

PROGRAMACIÓN INTEGRAL DEL RIEGO EN MAÍZ EN EL NORTE DE SINALOA, MÉXICO

INTEGRAL PROGRAMMING FOR CORN IRRIGATION IN NORTHERN SINALOA, MÉXICO

Waldo Ojeda-Bustamante¹, Ernesto Sifuentes-Ibarra² y Helene Unland-Weiss¹

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac #8532. 62550. Jiutepec, Morelos. México. (wojeda@tlaloc.imta.mx). ²Universidad Autónoma de Sinaloa. Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa. México.

RESUMEN

La calendarización de la irrigación para grandes zonas de riego requiere modelos de fácil implantación en sistemas computacionales. Una calendarización efectiva debe permitir el ajuste de la frecuencia y cantidad del riego basada en factores del suelo, ambiente, planta y manejo del riego. Con objeto de mejorar la calendarización del riego en maíz, se midieron variables meteorológicas estándares y del balance de energía en una parcela de maíz en el Valle del Fuerte, Sinaloa, México. La ventaja es generar automáticamente los programas de riego del maíz de acuerdo con la fenología del cultivo usando el concepto días grado crecimiento. Los resultados obtenidos sirvieron para verificar y actualizar los parámetros usados para calendarizar el riego en función de los días grado crecimiento: coeficiente de cultivo, profundidad radical y factor de abatimiento hídrico. El presente estudio muestra que el uso de modelos para expresar los parámetros de calendarización del riego en función de los días grado es una alternativa viable cuando se aplica a grandes zonas de riego. Se estudia el efecto de la fecha de siembra sobre el programa de riegos considerando la fenología del maíz, y se presenta una aplicación a programas de riegos con baja disponibilidad de agua. Por el tipo de suelo y la baja eficiencia de aplicación de la zona, fue posible reducir y redistribuir el número de riegos sin una merma en los rendimientos usuales, prediciendo la fenología del cultivo mediante el concepto de días grado. Se calculó un consumo de agua para maíz de 44 cm; un valor máximo del coeficiente de cultivo de 1.25 y un valor acumulado de 1451 días grado crecimiento de siembra a madurez fisiológica, para variedades intermedias de maíz sembradas en el norte de Sinaloa.

Palabras clave: Calendarización del riego, coeficiente de cultivo, consumo de agua, días grado, profundidad radical.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad irregular de agua es un problema mundial aún en zonas de alta precipitación (Wanjura y Upchurch, 2000). La agricultura de riego es el principal factor de desarrollo de zonas áridas

ABSTRACT

Irrigation scheduling for large irrigation zones requires models that are easily implemented in computer systems. An effective scheduling should allow for adjusting the frequency and quantity of water applied based on soil, environmental, crop and irrigation management factors. In order to improve irrigation scheduling in corn, the standard meteorological variables and energy balance components were measured to estimate the crop water requirement for corn grown in the Valle del Fuerte, Sinaloa, México. The advantage is to generate automatically the corn irrigation programs according to the phenology of the crop, using the growing-degree day concept. The results obtained were applied to verify and update the following parameters, used to generate irrigation schedules as a function of growing-degree days: crop coefficient, rooting depth, and factor of soil water depletion. The present study shows the feasibility of using models to express irrigation scheduling parameters as a function of degree days when applied to large irrigation districts. The effect of varying planting dates on the irrigation schedule was studied, considering the phenology of the maize crop. An irrigation scheduling application for low water availability is also presented. Due to the soil type and low irrigation efficiency of the area of study, it was possible to reduce and redistribute irrigations without a noticeable decrease in the normal yields, with phenology forecasting using the degree-day concept. A corn water consumption of 44 cm was calculated, with a maximum crop coefficient of 1.25 and a cumulative value of 1451 growing-degree days from planting to maturity, for intermediate corn varieties sown in northern Sinaloa.

Key words: Irrigation scheduling, crop coefficient, water consumption, degree days, rooting depth.

INTRODUCTION

The irregular availability of water is a problem throughout the world, even in high precipitation zones (Wanjura and Upchurch, 2000). Irrigation agriculture is the main development factor in arid and semiarid zones of México. However, recurrent drought and competition for water are the principal threat to the development of these zones; therefore, irrigation

Recibido: Octubre, 2004. Aprobado: Noviembre, 2005.
Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 40: 13-25. 2006.

y semiáridas de México. Sin embargo, las sequías recurrentes y la competencia por el agua son la principal amenaza al desarrollo en estas zonas; por tanto, la agricultura de riego debe disminuir los volúmenes aplicados sin una merma significativa en los rendimientos. En condiciones de baja disponibilidad y alta competencia por agua, se requiere una estrategia integral de su manejo para mejorar su productividad sin una merma importante en los rendimientos normales.

El maíz (*Zea mays* L.) es un grano primordialmente para consumo animal en el mundo. En México, el maíz ocupa la mayor superficie cultivada anualmente: 7 a 8.5 millones ha cultivadas mayoritariamente en temporal (85%), y el 15% restante con riego en el ciclo otoño-invierno (Muñoz y Hernández, 2004). Sinaloa es el principal estado productor de maíz con riego (65% de la producción nacional) durante el ciclo otoño-invierno. A pesar de ser un país maicero, México enfrenta un grave problema de autosuficiencia de maíz, importando anualmente 3 a 7 millones t de las 20 a 26 millones t que consume (periodo 1995-2003). Los rendimientos de maíz son bajos con respecto a los potenciales: los mayores rendimientos con riego son 9 t ha⁻¹ en Sinaloa, y en temporal 5 t ha⁻¹ en Jalisco; el rendimiento promedio nacional para riego es 5.2 t ha⁻¹ y 2 t ha⁻¹ para temporal (Muñoz y Hernández, 2004). Esto muestra las diferencias tecnológicas, edáficas y ambientales de las zonas maiceras de México.

Asegurar una humedad adecuada en la zona de raíces durante las etapas críticas es esencial para obtener rendimientos óptimos. Las etapas más críticas del maíz, desde el punto de vista hídrico, son durante la floración y el jiloteo (Shaw y Newman, 1987). El maíz es un cultivo más sensible al estrés hídrico que otras gramíneas como trigo o sorgo.

Los requerimientos de riego de los cultivos varían, temporal y espacialmente, en función del clima, del manejo, de la fase y de la variedad del cultivo, por lo que su cálculo debe ser local (Doorenbos y Pruitt, 1977). La implantación de un programa de uso eficiente del riego requiere certidumbre del cálculo de los requerimientos de riego.

