

PROGRAMA CROPWAT PARA PLANEACIÓN Y MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO*

CROPWAT SOFTWARE FOR SCHEDULING AND HANDLING HIDRIC RESOURCE

Ramón Arteaga Ramírez^{1§}, Vicente Ángeles Montiel¹ y Mario Alberto Vázquez Peña¹

¹Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. C. P. 56230. Chapingo, Estado de México. Tel. 01 595 9521649 y 9521652. (mavp52@hotmail.com). [§]Autor para correspondencia: arteaga@correo.chapingo.mx.

RESUMEN

La superficie bajo riego en México es de 6.1 millones de hectáreas y más de 90% utiliza el sistema de riego por gravedad, éste presenta una baja eficiencia en el uso del agua, por lo cual es importante contar con programas de cómputo que auxilien a los profesionales en la administración y el manejo del agua de riego. Los objetivos de este trabajo fueron: definir los diferentes métodos del programa CROPWAT e indicar que datos necesitan, realizar una simulación en caña de azúcar con diferentes opciones de frecuencia y aplicación del riego, hacer la programación de riego para el plan de cultivos del módulo de riego III-1 del Distrito de Riego 035, la Antigua-Actopan, Veracruz y definir si las necesidades de agua calculadas para el plan de cultivos, son satisfechas con la disponibilidad de agua con que cuenta. Los métodos del CROPWAT determinan: la evapotranspiración de referencia (ET_0), necesidades de agua de los cultivos, precipitación efectiva y necesidades de riego; además el calendario de riego se basa en un balance diario de humedad del suelo con varias opciones de aplicación del agua y condiciones de manejo del riego de un patrón de cultivos y la programación del riego. Se determinó que la disponibilidad de agua del módulo de riego III-1 satisface conjuntamente con la precipitación las necesidades de agua del plan de cultivos del año agrícola 2005-2006 en la mayoría de los meses, el mes de octubre fue la excepción.

ABSTRACT

In Mexico surface under irrigation is 6.1 million hectares and in more than 90% irrigation system is by gravity, having low efficiency in water use, reason why is important to have computer software that help professionals in management and handling of irrigation water. Objectives of this work were: to define different methods of CROPWAT software and to indicate data need, to carry out simulation in sugar cane with different frequency options and irrigation application, to make irrigation schedule for cultivation plan of irrigation module III-1 from Irrigation District 035, at Antigua-Actopan, Veracruz and to define if needs of water calculated for cultivation plan are satisfied with water availability that has. Methods of CROPWAT determine: reference evapotranspiration (ET_0), water needs of cultivations, effective precipitation and irrigation needs; also irrigation calendar is based on a daily balance of soil humidity with several options of water application and conditions of irrigation handling for cultivations pattern and irrigation schedule. It was determined that water availability of irrigation module III-1 satisfies, together with precipitation, water needs of cultivations plan for agricultural year 2005-2006 in most of the months, except for October.

* Recibido: agosto de 2010
Aceptado: abril de 2011

Palabras clave: calendario y requerimientos de riego, evapotranspiración de referencia, necesidades de agua del cultivo, precipitación efectiva.

Key words: effective precipitation, irrigation calendar and requirements, reference evapotranspiration, water needs of cultivation.

INTRODUCCIÓN

México cuenta con 6.1 millones de hectáreas bajo riego, las cuales se encuentran distribuidas en 79 Distritos de Riego (DR) con 3.5 millones de hectáreas y 1.8 millones en 18 487 unidades de riego para el Desarrollo Rural. De estas 6.1 millones de hectáreas el sistema de riego por gravedad destaca por que se utiliza en más de 90% de la superficie, siendo el restante ocupado por sistemas de riego presurizado (Palacios, 2002; COTENNSER, 2009). Por esto es necesario que las zonas con infraestructura hidroagícola, se haga un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, ya que la eficiencia en el uso del agua en las áreas bajo riego por gravedad es relativamente baja, con un aumento en ésta se incrementaría tanto la productividad por área sembrada y regada, como el área bajo riego. Para lograr lo anterior se requiere mejorar los métodos y técnicas en el manejo del recurso agua no sólo a escala parcelaria, sino también en la administración de las obras de riego.

La planeación de la operación de sistemas de riego consiste en la formulación de programas o planes de riego y presenta diferentes fases a saber: i) la estimación de volúmenes de agua que se esperan en la fuente de captación; ii) estimación de un plan de cultivos; y iii) las demandas de riego del sistema (Palacios y Exebio, 1989). Para tener una buena administración del recurso agua se requiere hacer una adecuada planeación, considerando los elementos atmosféricos y basándose en ellos, determinar los requerimientos de agua de cada cultivo y realizar el calendario de riego para la zona de riego (Shayya y Bralts, 1991; Smith *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1996).

Los modelos de simulación se utilizan en diversas ramas de la actividad humana, en la planificación de áreas agrícolas han permitido un gran avance sobre todo en la agilidad de los cálculos, en el procesamiento de la información, en la simulación de diferentes procesos, con lo cual se conocen mejor éstos y en la obtención de resultados confiables (Lhomme *et al.*, 1984; Jones y Tardieu, 1998).

INTRODUCTION

Mexico has 6.1 million hectares under irrigation, which are distributed in 79 Irrigation Districts (DR) with 3.5 million hectares and 1.8 millions in 18 487 irrigation units for Rural Development. From these, 6.1 million hectares irrigation system by gravity stands out because is used in more than 90% of surface, being the remaining area for pressurized irrigation systems (Palacios, 2002; COTENNSER, 2009). Then is necessary that in areas with hydroagricultural infrastructure best use of hydric resource is done, since efficiency in water use in areas under irrigation by gravity is relatively low, increasing it would be extended to an increase as much in productivity per sowed and irrigated area, as under irrigation area. To achieve this is required to improve methods and techniques in handling of water resource not only at plot scale, but also in management at irrigation works level.

Planning of operation for irrigation systems consists on formulation of irrigation schedules or plans and has several steps: i) estimate water volumes that are expected in catchment source; ii) estimate of cultivations plan; and iii) demands of irrigation system (Palacios and Exebio, 1989). To have a good management of water resource is required to make an appropriate planning, considering atmospheric elements and based on them, to determine requirements of water of each cultivation and to carry out irrigation calendar for irrigation area (Shayya and Bralts, 1991; Smith *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1996).

Simulation models are used in several branches of human activity, in planning of agricultural areas they have allowed a great advance mainly in speed calculations, in information processing, in simulation of different processes, with that which these are better known and in obtaining reliable results (Lhomme *et al.*, 1984; Jones and Tardieu, 1998).

Una alternativa que se está presentando en la gestión de los recursos hídricos, es la utilización de computadoras personales y modelos de simulación (programas de cómputo), para la realización del calendario de los planes de riego; en la actualidad los expertos en riego de la FAO recomiendan el programa CROPWAT, como un instrumento práctico de ayuda a los profesionales relacionados con el manejo del agua, ya que éste auxilia en el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos, a partir de información del clima y los cultivos. Además permite la preparación de planes de riego para varias condiciones de operación y la simulación de abastecimiento de agua para un terreno, con el mismo clima, en diferentes fechas de siembra y con varios planes de cultivo; para un mejor aprovechamiento del recurso agua (Smith *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1996; Smith, 2000; Caverio *et al.*, 2000; González-González *et al.*, 2001; Kassam and Smith, 2001).

Considerando la importancia que tiene la planeación y operación del recurso agua, los objetivos del trabajo fueron: definir los diferentes métodos en que se basa el programa CROPWAT, indicar que datos necesitan cada uno de éstos, realizar una simulación para la caña de azúcar con diferentes opciones de frecuencia y aplicación del riego, hacer la programación de riego del plan (patrón) de cultivos del módulo de riego III-1 del DR 035, La Antigua-Actopan, Veracruz y definir si las necesidades de agua calculadas para el plan de cultivos del módulo, son satisfechas con la disponibilidad (provisión) de agua con la que cuenta.

