

LA EFICIENCIA GLOBAL Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN: VARIABLES QUE DETERMINAN LA CAPACIDAD DE CANALES DE RIEGO

GLOBAL EFFICIENCY AND EVAPOTRANSPIRATION: MAIN VARIABLES TO SIZE IRRIGATION CANALS

Mauro Iñiguez-Covarrubias^{1*}; Waldo Ojeda-Bustamante¹; Ignacio Sánchez-Cohen²

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac Núm. 8535, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, México. C. P. 62550. Correo-e: mic@tlaloc.imta.mx (*Autor para correspondencia).

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. Gómez Palacio, Durango, México. C. P. 35150

RESUMEN

La capacidad en canales de riego es vital para satisfacer la demanda máxima de los cultivos y para lograr un uso eficiente de los recursos. Las metodologías para la determinación de la capacidad dependen, entre otras, de dos variables: una agronómica, evapotranspiración de los cultivos; y otra hidráulica, la eficiencia global del sistema. En grandes áreas de riego, con un padrón diversificado de cultivos, con diferentes fechas de siembra y varios ciclos agrícolas, no existe un procedimiento integral para estimar la variable agronómica. En este trabajo se desarrolla una metodología para estimar la evapotranspiración integrada para grandes áreas de riego, que se emplea junto con la variable eficiencia global para determinar la capacidad de canales de riego. Esta metodología se aplicó en el módulo de riego Santa Rosa, del Distrito de Riego DR- 075, "Río Fuerte", Sinaloa, México. Aplicando la metodología propuesta se determinó un valor de $4.08 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ para la evapotranspiración integrada de los cultivos a nivel módulo de riego. Con una eficiencia global para diseño del 49 %, se determinó un gasto de $21.70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De acuerdo a los resultados para el gasto de diseño obtenido y las eficiencias utilizadas, se estimaron valores seguros, sin incertidumbre, que proporcionan flexibilidad en la distribución del agua para las condiciones presentadas. Se concluye que la metodología propuesta cumple con el objetivo planteado y es general para cualquier caso.

Palabras clave adicionales: Evapotranspiración, dimensionamiento de canales, requerimientos hídricos.

ABSTRACT

Capacity of irrigation networks is vital to satisfy peak crop's water demands and to improve resource use efficiency. The methods to size canal capacity depend on mainly two variables: one agronomic - crop evapotranspiration - and the other hydraulic -system's global efficiency. However, there is not an integral procedure to estimate the agronomic variable in large irrigation areas with a diversified crop pattern, different planting dates, and several crop seasons. In this paper, a methodology is presented to estimate the integrated evapotranspiration for large irrigation areas that is used to estimate irrigation canal capacity in conjunction with the global efficiency variable. This methodology was applied to the "Santa Rosa" Water Irrigation Association in the 075 Irrigation District located in the state of Sinaloa, Mexico. With the proposed methodology, a value of $4.08 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ was estimated for the integrated evapotranspiration at Water Irrigation Association level. Using a design global efficiency of 49 %, the canal capacity was calculated to be $21.70 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$. Considering estimated design discharge and efficiencies used, the results are comprehensive giving flexibility for water distribution. It is concluded that the proposed methodology fulfills its established objective and can be applicable to other cases.

Additional keywords: Evapotranspiration, Canal sizing, crop water requirements.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura de un sistema de riego de grandes dimensiones consta de una serie de componentes; de éstos, los principales son: a) Obra de toma de la presa de almacenamiento, b) Bocatoma de la presa derivadora, c) Red de canales de conducción y distribución y d) Tomas en el sistema de distribución, desde tomas canal hasta tomas granja donde se entrega el agua a los usuarios. Esta infraestructura es diseñada para cumplir las

condiciones generales de la ingeniería acorde al proyecto del sistema de irrigación para satisfacer la demanda hídrica máxima de los cultivos. Es vital el conocimiento de la evapotranspiración de los cultivos de una zona de riego para lograr un uso eficiente de los recursos y dimensionar en forma óptima la red de canales (Spare *et al.*, 1980). En México los métodos de diseño utilizados para determinar la capacidad de canales son Clement, 1965, Clemmens, 1987 y SRH, 1973.

