \quad [12]$$

donde:

$p$  es la probabilidad de que una toma esté abierta determinada con la siguiente ecuación

$$p = \frac{Q_{rotación}}{rRm} \quad \text{para cada tramo del canal}$$

$r$  es la fracción del tiempo en que el sistema es utilizado para lo cual se toma el valor de uno, y el complemento de la probabilidad es  $q = 1 - p$ .

En la ecuación 13 se tiene el valor de  $H(U') = (\sqrt{Rpq}) * P_a$

donde:

$P_a$  indica el porcentaje de asegurar con alta probabilidad que la red estará libre en el momento que un usuario requiera el servicio de riego.

El valor de  $U'$  = función de probabilidad, interpolada con  $H(U')$  es conocida y se determina a partir de tablas (3,12) igual que  $U(P_q)$ . La aplicación del método para la estimación de la capacidad de los canales fue realizado a través de una hoja de excel.

El método de Clemmens (4) propone cuatro ecuaciones adimensionales para determinar la relación entre las capacidades de conducción de las entregas por rotación, demanda programada y demanda libre como una función del área de servicio.

Para la demanda programada se proponen las siguientes ecuaciones:

$$Q_n = 1,6 An + 1,0 \quad \text{for } An < 1,0 \quad [13]$$

$$Q_n = 1,0 An + 1,6 \quad \text{for } An > 1,0 \quad [14]$$

Para la demanda libre se proponen las ecuaciones 15 y 16.

$$Q_n = 4,0 An + 1,0 \quad \text{for } An < 1,0 \quad [15]$$

$$Q_n = 1,5 An + 3,5 \quad \text{for } An > 1,0 \quad [16]$$

donde:

$$A_n = A_{\text{tramo}} / A_{\text{rot}} (\text{adim}); A_t = Q_{\text{toma}} / Q_{\text{uni}}; \text{ el gasto } Q_{\text{unitario}} = \left( \frac{115,74 * ET_{ZR}}{E_g} \right) (\text{l s}^{-1} \text{ ha}^{-1});$$

el caudal de diseño  $Q_d = Q_n * Q_{rot}$  en  $\text{l s}^{-1}$ ;  $A$  la superficie de riego dominada en cada tramo del canal,  $ET$ ; evapotranspiración, ( $\text{m día}^{-1}$ ),  $E_g$ ; eficiencia global del uso del agua (adim) y el valor de 115,74 es una constante para presentar el gasto continuo en  $\text{l s}^{-1}$ .

### Zona de estudio

La zona de estudio es el módulo Santa Rosa del distrito de riego 075 (DR-075) localizado en el Valle del Fuerte, al norte del estado de Sinaloa, México, a una latitud media de  $25^{\circ} 50' \text{ N}$  y longitud de  $109^{\circ} 5' \text{ O}$ , con una altura promedio de 20 m s. n. m. Los suelos son planos con una textura predominante franco arcillosa con valores típicos de 50% para arcilla y 20% para arena, con bajo nivel de materia orgánica menor al 1%, una densidad aparente de  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ , y una humedad aprovechable volumétrica del 15%. La zona se localiza en una zona árida al norte del estado de Sinaloa. El periodo de lluvias, principalmente de origen ciclónico, se concentra en septiembre y octubre.

El módulo de riego "Santa Rosa" con una superficie física regable de 34.316 ha, tiene un factor de repetición de cultivos en el ciclo PV de hasta el 27%; dicho módulo por su extensión es el más grande del DR-075. La programación para la distribución del agua se realiza en el módulo por demanda semanal y el procedimiento para la asignación del riego (entrega-recepción) es con base a un programa de riegos. La operación de la obra de cabeza es responsabilidad de la autoridad federal, la Comisión Nacional del Agua (Conagua), la red mayor es responsabilidad de la federación de módulos de riego conocida como SRL (Sociedad de Responsabilidad Limitada), y la responsabilidad en la administración, operación y conservación está a cargo de cada asociación de usuarios del módulo de riego (AU). Según la clasificación de los métodos de distribución (4), la responsabilidad del control es compartida Usuario-Autoridad (CONAGUA). La frecuencia del riego es programada, el caudal entregado es limitado por la capacidad de toma granja, con una capacidad promedio de 120  $\text{l/s}$ , y la duración del riego es programada entre Usuario-AU.