MATERIALES Y MÉTODOS

El lugar donde se realizó el trabajo fue el módulo de riego III-1 “Puente Nacional” del DR 035, La Antigua-Actopan, Veracruz, en la zona de cultivos regada por el canal principal (único), río La Antigua. Se encuentra localizado en la planicie costera del Golfo de México, en la porción central y oriental del estado, aproximadamente entre los paralelos 19° 09' y 19° 53' de latitud norte y los meridianos 96° 17' y 96° 47' de longitud oeste.

La información climatológica que se utilizó se obtuvo de las normales climatológicas publicadas por el servicio meteorológico (SARH, 1988) y corresponde a la estación José Cardel, Veracruz, ésta se proporcionó para todos los meses, para el caso de que sólo se requieran para ciertos meses, el programa tiene la opción para cuantos meses

An alternative that is arising in management of hydric resources, is use of personal computers and simulation models (computer software), for realization of calendar for irrigation schedules; at the present time experts in irrigation from FAO recommend CROPWAT software, as a practical instrument of help to professionals related with water management, since this aids in calculation of water needs for cultivations, starting from weather and cultivations information. It also allows preparation of irrigation plans for several operation conditions and simulation of water supply for a land, with same weather, in different planting dates and with several cultivation plans; for a better exploitation of water resource (Smith *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1996; González-González *et al.*, 2001; Smith, 2000; Caverio *et al.*, 2000; Kassam and Smith, 2001).

Considering the importance that planning and operation of water resource have, objectives of work were: to define different methods in which CROPWAT software is based, to indicate which data need each one of them, to carry out a simulation for sugar cane with different options of irrigation frequency and application, to make scheduling of irrigation plan (pattern) of cultivations for irrigation module III-1 of DR 035, La Antigua-Actopan, Veracruz and to define if calculated needs of water for cultivations plan of module are fulfilled with water availability (supply) that it has.

MATERIALS AND METHODS

Work was carried out at module of irrigation III-1 “Puente Nacional” of DR 035, La Antigua-Actopan, Veracruz, in cultivations area irrigated by main (only) channel, La Antigua river. It is located in coastal plain of Gulf of Mexico, in the central and oriental portion of state, approximately between 19° 09' and 19° 53' of north latitude and 96° 17' and 96° 47' of west longitude.

The climatological information was obtained from the normal climatological records published by meteorological service (SARH, 1988) and it corresponds to station José Cardel, Veracruz, which provided for every month, for case that there are only required certain months, software has the option to select how many

se desea realizar los cálculos. La provisión del sistema se obtuvo de los archivos del modulo III-1 del DR 035, así como la superficie de cada uno de los cultivos sembrados.

Los datos climatológicos que requiere el programa son los siguientes: a) información básica de la estación meteorológica: nombre del país, nombre de la estación, altitud, latitud y longitud; y b) datos climáticos mensuales de: precipitación (p), temperatura máxima, mínima y media, humedad relativa, insolación (horas brillo sol) y velocidad del viento.

La información de los cultivos que se necesita para calcular los requerimientos de agua es la siguiente: duración de la etapa de crecimiento, se consideraron la inicial (INIT), desarrollo (DEVE), media (MID) y final (LATE), se obtuvieron del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en días; coeficiente de cultivo Kc (Doorenbos y Pruitt, 1980), profundidad de raíces (D), factor de reducción de rendimiento Ky (Doorenbos y Kassam, 1980), y las fechas de siembra son del plan de cultivos del modulo III-1, así como los siguientes cultivos: caña de azúcar, limón, maíz, mango, frijol, tomate, pasto, pepino, papaya y chile.

Para la programación del riego es necesaria la siguiente información del suelo: textura, humedad total utilizable del suelo (HTU), nivel de agotamiento de la humedad (fracción, %HTU), agotamiento inicial de la humedad del suelo (%HTUi), humedad inicial en el suelo y tasa máxima de infiltración de la precipitación en el suelo.

Finalmente para calcular las necesidades de agua, del sistema de riego se proporcionó la superficie de cada cultivo que se obtuvo del plan de riegos (2005-2006), del modulo de riego III-1 del distrito de riego 035 y se debe proporcionar en porcentaje de la superficie total del sistema de riego.

La evapotranspiración de referencia (ET_0), se calculó con el método de Penman-Monteith; Allen *et al.* (1998) hacen una presentación detallada y es el que utiliza el programa. Debido que se basa en principios físicos sólidos, realiza una mejor estimación, que la mayoría de los métodos empíricos (Jones y Tardieu, 1998). Para el cálculo de la precipitación efectiva (p) el programa presenta cuatro opciones (un porcentaje fijo de precipitación, precipitación probable a una probabilidad 80% de excedencia, métodos empíricos desarrollados localmente y el método del servicio de conservación de suelo del USDA), se utilizó un porcentaje

months is wanted to carry out calculations. System supply was obtained from files of module III-1 of DR 035, as well as surface of each one of sowed cultivations.

The climatological data that software requires are the following: to) basic information of meteorological station: country name, station name, altitude, latitude and longitude; and b) monthly climatic data of: precipitation (p), maximum, minimum and average temperature, relative humidity, insolation (sun hours) and wind speed.

Information of cultivations that is needed to calculate water requirements is the following: duration of growth stage, we considered initial (INIT), development (DEVE), average (MID) and final (LATE), they were obtained from Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), in days; cultivation coefficient Kc (Doorenbos and Pruitt, 1980), roots depth (D), factor of yield reduction Ky (Doorenbos and Kassam, 1980), and planting dates are from cultivations plan of module III-1, as well as the following cultivations: sugar cane, lemon, corn, mango, bean, tomato, grass, cucumber, papaya and chili.

For irrigation scheduling is necessary the following soil information: texture, total usable soil humidity (HTU), level of exhaustion of humidity (fraction, %HTU), initial exhaustion of soil humidity (%HTUi), initial humidity in soil and maximum infiltration rate of precipitation in soil.

Finally to calculate water needs, from irrigation system was provided the surface of each cultivation that was obtained from irrigation plan (2005-2006), of module of irrigation III-1 of irrigation district 035 and it should be provided in percentage of total surface of irrigation system.

Reference evapotranspiration (ET_0), was calculated with method of Penman-Monteith; Allen *et al.* (1998) make a detailed presentation and it is the one that software uses. Due that is based in solid physical principles, it carries out a better estimate than most of empiric methods (Jones and Tardieu, 1998). For calculation of effective precipitation (p) software has four options (a fixed percentage of precipitation, probable precipitation at a probability of 80% of excedence, empiric methods developed locally and method of service of conservation of soil of USDA), a fixed percentage of total precipitation

fijo de la precipitación total (0.8). Los procedimientos para calcular las necesidades de agua de los cultivos y las necesidades de riego son las que se presentan en Doorenbos y Pruitt (1980); Doorenbos y Kassam (1980).

Para la programación del riego, el programa se basa en un balance diario de humedad del suelo, tiene dos categorías: opciones de frecuencia (cuando se debe regar) y opciones de aplicación (cantidad de agua que se debe aplicar en cada riego). La primera categoría presenta ocho opciones de frecuencia: a= cada riego definido por el usuario; b= al agotamiento crítico (100% de HFU); c= debajo o encima de un agotamiento crítico; d= en intervalos fijos por etapa; e= un intervalo fijo de agotamiento; f= un valor dado de reducción de la evapotranspiración del cultivo (ET_c); g= un valor de reducción del rendimiento; y h= sin riego (temporal). La segunda categoría presenta cuatro opciones de aplicación: a= cada riego definido por el usuario; b= hasta la capacidad de campo; c= por debajo o encima de la capacidad de campo; y d= dosis de aplicación fija según el método de riego.