La programación del riego en grandes áreas demanda el uso de nuevas metodologías de fácil codificación en sistemas computacionales. La incorporación del concepto de días grado crecimiento para describir los parámetros asociados a la calendarización del riego es una alternativa factible en parcelas, y su aplicación a grandes distritos facilitará la programación computarizada del riego parcelario para un mejor análisis y aplicación de políticas para la asignación y uso eficiente del riego. El objetivo del presente estudio fue obtener los requerimientos y estimar los parámetros de riego del maíz, calibrados localmente en las condiciones semiáridas del norte de Sinaloa, México, y aplicarlos para generar una programación del riego viable para grandes zonas de riego.

agriculture should reduce the volume of water applied without a significant loss in yields. Under conditions of low availability and high competition for water, an integral strategy is required for its management to improve productivity, without an important loss in normal yields.

Corn (*Zea mays* L.) is a grain used mainly for animal consumption throughout the world. In México, corn occupies the largest cultivated surface of annual crops with 7 to 8.5 million ha, cultivated principally in the rainfed season (85%), whereas only 15% are planted during the fall-winter season as irrigated crops (Muñoz and Hernández, 2004). The State of Sinaloa is the main producer of irrigated corn, providing 65% of the national production in the fall-winter season. In spite of being a corn producing country, México faces a severe problem of corn self sufficiency, annually importing 3 to 7 million t of the 20 to 26 million t which it consumes (period 1995-2003). The corn yields are low compared to the potentials: the highest yields with irrigation are 9 t ha⁻¹ in Sinaloa, and under rainfed cultivation, 5 t ha⁻¹ in Jalisco; the average national yield is 5.2 t ha⁻¹ for irrigated, and 2 t ha⁻¹ for rainfed corn (Muñoz and Hernández, 2004). This shows the technological, soil, and environmental differences in the corn producing zones of México.

Insuring adequate moisture in the root zone during the critical growth stages is essential for obtaining optimum yields. The most critical stages of corn, from the irrigation aspect, are during flowering and silking (Shaw and Newman, 1987). Corn is a crop that is more sensitive to water stress than other grains such as wheat or sorghum.

The irrigation requirements of the crops vary in time and space, according to climate, management, stage and variety of the crop; therefore, its calculation must be customized to local conditions (Doorenbos and Pruitt, 1977). The implantation of an efficient irrigation water use program requires a high degree of precision for calculating the irrigation requirements.

Irrigation scheduling for large areas demands the use of new methodologies easily implemented into computer code. The incorporation of the growing-degree days concept for describing the parameters associated with irrigation scheduling is a feasible alternative for field plots, and its application to large districts will facilitate the computerized programming of field plots irrigation for a better analysis and application of policies for the allocation and efficient use of irrigation. The objective of the present study was to obtain the requirements and to estimate the irrigation parameters for corn, locally calibrated under the semiarid conditions of northern Sinaloa, Mexico, and to apply them to generate a viable irrigation program for large irrigation zones.

Modelos para los parámetros de calendarización del riego

El desarrollo de muchos organismos es controlado principalmente por la temperatura. Los días grado crecimiento ($^{\circ}D$) son una medida indirecta del crecimiento y desarrollo de plantas e insectos, y representan la integración de la temperatura ambiental entre dos temperaturas limitantes, las cuales definen el intervalo en el cual un organismo se encuentra activo. Fuera de este intervalo el organismo no presenta un desarrollo apreciable o puede morir.

El concepto de días grado crecimiento resultó de observaciones que indicaban: 1) las plantas no se desarrollan cuando la temperatura ambiental es menor que una temperatura basal (Neild y Smith, 1997); 2) la tasa de desarrollo aumentaba cuando la temperatura ambiental era mayor que la temperatura basal; 3) las variedades de maíz requieren diferentes valores acumulados (DA) de los $^{\circ}D$. Los valores acumulados para n días transcurridos se expresa con la siguiente relación:

$$DA = \sum_{i=1}^n {}^{\circ}D_i \quad (1)$$

donde i es el número de días transcurridos a partir de un día inicial de interés, usualmente la fecha de siembra o el día de inicio de una etapa fenológica del cultivo.

La estimación diaria, i , de la variable día grado ($^{\circ}D_i$) requiere conocer la temperatura media ambiental diaria (\bar{T}_i), la cual se determina mediante las siguientes ecuaciones (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2004):

$$\begin{aligned} {}^{\circ}D_i &= \bar{T}_i - T_{c-\min} \text{ si } \bar{T}_i < T_{c-\max}; \\ {}^{\circ}D_i &= T_{c-\max} - T_{c-\min} \text{ si } \bar{T}_i \geq T_{c-\max}; \\ {}^{\circ}D_i &= 0 \text{ si } \bar{T}_i \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (2)$$

donde $T_{c-\min}$ y $T_{c-\max}$ son las temperaturas mínimas y máximas del aire, dentro del cual la planta se desarrolla. La temperatura puede expresarse en grados centígrados o Fahrenheit, y se tiene valores de $T_{c-\min}$ y $T_{c-\max}$ para varios cultivos agrícolas (Fox *et al.*, 1992). La temperatura media diaria (\bar{T}_i) es el promedio aritmético de los registros de la temperatura ambiental en un día i , siendo el caso más simple el promedio aritmético de las temperaturas máxima y mínima del día. Aunque el maíz puede sobrevivir temperaturas adversas entre 0 y 45 $^{\circ}C$, las temperaturas de desarrollo del maíz usadas para calcular los $^{\circ}D$, son 10 y 30 $^{\circ}C$, para $T_{c-\min}$ y $T_{c-\max}$. Temperaturas mayores a 32 $^{\circ}C$ producen reducciones significativas

Models for the parameters used in irrigation scheduling

The development of many organisms is controlled mainly by temperature. The growing degree days ($^{\circ}D$) are an indirect measurement of the growth and development of plants and insects, and represent the integration of environmental temperature between two limiting temperatures, which define the interval in which an organism is active. When environmental temperatures fall outside of this interval, the organism ceases to develop, or it may even die.

The concept of growing-degree days resulted from the following observations: 1) Plants do not develop when the environmental temperature is below a basal temperature (Neild and Smith, 1997); 2) the development rate increases when the environmental temperature is higher than the basal temperature; 3) different maize varieties require different accumulated values (DA) of the $^{\circ}D$. The accumulated values for n days can be expressed using the following ratio:

$$DA = \sum_{i=1}^n {}^{\circ}D_i \quad (1)$$

where i is the number of days since an initial day of interest, which usually represents the planting date or the starting date of a phenological stage of the crop.

