



INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES  
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA  
EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

## CENID-RASPA

# Programa para Calcular las Demandas de Agua y Calendarizar el Riego de los Cultivos



**Dr. Ernesto Alonso Catalán Valencia**  
**Dr. Ignacio Sánchez Cohen**  
**Dra. Magdalena Villa Castorena**  
**Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra**  
**Ing. Segundo Felipe Mendoza Moreno**

ISBN: 970-43-0049-2

Incluye Software

Folleto Técnico 7

Gómez Palacio, Dgo.

Febrero del 2007

# **Programa para Calcular las Demandas de Agua y Calendarizar el Riego de los Cultivos**

Dr. Ernesto Alonso Catalán Valencia

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Dra. Ma. Magdalena Villa Castorena

Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra

Ing. Segundo Felipe Mendoza Moreno

CENID-RASPA

2007

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria  
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento  
Gómez Palacio, Durango. México  
Apdo. Postal 41  
35150 Cd. Lerdo, Dgo.  
Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34  
e-mail: catalan.ernesto@inifap.gob.mx

El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los autores, al CENID-RASPA y al INIFAP.

ISBN: 970-43-0049-2

## Presentación

Uno de los retos más importantes en materia de riego es la recuperación o reducción de pérdidas de agua para elevar los bajos niveles de eficiencia con que operan los distritos de riego. Para superar este reto se requiere no sólo invertir en la operación y mantenimiento de la infraestructura de riego sino también elevar la eficiencia técnica y operativa de sus sistemas. A nivel parcelario destaca la tecnificación de los sistemas de riego como alternativa para incrementar la eficiencia de operación de los distritos de riego.

La tecnificación del riego parcelario implica tanto el refinamiento de técnicas como su transferencia y adopción por el usuario. La generación y refinamiento de técnicas es el aspecto en el que se han tenido los avances más importantes. Sin embargo, la transferencia y adopción de estas técnicas es la etapa donde han ocurrido los mayores rezagos.

La programación de los riegos de los cultivos normalmente se ejecuta sin soporte técnico alguno con base únicamente en la experiencia de los usuarios, razón por la cual se requiere una mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarla de una manera adecuada. El objetivo de este trabajo fue desarrollar una aplicación computacional para que los usuarios de los distritos de riego estimen las demandas de agua de sus cultivos y programen sus riegos de una manera adecuada.

Dr. José Antonio Cueto Wong  
Director del CENID-RASPA



## Contenido

	Pág
INTRODUCCIÓN	1
EL RIEGO EN MÉXICO	2
PROGRAMACIÓN DEL RIEGO	4
MÉTODO DEL BALANCE DE AGUA EN EL SUELO	4
Contenido de humedad del suelo	5
Capacidad de campo	6
Punto de marchitamiento permanente	6
Humedad aprovechable	6
Abatimiento de la humedad aprovechable como criterio de riego	7
Consumo de agua por evapotranspiración	8
Estimación de la evapotranspiración	9
Estimación de la lluvia efectiva y las pérdidas de agua por percolación	11
DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN	11
Interpretación y uso de los calendarios de riego	30
CONCLUSIONES	31
LITERATURA CITADA	32



## **INTRODUCCIÓN**

La actividad agrícola consume más del 80 por ciento del agua total disponible a nivel mundial. En América este valor es de 60 por ciento, donde los sectores doméstico e industrial consumen el 25 y 15 por ciento respectivamente (Fourth World Water Forum, 2006). En México los porcentajes correspondientes son 77, 17 y cinco, con 6.3 millones de hectáreas bajo riego en las que la eficiencia global es menor al 50 por ciento (Sánchez y Catalán, 2006).

La menor disponibilidad de agua observada en las presas del país, producto de los cambios en los patrones de precipitación pluvial de los últimos años, probablemente ha contribuido a que se mantenga o incremente la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos. Así, de los 202 acuíferos en uso del país, 102 se encuentran sobre explotados con tasas de abatimiento anual -en algunos casos- de hasta 3.5 metros por año (Comisión Nacional del Agua, 2004; Sánchez, 2005). Esta situación indica la necesidad de establecer estrategias para ejercer un mayor control en la administración de los recursos hídricos. Entre estas estrategias destaca la tecnificación del riego, la cual implica la incorporación de técnicas y métodos más racionales y cuantitativos que permitan ejercer un mayor control en la ejecución de esta importante práctica agrícola.

La tecnificación del riego plantea tres preguntas básicas: cuánto cuándo y cómo regar los cultivos para obtener máxima eficiencia y productividad del agua. La presente publicación se centra en las dos primeras interrogantes, es decir, en la cuantificación de las demandas

hídricas de los cultivos y la determinación del momento oportuno para la aplicación de los riegos. Las respuestas a estas preguntas constituyen lo que se conoce como el programa o calendario de riegos.

En la programación de los riegos destaca la cuantificación de las necesidades hídricas de los cultivos que tienen su origen en los procesos de evaporación y transpiración. La medición de estos procesos por separado es difícil, por lo que se utiliza el término evapotranspiración para referirse de manera conjunta a la evaporación de agua que ocurre físicamente controlada desde la superficie del suelo y a la que ocurre fisiológicamente controlada desde la superficie de las hojas (FAO, 1977; FAO, 1989).

En esta publicación se describe y distribuye un programa computacional para estimar las demandas de agua y obtener el programa de riegos de los cultivos en los distritos de riego del país. Es una versión independiente para instalarse en cualquier computadora personal que se derivó de la versión original instalada en la página WEB del INIFAP (<http://www.inifap.gob.mx>), seleccionando sucesivamente las opciones «campos experimentales» y «Cenid Raspa» para ejecutarse en línea a través del Internet (Catalán *et al.*, 2005).

## **EL RIEGO EN MÉXICO**

En México la agricultura de riego se practica en los distritos y unidades de riego que cuentan con la infraestructura necesaria para el aprovechamiento de los recursos hídricos. Existen 86 distritos que difieren por sus niveles de tecnificación y aportación al producto interno bruto. Las zonas del país donde se ubican los distritos de riego presentan características contrastantes; por ejemplo, en la zona norte

que cubre más de la mitad del territorio, el escurrimiento superficial es de sólo 20 por ciento. Sin embargo, en esta porción del territorio nacional vive el 76 por ciento de la población total, están establecidas el 70 por ciento de las industrias y se localiza el 40 por ciento de las tierras arables. En contraste, en el sureste, que ocupa el 24 por ciento del territorio, siendo poca la industria, se tiene el 67 por ciento del escurrimiento.

Los problemas asociados con la disponibilidad y aprovechamiento del agua afectan tanto a la agricultura de riego como a la de temporal. De los 6.3 millones de hectáreas bajo riego, sólo 450 mil cuentan con alta tecnificación y el resto opera bajo métodos tradicionales de irrigación con eficiencias no mayores al 50 por ciento (Sánchez *et al.*, 2002). Por su parte, el 68 por ciento de los 14 millones de hectáreas de temporal operan bajo condiciones de riesgo debido a la incertidumbre climática. Otro problema añadido a la disponibilidad del agua es la salinidad de los suelos, habiendo en el país 400 mil hectáreas bajo esta condición (Sánchez, 2005). La Figura 1 señala la distribución del déficit evapotranspirativo en el territorio nacional.