Con estas condiciones de funcionamiento, reporta el módulo una eficiencia global de  $E_g = 51,4\%$ , valor que refleja el método de distribución del agua utilizado en el DR-075. Los usuarios tienen un periodo de una semana para solicitar y ajustar el gasto y duración del riego, siendo servido en las siguientes 72 horas de ser aceptada la solicitud del servicio de riego por la AU.

En el DR-075 existe una cultura de sistematización de información agrícola e hidrométrica, se tiene una base de datos muy completa con información de los últimos doce años agrícolas en el módulo Santa Rosa, que ha sido generada al usarse el Spriter, sistema de pronóstico de riego en tiempo real (14). La Climatología histórica utilizada son los valores promedio mensual del periodo 1961-1990 de la estación meteorológica Los Mochis, localizada en el centro del distrito de riego, la

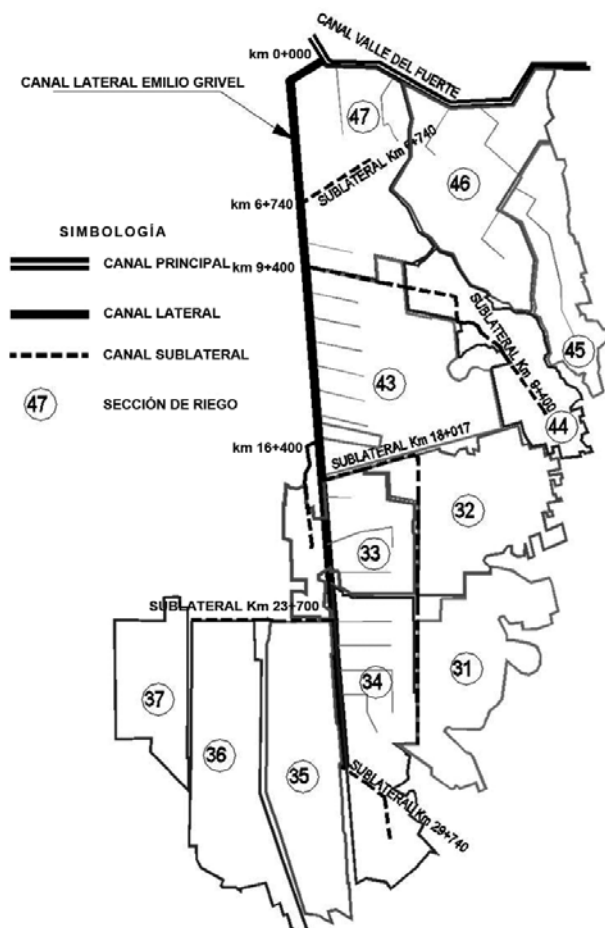


cual dispone de las siguientes variables meteorológicas; temperatura ambiente ( $T_a$ ) en  $^{\circ}\text{C}$ , Humedad relativa (HR) en [%], velocidad del viento ( $V_v$ ) en  $[\text{m s}^{-1}]$ , radiación solar global ( $R_s$ )  $[\text{Mj m}^{-2}\text{día}^{-1}]$ , precipitación promedio (Pp) en  $[\text{mm}]$  y  $ET_o$ , Evapotranspiración de referencia,  $[\text{mm día}^{-1}]$ .

En virtud de que la mayoría de las zonas de riego de México se localizan en zonas áridas y semiáridas, en este trabajo la precipitación no se considera ya que el periodo de máxima demanda de riego se presenta en los periodos secos del año.

### Red de distribución

El módulo Santa Rosa es alimentado por el lateral "Canal Emilio Grivel" e inicia en el km 18+430 del Canal principal Valle del Fuerte. En la figura 1 se muestra la configuración de la red de canales destacándose las once secciones de riego que lo conforman.



**Figura 1.** Plano del módulo de riego "Santa Rosa" del distrito de riego 075.  
**Figure 1.** General map of "Santa Rosa" irrigation zone at irrigation district 075.