En años recientes la Gerencia de Distritos de Riego de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México ha realizado varios estudios en los distritos de riego denominados planes directores (IMTA, 2007), y se han detectado una serie de acciones estructurales y no estructurales por emprender con fines de modernizar las zonas de riego del país. Entre las acciones más recurrentes están la rehabilitación y la modernización de la red de canales.

Actualmente, con la aplicación e innovación de herramientas informáticas se generan grandes volúmenes de información de diferentes variables útiles para realizar cálculos numéricos tediosos, como la estimación de los requerimientos de riego generados en grandes zonas de riego, y que son de gran importancia para acoplar las demandas hídricas de los cultivos con la aplicación del riego a través de la infraestructura hidráulica (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011).

Uno de los principales retos actuales de los investigadores relacionados con la gestión de grandes zonas de riego, es realizar de manera eficiente estos cálculos numéricos y generar recomendaciones certeras con la debida oportunidad. Por lo anterior los sistemas de riego se pueden diseñar y operar de forma insuperable como consecuencia de utilizar eficientemente herramientas y metodologías para manejar grandes volúmenes de información generada en las zonas de riego (Ojeda-Bustamante, *et al.*, 2006 y Ojeda-Bustamante, 2008). En este trabajo se presenta una nueva metodología para estimar la variable agronómica, evapotranspiración integrada, para grandes áreas de riego con un padrón diversificado de cultivos, con diferentes fechas de siembra y varios ciclos agrícolas; ésta y la variable eficiencia global son determinantes para calcular la capacidad de canales de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio: La zona de estudio fue 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° 50' y longitud de 109° 5', con una altura promedio de 20 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 g·cm⁻³ y una humedad aprovechable volumétrica del 15 %. La zona se localiza en una región árida al norte del estado de Sinaloa. El periodo de lluvias, principalmente de origen ciclónico, se concentra en los meses de 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 en una programación semanal de riegos. La operación de la obra de cabeza (presa de almacenamiento) es responsabilidad de la autoridad federal, CONAGUA; la red mayor es responsabilidad de la federación de asociaciones civiles de usuarios de riego (ACUR), conocida como SRL, y la responsabilidad en la administración, operación y conservación de la red menor está a cargo de cada ACUR que opera un módulo de riego. Según la

clasificación de los métodos de distribución (Iñiguez *et al.*, 2007), la responsabilidad del control es compartida Usuario-Autoridad (CONAGUA). La frecuencia del riego es programada en cada ACUR; el caudal entregado es limitado por la capacidad de toma granja, con una capacidad promedio de 120 L·s⁻¹, y la duración del riego es programada entre Usuario-AU. Con estas condiciones de funcionamiento, el módulo de riego de estudio reporta una eficiencia global de operación anual del 51.4 %, valor que refleja el método de distribución del agua utilizado en el DR-075. Los usuarios tienen un periodo para solicitar el riego a la ACUR en la semana: el gasto y duración del riego, siendo servido en las siguientes 72 horas después de ser aceptada la solicitud del servicio de riego por la ACUR.

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 12 años agrícolas en el módulo Santa Rosa, que ha sido generada al usarse el Spriter, sistema de pronóstico de riego en tiempo real (Ojeda, 1999). 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 (Ta) en [°C], Humedad relativa (HR) en [%], Velocidad del viento (Vv) en [m·s⁻¹], Radiación solar global (Rs) en [M J·m⁻²·día⁻¹], Precipitación promedio (Pp) en [mm] y Evapotranspiración de referencia (ETo) en [mm·día⁻¹]. En virtud de que la zona de estudio es semiárida, 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. La red de distribución del módulo Santa Rosa es alimentada por el lateral "Canal Emilio Grivel" e inicia en el km 18+430 del Canal principal Valle del Fuerte; de la configuración de la red de canales se destaca que existen 11 secciones de riego que conforman al módulo.

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). El Cuadro 1 presenta los principales cultivos establecidos en el año 2004-2005. El plan de cultivos típico indica que el 11.7 % de la superficie tiene cultivos perennes; el 88.3 % 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).