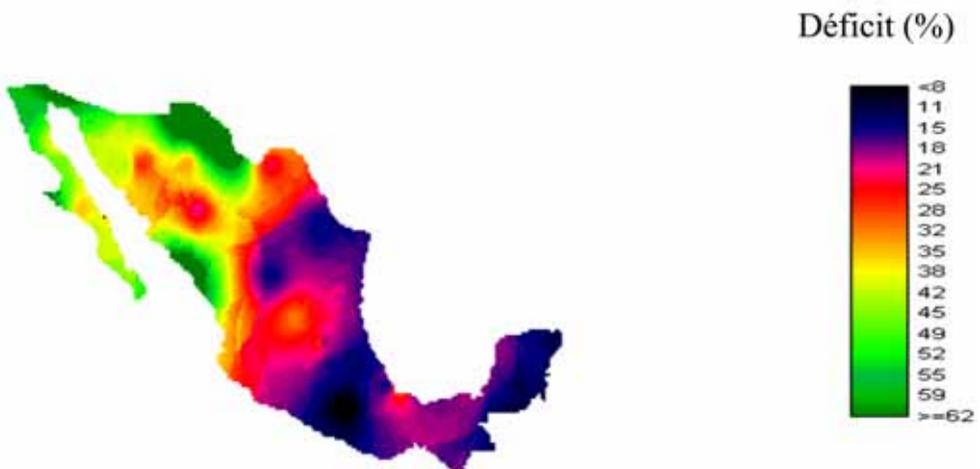


Figura 1. Déficit evapotranspirativo en México. Fuente: Sánchez *et al.* (2006).

## **PROGRAMACIÓN DEL RIEGO**

La programación del riego es un proceso de decisión orientado a determinar las cantidades de agua por aplicar y las fechas de aplicación de cada riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. Con la programación adecuada del riego se pueden lograr objetivos múltiples como ahorrar agua, disminuir costos por ahorro de energía y mano de obra, minimizar estrés hídrico y maximizar rendimiento, así como maximizar calidad, rentabilidad o ingreso.

Los métodos más utilizados para realizar la programación del riego son de dos tipos: los que se basan en la medición y monitoreo, en el suelo o las plantas, de algunas variables relacionadas con el estrés hídrico del cultivo, y los que se basan en el balance de la humedad en el suelo. Los métodos del primer tipo se apoyan en el uso de sensores para medir variables como el contenido de humedad, tensión de humedad y resistencia eléctrica del suelo, o bien, temperatura del follaje (Martin *et al.*, 1990). Por su parte, el método del balance de la humedad en el suelo se basa en la estimación de las entradas y salidas de agua en el perfil del suelo ocupado por las raíces del cultivo. Los principales cálculos de la presente aplicación computacional tienen que ver con la estimación de los componentes del balance de agua en el suelo.

### **MÉTODO DEL BALANCE DE AGUA EN EL SUELO**

Consiste en realizar un balance, a través del tiempo, de la cantidad de agua presente en el perfil del suelo ocupado por las raíces del cultivo. De acuerdo con el principio de conservación de la masa, la

cantidad de agua que entra menos la que sale en un período de tiempo determinado es igual al cambio de almacenamiento de agua que experimenta el perfil del suelo en dicho período de tiempo:

$$\Delta\theta = R + P - E_{Tr} - D \quad 1$$

donde:  $\Delta\theta$  es el cambio del contenido de agua en el suelo durante el período de tiempo considerado, R la cantidad de agua aplicada con el riego, P la precipitación pluvial o lluvia,  $E_{Tr}$  la evapotranspiración o consumo de agua y D es el drenaje o percolación profunda..

Cada término de la ecuación anterior debe cuantificarse en las escalas de tiempo y espacio adecuadas. La escala espacial es el volumen de control limitado por la profundidad del suelo explorada por las raíces del cultivo, y la escala del tiempo es variable, siendo la escala diaria la utilizada en la mayoría de los esquemas planteados para resolver la Ec. (1) (Fox *et al.*, 1994; Ojeda *et al.*, 1999; Catalán, 2002).

### **Cotenido de humedad del suelo**

El agua de riego que se aplica al cultivo se infiltra en el suelo saturando la capa superficial del mismo desde donde se transmite y redistribuye hacia capas subsuperficiales hasta que una parte del agua drena del perfil del suelo ocupado por las raíces. La velocidad de este movimiento depende de las propiedades hidráulicas del suelo las cuales se relacionan con la textura, siendo mayor en suelos ligeros de textura arenosa que en suelos pesados de textura arcillosa. Como consecuencia de este movimiento y del consumo de agua por evapotranspiración, el contenido de humedad en el suelo disminuye con el tiempo.

## **Capacidad de campo**

Con la aplicación del riego no se busca saturar el perfil del suelo sino elevar su contenido de humedad hasta un nivel óptimo para el cultivo conocido como capacidad de campo ( $\theta_{CC}$ ). Este se define como la cantidad máxima de agua que el suelo puede retener contra la fuerza de gravedad, después de haber sido saturado y en ausencia de evaporación directa, condición que se logra en un período de 3 a 10 días dependiendo del tipo de suelo y su capacidad para retener el agua. En términos prácticos,  $\theta_{CC}$  se refiere al contenido de humedad que se logra en el suelo después de que el movimiento descendente o drenaje del agua ha disminuido hasta un nivel que podría considerarse como una pérdida de agua mínima o despreciable.

## **Punto de marchitamiento permanente**

El riego debe aplicarse antes de que la humedad disponible en el suelo se agote por completo. Para esto se toma como referencia un contenido de humedad mínimo permisible para las plantas conocido como punto de marchitamiento permanente ( $\theta_{PMP}$ ). Bajo este contenido de humedad, ciertas plantas o cultivos indicadores son incapaces de recuperar su turgencia, aun después de colocarse en una atmósfera saturada por un período de 12 horas.

## **Humedad aprovechable**

Al rango de humedad comprendido entre  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$  se le conoce como humedad aprovechable (HA) máxima para las plantas y se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener el perfil del suelo ocupado por las raíces de las plantas ( $Pr$ ). Regularmente se estima como una lámina o espesor de agua:

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP})Pr \quad 2$$

donde  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$  se expresan en  $m^3$  de agua por  $m^3$  de suelo, HA y Pr en metros. El Cuadro 1 muestra valores promedio del contenido de humedad a saturación ( $\theta_S$ ),  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$  y HA para cada tipo de textura y a un metro de profundidad del suelo, los cuales fueron derivados de Saxton *et al.* (1986).