The daily estimation, i , of the variable degree day ($^{\circ}D_i$) requires to know the mean daily environmental temperature (\bar{T}_i), which is determined by the following equations (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2004):

$$\begin{aligned} {}^{\circ}D_i &= \bar{T}_i - T_{c-\min} \text{ if } \bar{T}_i < T_{c-\max}; \\ {}^{\circ}D_i &= T_{c-\max} - T_{c-\min} \text{ if } \bar{T}_i \geq T_{c-\max}; \\ {}^{\circ}D_i &= 0 \text{ if } \bar{T}_i \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (2)$$

where $T_{c-\min}$ and $T_{c-\max}$ are the minimum and maximum air temperatures, within which the plant develops. The temperature can be expressed in Celsius or Fahrenheit degrees, and there are values of $T_{c-\min}$ and $T_{c-\max}$ for several agricultural crops (Fox *et al.*, 1992). The mean daily temperature (\bar{T}_i) is the arithmetic average of the records of environmental temperature in day i , the simplest case being the arithmetic average of the maximum and minimum temperatures of the day. Although corn can survive adverse temperatures between 0 and 45 $^{\circ}C$, the temperatures used to calculate the $^{\circ}D$ for corn development are 10 $^{\circ}C$ and 30 $^{\circ}C$, for $T_{c-\min}$ and $T_{c-\max}$. Temperatures over 32 $^{\circ}C$ produce significant

en el rendimiento, principalmente durante las fases de llenado de grano y reproducción (Neild y Newman, 1987). Para el maíz, y usando grados centígrados, la ecuación (2) se simplifica como:

$$\begin{aligned} \text{°}D_i &= \bar{T}_i - 10 \text{ si } \bar{T}_i < 30; \\ \text{°}D_i &= 20 \text{ si } \bar{T}_i \geq 30; \\ \text{°}D_i &= 0 \text{ si } \bar{T}_i \leq 10 \end{aligned} \quad (3)$$

La acumulación diaria de los $\text{°}D_i$ es una variable de gran valor predictivo para el manejo del riego. La maduración de las variedades comerciales de maíz varía de 1150 a 1760 para valores acumulados $\text{°}D$. Las variedades se pueden clasificar por los requerimientos acumulados de $\text{°}D$, las de ciclo corto de 1150 a 1315 $\text{°}D$, las de ciclo intermedio de 1315 a 1590 $\text{°}D$, y las de ciclo largo de 1590 a 1760 $\text{°}D$ (Neild y Newman, 1987).

Para facilitar la expresión matemática del desarrollo de un cultivo se utiliza una variable auxiliar x_n que expresa los días grado crecimiento acumulado (DA_n) hasta el día n , a partir de la siembra o de la emergencia del cultivo, normalizado con respecto al parámetro α_o :

$$x_n = \frac{DA_n}{\alpha_o} \quad (4)$$

donde α_o es el valor DA_N requerido para completar el ciclo fenológico del cultivo de siembra a cosecha de acuerdo con la ecuación:

$$\alpha_o = DA_N = \sum_{i=1}^N \text{°}D_i \quad (5)$$

donde N es el número máximo de días de siembra a cosecha.

En el Cuadro 1 se presentan las ecuaciones para estimar los parámetros para calendarizar el riego propuestas por Ojeda-Bustamante *et al.* (2004). Los modelos permiten calcular las variables de calendarización para un día n : Kc_n , Rd_n , y f_n , en función de las variables DA_n y x_n de acuerdo con las relaciones del Cuadro 1 y la Ecuación 4.

La función $erfc(z)$ representa la función error complemento. Una aproximación racional de la función $erfc(z)$, para $z=0$, está dada por (Abramowitz y Stegun, 1971):

reductions in yield, principally during the grain filling and reproduction stages (Neild and Newman, 1987). For corn, using Celsius degrees, equation (2) is simplified as:

$$\begin{aligned} \text{°}D_i &= \bar{T}_i - 10 \text{ if } \bar{T}_i < 30 \\ \text{°}D_i &= 20 \text{ if } \bar{T}_i \geq 30; \\ \text{°}D_i &= 0 \text{ if } \bar{T}_i \leq 10 \end{aligned} \quad (3)$$

The daily accumulation of the $\text{°}D$ is a variable of high predictive value for irrigation management. The maturation of the commercial corn varieties varies from 1150 to 1760 for cumulative values of $\text{°}D$. The varieties can be classified by the cumulative requirements of $\text{°}D$: those of the short cycle, from 1150 to 1315 $\text{°}D$, those of the intermediate cycle, from 1315 to 1590 $\text{°}D$, and those of the long cycle, from 1590 to 1760 $\text{°}D$ (Neild and Newman, 1987).

To facilitate the mathematical expression of the development of a crop, an auxiliary variable x_n is used, which expresses the cumulative growing-degree days (DA_n) until day n , starting from planting or emergence of the crop, normalized with respect to the parameter α_o :

$$x_n = \frac{DA_n}{\alpha_o} \quad (4)$$

where α_o is the value DA_N required to complete the phenological cycle of the crop from planting to harvest according to the equation:

$$\alpha_o = DA_N = \sum_{i=1}^N \text{°}D_i \quad (5)$$

where N is the maximum number of days from planting to harvest.

The equations for estimating the irrigation scheduling parameters proposed by Ojeda-Bustamante *et al.* (2004) are shown in Table 1. The models make it possible to calculate the variables of scheduling for a day n : Kc_n , Rd_n , and f_n , as a function of the variables DA_n and x_n according to the relationships of Table 1 and Equation 4.

The function $erfc(z)$ represents the function complement error. A rational approximation of the function $erfc(z)$, for $z=0$, is given by Abramowitz and Stegun (1971):

Cuadro 1. Modelos para expresar las variables de calendarización del riego Kc_n , Rd_n y f_n , para un día n después de siembra o emergencia.
Table 1. Models for expressing the variables of irrigation scheduling Kc_n , Rd_n and f_n , for a day n after planting or emergence.

Variable	Modelo	Parámetros
Coefficiente de cultivo	$Kc_n = K_{\max} \operatorname{erfc} \left(\left(\frac{x_n - x_{K_{\max}}}{\alpha_1} \right)^2 \right)$ <p>Si $Kc_i < Kc_o$, entonces $Kc_n = Kc_o$</p>	$K_{\max}, x_{K_{\max}}, \alpha_1, Kc_o$
Profundidad radical	$Rd_n = Rd_o + (Rd_{\max} - Rd_o) \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{(DA_n)^2}{\alpha_2^2} \right) \right\}$	$Rd_o, Rd_{\max}, \alpha_2$
Factor de abatimiento	$f_n = \alpha_3 - \alpha_4 Kc_n$	α_3, α_4

Ojeda-Bustamante *et al.* (2004).

$$\operatorname{erfc}(z) = \left[1 + \sum_{k=1}^4 a_k z^k \right]^{-4} \quad (6)$$

donde a_1, a_2, a_3 , y a_4 son las constantes 0.278393, 0.230389, 0.000972, y 0.078108.