**Plan de cultivos**

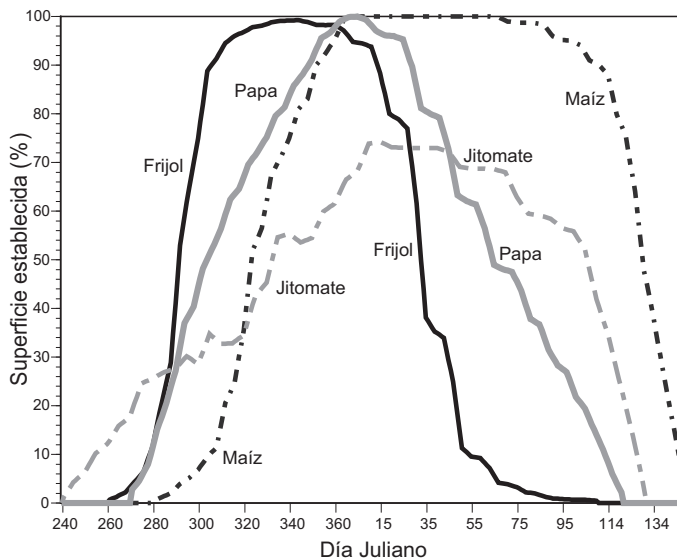
Se consideró el plan de riegos tipo de la zona, que incluye cultivos con fechas y superficies de siembra. Los cultivos más importantes en el DR-075 son maíz, sorgo, frijol, frutales, caña de azúcar, forrajes principalmente alfalfa, y hortalizas (jitomate y papa). La tabla 1 presenta los principales cultivos establecidos en un año agrícola típico con porcentajes respecto de superficie promedio por ciclos agrícolas. El plan de cultivos típico indica que el 11,7% de la superficie tiene cultivos perennes, el 88,3 por ciento son los cultivos de los ciclos anuales, de los cuales el 80% son del ciclo otoño-invierno (OI) y el 20% son segundos cultivos en el ciclo primavera-verano (PV).

**Tabla 1.** Principales cultivos por ciclo agrícola del distrito de riego 075.

**Table 1.** Main crops per agricultural season for Irrigation district 075.

Otoño-Invierno		Primavera-Verano		Perennes	
Frijol	19,5%	Maíz grano	33,8%	Forrajes (alfalfa)	19,8%
Maíz	65,8%	Sorgo grano	64,6%	Caña de azúcar	62,3%
Papa	6,7%	Otros	1,6%	Frutales (mango)	17,9%
Jitomate	4,1%				
Otros	3,9%				

Con base en la información agrícola del comportamiento de los ciclos agrícolas de los últimos diez años agrícolas del módulo Santa Rosa del DR-075, en la figura 2 se presenta la distribución típica de la superficie establecida y su correspondiente superficie cosechada para los cuatro principales cultivos del ciclo otoño-invierno.



**Figura 2.** Distribución de la superficie establecida (%) para cuatro cultivos, ciclo otoño-invierno en el distrito de riego 075.

**Figure 2.** Distribution of established area per crop (%) for fall-winter season at irrigation district 075.

Para el caso del maíz, el periodo de siembra es de principios de octubre a finales de diciembre; el frijol, de finales de septiembre a mediados de noviembre; la papa, de finales de septiembre a finales de diciembre, y el jitomate, de principios de septiembre a finales de diciembre.

Se observa para el cultivo de jitomate que no existe un periodo con toda la superficie establecida ya que este cultivo tiene un amplio periodo de siembra, por lo que las primeras cosechas se presentan todavía en el periodo de siembra. Para el caso de frijol, papa y maíz la siembra termina antes de las primeras cosechas, existiendo un periodo en el cual la superficie establecida de dichos cultivos es del 100% como lo muestra la figura 2 (pág. 184). Se generó la distribución de siembra y cosecha para los ciclos PV y perennes, como las presentadas para el ciclo OI mostrado en la figura 2.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variación en las fechas de siembra de un cultivo durante un ciclo agrícola generó una variedad de curvas de consumo de agua de cada cultivo. Existen grandes variaciones de las necesidades hídricas de los cultivos, como se muestra en la tabla 2 con los valores de  $ET_c$  para trece fechas de siembra típicas para maíz OI en el DR-075. Por ejemplo, para la fecha de siembra del día juliano 245 (inicios de septiembre) se tiene una duración del ciclo de 105 días y una  $ET_c$  de 295 mm año<sup>-1</sup>, se observa que existe un periodo largo de fechas de siembra en el cual se tiene un valor máximo de la evapotranspiración.