**Cuadro 1. Constantes de humedad por tipo de suelo.**

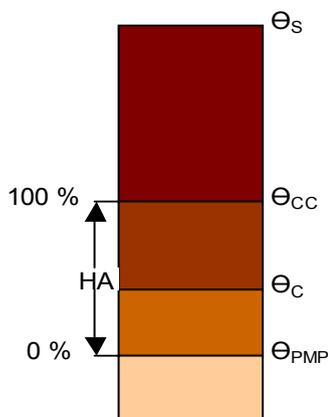
Textura	$\theta_S$	$\theta_{CC}$	$\theta_{PMP}$	HA
Arenosa	0.3545	0.1280	0.0567	0.0714
Areno francosa	0.3878	0.1598	0.0764	0.0834
Franco arenosa	0.4697	0.2522	0.1740	0.0782
Franca	0.4617	0.2540	0.1180	0.1360
Franco arcillo arenosa	0.4784	0.2676	0.1724	0.0952
Franco arcillosa	0.5018	0.3215	0.1838	0.1377
Franco arcillo limosa	0.5203	0.3648	0.1941	0.1707
Franco limosa	0.4676	0.2857	0.1062	0.1794
Arcillo arenosa	0.5052	0.3333	0.2419	0.0914
Arcillo limosa	0.5422	0.4403	0.2786	0.1617
Arcillosa	0.5566	0.5359	0.4127	0.1232
Limosa	0.4154	0.3154	0.0962	0.2192

### Abatimiento de la humedad aprovechable como criterio de riego

La aplicación de un riego se realiza cuando el contenido de humedad del suelo disminuye hasta un valor crítico ( $\theta_c$ ) que determina el grado de estrés hídrico máximo al que se somete el cultivo. Por lo regular, este valor se estima en la escala de la humedad aprovechable, donde  $\theta_{PMP}$  y  $\theta_{CC}$  representan el cero y 100 por ciento de HA respectivamente (Fig. 2). Se utiliza una fracción o porcentaje de abatimiento máximo de la humedad aprovechable FAM:

$$\theta_c = \theta_{CC} - \frac{FAM}{100} (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad 3$$

donde FAM se expresa en por ciento y el resto de los términos han sido previamente definidos.



**Figura 2. Representación gráfica de la humedad aprovechable del suelo.**

El contenido de agua del suelo en un día particular,  $\theta_i$ , se estima con base en el contenido de agua del día previo,  $\theta_{i-1}$ , y el resto de los términos de la Ec. (1) estimados para el día actual:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + R_i + P_i - ETr_i - D_i \quad 4$$

luego se compara  $\theta_i$  con  $\theta_c$  para decidir si se aplica un riego o no. Si  $\theta_i$  es menor que  $\theta_c$ , entonces el cultivo debe regarse el día siguiente, si no, se actualizan cada uno de los términos de la Ec. (4) para el día siguiente y se compara nuevamente  $\theta_i$  con  $\theta_c$ . La cantidad de agua por aplicar  $R$ , comúnmente denominada como la lámina de riego ( $L_r$ ), puede calcularse como el producto de  $H_a$  y  $FAM$ , o bien como:

$$L_r = (\theta_{CC} - \theta_c) Pr \quad 5$$

### **Consumo de agua por evapotranspiración**

El agua es un elemento esencial para el desarrollo de los procesos fisiológicos de todas las plantas. Constituye el medio primario para las reacciones químicas y el movimiento de sustancias a través de las diversas partes de la planta. Es un elemento vital en la fotosíntesis

(asimilación de la luz solar para el desarrollo de reacciones químicas) y el metabolismo incluyendo la división y crecimiento de células. También constituye el medio por el que las plantas se mantienen frescas a través del proceso de transpiración.

El agua de riego se consume tanto por la evaporación que ocurre desde la superficie del suelo como la que ocurre por transpiración desde la superficie de las hojas y que ha sido previamente absorbida por las raíces de la planta. Ante la dificultad de medir por separado la evaporación y la transpiración, se utiliza el término evapotranspiración (ETr) para referirse de manera conjunta a ambos tipos de flujo de agua (FAO, 1989).

La cantidad de agua consumida por un cultivo durante todo su ciclo se relaciona directamente con su rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1996). El valor de ETr en un momento dado depende de factores climatológicos como la temperatura y humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento. Depende también de la etapa o grado de desarrollo en que se encuentre el cultivo y de algunos mecanismos fisiológicos que controlan la respuesta de las plantas al cambio de las condiciones ambientales (Catalán *et al.*, 2004).

### **Estimación de la evapotranspiración**

Existen varios métodos para estimar ETr tanto de manera directa como indirecta. La medición directa se basa en el uso de instrumentos como los lisímetros para monitorear los cambios en el contenido de humedad del suelo a través del tiempo. Los métodos indirectos utilizan fórmulas físico-empíricas que requieren datos de clima y del cultivo y que varían en precisión dependiendo del enfoque de aproximación y del tipo y número de variables involucradas (Sánchez *et al.*, 2006).

En este caso se utilizó un método indirecto para calcular ETr con base en la estimación previa de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ):

$$ETr = K_c K_s ET_0 \quad 6$$

Donde:  $ET_0$  es la evapotranspiración potencial de un cultivo de referencia, alfalfa o pasto, bien irrigado sin limitaciones de agua (Allen *et al.*, 1990; Jensen *et al.*, 1990). La  $ET_0$  se estima con el método original de Hargreaves (1974), modificado posteriormente por Hargreaves y Samani (1982), el cual requiere de la latitud del lugar y de datos diarios de temperatura del aire (temperaturas máxima y mínima).

El parámetro  $K_c$  es un coeficiente adimensional empírico propio de cada cultivo, un determinado estado de crecimiento y una condición particular de la humedad del suelo. Indica la capacidad relativa de la superficie del suelo y cultivo específicos para igualar la demanda evaporativa de la superficie del suelo y cultivo de referencia bajo las mismas condiciones climáticas (Jensen *et al.*, 1990). Sus valores se obtienen de una curva específica de  $K_c$  para cada cultivo que describe la variación de este coeficiente a través de la estación de crecimiento del cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1977). Al producto  $K_c * ET_0$  también se le conoce como evapotranspiración máxima del cultivo, restringida únicamente por las condiciones ambientales del lugar.

El parámetro  $K_s$  es un factor adimensional que indica la disminución del consumo de agua máximo del cultivo debido al abatimiento de la humedad del suelo y a la resistencia al flujo de agua que ésta provoca. Refleja además el manejo del riego por parte del usuario, ya que a mayor espaciamiento entre riegos su efecto restrictivo sobre el consumo de agua es mayor.

## **Estimación de la lluvia efectiva y las pérdidas de agua por percolación**

El término precipitación ( $P$ ) de la Ec. (1) se estima como lluvia efectiva, ya que una parte de la lluvia se pierde por evaporación o escurrimiento y no se encuentra disponible para las plantas. Debido a la complejidad de estos procesos, la lluvia efectiva se estima mediante funciones empíricas derivadas de análisis estadísticos. Por su parte, las pérdidas de agua por drenaje o percolación profunda ( $D$ ) ocurren cuando la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil del suelo es rebasada, o sea, cuando  $P - E_{Tr}$  es mayor que  $HA$ .

### **DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN**

Los cálculos principales realizados en la aplicación fueron descritos de manera general en la sección precedente. En esta sección se describen los pasos para ejecutar la aplicación, es decir, el orden con que deben ingresarse los datos de entrada, así como las salidas proporcionadas por la aplicación. La primer pantalla corresponde a la presentación, la cual muestra el objetivo de la aplicación, instrucciones para visualizar ayudas sobre algunos conceptos y las variables de entrada, así como la lista de autores, que se visualiza pulsando el ícono *i* (Figura 3).