El cálculo del volumen bruto (Q_b , $m^3 \text{ mes}^{-1}$ o $L \text{ s}^{-1}$) de agua para abastecer el sistema se realiza con la siguiente expresión que presenta Smith (1992):

$$Q_b = (1/e_p) * (1/t_i) * A_c * 0.116 * \sum (ET_c - P_e) * A_c / A_s$$

Donde: e_p =eficiencia de riego del sistema ≤ 1 ; t_i =coeficiente operacional de tiempo ≤ 1 ; A_c = superficie cubierta por un cultivo individual, (ha); A_s = superficie total del sistema, (ha); ET_c = evapotranspiración del cultivo, ($mm \text{ día}^{-1}$); P_e = precipitación efectiva, ($mm \text{ día}^{-1}$); $ET_c - P_e$ = necesidad neta de riego del cultivo, ($mm \text{ día}^{-1}$); \sum = total para todos los cultivos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 de la columna 2 a la 4, se presenta la información climatológica que se obtuvo de la estación climatológica José Cardel, con altitud de 29 m, y coordenadas 19-23 N, 96-23 E, con estos datos el programa calculó la información que se tiene en las columnas 5 y 6, la primera es la radiación solar estimada y la última es la evapotranspiración de referencia (ET_0) obtenida con el método de Penman-Monteith.

was used (0.8). The procedures to calculate water needs of cultivations and irrigation needs are those that are presented in Doorenbos and Pruitt (1980); Doorenbos and Kassam (1980).

For irrigation schedule, software is based on a daily balance of soil humidity, it has two categories: frequency options (when should be irrigated) and application options (water quantity that it should be applied in each irrigation). The first category presents eight frequency options: a= each irrigation defined by user; b= at critical exhaustion (100% of HFU); c= under or above critical exhaustion; d= in fixed intervals per stage; e= a fixed interval of exhaustion; f= a given value for reduction of evapotranspiration of cultivation (ET_c); g= a value of yield reduction; and h= without irrigation (seasonal). The second category presents four application options: a= each irrigation defined by user; b= up to field capacity; c= under or above field capacity; and d= dose of fixed application according to irrigation method.

The calculation of gross volume (Q_b , $m^3 \text{ month}^{-1}$ or $L \text{ s}^{-1}$) of water to supply to system is carried out with the following expression that Smith (1992) develops:

$$Q_b = (1/e_p) * (1/t_i) * A_c * 0.116 * \sum (ET_c - P_e) * A_c / A_s$$

Where: e_p = irrigation efficiency of system ≤ 1 ; t_i = operational coefficient of time ≤ 1 ; A_c = covered surface per an individual cultivation, (ha); A_s = total surface of system, (ha); ET_c = evapotranspiration of cultivation, ($mm \text{ day}^{-1}$); P_e = effective precipitation, ($mm \text{ day}^{-1}$); $ET_c - P_e$ = net need of irrigation of cultivation, ($mm \text{ day}^{-1}$); \sum = total for all cultivations.

RESULTS AND DISCUSSION

In Table 1 of column 2 to 4, is presented climatological information obtained from climatological station José Cardel, with altitude of 29 m, and coordinates 19-23 N, 96-23 E, with these data software calculated information that has in columns 5 and 6, the first is estimated solar radiation and the last one is reference evapotranspiration (ET_0) obtained with Penman-Monteith method.

Cuadro 1. Cálculo de la ET_0 , con el método de Penman-Monteith, de la estación meteorológica José Cardel, La Antigua, Veracruz.

Table 1. Calculation of ET_0 , with Penman-Monteith method, of meteorological station José Cardel, La Antigua, Veracruz.

Mes	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Viento (km día ⁻¹)	Insolación (h)	Radiación (Mj m ⁻² día ⁻¹)	ET_0 (mm día ⁻¹)
Enero	21.3	80	899	4.9	7.2	3.36
Febrero	22.3	81	691	5.8	9.1	3.51
Marzo	24.6	81	899	5.3	10.4	3.15
Abril	26.9	81	899	5.7	11.9	3.7
Mayo	27.7	79	691	6.3	12.7	5.13
Junio	27.9	80	778	6.9	13.3	5.21
Julio	26.9	79	432	6.7	12.9	4.76
Agosto	27.2	78	518	7.6	13.5	5.14
Septiembre	27	79	691	5.2	10.8	4.66
Octubre	25.7	75	864	6.2	10.8	5.06
Noviembre	23.6	77	864	5.3	7.9	4.12
Diciembre	22	79	864	4.8	6.9	3.49
Anual	25.3	79	757	5.9	10.5	4.27

En el Cuadro 2 se tienen los datos de precipitación media mensual proporcionada al programa y los datos calculados de la precipitación efectiva media mensual.

In Table 2 there are data of monthly average precipitation supplied to software and calculated data of monthly average effective precipitation.

En los Cuadros 3 y 4 se observa la información proporcionada al programa que requieren los cultivos, en este caso se dan por razones obvias, la caña de azúcar y maíz respectivamente. Los valores que requieren los cultivos son los propuestos por default por el programa a excepción de la duración de las fases de los cultivos que se obtuvieron del campo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y se adaptaron a las que requiere el programa.

Con la información de los Cuadros 3 y 4, el programa pide la fecha de siembra y calcula: el coeficiente de cultivo (K_c), la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la precipitación efectiva y las necesidades de riego de los cultivos (Nac), todos a nivel decadal (agrupación de diez días) durante todo el ciclo del cultivo, este cálculo el programa lo realiza por medio de interpolaciones para transformar los datos mensuales a decadales. En los Cuadros 5 y 6 se tiene la información que se obtuvo para los cultivos de maíz y caña de azúcar y las necesidades de riego para éstos, el primero debido a la época de su establecimiento requiere una cantidad mínima (15.2 mm) y para el segundo dado que su ciclo es todo el año, es mayor su lamina (762.8 mm).

Cuadro 2. Estimación de la precipitación efectiva de la estación meteorológica: José Cardel, Veracruz.

Table 2. Estimate of effective precipitation of meteorological station: José Cardel, Veracruz.

Mes	Precipitación (mm mes ⁻¹)	Precipitación efectiva (mm mes ⁻¹)
Enero	9.2	7.4
Febrero	21.5	17.2
Marzo	12.3	9.8
Abril	10.4	8.3
Mayo	50.4	40.3
Junio	253.2	202.6
Julio	313.5	250.8
Agosto	247.9	198.3
Septiembre	245.5	196.4
Octubre	83.6	66.9
Noviembre	39	31.2
Diciembre	9.5	7.6
Total	1296	1036.8

Cuadro 3. Entrada de datos de caña de azúcar.**Table 3. Data input for sugar cane.**

Etapas de crecimiento	Inicial	Desarrollo	Media	Final	Total
Duración (días)	90	90	90	90	360
Coefficiente de cultivo (Kc)	0.95		0.95	0.95	
Profundidad de raíces (m)	1.5		1.5	1.5	
Nivel de agotamiento (Fracc)	0.6		0.6	0.6	
Respuesta al rendimiento (Ky)	0.8	0.8	0.8	0.8	1.2

Cuadro 4. Entrada de datos del maíz.**Table 4. Data input for corn.**

Etapas de crecimiento	Inicial	Desarrollo	Media	Final	Total
Duración (días)	25	35	40	30	130
Coefficiente de cultivo (Kc)	0.45		1.1	0.55	
Profundidad de raíces (m)	0.3		1.3	1.3	
Nivel de agotamiento (Fracc)	0.5		0.5	0.8	
Respuesta al rendimiento (Ky)	0.4	0.4	1.3	0.5	1.25

Con las necesidades de agua de los cultivos obtenidas, el programa realiza la programación de los riegos, para lo cual presenta varias opciones dependiendo de las aplicaciones específicas que el usuario requiere y de las condiciones y restricciones que el sistema de riego impone.

La opción de frecuencia de riego (cuando) que se utilizó en este trabajo fue la de riego práctico a intervalos fijos por etapa y la opción de aplicación (cantidad) fue la de riego óptimo hasta la capacidad de campo, para esta última es necesario indicar la eficiencia de aplicación en el campo, se utilizó la que el programa propone por default (70%).