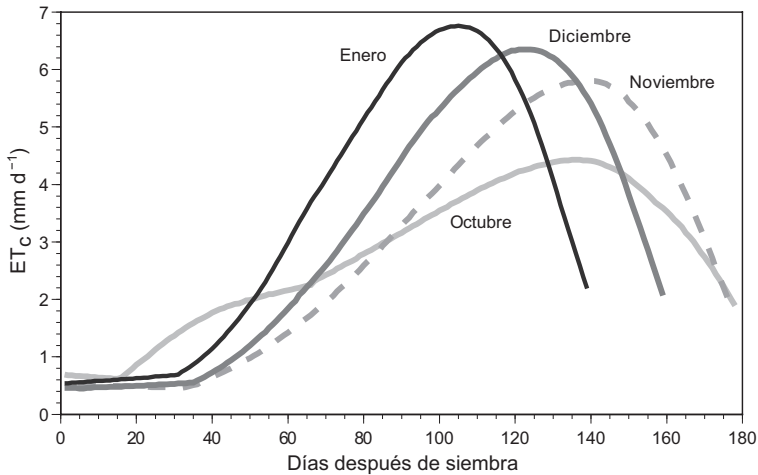
El periodo de siembra que genera la máxima demanda no necesariamente coincide con el periodo de máxima duración del ciclo del cultivo como se presenta en la tabla 2. Se observa que las fechas de siembra de la primera decena de noviembre (periodo juliano 305-314) generan la máxima duración del ciclo de maíz, mientras que la evapotranspiración acumulada es máxima en las siembras de la segunda decena de octubre (periodo juliano 315-324). Para el periodo típico de siembra de maíz OI (20 octubre al 15 de diciembre) se observa una mayor variación en los valores pico de la  $ET_c$  que en los valores acumulados. Los valores máximos de la  $ET_c$  diaria pico se presentan para las siembras tardías del ciclo OI (fines de diciembre) por arriba de 6 mm d<sup>-1</sup>.

**Tabla 2.** Evapotranspiración ( $ET_c$ ) acumulada y pico, y duración ciclo por fecha de siembra para maíz de otoño-invierno en el distrito de riego 075.

**Table 2.** Cumulative and peak evapotranspiration ( $ET_c$ ), and duration of growing season as a function of planting date for fall-winter corn at irrigation district 075.

Mes	Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
Día Fecha Siembra	1	11	21	1	11	21	10	20	30	10	20	30
Día Juliano	245	255	265	275	285	295	305	315	325	335	345	355
$ET_c$ acum (mm)	295	320	345,4	391	434	472,8	497,3	509,8	512,8	511,3	507,7	503,6
$ET_c$ max (mm día <sup>-1</sup> )	4,61	4,20	3,79	3,34	3,37	4,06	4,70	5,19	5,61	5,92	6,14	6,28
Duración días	105	127	146	160	169	177	180	180	178	175	169	163

Para el caso del maíz se identificó la curva de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) para cada una de las varias fechas de siembra de interés en la zona de riego. Como ejemplo, la figura 3 presenta la variación diaria de la  $ET_c$  para cuatro fechas de siembra del periodo de octubre a enero del ciclo OI. Se observa que existe una gran variación diaria en la evapotranspiración de los cultivos ( $ET_c$ ) en función de la fecha de siembra. La máxima demanda diaria para maíz OI corresponde para una fecha de siembra de fines de enero,  $ET_c = 6,8 \text{ mm día}^{-1}$ .



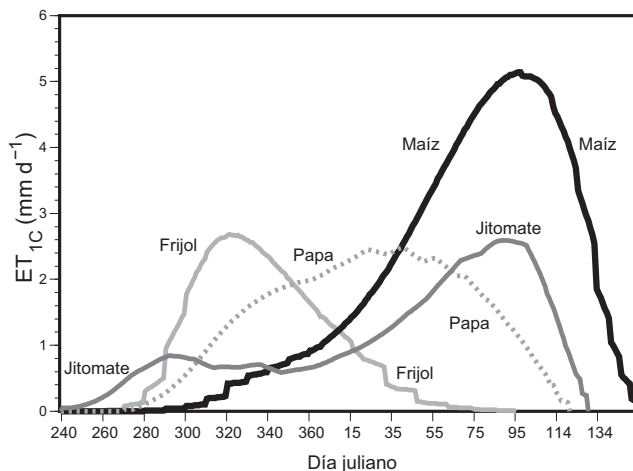
**Figura 3.** Evapotranspiración para cuatro fechas de siembras para maíz de otoño-invierno en el distrito de riego 075.