De acuerdo con los modelos (Cuadro 1), además del parámetro común α_o de las Ecuaciones 4 y 5, se requieren: cuatro parámetros adicionales para estimar el coeficiente de cultivo; tres para la profundidad radical; y dos para el factor de abatimiento hídrico.

Los parámetros $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, y α_4 se obtienen del ajuste entre los datos experimentales y los modelos del Cuadro 1, por lo que carecen de significado físico. K_{\max} es el valor máximo del coeficiente de cultivo (K_c), y $x_{K_{\max}}$ es el valor adimensional normalizado x cuando se presenta el valor máximo K_{\max} . Kc_o es el valor inicial de Kc cuando el área foliar del cultivo es mínima, predominando la evaporación del suelo sobre la transpiración del cultivo. Rd_o es la profundidad de siembra y Rd_{\max} es la profundidad máxima efectiva de las raíces.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el área de influencia del distrito de riego 075 localizado en el Valle del Fuerte, al norte del Estado de Sinaloa, México, 25° 48' 53" N y 109° 1' 32" O, y con una altura promedio de 20 m. La superficie regable de este distrito es 238 000 ha, ocupando el maíz para grano casi 50% de la superficie anual cosechada durante el año agrícola 2002-03.

Los suelos del Valle del Fuerte son planos con una textura predominantemente franco arcillosa (50% arcilla, 30% limo y 20% arena), bajos en materia orgánica (menos de 1%), una densidad aparente de 1.2 g cm⁻³, y una humedad aprovechable volumétrica de 15%. La precipitación es primordialmente de origen ciclónico y muy estacional, insuficiente para suplir las necesidades hídricas de los cultivos para su ciclo fenológico. La precipitación anual es 200 a 350 mm, de julio

$$\operatorname{erfc}(z) = \left[1 + \sum_{k=1}^4 a_k z^k \right]^{-4} \quad (6)$$

where a_1, a_2, a_3 , and a_4 are constants with values of 0.278393, 0.230389, 0.000972, and 0.078108.

According to the models (Table 1), in addition to the common parameter α_o of Equations 4 and 5, the following are required: four additional parameters to estimate the crop coefficient; three for rooting depth; and two for the water depletion factor.

The parameters $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, and α_4 are obtained from the adjustment between the experimental data and the models of Table 1, thus, they lack physical significance. K_{\max} is the maximum value of the crop coefficient (K_c), and $x_{K_{\max}}$ is the normalized adimensional value x when the maximum value K_{\max} is presented. Kc_o is the initial value of Kc when the leaf area of the crop is minimal, predominating the soil evaporation over the transpiration of the crop. Rd_o is the planting depth and Rd_{\max} is the effective maximum rooting depth.

MATERIALS AND METHODS

The study was developed in the area of influence of irrigation district 075, located in the Valle del Fuerte, in the north of the State of Sinaloa, Mexico, located at 25° 48' 53" N and 109° 1' 32" W, and with an average elevation of 20 m. The irrigable surface of this district is 238 000 ha, with grain corn occupying nearly 50% of the annual surface harvested during the agricultural year 2002-03.

The soils of the Valle del Fuerte are flat with a texture that is predominantly clay loam (50% clay, 30% silt and 20% sand), low in organic matter (less than 1%), with an apparent density of 1.2 g cm⁻³, and a volumetric available moisture of 15%. The precipitation is mainly of cyclonic origin and is highly seasonal, insufficient to satisfy the water requirements of the crops during their phenological cycle. The annual precipitation is 200 to 350 mm, from July to

a octubre. La evapotranspiración de referencia excede a la precipitación todo el año y, por tanto, se requiere riego para asegurar rendimientos comerciales. Los valores anuales acumulados de la evapotranspiración de referencia (ET_o), de 1600 a 1700 mm, son muy superiores a la precipitación anual.

Para conocer el comportamiento fenológico y evapotranspirativo del maíz, se utilizó una parcela comercial de maíz de 40 ha donde se instaló una estación micrometeorológica para estimar la evapotranspiración real del maíz (ET_r) usando el método de balance de energía de Bowen (Bowen, 1926). La configuración de la estación, similar a la usada por Unland *et al.* (1996), consiste en sensores para medir la radiación neta, la temperatura y presión de vapor del aire a dos alturas sobre el follaje y la temperatura del suelo a dos profundidades. La extensión de la parcela permite minimizar los efectos advectivos debido a inversiones térmicas y a gradientes horizontales de temperatura y presión de vapor (Moguel-Ordóñez *et al.*, 2001), lo cual facilita calcular los flujos de masa y energía requeridos por el método de Bowen. La evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó con la información de una estación agrometeorológica estándar, localizada en la misma parcela de maíz, usando la ecuación de Penman-Monteith (Campbell, 1977; Monteith and Unsworth, 1990). Se sembró el maíz variedad Pioneer 30G54 el 24 de noviembre de 2003 y se cosechó el 31 de mayo del 2004 con una humedad de grano de 13.7%. La densidad de siembra fue 95 000 plantas ha⁻¹ con un espaciamiento entre plantas de 13.15 cm y una separación entre surcos de 80 cm. Se aplicaron cinco riegos por gravedad: cuatro de auxilio y uno de presiembra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Días grado crecimiento acumulado (DA)

En el Cuadro 2 se presentan los días requeridos para acumular diferentes valores de °D para maíz sembrado en diferentes fechas. Un valor DA de 1500 a 1600 (típico

October. The reference evapotranspiration exceeds the precipitation throughout the year; therefore, irrigation is required to insure commercial yields. The accumulated annual values of the reference evapotranspiration (ET_o), from 1600 to 1700 mm, are much higher than the annual precipitation.

To determine the phenological and evapotranspiratory behavior of the corn, a commercial corn plot of 40 ha was selected to install a micrometeorological station to estimate the actual maize evapotranspiration (ET_r) using the Bowen energy balance method (Bowen, 1926). The configuration of the station, similar to that used by Unland *et al.* (1996), consists of sensors for measuring net radiation, air temperature and vapor pressure at two different heights above the foliage, and the soil temperature and at two depths. The large plot size ensured that advective effects due to thermal inversions and to horizontal gradients of temperature and vapor pressure were minimized (Moguel-Ordóñez *et al.*, 2001), facilitating the calculation of the mass and energy flows required by the Bowen method. The reference evapotranspiration (ET_o) was calculated using the information from a standard agrometeorological station, located in the same corn plot, using the Penman-Monteith equation (Campbell, 1977; Monteith and Unsworth, 1990). The corn variety Pioneer 30G54 was sown on November 24 of 2003 and was harvested on May 31 of 2004 with a grain moisture of 13.7%. The crop density was 95 000 plants ha⁻¹ with a spacing between plants of 13.15 cm and a separation between rows of 80 cm. Five furrow irrigations were applied: four auxiliary irrigations and one pre-sowing irrigation.