Las estadísticas de los principales cultivos del módulo Santa Rosa del DR-075 presentadas en el Cuadro 1 son de referencia estadística, y los valores de la lámina de riego fueron con fines de planeación anual. Las estadísticas hidrométricas son primero a nivel de punto de control inicial del módulo; estos valores son tomados de información directa del módulo y son para el agua recibida por el módulo del sistema de presas y no se consideran aportaciones al interior del módulo, como bombeo de pozos profundos y recuperación de agua de los drenes. El volumen total bruto del agua por gravedad proveniente de presas es estimado a nivel módulo y asignado por la CONAGUA de acuerdo al desarrollo del plan de riegos para el año agrícola 2004-2005.

CUADRO 1. Estadística de los principales cultivos del módulo Santa Rosa del DR-075.

Cultivos	Superficie (ha)		Láminas cm neto	Núm. riegos	Volumen millar m ³		Rendimiento t·ha ⁻¹
	regada	cosechada			neto	bruto	
Perennes							
Alfalfa	136	136	67.6	9.2	917	1,068	13.20
Caña	4,146	3,437	132.9	7.4	55,090	64,133	44.74
Frutales	95	38	55.8	2.7	528	614	8.50
Sub-Total	4,376	3,611	129.2	7.4	56,535	65,815	
Otoño-Invierno							
Frijol	3,408	3,408	30.8	2.1	10,485	12,206	2.10
Maíz	10,919	10,919	61.9	4.5	67,610	78,708	10.22
Papa	5,256	5,158	34.0	5.9	17,858	20,789	23.84
Tomate	1,622	1,622	42.1	7.6	6,834	7,956	33.28
Sub-Total	21,205	21,107	48.5	4.8	102,786	119,658	
Primavera-Verano							
Maíz	1,162	1,162	80.4	4.6	9,338	10,871	8.33
Sorgo	4,648	4,648	53.6	4.1	24,914	29,004	6.03
Sub-Total	5,810	5,810	59.0	4.0	34,252	39,875	
Total	31,390	30,527	61.7	5.0	193,573	225,347	

Con base en la información del comportamiento de los ciclos agrícolas de los últimos 10 años agrícolas del módulo Santa Rosa del DR-075, en la Figura 1 se presenta la distribución típica de la superficie establecida y su correspondiente superficie cosechada para los cuatro principales cultivos del ciclo Otoño-Invierno.

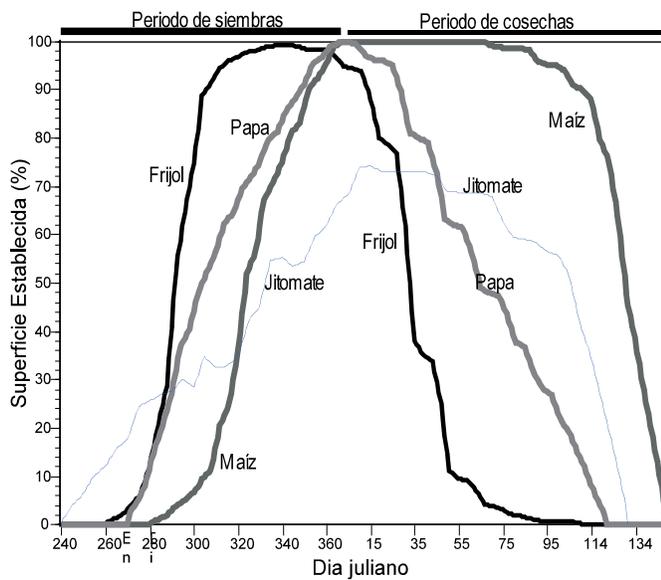


FIGURA 1. Distribución de la superficie establecida (%) para cuatro cultivos, ciclo O-I en el DR 075.

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 presenta 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 periodo de siembra. Para el caso de frijol, papa y maíz la siembra termina antes de las primeras cosechas, existiendo un periodo donde la superficie establecida de dichos cultivos es del 100 %, como lo muestra la Figura 1. Se generaron las curvas de distribución de siembra y cosecha para los ciclos PV y perennes, como las presentadas para el ciclo OI mostrado en la Figura 1.