La primer pantalla de captura de datos solicita información general como la entidad federativa, el distrito de riego y el cultivo (Figura 4). Cuando se selecciona un estado, el sistema despliega los distritos de riego existentes en el estado; posteriormente, cuando se selecciona un distrito de riego, la base de datos del clima de ese distrito es consultada y retenida para realizar los cálculos posteriores. El Cuadro 2 lista los distritos de riego considerados en la aplicación. El Cuadro 3 muestra la lista de cultivos considerados; una vez que se selecciona el cultivo,

la aplicación propone una fecha de siembra y una duración de su ciclo vegetativo desde la siembra o establecimiento hasta la madurez fisiológica, datos que el usuario puede cambiar.

**Cuadro 2. Distritos de riego incluidos en la aplicación.**

Estado	No.	Nombre	Estado	No.	Nombre	Estado	No.	Nombre
Ags	1	Pabellón	Hgo	8	Meztitlán	Sin	10	Culiacán
Bc	14	Rio Colorado	Hgo	28	Tulancingo	Sin	63	Guasave
Bcs	66	Santo Domingo	Hgo	100	Alfajayucan	Sin	74	Mocorito
Cam	81	Campeche	Jal	13	Jalisco	Sin	75	Rio Fuerte
Coah	6	Palestina	Jal	93	Tomatlán	Sin	76	El Carrizo
Coah/Dgo	17	La Laguna	Jal	94	Jalisco Sur	Slp	49	Rioverde
Col	53	Colima	Mex	33	Edo México	Son	18	Colonias Yaquis
Chi	5	Delicias	Mex	44	Jilotepec	Son	37	Altar
Chi	9	Juárez	Mex	73	La Concepción	Son	38	Rio Mayo
Chi	42	Buenaventura	Mex	88	Chiconautla	Son	41	Rio Yaqui
Chi	83	Papigochic	Mex	96	Arroyo Zarco	Son	51	Hermosillo
Chi	89	El Carmen	Mich	20	Morelia	Son	84	Guaymas
Chi	90	Bajo conchos	Mich	24	Chapala	Tam	25	Bajo Río Bravo
Chi	103	Rio Florido	Mich	45	Tuxpan	Tam	26	Río San Juan
Chs	46	Suchiate	Mich	61	Zamora	Tam	29	Xicotencatl
Chs	59	Rio Blanco	Mich	87	Rosario	Tam	39	Rio Frío
Chs	101	Custepeques	Mich	97	Cárdenas	Tam	50	Acuña
Chs	107	San Gregorio	Mich	98	Morelos	Tam	86	Sotolamarina
Dgo	52	Durango	Mich	99	La Magdalena	Tam	92.2	Ánimas
Gro	57	Cutzamala	Mor	16	Edo Morelos	Tlx	56	Atoyac
Gro	68	Tepecuacuico	Nay	43	Nayarit	Ver	92.1	Rio Pánuco
Gro	95	Atoyac	Nl	4	Don Martín	Ver	35	La antigua
Gro	104	Cuajinicuila	Nl	31	Las Lajas	Ver	60	El Higo
Gro	105	Nexpa	Oax	19	Tehuantepec	Ver	82	Rio Blanco
Gto	11	Rio Lerma	Pue	30	Valsequillo	Yuc	48	Ticul
Gto	85	La Begoña	Qr	102	Rio Hondo	Zac	34	Zacatecas
Hgo	3	Tula	Qro	23	San Juan del Río			

INIFAP - CENID - RASPA - DRiego 1.0 ...

**inifap** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

**CENID-RASPA** CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES EN SISTEMAS DE RIEGO

LABORATORIO NACIONAL DE MODELAJE Y SENSORES REMOTOS

CONACYT

COFUPRO

**DRiego Ver. 1.0**

## Bienvenid@.

El objetivo de ésta aplicación, es proveer de información básica a usuarios del riego: técnicos e investigadores, sobre las demandas de agua y programación del riego para diferentes cultivos en los distritos de riego del País. El algoritmo utiliza un método que se fundamenta en las temperaturas máximas y mínimas, precipitación y radiación solar para calcular las demandas, así, propone un calendario de riego en función de la información proporcionada. Este calendario de riego es producto de un balance del agua en el suelo y de la información climática promedio de los últimos 20 años en cada distrito de riego por lo que constituye una guía y deberá ser ajustado acorde a la operación del sistema productivo que se trate. El método también arroja las demandas diarias lo cual es una información imprescindible para la calendarización del riego en sistemas de riego presurizados o esquemas de ferti riego.

Para obtener ayuda, de doble clic sobre las etiquetas de los campos en color azul.

Siguiete

Salir

Bienvenid@ a DRiego Ver. 1.0...

Figura 3. Pantalla de presentación.

**INIFAP - CENID - RASPA - DRiego 1.0 ...**

**inifap** **CENID-RASPA** **DRiego Ver. 1.0**

Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos  
CONACYT  
CO-FUJAPRO

**1 Proporcione información general sobre su cultivo.**

1.1. Selección su Entidad Federativa:

1.2. Selección su distrito de Riego:

1.3. Selección el cultivo:

1.4 Proporcione la fecha de Siembra (mes/día):

1.5. Ciclo vegetativo (siembra-madurez):

Atras Siguiete Salir

Posicione el mouse sobre el nombre de los campos para obtener ayuda...

Figura 4. Pantalla de información general.

Cuadro 3. Cultivos considerados en el programa.

<b>Cultivos anuales</b>					
Ajo	Berenjena	Cebada	Fresa	Lenteja	Repollo
Ajonjolí	Betabel	Cebolla	Frijol	Maíz	Sandía
Algodón	Brocoli	Centeno	Garbanzo	Melón	Sorgo
Alpiste	Cacahuate	Chícharo	Girasol	Nabo	Soya
Apio	Calabaza	Chile	Haba	Papa	Tomate
Arroz	Camote	Coliflor	Jícama	Pepino	Trigo
Avena	Cártamo	Espinaca	Lechuga	Rábano	Zanahoria
<b>Cultivos perennes</b>					
Aguacate	Limonero	Naranja	Palma coco	Pera	Toronja
Alfalfa	Mandarina	Nogal	Papaya	Pistacho	Vid
Caña	Mango	Olivo	Pasto	Plátano	
Durazno	Manzano	Palma dátitera			

La pantalla de captura número dos solicita la información que determina la capacidad de retención de agua por el suelo (Figura 5). El programa da al usuario tres posibles opciones para determinar los valores de  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$ , dependiendo de la información disponible. Se pueden proporcionar datos representativos de todo el perfil del suelo para lo cual se llena sólo una línea o bien, de un máximo de cuatro estratos o profundidades distintas con diferentes valores de  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$ . El programa proporciona una profundidad promedio de raíces para cada cultivo, misma que el usuario puede modificar. Para facilitar el uso de la aplicación, el usuario puede acceder a textos de ayuda sobre las variables de entrada dando doble clic a las etiquetas marcadas en azul.

Opción 1: Si se conocen, proporcionar los valores de  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$  (Figura 5).

Opción 2: Si no conocen  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$ , proporcionar los contenidos de arena, arcilla y materia orgánica del suelo. El programa luego ejecuta una subrutina para estimar indirectamente  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$  a partir de dichos datos y las funciones desarrolladas por Rawls y Brakensiek, (1982), (Figura 6).