En el Cuadro 7 se presenta parte de los resultados que genera el programa para el cultivo de maíz, con los siguientes datos de entrada: a) fecha de siembra 8 de junio; b) suelo de textura media; c) humedad disponible del suelo 140 mm m⁻¹; d) humedad inicial del suelo 140 mm m⁻¹; e) frecuencia: intervalo fijo de 20(A)/ 30(C)/ 10 (D) días; f) aplicación: riego hasta la capacidad de campo; y g) eficiencia de aplicación en el campo: 70%; en donde se observa que el maíz no presenta reducción de rendimiento.

In Table 3 and 4 is seen information supplied to software that cultivations require, in this case they are given by obvious reasons, sugar cane and corn, respectively. The values that cultivations require are those proposed by default in the software with exception of stages duration of cultivations that were obtained from INIFAP and they were adapted to those that it requires the software.

With information from Table 3 and 4, software requests planting date and calculates: cultivation coefficient (Kc), the cultivation evapotranspiration (ETc), the effective precipitation and the needs of irrigation of cultivations (Nac), all at decadal level (grouping of ten days) during whole cultivation cycle, this calculation is carried out by means of interpolations to transform monthly data to decadal data. In Table 5 and 6 there is information that was obtained for corn and sugar cane cultivations and their irrigation needs, the first one due to season of its establishment it requires a minimum quantity (15.2 mm) and for the second due its cycle is whole year, its sheet is greater (762.8 mm).

Cuadro 5. Cálculo de la ETc y la Nac de maíz, sembrado el ocho de junio, en la estación meteorológica José Cardel, Veracruz.**Table 5. Calculation of ETc and Nac of corn, planted June 8th, in meteorological station José Cardel, Veracruz.**

Mes	Década	Etap	Kc	ETc (mm dec ⁻¹)	ETc (mm día ⁻¹)	P _e (mm día ⁻¹)	Nac (mm día ⁻¹)	Nac (mm dec ⁻¹)
Junio	1	INIT	0.45	2.33	4.7	10.2	0	0
Junio	2	INIT	0.45	2.34	23.4	72.5	0	0
Junio	3	INIT	0.45	2.28	22.8	76.2	0	0
Julio	1	In/De	0.52	2.53	25.3	81.9	0	0
Julio	2	DEBE	0.67	3.2	32	86.6	0	0
Julio	3	DEBE	0.86	4.2	42	79.8	0	0
Agosto	1	De/Mi	1.03	4.14	51.4	71.6	0	0
Agosto	2	MID	1.1	5.65	56.5	64.1	0	0
Agosto	3	MID	1.1	5.48	54.8	64.6	0	0
Septiembre	1	MID	1.1	5.3	53	69	0	0
Septiembre	2	Mi/La	1.08	5.04	50.4	71.5	0	0
Septiembre	3	LATE	0.97	4.66	46.6	55.1	0	0
Octubre	1	LATE	0.79	3.94	39.4	35.4	0.4	4
Octubre	2	LATE	0.61	3.12	25	13.8	1.39	11.1
Total					527.2	852.3		15.2

INIT= inicial; DEBE= desarrollo; MID= media; LATE= final; p_e= precipitación efectiva; dec= diez días; Kc= coeficiente de cultivo; ETc= evapotranspiración del cultivo; Nac= necesidad de riego del cultivo.

Cuadro 6. Cálculo de la ETc y la Nac de caña de azúcar, sembrado el 6 de mayo, en la estación meteorológica José Cardel, Veracruz.**Table 6. Calculation of ETc and Nac of sugar cane, planted May 6th, in meteorological station José Cardel, Veracruz.**

Mes	Década	Etap	Kc	ETc (mm día ⁻¹)	ETc (mm dec ⁻¹)	P _e (mm dec ⁻¹)	Nac (mm día ⁻¹)	Nac (mm dec ⁻¹)
Mayo	1	INIT	0.95	4.75	19	2.5	4.13	41.3
Mayo	2	INIT	0.95	4.87	48.7	8.4	4.03	40.3
Mayo	3	INIT	0.95	4.9	49	28.1	2.09	20.9
Junio	1	INIT	0.95	4.92	49.2	51.2	0	0
Junio	2	INIT	0.95	4.95	49.5	72.5	0	0
Junio	3	INIT	0.95	4.81	48.1	76.2	0	0
Julio	1	INIT	0.95	4.66	46.6	81.9	0	0
Julio	2	INIT	0.95	4.52	45.2	86.6	0	0
Julio	3	INIT	0.95	4.64	46.4	79.8	0	0
Agosto	1	In/De	0.95	4.76	47.6	71.6	0	0
Agosto	2	DEBE	0.95	4.88	48.8	64.1	0	0
Agosto	3	DEBE	0.95	4.73	47.3	64.6	0	0
Septiembre	1	DEBE	0.95	4.58	45.8	69	0	0
Septiembre	2	DEBE	0.95	4.43	44.3	74.5	0	0
Septiembre	3	DEBE	0.95	4.55	45.5	55.1	0	0

INIT= inicial; DEBE= desarrollo; MID= media; LATE= final; p_e= precipitación efectiva; dec= periodo de diez días; Kc= coeficiente de cultivo; ETc= evapotranspiración del cultivo; Nac= necesidad de riego del cultivo.

Cuadro 6. Cálculo de la ETc y la Nac de caña de azúcar, sembrado el 6 de mayo, en la estación meteorológica José Cardel, Veracruz (Continuación).**Table 6. Calculation of Etc and Nac of sugar cane, planted May 6th, in meteorological station José Cardel, Veracruz (Continuation).**

Mes	Década	Etap	Kc	ETc (mm día ⁻¹)	ETc (mm dec ⁻¹)	p _e (mm dec ⁻¹)	Nac (mm día ⁻¹)	Nac (mm dec ⁻¹)
Octubre	1	DEBE	0.95	4.74	37.4	35.4	1.21	12.1
Octubre	2	DEBE	0.95	4.9	49	17.3	3.17	31.7
Octubre	3	DEBE	0.95	4.57	45.7	15	3.07	30.7
Noviembre	1	De/Mi	0.95	4.21	42.1	12.7	2.94	29.4
Noviembre	2	MID	0.95	3.91	39.1	10.4	2.87	28.7
Noviembre	3	MID	0.95	3.71	37.1	7.8	2.94	29.4
Diciembre	1	MID	0.95	3.51	35.1	5.2	3	30
Diciembre	2	MID	0.95	3.32	33.2	2.5	3.06	30.6
Diciembre	3	MID	0.95	3.27	32.7	2.5	3.02	30.2
Enero	1	MID	0.95	3.23	32.3	2.5	2.99	29.9
Enero	2	MID	0.95	3.19	31.9	2.5	2.95	29.5
Enero	3	MID	0.95	3.24	32.4	3.5	2.88	28.8
Febrero	1	Mi/La	0.95	3.29	32.9	4.6	2.82	28.2
Febrero	2	LATE	0.95	3.33	33.3	5.7	2.76	27.6
Febrero	3	LATE	0.95	3.54	35.4	4.9	3.05	30.5
Marzo	1	LATE	0.95	3.75	37.5	4.1	3.34	33.4
Marzo	2	LATE	0.95	3.95	39.5	3.3	3.62	36.2
Marzo	3	LATE	0.95	4.14	41.4	3.1	3.83	38.3
Abril	1	LATE	0.95	4.33	43.3	2.3	4.1	41
Abril	2	LATE	0.95	4.51	45.1	1.8	4.34	43.4
Abril	3	LATE	0.95	4.63	46.3	5.7	4.07	40.7
Mayo	1	LATE	0.95	4.75	28.5	3.7	4.13	41.3
Total					1522.2	1042.6		804.1

INIT= inicial; DEBE= desarrollo; MID= media; LATE= final; p_e= precipitación efectiva; dec= periodo de diez días; Kc= coeficiente de cultivo; ETc= evapotranspiración del cultivo; Nac= necesidad de riego del cultivo.