Estimación de la evapotranspiración de una zona de riego (ET_{zt}) para condiciones actuales. La información necesaria para estimar la variable ET es la siguiente: Climatología histórica y un plan de riegos de la zona que incluye cultivos propuestos con fechas, superficies de siembra y ciclos agrícolas. La propuesta se desarrolla en cuatro pasos.

Paso 1. Se realiza la estimación de la evapotranspiración de referencia y se obtiene la evapotranspiración (ET_c) por cultivo y fecha de siembra (Allen *et al.*, 2006); 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 a las ecuaciones de Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006. En este caso se identifica una curva de la ET_c para cada una de varias fechas de siembra que integran el periodo de siembra en la zona de riego. Se obtienen los valores diarios ET_{c-i} usando las ecuaciones 1 y con los parámetros de los cultivos se estima el coeficiente de cultivo en función de los $^{\circ}D$. La evapotranspiración de un cultivo a partir de la fecha de siembra (FS) a la fecha de cosecha (FC) está dada por la ecuación 1.

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

Donde: K_{c-i} y ET_{o-i} son el coeficiente de cultivo y la evapotranspiración de referencia, respectivamente, para el día i . La ecuación 1 se repite para cada uno de los cultivos de los ciclos perennes, Otoño-Invierno (OI) y segundos cultivos Primavera-Verano (PV). Al final de la determinación de la ET_{c-i} diaria y máxima diaria, se determina el área establecida por día y el valor del volumen diario máximo y el acumulado por cultivo para cada una de las fechas de siembra.

Paso 2. Se genera una curva única que integra la evapotranspiración por cultivo bajo diferentes fechas de siembra, las curvas ET_{c-i} del cultivo se ponderan considerando la superficie sembrada por fecha de siembra (FS) y se obtiene la evapotranspiración ponderada potencial de un cultivo (ET_{1c}) que integra los valores diarios ET_{c-i} 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 del cultivo para una fecha de siembra j estimada para el día i , ponderada por su superficie sembrada de acuerdo a $f_{c-i,j}$; este valor se determina con la ecuación 2.

$$ET_{1c-i} = \sum_{j=1}^{NS} f_{c-i,j} ET_{c-i,j} \quad (2)$$

Donde: j define el cultivo para la fecha de siembra j dada, esto es, para cada día i intervienen varias siembras (NS) para el cultivo bajo análisis; i es el día en el periodo de desarrollo del cultivo bajo análisis que cubre desde el día de la fecha de la primera siembra (PS) hasta el día de la última cosecha (UC), de los NS de los cultivos. NS es el número total de siembras para el cultivo analizado, $f_{c-i,j}$ factor de peso para la superficie sembrada respecto del total para la fecha de siembra j dada por la ecuación 3.

$$f_{c-i,j} = \frac{S_{c-i,j}}{S_{t(1c)-i}} \quad (3)$$

$S_{c-i,j}$ es la superficie establecida para el cultivo analizado con fecha de siembra j . $S_{t(1c)-i}$ es la suma de las superficies establecidas de las diferentes fechas de siembra en el día i del cultivo analizado donde $S_{t(1c)-i} = \sum_{j=1}^{NS} S_{c-i,j}$. Al final en la determinación de ET_{1c-i} diario y con base en los cálculos se determinan los valores del área establecida diaria y con el volumen respectivo.