Opción 3: Si no se conoce la información solicitada en las dos opciones anteriores, proporcionar la categoría o clasificación del suelo por textura (Cuadro 4). El programa luego asume valores típicos de  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$  de acuerdo a la textura del suelo (Catalán *et al.*, 2006) (Figura 7).

**Cuadro 4. Clasificación de los suelos por textura (USDA, 1952).**

Arenoso	Franco	Franco arcilloso	Arcillo limoso
Arcilloso	Areno francoso	Franco limoso	Franco arcillo arenoso
Limoso	Franco arenoso	Arcillo arenoso	Franco arcillo limoso

INIFAP - CENID - RASPA - DRiego 1.0 ...

**inifap** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

**CENID-RASPA**

**DRiego Ver. 1.0**

Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos

CONACYT

COFUPRO

INIFAP

## 2 Proponga información sobre su tipo de suelo.

2.1. ¿Qué información tiene del suelo?

- Constantes de Humedad [CC y PMP]
- Contenido de Arena, Arcilla y Materia Orgánica.
- Textura del Suelo.

2.2. Tecle la información sobre su tipo de suelo:

Estratos	Profundidad (cm)	CC (%)	PMP (%)
1	100		
2			
3			
4			

2.3. Tipo de Siembra:

De Doble Clic sobre los campos de color AZUL para obtener ayuda...

Figura 5. Primera opción para los datos del suelo.

INIFAP - CIMID - RASPA - DRiego 1.0 ...

**inifap**

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

**CENID-RASPA**

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

**DRiego**

Ver. 1.0

Laboratorio Nacional de Modelado y Sensores Remotos

CONACYT

COE-UPRO

?

X

## 2 Proporcione información sobre su tipo de suelo.

2.1. ¿Qué información tiene del suelo?

- Constantes de Humedad (CC y PMP)
- Contenido de Arena, Arcilla y Materia Orgánica
- Textura del Suelo.

2.2. Tecle la información sobre su tipo de suelo:

Estratos	Prof. (cm)	Arena (%)	Arcilla (%)	Mat. Org. (%)
1	100			
2				
3				
4				

2.3. Tipo de Siembra:

De Doble Clic sobre los campos de color AZUL para obtener ayuda...

Salir



Figura 6. Segunda opción para los datos del suelo.

INIFAP - CENID - RASPA - DRiego 1.0 ...

**inifap**

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

**CENID-RASPA**

CONACYT

COFLUPRO

Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos

**DRiego**

Ver. 1.0

?

X

## 2 Proporcione información sobre su tipo de suelo.

2.1. ¿Qué información tiene del suelo?

- Constantes de Humedad (CC y PMP)
- Contenido de Arena, Arcilla y Materia Orgánica.
- Textura del Suelo.

2.2. Tecle la información sobre su tipo de suelo:

Estratos	Prof. (cm)	Textura
1	100	Franco
2		
3		
4		

2.3. Tipo de Siembra:



←

Antes

→

Siguiente

⏸

Salir

De Doble Clic: sobre los campos de color AZUL, para obtener ayuda...

Figura 7. Tercera opción para los datos del suelo.

El campo «tipo de siembra» tiene dos opciones, «en seco» para el caso en que el primer riego se aplica después de la siembra o trasplante y «en húmedo» para cuando se aplica primero un riego de presiembra y luego se siembra en húmedo algunos días después.

La pantalla de captura número tres (Figura 8) solicita la fracción de abatimiento máximo de la humedad aprovechable del suelo (FAM). El programa propone un valor promedio recomendado para todo el ciclo vegetativo del cultivo seleccionado. El usuario puede modificar este valor y fraccionar el ciclo vegetativo en un máximo de cuatro etapas de diferente duración y valor de FAM en cada una de ellas. Esto permite considerar períodos de mayor sensibilidad al estrés hídrico por parte del cultivo a través de su ciclo vegetativo. En general, no se recomienda dejar abatir la humedad aprovechable del suelo más del 80 por ciento, es decir, se tiene que reponer humedad mediante el riego antes de que este valor ocurra. Valores de FAM menores a los propuestos producen riegos más frecuentes (mayor número de riegos), láminas de riego menores y menor estrés hídrico. Lo contrario ocurrirá con valores de FAM mayores.

El campo «humedad aprovechable inicial» (HAI) se refiere al contenido de humedad del suelo previo al establecimiento del cultivo ( $\theta_0$ ), expresado como un porcentaje de la humedad aprovechable máxima (HA). El programa propone un valor de cero para indicar que el suelo se encuentra sin reservas de agua aprovechable por el cultivo, es decir, a un contenido de humedad igual al punto de marchitamiento permanente (PMP). En regiones del sureste del país, donde se aprovechan las lluvias de verano, el suelo suele estar a un contenido de humedad entre PMP ( $\theta_{PMP}$ ) y capacidad de campo ( $\theta_{CC}$ ), es decir a un valor de HAI entre cero y 100 por ciento, lo cual permite atrasar la aplicación de los riegos y ahorrar agua:

INIFAP - CENID - RASPA - DRiego 1.0 ...
?
X



**inifap**  
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

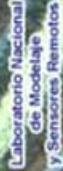


**CENID-RASPA**



**DRiego**  
Ver. 1.0





## 3 Denos a conocer las etapas de su cultivo.

3.1. Teclee las etapas del cultivo:

Etapa	Duración (días)	Abalmeamiento (%)
1	150	65
2		
3		
4		

3.2. Humedad Aprovechable Inicial:





De Doble Clic sobre los campos de color AZUL, para obtener ayuda...





Terminar



Salir

Figura 8. Pantalla de captura de datos número tres.

$$\text{HAI} = \frac{(\theta_0 - \theta_{\text{PMP}})}{(\theta_{\text{CC}} - \theta_{\text{PMP}})} \times 100 \quad 7$$

El botón «atrás» permite regresar y modificar los datos de las pantallas previas. El botón «terminar» ejecuta o corre el programa para los datos de entrada capturados, y el botón «salir» detiene el programa y da la salida al sistema. Después de aplicar el botón «terminar», el programa despliega una pantalla con un menú de resultados (Figura 9).

El primer botón del menú de resultados despliega el calendario de riego que incluye el número de riegos, fechas de aplicación, intervalos entre riegos y láminas de riego. La Figura 10 muestra la pantalla que despliega el calendario de riegos resultante para el algodón de acuerdo a los datos proporcionados en las pantallas de captura descritas. La pantalla muestra algunas herramientas para visualizar, imprimir o guardar en un archivo el calendario de riegos, así como un botón para regresar al menú de resultados.