RESULTS AND DISCUSSION

Accumulated growing-degree days (DA)

The total days required for accumulating different values of °D for corn sown on different dates are shown in Table 2. A DA value of 1500 to 1600, typical for corn

Cuadro 2. Días (n) requeridos para alcanzar varios valores de días grado crecimiento acumulado (DA_n) con diferentes fechas de siembra en el Valle del Fuerte, Sinaloa, México. Se usaron datos climáticos promedio diario de la temperatura ambiental de 10 años (1995-2004) de la estación Batequis de la red climática del Valle del Fuerte.

Table 2. Days (n) required to reach various values of cumulative growing-degree days (DA_n) with different planting dates in the Valle del Fuerte, Sinaloa, Mexico. Daily average climatic data was used of the environmental temperature of 10 years (1995-2004) from the Batequis station of the meteorological network of the Valle del Fuerte.

DA_n	Fecha de siembra									
	1/oct Días	10/oct Días	20/oct Días	30/oct Días	10/nov Días	20/nov Días	30/nov Días	10/dic Días	20/dic Días	
800	56	67	86	108	122	124	122	122	118	
900	67	85	105	128	132	133	134	132	127	
950	74	93	118	134	137	139	138	136	131	
1000	83	100	128	139	141	145	143	140	135	
1100	100	121	144	148	153	153	151	148	142	
1150	107	134	149	153	158	158	155	152	146	
1500	170	176	183	186	186	184	179	174	168	
1600	179	187	192	194	193	190	185	180	174	
1700	190	196	200	201	199	195	191	186	179	
1750	195	201	204	204	202	198	194	189	182	
1800	200	205	208	207	205	201	194	191	184	

para variedades de maíz de la zona, de siembra a maduración para siembras del 20 de octubre al 20 de noviembre (periodo típico en el norte de Sinaloa) produce duraciones uniformes del ciclo con diferencias menores a 5 d, dependiendo de la fecha de siembra. A medida que la fecha de siembra es más temprana o tardía, la duración del ciclo se acorta. Para una variedad que requiere para su desarrollo 1500 °D de siembra a maduración, y para una fecha de siembra de fines de diciembre, la duración del ciclo del maíz se acorta 18 d con respecto a siembras en el periodo del 30 de octubre al 10 de noviembre, como se muestra en el Cuadro 2. Ciclos cortos no necesariamente van asociados con menor requerimiento de riego, ya que las temperaturas aumentan, lo cual incrementa la demanda evapotranspirativa atmosférica.

Fenología del maíz

En el Cuadro 3 se presentan los valores de DA_n a los cuales se presentan las etapas fenológicas de las variedades principales de ciclo intermedio sembradas en el Valle del Fuerte durante el ciclo otoño-invierno. Los valores acumulados de °D son de siembra a madurez fisiológica; si se quiere obtener a partir de emergencia se debe restar 109 °D. La etapa y clave fenológica son descritos por Ritchie *et al.* (1992).

La madurez fisiológica en el cultivo de maíz es cuando se forma una capa negra cerca de la base del grano, lo cual indica que ha cesado la traslocación de materia seca al grano. En esta etapa el maíz ya no requiere agua, pero no puede ser cosechado por el alto contenido de humedad del grano (30 a 40%) y el costo de su secado artificial. La humedad óptima para almacenamiento del maíz

varieties of this region from planting to maturity, for planting dates from October 20 to November 20 (a typical period in northern Sinaloa) produces uniform durations of the cycle with differences of less than 5 d, depending on the planting date. If the planting date selected is earlier or later than this period, the duration of the cycle is shortened. For a variety that requires 1500 °D for its development from planting to maturity, and for a planting date at the end of December, the duration of the corn cycle is shortened by 18 d with respect to plantings in the period of October 30 to November 10, as is shown in Table 2. Short cycles are not necessarily associated with a lower irrigation requirement, since the temperatures increase, which leads to a higher atmospheric evapotranspiration demand.

Corn phenology

In Table 3 it can be observed the values of DA_n and the corresponding phenological stages for the principal varieties of intermediate cycle corn sown in the Valle del Fuerte during the fall-winter cycle. The cumulative values of °D are from planting to physiological maturity; if they are to be obtained from the point of emergence, 109°D should be subtracted. The stage and phenological code are described by Ritchie *et al.* (1992).

Physiological maturity in the corn crop is when a black layer is formed near the base of the grain, which indicates that the translocation of dry matter to the grain has ceased. In this stage, the corn no longer requires water, but it can not be harvested due to the high moisture content of the grain (30 to 40%), and due to the cost of artificial drying. The optimum moisture content for

Cuadro 3. Consumo de agua promedio (ET_p) por etapa fenológica para una variedad típica intermedia de maíz sembrada en el Valle del Fuerte, Sinaloa, con requerimientos a madurez de 1451 °D. Se presenta la duración promedio de cada etapa expresada en días, así como en días grado acumulado (DA_n), tanto para la etapa como acumulada desde la siembra.

Table 3. Average water consumption (ET_p) per phenological stage for a typical intermediate variety of corn sown in the Valle del Fuerte, Sinaloa, with requirements to maturity of 1451 °D. The average duration is shown for each stage expressed in days, as well as in cumulative degree days (DA_n), for the stage as well as the accumulation after planting.

Etapa	Clave	K_c	Consumo de agua promedio			Duración etapa		Duración acumulada	
			Diario mm	Etapa mm	Acum mm	Días n	DA_n °D	Días n	DA_n °D
Emergencia	Ve	0.05 - 0.3	0.59	7.1	7.1	12	109.4	12	109.4
4 hojas	V4	0.40 - 0.45	0.63	21.6	28.6	34	207.0	46	316.4
8 hojas	V8	0.80 - 0.85	1.41	52.2	80.9	37	185.5	83	502.0
12 hojas	V10	0.9 - 0.98	2.50	35.0	115.9	14	74.1	97	576.1
Flor masculina	VT	1 - 1.12	3.03	39.3	155.2	13	89.1	110	665.2
Jiloteo	R1	1.15 - 1.25	4.47	67.0	222.2	15	158.3	125	823.5
Grano acuoso	R2	1.1 - 1.2	4.87	82.9	305.0	17	155.1	142	978.6
Grano lechoso	R3	1 - 1.1	4.32	47.5	352.6	11	123.7	153	1102.3
Grano masoso	R4	0.8 - 1	4.34	47.8	400.3	11	137.5	164	1239.8
Grano abollado	R5	0.6 - 0.85	2.97	20.8	421.1	7	95.8	171	1335.5
Madurez	R6	0.3 - 0.4	1.85	14.8	435.9	8	115.6	179	1451.1
Cosecha	-	0.05 - 0.2	0.81	8.9	444.8	11	189.6	190	1640.8

grano es 13 a 15 % (Ritchie *et al.*, 1992). La combinación de los Cuadros 2 y 3 se puede utilizar para predecir la duración de cada etapa fenológica del maíz en función de la fecha de siembra para el Valle del Fuerte, Sinaloa. La predicción de la madurez fisiológica es un indicador indirecto de la fecha del último riego. Una buena calendarización del riego debe predecir un bajo contenido de humedad posterior a la madurez fisiológica. Para las condiciones del Valle del Fuerte, el último riego debe aplicarse dos a cuatro semanas antes de la madurez fisiológica de acuerdo con el suelo y clima típico. La información fenológica (Cuadro 3) sería la base para generar mapas de la variabilidad espacial de la maduración y cosecha de las parcelas sembradas con maíz, de la aplicación del último riego, y del consumo de agua.