Paso 3. Se integra la evapotranspiración por ciclo agrícola PV, OI y Perennes, considerando la superficie por cultivo del plan de riegos de la zona. Por ejemplo, para un día i , la evapotranspiración integrada de los cultivos del ciclo OI puede estimarse con la ecuación 4.

$$ET_{ciclo-i} = \sum_{k=1}^{NC} f_{i,k} ET_{1c-i,k} \quad (4)$$

donde: $k=1$ a n_k , NC es el número de cultivos por trabajar de cada ciclo OI, PV y Perennes, i es definido para el día y k el cultivo, $f_{i,k}$ es el factor de ponderación del cultivo i para un ciclo dado de acuerdo a la siguiente relación:

$$f_{i,k} = \frac{S_{c-i,k}}{S_{t-i}} \quad (5)$$

S_{c-i} es la superficie establecida del cultivo k en el ciclo analizado para el día i , S_{t-i} es la superficie total del ciclo analizado en el día i , $S_{t-i} = \sum_{k=1}^{NC} S_{c-k}$. Al final se obtiene el valor de la evapotranspiración integrada para el ciclo analizado. Con el valor de $ET_{ciclo-i}$ se determinan el área establecida y el volumen diario.

Paso 4. Finalmente, se obtiene una curva general integrada diaria 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 $ET_{ciclo-i}$ de cada ciclo, si se tienen tres ciclos agrícolas ($N_{ca}=3$)

$$ET_{zr-i} = \sum_{r=1}^{N_{ca}=3} f_{zr-i,r} ET_{ciclos-i,r} \quad (6)$$

donde: N_{ca} es el número de ciclos por analizar, en nuestro caso OI o PV, PER, en el día i , $f_{zr-i,r}$ es el factor de ponderación del ciclo r para el día i de acuerdo a la siguiente relación:

$$f_{zr-i,r} = \frac{S_{i,r}}{S_{zr-i}} \quad (7)$$

$S_{i,r}$ es la superficie establecida del ciclo r para el día i , S_{zr-i} es la superficie total establecida en el año agrícola analizado para el día i . $S_{zr-i} = \sum_{r=1}^{N_{ca}} S_{i,r}$. N_{ca} es el número de ciclos presentes en el año agrícola. Al final de este paso se obtiene un valor diario integrado ET_{zr-i} de la evapotranspiración de una zona de riego, y asimismo se determinan el área establecida y el volumen diario.

El valor máximo de ET_{zr} de la curva general integral es el que se toma como el valor de la variable evapotranspiración ponderada de una zona de riego. La ET_{zr} diaria se relaciona con el área establecida diaria y el volumen requerido diario por el sistema.

Con fines de diseño y para determinar la capacidad de conducción del canal se aplican las eficiencias de conducción y aplicación reportadas por la SRH, 1973. La eficiencia global η para diseño se estima como $\eta_{Conducción} * \eta_{aplicación}$. Para los canales de tierra la eficiencia global es $\eta=49\%$, para canales revestidos de mampostería la eficiencia global es $\eta=52.5\%$ y para los canales revestidos de concreto la eficiencia global es de $\eta=59.5\%$. La eficiencia de aplicación actualmente varía según la tecnología

aplicada y puede alcanzar un valor de $\eta = 90\%$. La eficiencia de aplicación parcelaria reportada por SRH (SRH, 1973) se considera de $\eta = 70\%$ para riego por gravedad. Los valores de las eficiencias con fines de diseño usados por SRH (SRH, 1973) para la conducción y distribución son de $\eta = 70\%$ para los canales con revestimiento de tierra; para los revestidos de mampostería la eficiencia es de $\eta = 75\%$ y por último para canales revestidos de concreto la eficiencia es de $\eta = 85\%$.

Con la ecuación 8 se relacionan la eficiencia global y la evapotranspiración: variables que determinan la capacidad de canales de riego.

$$Q_d = 115.74 \frac{(ET_{zr} * \text{Hectáreas})}{E_g} \quad (8)$$

Donde: Q_d gasto de diseño ($L \cdot s^{-1}$), ET_{zr} Evapotranspiración integrada, ($mm \cdot día^{-1}$), E_g Eg = Eficiencia global para diseño, 115.74= Coeficiente de transformación a ($L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$), por ser grandes áreas se considera que el servicio de riego es durante las 24 horas del día.