El segundo botón del menú de resultados despliega datos del clima y algunos componentes del balance del agua en el suelo a nivel diario (Figura 11). De estos últimos destacan la evapotranspiración máxima y real por día y acumulados, la lluvia efectiva y el déficit de la humedad aprovechable del suelo. La definición de cada variable y sus unidades pueden visualizarse dando doble clic en las etiquetas de ayuda marcadas en color azul, mismas que se transcriben enseguida:

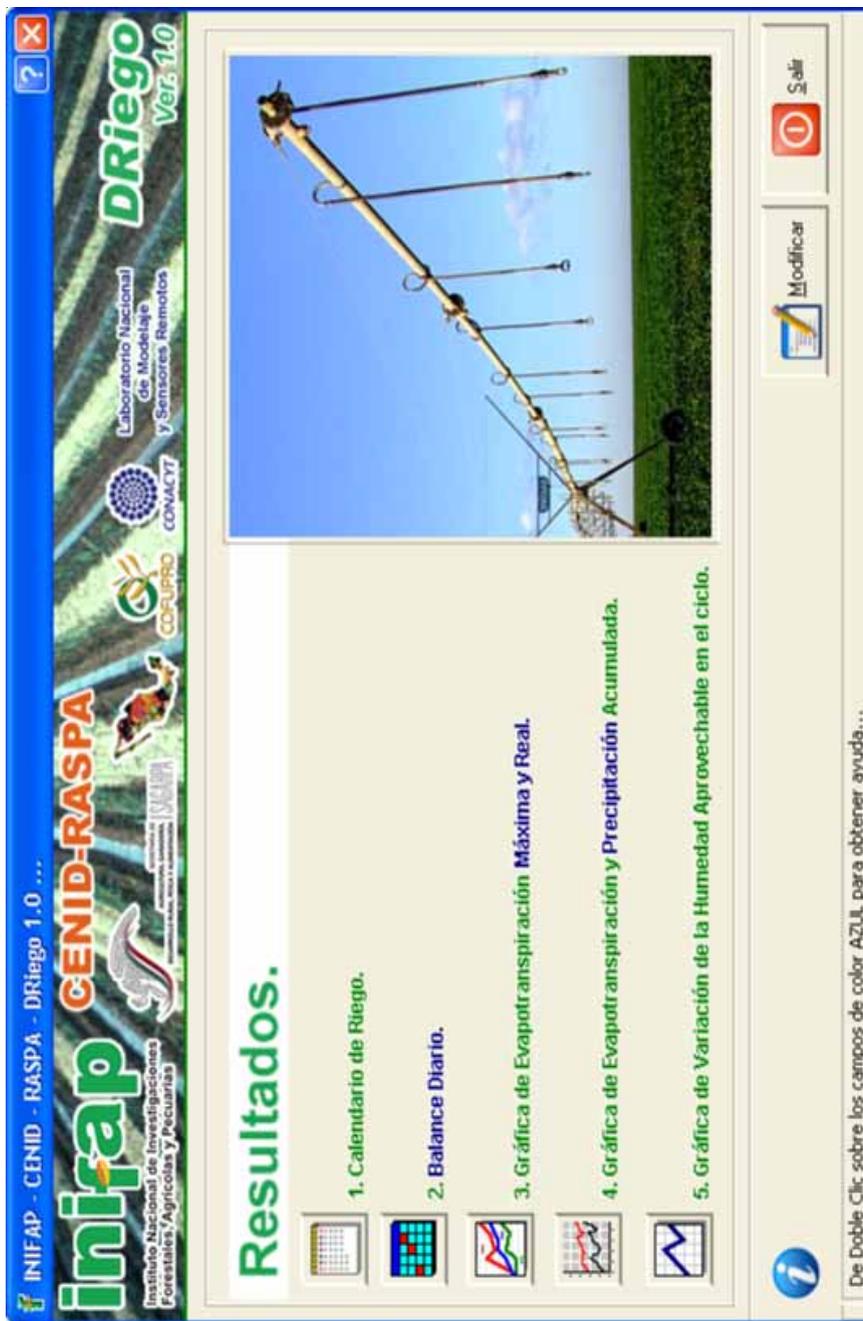


Figura 9. Menú de resultados.

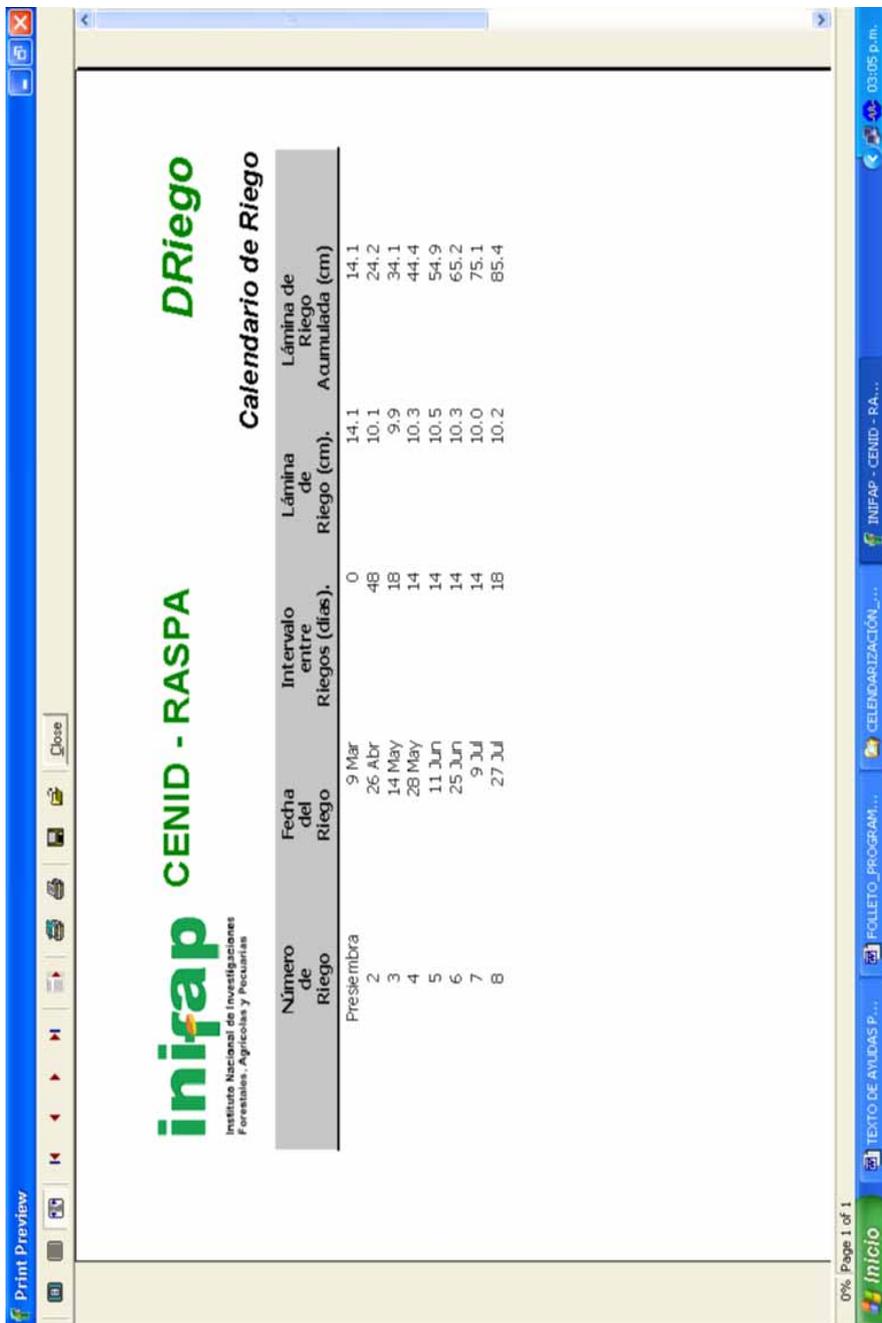


Figura 10. Calendario de riegos del algodonnero.