Con los datos del Cuadro 7, se obtuvieron los siguientes resultados: a) riego total bruto: 133.1 mm; b) total precipitación: 1056.8 mm; c) riego total neto: 93.2 mm; d) precipitación efectiva: 680.8 mm; e) pérdidas totales de riego: 0 mm; f) pérdida total de precipitación: 376 mm; g) déficit de humedad a la cosecha: 7 mm; h) abastecimiento neto más retención del suelo: 100.2 mm; i) uso real de agua del cultivo: 527.2 mm; j) necesidades reales de riego: -153.6 mm; k) uso potencial de agua del cultivo: 527.2 mm; l) eficiencia programación de riego: 100%; m) eficiencia precipitación: 64.4%; n) deficiencia programación de riego: 0%; y ñ) no hubo reducción de rendimiento por los déficit de agua.

With obtained water needs of cultivations, software carries out irrigation schedules, presenting several options depending on specific applications that user requires and from conditions and restrictions that irrigation system imposes.

The option of irrigation frequency (when) that was used in this work it was the one from practical irrigation at fixed intervals per stage and application option (quantity) was that of good irrigation up to field capacity, for this last one it is necessary to indicate application efficiency in the field, using default value that software proposes (70%).

Cuadro 7. Programación del riego para el maíz de la estación meteorológica José Cardel, Veracruz.**Table 7. Irrigation schedule of corn of meteorological station José Cardel, Veracruz.**

Riego	Int (días)	Fecha	Etap	Agot (%)	Tx (%)	ETa (%)	Dosis neta (mm)	Déficit (mm)	Perd (mm)	Dosis bruta (mm)	Caudal L s ⁻¹ ha ⁻¹
1	20	28 jun	INIT	03	100	100	2.3	0	0	3.3	0.02
2	30	28 jul	DEBE	03	100	100	4.2	0	0	6	0.02
3	30	28 ago	MID	22	100	100	40.2	0	0	57.4	0.22
4	21	19 sep	LATE	16	100	100	29.3	0	0	41.9	0.23
5	10	29 sep	LATE	05	100	100	9.3	0	0	13.2	0.15
6	10	9 oct	LATE	04	100	100	7.9	0	0	11.2	0.15
Fin	10	19 oct	LATE	04	100	100					

Agot=nivel de agotamiento en porcentaje de la humedad total; Tx=evapotranspiración real del día antes de regar, expresada como porcentaje de la ET₀; Eta=evapotranspiración real promedio calculada en el periodo del intervalo y expresada como porcentaje de la evapotranspiración máxima de cultivo; Déficit= indica el nivel de agotamiento de la humedad del suelo después del riego, un valor de cero indica una recarga a capacidad de campo; Perd= pérdida de agua por percolación de una dosis de riego o precipitación que exceda la capacidad de campo.

En el Cuadro 8a y 8b, se presenta parte de los resultados que genera el programa para el cultivo de caña de azúcar, con los siguientes datos de entrada: a) fecha de siembra 6 de mayo; b) suelo de textura media; c) humedad disponible en el suelo 140 mm m⁻¹; d) humedad inicial en el suelo 140 mm m⁻¹; e) frecuencia: intervalo fijo de 90(A)/90(B)/90(C)/90(D) días; f) aplicación de riego hasta la capacidad de campo; g) eficiencia de aplicación en el campo de 70%; en donde se observa que en caña de azúcar presentó reducción de rendimiento.

In Table 7 is presented part of results that software generates for corn cultivation, with the following input data: to) planting date June 8th; b) average soil texture; c) available soil humidity of 140 mm m⁻¹; d) initial soil humidity of 140 mm m⁻¹; and) frequency: fixed interval of 20(A)/ 30(C)/ 10 (D) days; f) application: irrigation up to field capacity; and g) application efficiency in field: 70%; where is observed that corn does not present yield reduction.

Cuadro 8a. Programación del riego para la caña de azúcar de la estación meteorológica José Cardel, Veracruz.**Table 8a. Schedule of irrigation for sugar cane of meteorological station José Cardel, Veracruz.**

Riego	Int (días)	Fecha	Etap	Agot (%)	Tx (%)	ETa (%)	Dosis neta (mm)	Déficit (mm)	Perd (mm)	Dosis bruta (mm)	Caudal L s ⁻¹ ha ⁻¹
1	90	3 jul	INIT	75	67	67	156.5	0	0	223.5	0.29
2	90	3 oct	DEVE	38	100	100	79.2	0	0	113.2	0.15
3	90	3 ene	MID	90	27	27	188.4	0	0	269.1	0.35
4	90	3 abr	LATE	92	21	21	194.1	0	0	275.9	0.35
Fin	1	4 abr	LATE	0	21	21					

Agot=nivel de agotamiento en porcentaje de la humedad total; Tx=evapotranspiración real el día antes de regar, expresada como porcentaje de la ET₀; Eta=evapotranspiración real promedio calculada en el periodo del intervalo y expresada como porcentaje de la evapotranspiración máxima de cultivo; Déficit= indica el nivel de agotamiento de la humedad del suelo después del riego, un valor de cero indica una recarga a capacidad de campo; Perd= pérdida de agua por percolación de una dosis de riego o precipitación que exceda la capacidad de campo.

Cuadro 8b. Reducción de rendimiento para la caña de azúcar en la estación meteorológica José Cardel, Veracruz.**Table 8b. Yield reduction for sugar cane in the meteorological station José Cardel, Veracruz.**

Reducción rendimiento	INIT	DEBE	MID	LATE	Ciclo
Reducción de la ET	20.6	0	16.8	26.7	15.3
Coeficiente respuesta rendimiento	0.8	0.8	0.8	0.8	1.2
Reducción de rendimiento	16.5	0	10.9	21.4	18.4
Reducción acumulado de rendimiento	16.5	16.5	27.4	48.8	

INIT= inicial; DEBE= desarrollo; MID= media; LATE= final.

Con los datos del Cuadro 8a, se obtuvieron los siguientes resultados: a) riego total bruto: 881.6 mm; b) total precipitación: 1297.8 mm; c) riego total neto: 617.1 mm; d) precipitación efectiva: 1177.6 mm; e) pérdidas totales de riego: 0 mm; f) pérdida total de precipitación: 120.2 mm; g) déficit de humedad a la cosecha: 0 mm; h) abastecimiento neto más retención del suelo: 617.1 mm; i) uso real de agua del cultivo: 1289 mm; j) necesidades reales de riego: 111.3 mm; k) uso potencial de agua del cultivo: 1522.7 mm; l) eficiencia programación de riego: 100%; m) eficiencia precipitación: 90.7%; n) deficiencia programación de riego: 15.3%; en el Cuadro 8b se muestra la reducción de rendimiento por etapas.

Para la programación del riego de los cultivos, se maneja la opción de frecuencia de riego a intervalos fijos por etapa, debido que la programación del riego se ajusta al método de riego que se utilice y a las condiciones de abastecimiento de agua del sistema y especialmente utilizada en los sistemas de riego por gravedad con distribución rotacional del agua, como se practica en la mayoría de los distritos de riego y la opción de aplicación del riego hasta la capacidad de campo; en este caso el agua aplicada lleva la humedad del suelo hasta capacidad de campo, ella corresponde a la humedad del suelo agotada en la zona de raíces y como el agotamiento de agua de la zona radicular varía durante el ciclo de cultivo, la dosis variará sustancialmente en cada etapa del cultivo.

Sin embargo, el programa permite la programación del riego bajo diferentes opciones de frecuencia y aplicación de riego, así definir la mejor para cada cultivo y tipo de suelo, por lo que es importante hacer notar que la programación de riego de un cultivo en la misma fecha de siembra, presenta variaciones en función de la opción de frecuencia y de la aplicación de riego que se seleccione.