Consumo de agua

En la Figura 1 se presenta la variación obtenida con el método de Bowen (puntos) y ajustada (línea continua) de la evapotranspiración real diaria del maíz en el sitio experimental. Los valores experimentales presentan las fluctuaciones diarias del consumo de agua por el cultivo. La línea de ajuste de la Figura 1 define un consumo promedio para el maíz obtenida empíricamente por ajuste de la ecuación para K_c del Cuadro 1 a los datos experimentales. La duración y el consumo de agua promedio para cada etapa fenológica se presenta en el Cuadro 3.

Los valores altos de consumo de agua después de cada riego se deben al incremento de la evaporación del agua del suelo intrínseca al riego superficial. Los valores del consumo de agua de los días 40 al 60 fueron bajos debido a las bajas temperaturas (atípicas) en la zona durante el periodo de estudio. El consumo total de agua del maíz es 44 cm, con una demanda máxima promedio de 5.4 mm d^{-1} . La duración del ciclo fue 179 d (siembra a maduración fisiológica) con una acumulación de días grado crecimiento de $1451 \text{ }^\circ\text{D}$; la duración de siembra a cosecha fue 190 d, equivalente a $1641 \text{ }^\circ\text{D}$. El promedio del consumo de agua en todo el ciclo fue 2.7 mm d^{-1} . El valor máximo del coeficiente de cultivo (K_c) fue 1.25 y los valores K_c para cada etapa fenológica se presentan en el Cuadro 3.

Parámetros de calendarización

Los parámetros correspondientes a los modelos del Cuadro 1, usados para calendarizar el riego en parcelas con dos sistemas de aplicación del riego, se presentan en el Cuadro 4.

Los valores K_{\max} , K_{c_0} , y $x_{K_{\max}}$ se obtuvieron de los datos experimentales (Figura 1) ajustados con datos para el tipo de variedades intermedia sembradas en la zona

storage of corn grain is 13 to 15% (Ritchie *et al.*, 1992). Tables 2 and 3 can be used in combination to predict the phenological stage duration as a function of the corn planting date for the Valle del Fuerte, Sinaloa. The prediction of physiological maturity is an indirect indicator of the last irrigation date. A good irrigation scheduling should predict a low moisture content after physiological maturity. For the conditions of the Valle del Fuerte, the last irrigation should be applied two to four weeks prior to physiological maturity according to the soil and typical climate. The phenological information (Table 3) forms the basis for generating spatial variability maps of the maturation and harvest of the plots sown with corn, of the last irrigation application, and of the water consumption.

Water consumption

The variation of the actual daily corn evapotranspiration at the experimental site, obtained using the Bowen Ratio method (dots) and adjusted values (continuous line) is shown in Table 1. The experimental values present the daily fluctuations of the crop water consumption. The adjusted line in Figure 1 defines an average consumption for the corn obtained empirically by adjusting the K_c equation shown in Table 1 to the experimental data. The duration and average water consumption for each phenological stage are presented in Table 3.

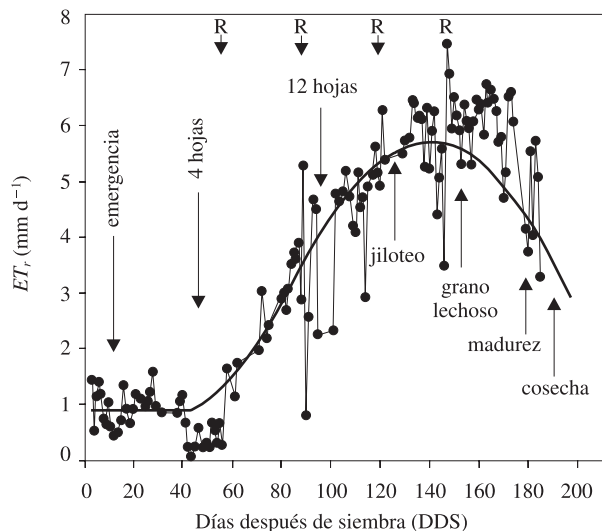


Figura 1. Consumo de agua experimental y promedio para el maíz a lo largo de su ciclo. Se presentan las fechas de aparición de las fases fenológicas y de los riegos aplicados (R) en la parcela experimental.

Figure 1. Experimental water consumption and average for corn throughout its cycle. Dates are shown of the appearance of the phenological phases and of the applied irrigations (R) in the experimental plot.

Cuadro 4. Parámetros estimados de calendarización del riego obtenidos para el cultivo de maíz en condiciones óptimas de disponibilidad de agua.**Table 4. Estimated parameters of irrigation scheduling obtained for the corn crop under optimum conditions of water availability.**

Parámetro	Valor
K_{max}	1.25
Kc_o	0.2
$x_{K_{max}}$	0.59
Rd_o	0.07 m
Rd_{max}	1.00 m
$\alpha_o, \alpha_1, \alpha_2$	1641 °D, 0.45, 527 °D,
α_3	0.8 (gravedad), 0.6 (aspersión)
α_4	0.1

que maduran a valores de DA de 1400-1600 °D. Los valores de Rd_o y Rd_{max} se obtuvieron de datos de profundidad de la siembra y profundidad radical máxima del maíz para la zona. El parámetro $\alpha_o=1641^\circ D$ define el valor máximo de DA de siembra a cosecha. El valor α_1 se obtuvo del ajuste del modelo del Cuadro 1 para Kc a los datos experimentales de ET_r . El valor $\alpha_2=527$, del modelo del Cuadro 1 para Rd fue ajustado empíricamente, de acuerdo a Ojeda-Bustamante *et al.* (2004), de un valor aproximado a 2/3 del valor DA_n donde el maíz alcanza profundidad radical máxima de 750 a 850 °D. Los valores de los parámetros α_3 y α_4 para el factor de abatimiento f del Cuadro 1 fueron calibrados empíricamente considerando la sensibilidad del maíz al estrés hídrico y las prácticas del manejo del riego por gravedad y aspersión en la zona.