Por la gran cantidad de cálculos involucrados, los algoritmos para estimar la evapotranspiración de los cultivos de una zona de riego de acuerdo a la metodología propuesta fueron programados en lenguaje de programación Java. En virtud de 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 donde la precipitación sea importante en el periodo de máxima demanda de los cultivos, ésta debe ser restada de la evapotranspiración diaria.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan de acuerdo al desarrollo de los cuatro pasos. Se realizó la estimación de la evapotranspiración de referencia y se obtiene la evapotranspiración (ET_c) por cultivo y fecha de siembra de acuerdo a la ecuación 1. En el Cuadro 2 se muestran los resultados acumulados ET_c por fecha de siembra de la ecuación 1 para las nueve fechas de siembra para el cultivo del maíz para el ciclo Otoño-Invierno; se incluye fecha de siembra, día juliano de la siembra, número de siembra y, por último, la ET_c integral de las nueve fechas de siembra con una superficie total de 10,918 ha para el módulo Santa Rosa del DR- 075, en el ciclo agrícola 2004-2005.

En el Cuadro 3 se muestra la ET_c acumulada y ponderada por cultivo y ciclo; incluye todas las fechas de siembra de los principales cultivos del módulo Santa Rosa del DR-075. Se resalta que este resultado no corresponde a las láminas del Cuadro 1, ya que en su momento se comentó que el citado cuadro es con fines internos del módulo.

CUADRO 2. Fechas de siembra cultivos de maíz para el módulo Santa Rosa del DR-075.

Fecha siembra	Día juliano	Número siembra	ET_c acumulado	Superficie por fecha	Factor ponderación	ET_c ponderada
07/10/2004	280	1	42.31	141.94	0.0130	0.55
17/10/2004	290	2	46.09	393.06	0.0360	1.66
27/10/2004	300	3	49.13	535.00	0.0490	2.41
06/11/2004	310	4	50.60	1,484.90	0.1360	6.88
16/11/2004	320	5	51.16	3,450.20	0.3160	16.17
26/11/2004	330	6	51.21	1,703.26	0.1560	7.99
06/12/2004	340	7	51.05	1,233.77	0.1130	5.77
16/12/2004	350	8	50.62	1,135.51	0.1040	5.26
26/12/2004	360	9	50.04	840.71	0.0770	3.85
Total				10,918.36 ha	1.0000	50.54 cm

CUADRO 3. Láminas parcelarias de los principales cultivos del módulo Santa Rosa del DR-075.

Ciclo					
Perennes		Otoño-Invierno		Primavera-Verano	
Cultivo	Lámina (cm)	Cultivo	Lámina (cm)	Cultivo	Lámina (cm)
		Frijol	20.43		
Alfalfa	129.13	Maíz	50.54		
Caña	109.65	Papa	32.27	Maíz	45.26
Frutales	138.96	Tomate	28.25	Sorgo	37.62
Total ponderada del ciclo	110.89	Total ponderada del ciclo	39.47	Total ponderada del ciclo	39.15
Lámina total ponderada del módulo= 49.36 cm					

Resultado de la aplicación de la ecuación 1, inicio de la metodología; en la Figura 2 se muestra la curva de ET_c para el cultivo del maíz con fecha de siembra del 16/12/2004 (siembra número 8) del ciclo OI; se resalta que el volumen máximo demandado es de $70,719.6 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$; el valor de ET_c ($6.2 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$) para el día Juliano 113 fecha del 22/04/2005; la superficie establecida fue de $1,135.51$.

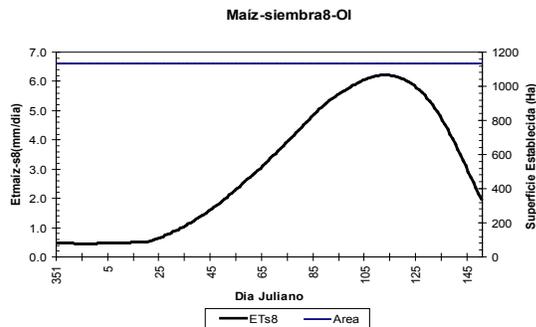


FIGURA 2. Relación ET_c –hectáreas una siembra

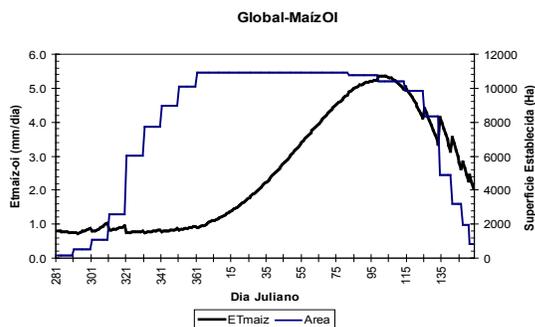


FIGURA 3. Curva ET_{ci} –hectáreas (maíz)