Para conocer las diferencias que se presentan según la frecuencia y la aplicación del riego seleccionada, se realizaron siete alternativas de programas de riego en una misma fecha de siembra para la caña de azúcar, generándose otros siete cuadros semejantes al Cuadro 8a y 8b; por lo tanto, se obtuvo un resumen de éstos en el Cuadro 9, las alternativas que no presentan reducción en el rendimiento del cultivo son: 2, 3 y 4. Además se mencionan los siguientes datos que no se dan en éste: la lamina de riego total bruto varió entre 143 (f, d) y 1613 (b, c) mm, con la primer lamina se tiene una reducción del rendimiento para todo el ciclo 41.7%, en la otra no se

With data from Table 7, the following results were obtained: a) total gross irrigation: 133.1 mm; b) total precipitation: 1056.8 mm; c) total net irrigation: 93.2 mm; d) effective precipitation: 680.8 mm; e) total irrigation losses: 0 mm; f) total precipitation loss: 376 mm; g) deficit of humidity to crop: 7 mm; h) net supply plus soil retention: 100.2 mm; i) real use of cultivation water: 527.2 mm; j) real irrigation needs: -153.6 mm; k) potential use of cultivation water: 527.2 mm; l) efficiency irrigation schedule: 100%; m) precipitation efficiency: 64.4%; n) irrigation schedule inefficiency: 0%; and o) there was not yield reduction due deficit of water.

In Table 8a and 8b, is presented part of results that software generates for sugar cane cultivation, with the following input data: to) planting date May 6th; b) average soil texture; c) available soil humidity 140 mm m⁻¹; d) initial soil humidity 140 mm m⁻¹; and) frequency: fixed interval of 90 (A)/ 90 (B)/ 90 (C)/ 90 (D) days; f) irrigation application up to field capacity; g) application efficiency in field of 70%; where it is observed that in sugar cane it presented yield reduction.

With data of Table 8a, the following results were obtained: a) total gross irrigation: 881.6 mm; b) total precipitation: 1297.8 mm; c) total net irrigation: 617.1 mm; d) effective precipitation: 1177.6 mm; e) total irrigation losses: 0 mm; f) total precipitation loss: 120.2 mm; g) deficit of humidity to crop: 0 mm; h) net supply plus soil retention: 617.1 mm; i) real use of cultivation water: 1289 mm; j) real irrigation needs: 111.3 mm; k) potential use of cultivation water: 1522.7 mm; l) efficiency irrigation schedule: 100%; m) precipitation efficiency: 90.7%; n) irrigation schedule inefficiency: 15.3%; in Table 8b yield reduction is shown per stages.

For scheduling of cultivations irrigation, it was selected the option of irrigation frequency at fixed intervals per stage, due to that irrigation schedule is adjusted to irrigation method that is used and to conditions of water supply of the system and specially used in irrigation systems per gravity with rotational distribution of water, such as is practiced in most of irrigation districts and the option of application of irrigation up to field capacity; in this case applied water takes soil humidity up to field capacity, which corresponds to soil humidity drained in root area and as exhaustion of water of radicular area varies during cultivation cycle, the dose will vary substantially in each stage of cultivation.

presentó. Además el usuario puede para un mismo cultivo, con los datos climatológicos de la misma estación y un mismo tipo de suelo, elegir distintas fechas de siembra, esto es muy útil en el análisis de distintas combinaciones de cultivos y cálculo de las necesidades del sistema.

However, software allows scheduling irrigation under different frequency options and irrigation application, this way to define best for each cultivation and soil type, is important to mention that scheduling irrigation of cultivation in the same planting date, presents variations in function of frequency option and of irrigation application that is selected.

Cuadro 9. Resumen de las alternativas de riego de la caña de azúcar.

Table 9. Summary of irrigation alternatives of sugar cane.

Alternativa de riego	Opción de frecuencia	Opción de aplicación	Dosis neta (mm)	Neces riego (mm)	Eficiencia (%)	Reducc rendim (%)	Eficiencia precipita (%)
1	a	a	100-130	375.0	53.4	16.3	88.7
2	b	c	186-189	311.6	68.1	-----	93.4
3	b	b	126-130	311.6	100	-----	93.4
4	e	d	50	388.9	100	-----	87.5
5	d	d	50	226.4	100	58.4	100
6	f	b	190-200	231.4	100	17.7	99.6
7	f	d	50	226.4	100	52.8	100

Las letras de opción de frecuencia y de aplicación son las que se presentan en materiales y métodos; Neces riego= necesidades reales de riego; Reducc rendim= reducción del rendimiento en la etapa final; Eficiencia precipita= eficiencia total de la precipitación.

Con la información presentada en los Cuadros 5 y 6 y la que se determinó para los otros ocho cultivos (el programa tiene la opción de almacenarlos), se generó el plan de cultivos que se muestra en el Cuadro 10.

To know the differences that are presented according to frequency and application of selected irrigation, there were carried out seven alternatives of irrigation schedules in same planting date for sugar cane, being generated other seven

Cuadro 10. Plan de cultivos para la evaluación de las necesidades de agua del sistema de la estación meteorológica José Cardel, Veracruz.

Table 10. Cultivations plan for evaluation of water needs of system of meteorological station José Cardel, Veracruz.

Núm.	Cultivo	Sup (%)	Siembra (fecha)	Cosecha (fecha)	ETc (mm)	Pef (mm)	Efic sis	Red rend
1	Maíz	3	Junio 8	Octubre 18	527.2	852.3	100	0
2	Fríjol	1	Octubre 18	Enero 18	269.1	64	100	0
3	Tomate	1	Noviembre 5	Abril 1	488	69	100	0
4	Limón	1	Abril 15	Abril 15	1118.8	1039.5	100	0
5	Mango	7	Junio 12	Junio 12	1442.6	1039.5	100	0
6	Caña	57	Mayo 6	Mayo 6	1522.7	1039.5	100	0
7	Pasto	8	Enero 7	Enero 7	1602.8	1039.5	100	0
8	Pepino	1	Junio 15	Octubre 1	406	756.6	100	0
9	Papayo	6	Enero 28	Enero 28	1119.9	1039.5	100	0
10	Chile	1	Octubre 3	Enero 8	289.6	100.1	100	0

Sup= superficie de cada cultivo; ETc= evapotranspiración del cultivo; Pef= precipitación efectiva; Efic sis= eficiencia del sistema; Red rend= reducción del rendimiento.

El programa necesita también la superficie de cada cultivo en porcentaje, que en este caso correspondió a la que reporta el modulo III-1, para el año agrícola de 2005-2006, el total de

tables similar to Table 8a and 8b; therefore, a summary was obtained of these in Table 9, the alternatives that do not show yield reduction of cultivation are: 2, 3 and 4. Also the following

la superficie de los cultivos en estudio fue 86% y representa 3 705 ha, 14% restante (603 ha) correspondía al rubro de cultivos varios, pero como no se especificaban éstos y no se calculó la evapotranspiración, por lo que no se consideraron, además el programa no admite superficies menores al uno por ciento.

Para calcular las necesidades de riego del sistema, los valores decadales de las necesidades de riego que se determinaron para todos los cultivos se transforman a valores mensuales. Aquí se determina la entrega de agua mensual requerida por el sistema de riego de acuerdo a la superficie de los cultivos sembrados y de sus épocas de establecimiento, en el Cuadro 11 se presentan éstas, en los meses de junio a septiembre no se requiere riego. Con respecto al pepino no se le proporciona ningún riego, el maíz únicamente requiere en el mes de octubre.

data are mentioned that are not given in this: sheet of gross irrigation varied between 143 (f, d) and 1613 (b, c) mm, with the first sheet there is a yield reduction for the whole cycle 41.7%, in the other one it was not presented. The user can also for one same cultivation, with climatological data of the same station and same soil type, to select different planting dates, this is very useful in the analysis of different combinations of cultivations and calculation of needs of the system.

With the information presented in Table 5 and 6 and the one that was determined for the other eight cultivations (software has the option of saving them), the cultivations plan shown in Table 10 was generated.

The software also needs surface of each cultivation in percentage, in this case corresponded to the one that module III-1 reports, for agricultural year 2005-2006, the total surface

Cuadro 11. Necesidades de agua del sistema para la evaluación de la estación meteorológica José Cardel, La Antigua, Veracruz.

Table 11. Water needs of system for evaluation of meteorological station José Cardel, La Antigua, Veracruz.