Para mostrar la aplicabilidad de los modelos usados se generaron calendarios de riego para maíz en condiciones normales de disponibilidad de agua, en dos parcelas comerciales del Valle del Fuerte. Se usaron los valores del Cuadro 4 para generar calendarios de riego en surcos y aspersión móvil para maíz. En ambos calendarios se consideró que el primer riego se aplica para mojar la zona de raíces máxima (100 cm) y que el suelo tiene una humedad a punto de marchitamiento permanente. El calendario de riego aplicado para riego por gravedad se presenta en el Cuadro 5, con un riego de presiembra de 23.5 cm y cuatro riegos de auxilio, totalizando una lámina neta de 44.2 cm y una lámina bruta de 73.7 cm, calculada en la cabecera de la parcela, con una eficiencia de aplicación de 60%. El primer riego se aplicó 20 d antes de la siembra.

El calendario de riego con un sistema de aspersión móvil se presenta en el Cuadro 6 con un riego de presiembra de 16.5 cm y ocho de auxilio, para totalizar una lámina neta de 45.6 cm y una lámina bruta de 53.6 cm, con una eficiencia de aplicación de 85%. Se tiene una lámina neta un poco mayor en riego por aspersión (Cuadro 6) que el obtenido para gravedad (Cuadro 5),

The high water consumption values observed after each irrigation are due to the increase in the soil evaporation intrinsic to furrow irrigation. The values of water consumption of days 40 to 60 were low, due to the atypically low temperatures recorded in the zone during the period of study. The total water consumption measured for the corn crop was 44 cm, with an average maximum demand of 5.4 mm d⁻¹. The duration of the growing cycle was 179 days (planting to physiological maturity) with an accumulation of 1451 °D; while the duration from planting to harvest was 190 days, equivalent to 1641 °D. The average water consumption for the whole cycle was 2.7 mm d⁻¹. The maximum value of the crop coefficient (Kc) was 1.25; the Kc values for each phenological stage are presented in Table 3.

Scheduling parameters

The parameters corresponding to the models of Table 1, used to schedule the irrigation in plots with two systems of irrigation application, are presented in Table 4.

The values K_{max} , Kc_o , and $x_{K_{max}}$ were obtained from the experimental data (Figure 1) adjusted using data for the type of intermediate varieties sown in the zone, that mature at DA values of 1400-1600 °D. The values of Rd_o and Rd_{max} were obtained from data of corn planting depth and maximum root depth for the zone. The parameter $\alpha_o=1641^\circ D$ defines the maximum value of DA from planting to harvest. The value α_1 was obtained from the adjustment of the model of Table 1 for Kc to the experimental data of ET_r . The value $\alpha_2=527$, from the model of Table 1 for Rd , was adjusted empirically, according to Ojeda-Bustamante *et al.* (2004) from an approximate value to 2/3 of the DA_n value where the corn reaches maximum root depth from 750 to to 850 °D. The values of the parameters α_3 and α_4 for the depletion factor f of Table 1 were empirically calibrated considering the sensitivity of the corn to water stress and management practices for gravity and sprinkler irrigation in the zone.

To show the applicability of the models that were used, irrigation schedules were generated for corn under normal conditions of water availability, in two commercial fields of the Valle del Fuerte. The values of Table 4 were used to generate irrigation schedules in furrows and linear-move sprinkler systems for corn. In both schedules, it was considered that the first irrigation is applied to wet the maximum root zone (100 cm) and that the soil moisture is at the permanent wilting point. The irrigation schedule applied for gravity (furrow) irrigation is presented in Table 5, with a pre-planting irrigation depth of 23.5 cm and four auxiliary irrigations, totaling a net depth of 44.2 cm and a gross depth of 73.7 cm, calculated at the head of the plot, with an

Cuadro 5. Calendario de riego en maíz con riego por gravedad.
Table 5. Irrigation schedule for corn with gravity (furrow) irrigation.

Riego (número)	Intervalo (días)	Días después de siembra	$^{\circ}D$ acumulados a partir de siembra ($\sum^{\circ}D$)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.0	235.0
2	84	64	424.72	44.5	74.2
3	34	98	580.13	73.7	122.8
4	23	121	778.48	86.1	143.4
5	30	141	980.00	96.9	161.5
Total				442.2	736.9

Cuadro 6. Calendario de riego en maíz con riego por aspersión móvil (avance frontal).
Table 6. Irrigation schedule for corn with linear-move sprinkler irrigation.

Riego (número)	Intervalo (días)	Días después de siembra	$^{\circ}D$ acumulados a partir de siembra ($\sum^{\circ}D$)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.0	165.1
2	50	30	225.5	15.6	18.3
3	38	68	442.8	36.4	42.8
4	20	88	527.5	42.9	50.4
5	19	107	635.4	49.8	58.5
6	13	120	766.1	52.6	61.9
7	12	132	890.2	56.9	66.9
8	13	145	1011.9	61.1	71.9
Total				456.2	535.8

debido que al incrementar la frecuencia del riego se reduce el estrés hídrico del cultivo y se incrementa su evapotranspiración.

Efecto de la fecha de siembra en la evapotranspiración

Para definir la mejor temporada de siembra desde el punto de vista de requerimientos de riego, se realizaron varias simulaciones para las condiciones típicas del módulo de riego Batequis. Con el apoyo de un sistema de pronóstico de riego en tiempo real usado en el distrito de riego 075, así como de información sobre la fenología local del cultivo y de datos climáticos registrados por estaciones meteorológicas, se determinaron los requerimientos de riego del maíz considerando 1000-1100 $^{\circ}D$ para aplicar el último riego y 1452 $^{\circ}D$ para alcanzar la madurez fisiológica acumulados a partir de la siembra. En el Cuadro 7 se presentan los resultados de los requerimientos de riego en función de la fecha de siembra. Desde el punto de vista de uso eficiente del agua y manejo del riego, es preferible compactar el periodo de siembras que minimice el consumo de agua sin mermas significativas en los rendimientos convencionales. Considerando rendimiento, disponibilidad del agua y requerimientos de riego del maíz, el mejor periodo de siembras se presenta durante la primera mitad del mes de octubre. Siembras tempranas a ese periodo no son recomendables por la incertidumbre en la disponibilidad de agua, mientras que siembras tardías tienen mayores consumos

application efficiency of 60%. The first irrigation was applied 20 d before planting.

The irrigation schedule for a sprinkler system is presented in Table 6 with a pre-planting irrigation depth of 16.5 cm and 8 auxiliary irrigations, totaling a net depth of 45.6 cm and a gross depth of 53.6 cm, with an 85% application efficiency. There was a slightly greater net depth for sprinkler irrigation (Table 6) than that obtained for gravity (Table 5), due to the fact that as the frequency of irrigation is increased, there is a reduction in the crop water stress and an increase of evapotranspiration.