**Figure 3.** Evapotranspiration for four planting dates for fall-winter corn at irrigation district 075.

Como resultados del paso 2 (pág. 179) en la figura 4 (pág. 187) se presenta la curva integrada  $ET_{1c}$  de las curvas  $ET_c$  para los cuatro principales cultivos en el ciclo OI del DR-075, de acuerdo con la ecuación 3 (pág. 179).

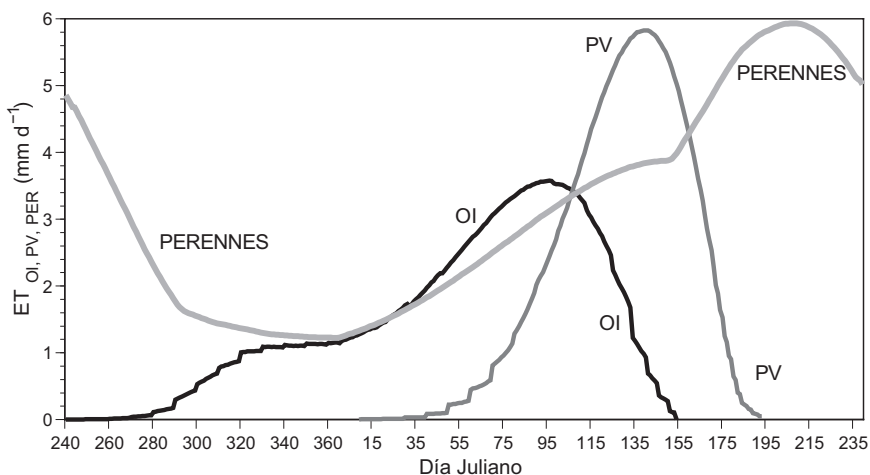
Para el cultivo de maíz, la curva integrada  $ET_{1c}$  se obtuvo a partir de las curvas  $ET_c$  generadas para nueve siembras, como las mostradas en la tabla 2 (pág. 185), con sus respectivas superficies establecidas de acuerdo con el patrón de fechas de siembras y cosechas mostradas en la figura 2 (pág. 184). Existe una gran diferencia de los valores pico y acumulada entre las curvas  $ET_{1c}$  y  $ET_c$  para una fecha de siembra. Para el caso del maíz se obtuvo un valor pico de  $ET_{1c} = 5,0 \text{ mm día}^{-1}$  de acuerdo con la curva integrada mostrada en la figura 4, mientras que los valores de  $ET_c$  variaron de 4,4 a  $6,8 \text{ mm día}^{-1}$ , dependiendo de la fecha de siembra como se muestra en la figura 3.

En la figura 5 (pág. 187) se observan las curvas integradas por ciclo, que indican que los requerimientos de riego diarios máximos para el día 110 es de  $3,54 \text{ mm día}^{-1}$  del periodo del ciclo OI y de  $5,8 \text{ mm día}^{-1}$  en el ciclo PV. Para la penúltima etapa se ha estimado con la metodología propuesta una curva para cada ciclo agrícola de una zona de riego, PV, OI y Perennes.