En la Figura 3 se muestra como ejemplo la curva única ET_{ci} –hectáreas para el cultivo del maíz del ciclo OI e integra la evapotranspiración de las diferentes fechas de siembra y se ponderan considerando la superficie sembrada por fecha de siembra, tal como lo indica la ecuación 2. Los valores para el volumen máximo requerido para Maíz del ciclo OI del año agrícola en el módulo Santa Rosa del DR-075, se presentan en el día Juliano 99, con fecha del 09/04/2005, el volumen máximo de $557,134.56 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$; ET_{ci} de ($5.3 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$) y una superficie de $10,383.36 \text{ ha}$.

En la siguiente etapa de la metodología se integra la evapotranspiración por ciclo agrícola, considerando la superficie por cultivo del ciclo PV, OI y Perennes, tal como se indica en la ecuación 3. En la Figura 4 (que corresponde al paso 3) se muestra la curva que integra ET_{1c-i} del ciclo OI. Se destacan los valores para el ciclo OI con el volumen requerido del pico, para el día Juliano 87 con fecha 28/03/2005, un volumen máximo demandado de $672,200.7 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$; $ET_c = (4.9 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1})$ y una superficie de $13,710.8 \text{ ha}$.

Finalmente, se obtiene la curva general integrada de los tres ciclos PV, OI y Perennes para el año agrícola, encontrándose la variable evapotranspiración ponderada de una zona de riego,

tal como se muestra en la Figura 5. El valor pico se presenta el día Juliano 105 con fecha 15/04/2005; día, 231; un volumen máximo de $918,487.63 \text{ (m}^3 \cdot \text{día}^{-1})$; $ET_{zr} = 4.07892 \text{ (mm} \cdot \text{día}^{-1})$ y una superficie (ha) de $22,517.93$.

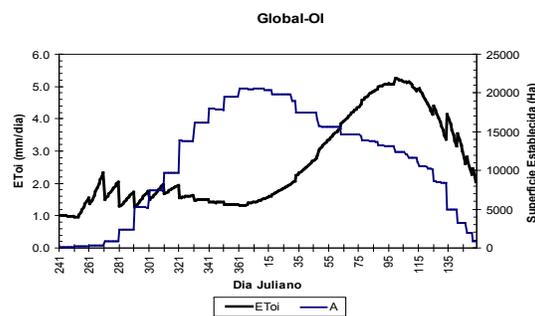


FIGURA 4. Curva $ET_{ciclo-OI}$ –hectáreas

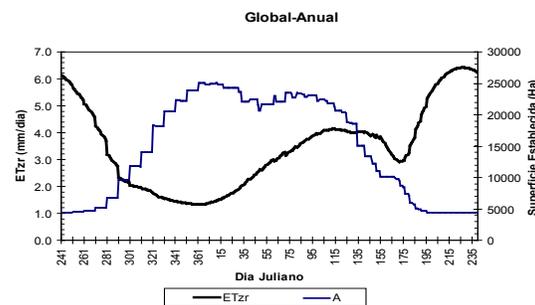


FIGURA 5. Curva ET_{zr} –hectáreas

El la Figura 6 se muestra la curva que integra el volumen diario demandado con eficiencia global del 100 %, esto es la ET_{zr} diaria integrada ciclos multiplicada por las hectáreas establecidas; el valor pico se presenta el día 231 con un volumen máximo de $918,487.63 \text{ (m}^3 \cdot \text{día}^{-1})$, resultado igual al mostrado con las dos curvas de la Figura 5.