Núm.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	1.3	3.6
3	3.3	3.4	3.2	0	0	0	0	0	0	0	1.9	2.5
4	2	2	2.7	3.2	2.4	0	0	0	0	1.1	1.7	2
5	2.8	2.7	3.4	3.9	3.2	0	0	0	0	2.2	2.7	2.8
6	2.9	2.9	3.6	4.2	3.4	0	0	0	0	2.5	2.9	3
7	3.1	3.1	3.8	4.4	3.7	0	0	0	0	2.7	3.1	3.2
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1.8	0.9	1.3	1.6	0.9	0	0	0	0	3.2	3.5	3.4
10	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	2.2	3.7
QN ₁	2.3	2.2	2.7	3.1	2.5	0	0	0	0	2	2.4	2.3
QN ₂	70	66	82	94	76	0	0	0	0	61	72	76
QN ₃	0.27	0.25	0.32	0.36	0.3	0	0	0	0	0.24	0.28	0.29
SI	81.6	80.6	80.6	79.6	77.4	0	0	0	0	82.8	82.6	82.6
QS	0.33	0.31	0.39	0.46	0.38	0	0	0	0	0.28	0.34	0.35

Núm.= corresponde al número del cultivo presentado en el cuadro 10; QN₁= necesidades netas de riego (mm día⁻¹); QN₂= necesidades netas de riego (mm mes⁻¹); QN₃= necesidades netas de riego (L s⁻¹ ha⁻¹); SI= superficie regada (%); QS= necesidades netas de riego para la superficie regada en (L s⁻¹ ha⁻¹).

Al considerar el plan de cultivos del año agrícola 2005-2006, del módulo de riego puente nacional del distrito de riego 035 y con las necesidades de riego del sistema que se calcularon y se compararon con la disponibilidad o abasto de agua de la región (provisión) que fueron proporcionadas por el modulo III-1, para realizar la evaluación de la disponibilidad con

of cultivations in study was 86% and it represents 3 705 ha, 14% remaining (603 ha) corresponded to several cultivations, but as these were not specified and evapotranspiration was not calculated, then they were not considered, besides software does not admit smaller surfaces than one percent.

que contó el modulo en el ciclo indicado, se determinó que se satisfacen las necesidades de riego sin ningún problema excepto para el mes de octubre (Cuadro 12) al comparar la primera fila (Prov) con la última (Nec sist).

To calculate irrigation needs of system, decadal values of irrigation needs that were determined for all cultivations were transformed into monthly values. At this point, is determined delivery of monthly water required by irrigation

Cuadro 12. Evaluación de necesidades de agua del sistema de la estación: José Cardel, río La Antigua, Veracruz.
Table 12. Evaluation of irrigation needs of system of station: José Cardel, La Antigua River, Veracruz.

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Total
Prov	3626	6768	7321	6172.8	6172.8	8811.9	8911.6	9914.2	1637.1	1405.6	2749.5	556	64046.5
NAS netas	61	72	76	70	66	82	94	76	0	0	0	0	597
Efi riego	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
NAS brutas	122	144	152	140	132	164	188	132	0	0.0	0	0	1194
A regada	3705	3705	3705	3705	3705	3705	3705	3705	3705	3705	3705	3705	
Nec sist	4520.1	5335.2	5631.6	5187	4890.6	6076.2	6965.4	4890.6	0	0	0	0	43496.7

Prov= provisión (abastecimiento) en miles de $\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$; NAS netas= necesidades de agua del sistema netas (mm mes^{-1}); Efi riego= eficiencia de riego del sistema (%); NAS bruta= necesidades de agua del sistema brutas (mm mes^{-1}); A regada= área regada (ha); Nec sist= necesidades del sistema brutas en miles de $\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$.

El programa de cómputo CROPWAT es una herramienta muy útil por las diferentes estimaciones y cálculos que realiza, así como la integración de todos éstos. Con lo que respecta al cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) utiliza el método de Penman-Monteith, que es propuesto por los especialistas de la materia (Smith *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1996; Allen *et al.*, 1998) y que tiene un amplio uso actualmente en los trabajos científicos relacionados con el uso del agua. Parte de la información que este método utiliza, en la mayoría de las estaciones climatológicas tradicionales del país no se reporta, pero si no se cuenta con esta información (viento, humedad atmosférica y radiación solar) que requiere éste, se tiene la opción de proporcionar la ET_0 por medio del teclado, al utilizar los métodos que se proponen en el boletín 24 de la FAO, la selección de uno de éstos, se basa en la información que tenga disponible la estación de la región. En la actualidad la disminución del costo de las estaciones automáticas está permitiendo su uso creciente en los distritos de riego y unidades de riego, con lo cual se facilita el cálculo de la ET_0 .

Con respecto al cálculo de la precipitación efectiva el programa presenta cuatro opciones, para definir cual se va a utilizar depende de la información con que se

system according to surface of sowed cultivations and of their establishment season, in Table 11 these are presented, in months from June to September irrigation is not required. With regard to cucumber is not provided any irrigation, corn only requires it in October.

When considering cultivations plan of agricultural year 2005-2006, of irrigation module "Puente Nacional" of irrigation district 035 and with irrigation needs of system that were calculated and they were compared with water supply or availability of the region (supply) that were provided for module III-1, to carry out evaluation of availability that had module in the suitable cycle, it was determined that irrigation needs are satisfied without any problem except for October (Table 12) when comparing the first line (Prov) with the last one (Nec sist).

Computer software CROPWAT is a very useful tool for different estimates and calculations that carries out, as well as integration of all these. With respect calculation of reference evapotranspiration (ET_0) it uses Penman-Monteith method that is proposed by specialists (Smith *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1996; Allen *et al.*, 1998) and that currently has a wide use in scientific works related with water use. Part of information this method uses, in most of nation's traditional climatological stations is not reported, but if this information

cuenta y además de la experiencia y conocimiento que tenga el profesional responsable del manejo de la zona, datos que son importantes para estimar la precipitación efectiva en una región, son algunas propiedades físicas de los suelos, las características de la precipitación, así como de los cultivos. Además las cuatro opciones permiten determinar cuál es la que se adapta mejor a las condiciones de la región.

Si no se cuenta con la información que se necesita de los cultivos, se puede utilizar la que presentan los boletines 24, 33 y 56 de la FAO. Con las experiencias que se vayan teniendo en el uso del programa de los responsables de las zonas de riego, con el manejo de los cultivos por parte de los investigadores(as) de los Campos Experimentales del INIFAP y de los agricultores de la región, se puede determinar, cuál sería la mejor fecha de siembra, la duración de las etapas de los cultivos, ya que el programa permite hacer simulaciones, con lo cual esta información se aproxima más a la realidad, con lo que se obtendrán mejores resultados en el manejo y aprovechamiento del agua, en los rendimientos de los cultivos y en el conocimiento del programa (Fabeiro y Moratalla, 2005).

Para los valores de K_c y K_y se pueden utilizar los que se reportan en los boletines 24 y 56 y 33 respectivamente y se requiere que se validen a nivel regional, para lo cual es necesario realizar experimentación al respecto.

En el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos (evapotranspiración de cultivo, ET_c), se toma como base la información de clima (ET_0 y precipitación efectiva), cultivos (duración de las etapas, K_c , profundidad de raíces, nivel de agotamiento de agua del suelo y K_y) y se determina la ET_c y las necesidades de riego de cada cultivo. Con esta última información se puede obtener el programa de cultivos, para lo cual es necesario conocer el área de establecimiento de cada uno. Un aspecto importante es que a partir del plan de cultivos se definen las necesidades de agua de todo el sistema y si se conoce el abastecimiento con que se cuenta, se realiza la evaluación al comparar éstos. Con lo anterior se pueden proporcionar indicaciones para realizar un ajuste al plan de cultivos y de riego, como en este estudio se definió que las provisiones de agua del sistema en el mes de octubre no son suficientes para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos que se tienen, por lo que es necesario hacerle un ajuste.

is not there (wind, atmospheric humidity and solar radiation), there is an option to provide ET_0 by keyboard input, when using methods proposed in FAO's bulletin 24, selection of one of these, is based on information available in the station of such region. At the present time the decrease in cost of automated stations is allowing its growing use in irrigation districts and irrigation units, with which calculation of ET_0 is eased.