**Figura 4.** Evapotranspiración integrada para los cultivos de importancia del ciclo otoño-invierno.

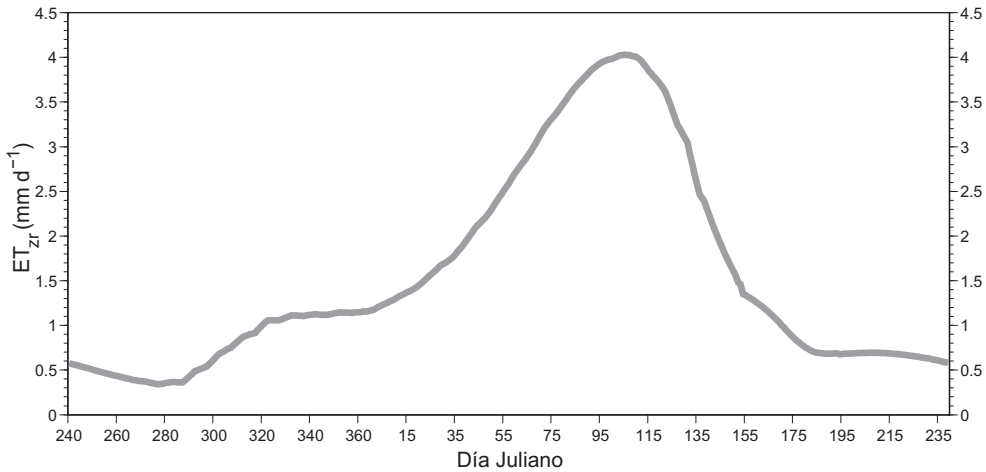
**Figure 4.** Integrated evapotranspiration curve for most important fall-winter crops.



**Figura 5.** Curvas integradas por ciclo ( $ET_{OI}$ ,  $ET_{PV}$  y  $ET_{PER}$ ) para el plan típico de cultivos del distrito de riego 075.

**Figure 5.** Integrated curves per growing season ( $ET_{OI}$ ,  $ET_{PV}$  y  $ET_{PER}$ ) for typical cropping plan at irrigation district 075.

Por último, en la figura 6 (pág. 188) se muestra en forma gráfica la variación diaria de la curva que representa la evapotranspiración integrada de los cultivos de la zona de riego estudiada ( $ET_{ZI}$ ). La obtención de la curva única facilita la detección del periodo de máxima demanda hídrica, que es el insumo para determinar la capacidad de canales de riego, que en el caso analizado  $ET_{ZI}$  fue de  $4,1 \text{ mm día}^{-1}$ .



**Figura 6.** Curva integral de la evapotranspiración de los cultivos de la zona de riego para todo el año agrícola ( $ET_{zr}$ ) en el distrito de riego 075.

**Figure 6.** Integral evapotranspiration curve of the irrigation zone for the water year at the irrigation district 075.

#### **Capacidad del Canal Emilio Grivel por los métodos de Clément y Clemmens**

Aunque existe una variedad de curvas de ET para los cultivos de una zona de riego, se ha identificado hasta aquí el valor único de ET, variable agronómica que es utilizada en la determinación de la capacidad en canales de riego.

La propuesta de innovación tecnológica para estimar la variable es utilizar la evapotranspiración ponderada potencial de todos los cultivos para todas las fechas de siembra y todos los ciclos agrícolas, para lo cual resultó con el valor de  $ET_{zr} = 4,1 \text{ mm día}^{-1}$ .

El gasto determinado con el método de Clément es función del número total de tomas abiertas (N) y del gasto modular de la toma alimentada por el canal ( $Q_i$ ). Se determinó una superficie promedio dominada de 21,17 ha por toma, el gasto promedio por toma ( $Q_i$ ), capacidad alimentada por el canal es de  $120 \text{ l s}^{-1}$ . La eficiencia global reportada por el módulo es de  $E_g = 51,35\%$ . La probabilidad  $P_q$  es de uno por ciento, con el fin de asegurar en un 99% que la red estará libre en el momento que un usuario solicite el servicio de riego, de la ecuación 12 se reemplaza la evapotranspiración, variable agronómica determinada por esta propuesta  $ET_{zr} = 4,1 \text{ mm día}^{-1}$ .

En la tabla 3 se muestran los resultados, se indica el kilometraje del canal a partir del km 0+000 con la correspondiente área dominada, en número de tomas, y por último se muestran los gastos determinados por el método de Clément. Éstos son los gastos propuestos para ser presentados a las autoridades encargadas del programa de modernización del módulo Santa Rosa del distrito de riego 075 (DR-075) localizado en el Valle del Fuerte, al norte del estado de Sinaloa, México, para su evaluación.