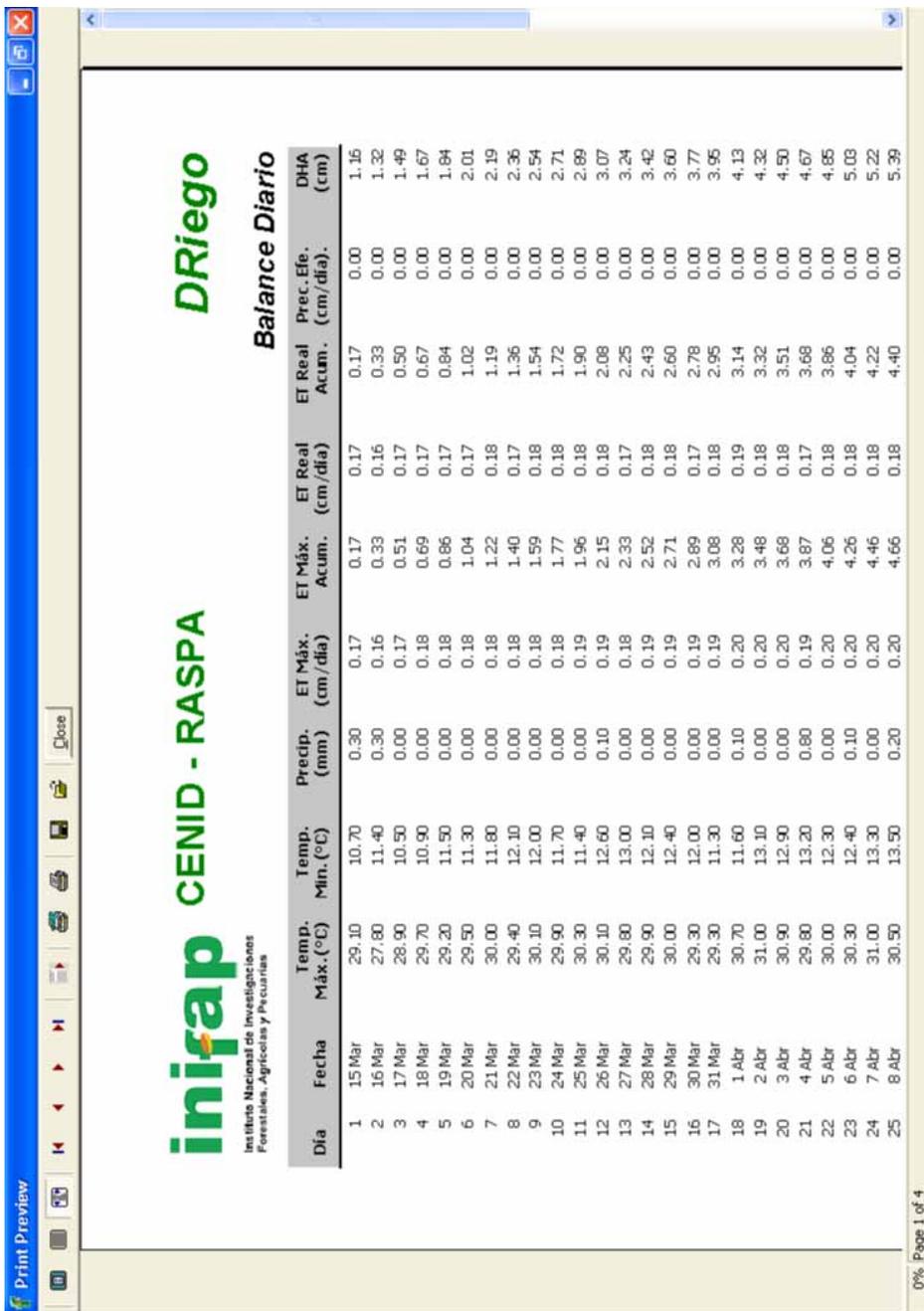


Figura 11. Componentes del balance del agua en el suelo.

Evapotranspiración máxima: cantidad de agua que consume el cultivo por día cuando no sufre por estrés hídrico. Es decir, cuando está siempre provisto de una humedad adecuada en el suelo. En este caso, el factor limitante es el clima.

Evapotranspiración real o actual: cantidad de agua que consume el cultivo por día y que muestra el manejo del riego, es decir, refleja los efectos de la disminución de la humedad del suelo entre un riego y otro. El efecto principal es que el consumo de agua se reduce, en relación a ET máxima, con el abatimiento de la humedad.

Precipitación efectiva: cantidad de lluvia acumulada aprovechable por el cultivo. Su valor depende de muchos factores como la intensidad y duración de los eventos lluviosos, tipo de suelo, cubierta vegetal y pendiente del terreno, entre otros.

Déficit de la humedad aprovechable: déficit acumulado de la humedad aprovechable a través del tiempo expresado como una lámina o espesor de agua en centímetros.

El tercer botón del menú de resultados despliega una gráfica con los valores diarios del consumo de agua en sus modalidades de evapotranspiración máxima y real para todo el ciclo del cultivo (Figura 12). El cuarto botón muestra una gráfica con los valores acumulados de estas mismas variables junto con los datos de precipitación (Figura 13). Por su parte, el quinto botón presenta una gráfica que ilustra los cambios que sufre la humedad aprovechable del suelo de un riego a otro durante el ciclo del cultivo (Figura 14). El botón «modificar» permite regresar a las pantallas previas para modificar alguno de los datos de entrada.



Figura 12. Consumo de agua por el cultivo a través de su ciclo vegetativo.



Figura 13. Datos acumulados del consumo de agua y la precipitación.



Figura 14. Evolución de la humedad aprovechable entre los riegos.

Todas las gráficas desplegadas por la aplicación poseen algunas herramientas que permiten al usuario visualizarlas de distinta manera, imprimirlas, guardarlas temporalmente en el portapapeles o almacenarlas en un archivo para uso posterior como puede ser insertarlas en un documento o presentación. Es posible visualizar los valores de las variables sobre las gráficas y abrir ventanas de acercamiento a una porción de las mismas para lograr una visualización más detallada. Para abrir una de estas ventanas se debe arrastrar el botón izquierdo del ratón sobre el área por ampliar, iniciando desde la esquina superior izquierda de la ventana hacia la esquina inferior derecha. Para deshabilitar la ventana, se debe marcar una ventana de cualquier tamaño en sentido inverso, es decir, iniciando desde la esquina inferior derecha hacia la esquina superior izquierda.