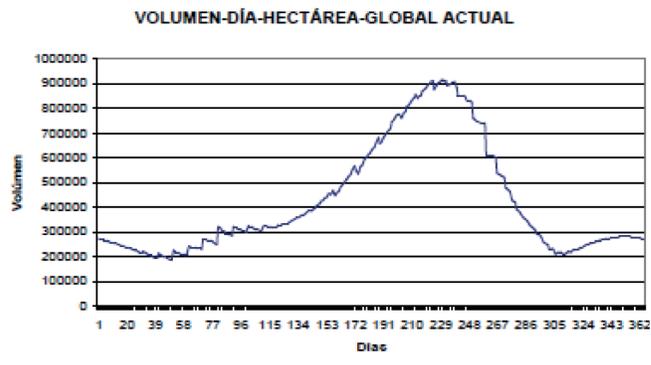


FIGURA 6. Volumen demandado-día

Determinación de la capacidad de canales. Con la aplicación de la ecuación 8 se obtiene el valor del gasto; se emplea con los valores determinados para el volumen máximo necesario; para el caso el valor pico se presenta el día Juliano 105 con fecha 15/04/2005 con la $ET_{zr} = 4.07892 \text{ (mm} \cdot \text{día}^{-1})$ y la superficie

establecida de 22,517.93 ha. La eficiencia global de $\eta = 0.49$ recomendadas para diseño en canales revestidos de tierra (SRH, 1973) y por ser grandes áreas se considera que las horas del servicio de riego son las 24 h del día se obtiene un gasto $21.70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, para una eficiencia global de $\eta = 0.525$ se obtiene un gasto de $20.25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; por último, si variamos la η =eficiencia de 0.595, se estima un gasto de $17.87 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Respecto al volumen programado utilizado bajo el plan de cultivos, la ACUR reporta un volumen bruto programado en punto de control al inicio del módulo de 226,480 millares de m^3 ; el volumen estimado al integrar la curva de la Figura 6 es de 154,544.00 millares de m^3 , esto es, 47 % menor al programado por los usuarios.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología para evaluar la evapotranspiración integrada base para determinar la capacidad en canales de riego, y de acuerdo a los resultados obtenidos no es necesario aplicar algún método tradicional para determinar la capacidad de canales, ya que se tienen valores seguros de gasto, sin incertidumbre, que proporcionan flexibilidad en la distribución del agua para estas condiciones.

El valor del gasto varía desde $21.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $17.87 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ al inicio del módulo, por lo que se considera analizar la conveniencia de revestir o no los canales de la red, ya que el gasto por conducir se refleja en el costo de la infraestructura hidráulica.

Existe la relación de las variables evapotranspiración y las eficiencias globales en la determinación de la capacidad de canales, y puede ser aplicable en cualquier distrito de riego de México.

LITERATURA CITADA

- 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. FAO. Roma, Italia. 298 p.
- Clement, R. 1965. Computation of flow in Irrigation Systems Operating 'On Demand' La Société du canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale, Le Tholonet, 13 December, 1965. Traducción al Inglés por U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, Junio, 1979.
- Clemmens, A. J. 1987. Delivery System Schedules and Required Capacities, Planning, Operation, Rehabilitation and Automation of Irrigation Water Delivery Systems. Symposium Proceedings, ASCE, New York, U.S.A.
- IMTA. 2007. Plan director distrito de riego Rosario Mezquite. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- Iñiguez, C. 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.
- Ojeda-Bustamante, W. 1999. Pronóstico de riego en tiempo real. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- Ojeda-Bustamante, W.; Sifuentes-Ibarra, E.; Unland, H. 2006. Programación integral del riego en maíz. Agrociencia 40: 13-25.
- 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. 1-49 p.
- Ojeda-Bustamante, W.; Sifuentes-Ibarra, E.; Iñiguez C. M.; Montero-M. J. M. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos, Agrociencia 45:1-21.
- Spare, D. P.; Wang, J.; Hagan, E. 1980. Sizing rice irrigation canals. Transaction of the ASAE. 23(4): 914-918.
- S. R. H. 1973. Proyecto de Zonas de Riego. Dirección de Proyectos de Grande Irrigación, Departamento de Canales. México, D. F.