**Tabla 3.** Capacidad de diseño (en  $\ell s^{-1}$ ) del canal "Emilio Grivel" con el método de Clément.

**Table 3.** Design capacity (in  $\ell s^{-1}$ ) of "Emilio Grivel" canal with the Clément method.

Kilómetro	Área (ha)	Tomas			Gasto	
		R	p	H( $\mu$ )	( $\mu$ )	$Q_d = \ell s^{-1}$
0+000	27.285	1.289	0.1506	0.1336	1.5232	27.863
6+740	26.752	1.264	0,1506	0,1323	1,5291	27.355
8+344	25.442	1.202	0,1506	0,1290	1,5442	26.104
9+400	25.269	1.194	0,1506	0,1286	1,5462	25.939
10+400	20.770	981	0,1507	0,1166	1,6040	21.627
11+400	20.287	958	0,1507	0,1152	1,6108	21.162
12+400	19.899	940	0,1507	0,1141	1,6164	20.789
13+400	19.599	926	0,1506	0,1132	1,6207	20.500
15+400	19.029	899	0,1506	0,1116	1,6292	19.951
13+350	18.776	887	0,1506	0,1108	1,6331	19.706
18+017	18.001	850	0,1507	0,1085	1,6452	18.958
21+740	11.439	540	0,1508	0,0865	1,7708	12.564
22+740	11.073	523	0,1507	0,0851	1,7795	12.203
23+740	10.907	515	0,1507	0,0845	1,7835	12.039
24+740	2.600	123	0,1504	0,0412	2,1381	3.546
25+740	2.236	106	0,1501	0,0381	2,1724	3.143
26+740	1.679	79	0,1513		2,32	2.550
29+740	1.143	54	0.1506		2.32	1.877

El método de Clemmens (4, 5) propone ecuaciones para determinar la capacidad de conducción de las entregas demanda programada y demanda libre. En la tabla 3 se muestran los resultados de la aplicación con el método de Clemmens: de la columna uno a la tres es lo mismo que en el método de Clément.

Usando los siguientes valores: área de rotación:  $A_t = 27.285$  ha,  $Q_t = 120 \ell s^{-1}$   $Q_u = 0,924 \ell s^{-1}$  por unidad de área,  $E_g = 0,5135$ , de la ecuación 12 (pág. 181) se reemplaza la evapotranspiración, variable agronómica determinada por esta propuesta  $ET_{zr} = 4,1$  m día<sup>-1</sup>.

En la tabla 4 (pág. 190) se muestran los resultados por el método de Clemmens, demanda programada o demanda libre, se anota el kilometraje del canal a partir del km 0+000 con la correspondiente área dominada, número de tomas y por último se muestran los gastos.

Éstos son los gastos propuestos para ser presentados a las autoridades encargadas del programa de modernización del módulo Santa Rosa del distrito de riego 075 (DR-075) localizado en el Valle del Fuerte, al norte del estado de Sinaloa, México, para su evaluación.

**Tabla 4.** Capacidad de diseño (en  $\ell s^{-1}$ ) del Canal Emilio Grivel con el método de Clemmens.**Table 4.** Design capacity ( $\ell s^{-1}$ ) of Emilio Grivel Canal using the Clemmens method.

Kilómetro	Área (ha)	Tomas $R$	$An \geq 1.0$	Demanda programada $Q_n$	Demanda libre $Q_n$	Gasto de diseño $Q_d$	
						programada ( $\ell s^{-1}$ )	libre ( $\ell s^{-1}$ )
0+000	27.285	1.289	210	212	319	25.407	38.242
6+740	26.752	1.264	206	208	313	24.914	37.503
8+344	25.442	1.202	196	198	297	23.703	35.687
9+400	25.269	1.194	195	196	295	23.544	35.447
10+400	20.770	981	160	162	243	19.386	29.211
11+400	20.287	958	156	158	238	18.940	28.541
12+400	19.899	940	153	155	233	18.581	28.004
13+400	19.599	926	151	153	230	18.304	27.588
15+400	19.029	899	147	148	223	17.777	26.798
13+350	18.776	887	145	146	220	17.543	26.447
18+017	18.001	850	139	140	211	16.827	25.373
21+740	11.439	540	88	90	136	10.763	16.276
22+740	11.073	523	85	87	131	10.425	15.769
23+740	10.907	515	84	86	129	10.271	15.539
24+740	2.600	123	20	22	34	2.595	4.024
25+740	2.236	106	17	19	29	2.258	3.519
26+740	1.679	79	13	15	23	1.744	2.747
29+740	1.143	54	9	10	17	1.248	2.004

## CONCLUSIONES

Termina la incertidumbre al asociar el valor de la variable agronómica, evapotranspiración, en la determinación de la capacidad del canal para grandes zonas de riego, por lo que se recomienda utilizar la metodología propuesta.