### **Interpretación y uso de los calendarios de riego**

Un calendario de riego es una receta en la que se indica cuánto y cuándo regar los cultivos. Esta receta muestra el número de días que deben transcurrir entre riegos para aplicar una determinada cantidad de agua que ordinariamente se expresa como una lámina o altura de agua. En general, los agricultores riegan sus cultivos con base en su experiencia, considerando por lo tanto algunos criterios empíricos. Son pocos aquellos que realizan mediciones del estado hídrico del suelo o las plantas para decidir cuándo y cuánto regar. La herramienta aquí propuesta hace una estimación del consumo de agua por el cultivo y del balance de agua en el suelo utilizando valores promedio de los datos históricos de clima. Por lo tanto, los calendarios de riego que de ella se derivan deben considerarse como una aproximación de la situación real. El máximo potencial de la aplicación descrita recae sobre el proceso de planeación del riego, es decir, se

pueden hacer iteraciones considerando diferentes escenarios (abatimientos de humedad, etapas de desarrollo, texturas, etc.) para obtener una apreciación objetiva del impacto producido por el cambio de alguna de estas variables.

## **CONCLUSIONES**

La aplicación computacional aquí descrita es una herramienta útil para que los usuarios de los distritos de riego incorporen un soporte técnico a la tarea de programar el riego de sus cultivos. El uso de esta aplicación significa también un paso más en el proceso de transferencia de la tecnología disponible. Además de los usuarios del riego, la aplicación aquí descrita puede utilizarse con fines didácticos por maestros y estudiantes para entender mejor los principios teóricos involucrados en su desarrollo; así como por investigadores para ayudar a definir posibles acciones de investigación orientadas al refinamiento de las técnicas utilizadas en la aplicación.

Esta aplicación también es de ayuda para la optimización de los patrones de cultivo en los distritos de riego del país en aras de estimar los volúmenes necesarios para un ciclo de riego. Su valor debe ser afectado por la eficiencia en el manejo del agua del distrito (volumen neto) para que arroje el volumen bruto (Sánchez y Catalán, 2006; Rogers *et al.*, 1997; Solomon, 1988). En este proceso la eficiencia juega un papel preponderante ya que de ésta depende el volumen total necesario para irrigar los cultivos en los distritos de riego del país.

## LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., R. H. Cuenca, M. E. Jensen, W. O. Pruitt, R. K. Blatchlet, J. M. Erpenbeck, E. L. Johns, J. F. Stone, R. D. Burman, R. W. Hill, P. R. Nixon, and J. L. Wright. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. M.E. Jensen, R.D. Burman, and R.G. Allen Editors. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York.
- Catalán V., E. 2002. Programa para la Calendarización del riego parcelario. Informe de Investigación. CENID RASPA INIFAP. Gómez Palacio, Dgo., México.
- \_\_\_\_\_ V. P Gutschick y M. Villa. 2004. Análisis del control fisiológico sobre la transpiración y asimilación de especies forestales. Memorias del VII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas. Mexicali, Baja California.
- \_\_\_\_\_ I. Sánchez C., M. Villa C., M. Inzunza I., y S. Mendoza M. 2005. Aplicación computacional en red para la estimación de las demandas de agua y la calendarización de los riegos de los cultivos en los distritos de riego del país. AGROFAZ 5: 51-58.
- \_\_\_\_\_ M. Villa C., M. A. Inzunza, S. F. Mendoza y A. Román L.. 2006. Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas de los suelos de la Región Lagunera. Memorias de la XVII Semana Internacional de Agronomía. Gómez Palacio, Dgo.
- Comisión Nacional del Agua. 2004. Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. [http://www.cna.gob.mx/ecna/espaniol/estadisticas/central/cap3\\_situación\\_de\\_recursos.pdf](http://www.cna.gob.mx/ecna/espaniol/estadisticas/central/cap3_situación_de_recursos.pdf).
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization. United Nations, Rome, Italy.

- \_\_\_\_\_ and A. H. Kassam. 1996. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24. Rome, Italy.
- \_\_\_\_\_ 1989. Irrigation water management: Irrigation scheduling. Training manual No. 4. Rome Italy.
- Fourth World Water Forum. 2006. Official Delegate Publication. National Water Commission. 208 pp. Mexico.
- Fox, F. A., T. F. Schere, D. C. Slack and L.J. Clark. 1994. Arizona Irrigation Scheduling (AZSCHED Version 1.1E): Users Manual. Cooperative Extension. University of Arizona, Tucson AZ.
- Hargreaves, G. H. 1974. Estimation of potential and crop evapotranspiration. Trans. ASAE 17:701-704.
- \_\_\_\_\_ and Z. A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 108:223-230.
- Jensen, M. E., R. D. Burman, and R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers. Irrigation Water Requirements Committee of the Irrigation and Drainage Division. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York. 332 p.
- Martin, D. L., E. C. Stegman and E. Fereres. 1990. Irrigation scheduling principles. In. Management of farm irrigation systems. Hoffman, G. J., and K. H. Solomon (eds). pp. 155-203. ASAE monograph. St. Joseph, MI.
- Ojeda B., W., E. Sifuentes I., J. M. González C., J. A. Guillen G. y H. Unland W. 1999. Pronóstico del riego en tiempo real. Centro Nacional de Transferencia de Tecnología de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- Rawls, W. J. and D. L. Brankensiek. 1982. Estimating soil water retention from soil properties. Journal of the ASCE 108: 166-171.

- Rogers, D. H., F. R. Lamm, A. Mahbub, T. P. Trooien, G. A. Clark, P. L. Barnes, and K. Mankin. 1997. Efficiencies and water losses of irrigation systems. Irrigation Management Series Publications. Kansas State University, Kansas.
- Sánchez C., I., J. Estrada A., and G. González C. 2002. Irrigation Technology in the Irrigation Districts of México. International Water Resources Association. Water International 27: 578 - 584. U.S.A.
- \_\_\_\_\_ 2005. Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua. Un enfoque de simulación de procesos. Libro científico No. 2. INIFAP CENID RASPA. 272 pp. Gómez Palacio, Dgo. México.
- \_\_\_\_\_ y E. Catalán V. 2006. Sistema para la optimización de patrones de cultivo en distritos de riego del norte del país. Folleto Técnico No. 5. CENID RASPA INIFAP. 75 pp. Gómez Palcio, Dgo. México.
- \_\_\_\_\_ E. Catalán V. and M. Villa C. 2006. Evapotranspiration modeling for irrigation purposes. Chapter book. In. Modeling and Remote Sensing Applied to Agriculture. pp. 71 – 89. USA – Mexico. USDA ARS – INIFAP.
- Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger, and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. J. 50(4):1031-1036
- Solomon, K. H. 1988. Irrigation systems and water application efficiencies. Center for Irrigation Technology research notes, CAIT Pub #880104. California State University, California.
- United States Department of Agriculture. 1952. Soil Survey Manual. USDA Handbook 18. USDA. Washington, DC.

Editora: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

Comité Editorial del **CENID-RASPA**

Presidente: Dr. José Antonio Cueto Wong

Secretario: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

Vocal: Dr. Guillermo González Cervantes

Editor Técnico:

M. C. Abel Román López

Esta publicación se terminó de imprimir en el mes de febrero del 2007 en los talleres del Grupo Colorama de Torreón, Coahuila.

Su tiraje consta de 600 ejemplares

**CENID-RASPA**  
**Km 6.5 margen derecha canal Sacramento**  
**Gómez Palacio. Durango. MÉXICO.**  
**Apdo. Postal 41, Cd. Lerdo, Dgo.**  
**Tels. y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34**  
**e-mail: catalan.ernesto@inifap.gob.mx**