With regards calculation of effective precipitation software presents four options, to define which will use it depends on the information available and also experience and knowledge professional responsible for handling of area has, data important for estimating effective precipitation in a region are some physical properties of soils, precipitation characteristics, as well as of cultivations. Also four options allow determining which one adapts better to region conditions.

If needed cultivations information is not on hand, it can be used the one that FAO's bulletins 24, 33 and 56 present. With experience obtained with software usage, personnel responsible for irrigation areas, with handling of cultivations done by researchers at INIFAP's fields and from farmers of the region, can determine which is best planting date, duration of cultivations stages, since software allows simulations, and with this information is closer to reality, obtaining better results in water handling and exploitation, in cultivations yields and in software knowledge (Fabeiro and Moratalla, 2005).

For K_c and K_y values can be used those reported in bulletins 24 and 56 and 33 and it is required that are validated at regional level; this requires experimentation.

In the calculation of water needs of cultivations (cultivation evapotranspiration, ET_c), as base is taken climate information (ET_0 and effective precipitation), cultivations (stages duration, K_c , roots depth, level of exhaustion of water of soil and K_y) and ET_c and irrigation needs of each cultivation are determined. With this last information can be obtained cultivations schedule, for which is necessary to know establishment area of each one. An important issue is that from cultivations plan there are defined the irrigation needs of the whole system and if is known the available supply, it is carried out evaluation when comparing these. With the above-mentioned can be provided indications to carry out an adjustment to the cultivations and irrigation plan, as in this study it was defined that water supplies of system in October are not enough to satisfy water needs of existing cultivations, is necessary to make it an adjustment.

Por último la programación del riego es un componente importante del programa CROPWAT, ya que permite realizar una serie de aplicaciones y proposiciones para un mejor manejo y aprovechamiento del agua del sistema, en esta parte se requiere información del suelo, que se puede obtener con más facilidad que los cultivos, con respecto al tiempo de su obtención.

El uso adecuado del programa, así como de las opciones de frecuencia y aplicación del riego, servirá para determinar si las prácticas de riego existentes son las adecuadas para el mejor manejo del agua y sino desarrollar y promover mejores prácticas de riego en la región.

El programa también permite simular programas de riego de campo en condiciones de déficit hídrico (un método que está teniendo auge, debido a la contaminación y la presión que está presentando el recurso hídrico en la actualidad), en este caso se propone la reducción de la evapotranspiración en una o varias etapas del cultivo y se valora cual es la mejor opción en función de la disminución del rendimiento y la disponibilidad del recurso hídrico, otra opción es en condiciones de temporal; en este caso el programa define la época en la cual se aprovecha mejor la precipitación y detecta los periodos de sequía, con lo cual se pueden realizar estudios de riego complementario tal y como lo presenta Smith (2000).

CONCLUSIONES

El programa de computo CROPWAT incorpora procedimientos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y los requerimientos de agua de los cultivos y permite la simulación del uso del agua por los cultivos bajo diferentes condiciones de clima, cultivos y suelos.

Los programas de simulación facilitan grandemente la estimación de las necesidades de agua de los cultivos y por ende el cálculo del programa de riego. Además permiten generar criterios para la planeación y manejo del riego, con lo cual se da un mejor uso al recurso hídrico.

Se determinó con la evaluación del sistema, que la disponibilidad del agua del modulo de riego III-1 satisface conjuntamente con la precipitación las necesidades de agua del plan de cultivos del año agrícola 2005-2006 en la mayoría de los meses, siendo la excepción el mes de octubre.

Lastly irrigation schedule is an important component of CROPWAT software, since allows to carry out a series of applications and proposals for a better water handling and exploitation of system, at this point soil information is required, which can be gathered more easy than cultivations, from point of view of time required for its obtention.

The appropriate use of software, as well as of frequency options and irrigation application, will be good to determine if the existent irrigation practices are the appropriate for best water handling and if not, then to develop and to promote better irrigation practices in the region.

Software also allows to simulate field irrigation schedule under hydric deficit conditions (a method that is becoming popular, due to contamination and pressure that it is facing hydric resource at the present time), in this case is intended the reduction of evapotranspiration in one or several stages of cultivation and it is valued which is the best option in function of yield decrease and availability of hydric resource, another option is under season conditions; in this case software defines season in which takes better advantage of precipitation and it detects drought periods, with which there can be carried out studies of complementary irrigation such as Smith (2000) presents it.

CONCLUSIONS

Computer software CROPWAT incorporates procedures for calculation of reference evapotranspiration and requirements of water of cultivations and it allows simulation for water use for cultivations under different climate conditions, cultivations and soils.

Simulation software largely helps to estimate water needs of cultivations and then calculation of irrigation schedule. They also allow generating criteria for planning and irrigation handling, giving a better use to hydric resource.

It was determined with system evaluation that water availability of irrigation module III-1 satisfies, together with precipitation, the water needs of cultivations plan of agricultural year 2005-2006 in most of the months, except for October.

End of the English version



LITERATURA CITADA

- Allen, R.; Pereira, L. A.; Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy. 293 p.
- Cavero, J.; Farre, I.; Debaeke, P. and Faci, J. M. 2000. Simulation of maize under water stress with the EPIC phase and CROPWAT models. *Agron. J.* 92:679-690.
- Comité Técnico de Normalización Nacional de Sistemas y Equipos de Riego (COTENNSER). 2009. Antecedentes. URL: <http://www.imta.gob.mx/cotennser/>.
- Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional. 1988. Normales climatológicas. Periodo 1971-2000. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Distrito Federal, México.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. 1980. Necesidades de agua de los cultivos. Estudios de riego y drenaje. FAO. Boletín 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 194 p.
- Doorenbos, J. y Kassam, A. H. 1980. Efectos del agua sobre el rendimiento en los cultivos. Estudios de riego y drenaje. FAO. Boletín 33. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 212 p.
- González-González, A.; Palacios-Vélez, O.; Palacios-Vélez, E.; Chávez-Morales, J. y Springall-Galindo, R. 2001. Planificación de los recursos hidráulicos con fines de riego en la zona andina del Ecuador. *Agrociencia.* 35:1-12.
- Jones, H. G. and Tardieu, F. 1998. Modelling water relations of horticultural crops a review. *Scientia Hort.* 74:21-46.
- Kassam, A. and Smith, M. 2001. FAO. Methodologies on crop water use and crop water productivity. Paper Núm. CWP-M07. Rome, Italy. 18 p.
- Lhomme, J. P.; Gómez, L. y Jaramillo, A. 1984. Modelo matemático del balance hídrico. *Turrialba.* 34(4):503-507.
- Palacios, V. E. 2002. ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar? Para lograr mejores cosechas. Trillas. México. 214 p.
- Palacios, V. E. y Exebio, G. A. 1989. Introducción a la teoría de la operación de distritos de riego y sistemas de riego. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México. 482 p.
- Fabeiro, C. C. y Moratalla, V. A. 2005. Programación de riegos. *In:* de Santa Olallam M. M. F.; López, F. P. y Calera, B. A. (eds). Agua y agronomía. Mundi Prensa. Madrid, España. 377-405 pp.
- Shayya, W. H. and Bralts, V. F. 1991. Guide to SCS Microcomputer irrigation scheduling package, SCS-Scheduler version 2.0. Departament of agricultural engineering. Michigan State University. Michigan, USA. 50 p.
- Smith, M.; Segeren, A.; Santos-Pereira, L.; Perrier, A. and Allen, R. (1991). Report on the expert consultation for the revision of FAO methodologies for crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 60 p.
- Smith, M. 1992. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management. Irrigation and Drainage Paper 46. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 140 p.
- Smith, M.; Allen, R. and Pereira, L. 1996. Revised FAO methodologies for crop water requirements, *In:* Proceedings of the international conference on evapotranspiration and irrigation scheduling. San Antonio Texas, ASCE. 116-123 pp.
- Smith, M. 2000. The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigate crop production. *Agricultural and Forest Meteorology.* 103:99-108.