La conclusión sobre la alternativa de usar días grado acumulado, en lugar de los días después de siembra, permitió realizar un ajuste automático de la fecha de cosecha, la duración del ciclo y fases fenológicas de un cultivo para cada fecha de siembra. Lo anterior facilitó la estimación de la evapotranspiración del cultivo, al determinar el coeficiente de cultivo en función de los días grado acumulado, para cualquier fecha de siembra y condiciones ambientales asociadas.

Con los resultados obtenidos se cumple con el objetivo planteado, ya que se logró acabar con la incertidumbre en la determinación de la variable agronómica evapotranspiración de una zona de riego.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, G. R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Estudio FAO Riego y drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie Cuadernos Técnicos. Roma, Italia. FAO. 298 p.
2. Bhadra, A.; Bandyopadhyay, A.; Singh, R.; Raghuwanshi, N. S. 2009. Integrated reservoir-based canal irrigation model. I: Description. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 135(2): 149-157.
3. Clément, R. 1966. Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande [Discharges computation in an on demand irrigation system]. *La Houille Blanche. Société Hydrotechnique de France*. 20(5): 553-575.
4. Clemmens, A. J. 1986. Canal capacities for demand under surface irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. American Society of Civil Engineers (ASCE). 112(4): 331-347.
5. Clemmens, A. J. 1987. Delivery System Schedules and Required Capacities, Planning, Operation, Rehabilitation and Automation of Irrigation Water Delivery Systems. Symposium Proceedings. New York, USA. ASCE. p. 18-34.
6. Daccache, A.; Lamaddalena, N. 2010. Climate change impact on pressurized irrigation systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Engineering sustainability*. 163(2): 97-105.
7. FAO. 1976. Pequeñas obras hidráulicas. Estudio FAO Riego y drenaje 26-1 y 2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. FAO. 40 p.
8. Íñiguez-Covarrubias, M.; De León, M. B.; Prado, H. J. V.; Rendón, P. L. 2007. Análisis y comparación de tres métodos para determinar la capacidad de conducción de canales, aplicados en el distrito de riego La Begoña. *Ingeniería Hidráulica*. XXII(2): 81-90.
9. Lamaddalena, N.; Sagardoy, J. A. 2000. Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. *FAO Irrigation and Drainage paper N° 59*. Roma, Italy. 132 p.
10. Mainment, D. R.; Hutchinson, P. D. 1983. Modeling water demands of irrigation projects. *Journal of Irrigation and Drainage*. 109(4): 405-418.
11. McMaster, G. S.; Wilhelm, W. W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 87: 291-300.
12. Monserrat, J., R.; Poch, M.; Colomer, A.; Mora, F. 2004. Análisis of Clément's first formula for irrigation distribution networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. 130(2): 99-105.
13. Ojeda-Bustamante, W.; Sifuentes-Ibarra, E.; Unland, H. 2006. Programación integral del riego en maíz. *Agrociencia*. 40(1):13-25.
14. Ojeda-Bustamante, W.; González-Camacho, J. M.; Sifuentes-Ibarra, E.; Pioquinto, I.; Rendón-Pimentel, L. 2007. Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agricultural Water Management*. 89: 81-88.
15. Ojeda-Bustamante, W.; Hernández, L.; Sánchez, I. 2008. Requerimientos de riego de los cultivos. En *Manual para Diseño de Zonas de Riego Pequeñas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor., México, 49 p.
16. Pulido-Calvo I.; Roldán, J.; López-Luque, R.; Gutiérrez-Estrada, C. 2003. Water delivery system planning considering irrigation simultaneity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(4): 247-255.
17. Secretaría de Recursos Hidráulicos (S. R. H.) 1973. Proyecto de Zonas de Riego. Dirección de Proyectos de Grande Irrigación, Departamento de Canales. México, D. F. p. 170-200.