Effect of the planting date on evapotranspiration

To define the best planting season from the viewpoint of irrigation requirements, various simulations were run for the conditions typical of the Batequis irrigation module. Using a real time irrigation forecasting computer model installed in the irrigation district 075, in addition to information about the local crop phenology and climatic data registered by meteorological stations, the irrigation requirements were determined for corn considering 1000-1100 $^{\circ}D$ for applying the last irrigation and 1452 $^{\circ}D$ for reaching physiological maturity accumulated after planting. The results of the irrigation requirements as a function of the planting date are shown in Table 7. From the point of view of an efficient water use and irrigation management, it is preferable to compact the planting period to minimize the consumption of water without causing significant losses in conventional yields.

Cuadro 7. Requerimientos de riego para alcanzar madurez fisiológica del maíz grano para diferentes fechas de siembra en el módulo de riego Batequis del DR 075, Sinaloa.

Table 7. Irrigation requirements to reach physiological maturity of corn grain for different planting dates in the irrigation module Batequis of DR 075, Sinaloa.

Fecha de siembra	Duración del ciclo (días)	ET_o^\dagger (mm)	ET_r^\ddagger (mm)	Número de riegos
Sep-15	123	405	277	3
Oct-01	165	505	360	4
Oct-15	176	558	375	4
Nov-01	183	605	435	5
Nov-15	182	633	419	5
Dic-01	176	641	421	5
Dic-15	168	636	433	6
Ene-01	157	622	425	6
Ene-15	148	626	410	5

$^\dagger ET_o$ = evapotranspiración de referencia; $^\ddagger ET_r$ = evapotranspiración real.

de agua y acortan el intervalo de riegos sin un incremento sustancial en los rendimientos.

Programación del riego en maíz con estrés hídrico

El riego es la única forma de reducir el estrés hídrico de los cultivos, aunque es posible aplicar prácticas de manejo (riego en surcos alternos, riego intermitente, riego deficitario, surcos cortos, y reducción del gasto) para reducir el efecto del estrés cuando el riego aplicado es inferior al requerimiento de riego óptimo del cultivo.

En el módulo Batequis del distrito de riego 075 se asigna una lámina bruta a nivel de toma granja de aproximadamente 90 cm, con una lámina neta de 44 cm para años normales. Sin embargo, para el ciclo otoño-invierno 2002-03 la disponibilidad de agua del módulo era casi 20% menor que la lámina normal, por lo que la lámina bruta asignada fue 72 cm. Para evitar una reducción en la superficie de maíz se generó un programa de riegos en condiciones de sequía, con la finalidad de reducir en un riego el total de los aplicados en condiciones normales. Para minimizar el efecto negativo sobre el cultivo se corrieron varias simulaciones de programas de riego para asegurar una buena humedad durante los periodos de polinización y llenado de grano. En el Cuadro 8 se presentan los programas óptimos en dos condiciones de disponibilidad de agua (normal y escasez) para un suelo típico (franco-arcilloso) del módulo Batequis, considerando las necesidades de riego y fenología del cultivo, así como las condiciones climáticas de la zona.

La reducción de un riego por hectárea generó un ahorro de agua de 1300 m³ ha⁻¹ sin afectar significativamente los rendimientos usuales de la zona. Esto indica que es posible generar programas de riego específicos de una zona de riego con diferentes escenarios de disponibilidad de agua, considerando las condiciones fenológicas, climáticas, y edáficas de las parcelas. Para el tipo de suelo franco-arcilloso predominante en la zona,

Considering yield, water availability and corn irrigation requirements, the best planting period is during the first half of the month of October. Plantings earlier than this are not recommended because of the uncertainty in the water availability, whereas late plantings result in increased water consumption and shortened irrigation intervals without a substantial increase in yields.

Irrigation scheduling in corn with water stress

Irrigation is the only way for reducing crop water stress, although it is possible to apply management practices (alternating furrow irrigation, intermittent irrigation, deficit irrigation, short furrows and reduction in furrow discharge) to minimize the effect of stress when the irrigation applied is lower than the optimum irrigation requirement of the crop.

In the Batequis module of irrigation district 075, a gross irrigation depth of approximately 90 cm is allocated at farm level, with a net depth of 44 cm for normal years. However, for the 2002-03 fall-winter season, the water availability of the module was almost 20% lower than the normal assigned depth, thus the gross depth allocated was 72 cm. To avoid a reduction in the total corn area, an irrigation program was generated for drought conditions, with the purpose of reducing by one the total number of irrigations applied, as compared to normal conditions. To minimize the negative effect on the crop, various simulations of irrigation programs were made to insure a sufficient moisture level during the pollination and grain filling stages. In Table 8 it is shown the optimum programs under two water availability conditions (normal and drought) for a typical soil (clay-loam) of the Batequis irrigation module, considering the irrigation requirements and crop phenology, as well as the local climate conditions of the region.

The reduction of one irrigation per hectare generated a savings of water of 1300 m³ ha⁻¹ without significantly

Cuadro 8. Distribución de riegos por gravedad recomendados para maíz para suelos franco-arcillosos en el Valle del Fuerte, con dos escenarios de disponibilidad de agua.**Table 8. Distribution of gravity (furrow) irrigations recommended for corn for clay-loam soils in the Valle del Fuerte, with two scenarios of water availability.**

Número de riegos	Normal				Escasez			
	$\dagger L_n$ (cm)	$\ddagger L_b$ (cm)	$\S DA_n$	Etapas	L_n (cm)	L_b (cm)	DA_n	Etapas
1	14.1	23.5	-80	Presiembra	14.1	23.5	-80	Presiembra
2	5.4	16	436	V6	7.2	16	500	V8-V10
3	7.4	16	616	VT	9.8	16	747	R1
4	8.6	16	819	R1	10.9	16	996	R3
5	9.1	16	1006	R3				
Total	44.6	87.5	-	-	42	71.5	-	-

$\dagger L_n$ = lámina neta; $\ddagger L_b$ = lámina bruta; $\S DA_n$ = días grado acumulado.

es posible reducir en un riego el programa convencional de los agricultores, aplicando casi la misma lámina neta pero redistribuyendo los riegos considerando las etapas más sensibles del maíz al estrés hídrico. Lo anterior se traduce en grandes ahorros de agua.

La restricción del periodo de siembras y el acoplamiento de los riegos de acuerdo con la fenología del maíz siguiendo la metodología presentada en este trabajo, ha permitido reducir el número de riegos de auxilio en el módulo de riego Batequis: de cinco en el año agrícola 2000-01 a tres en el año 2003-04. La restricción en la disponibilidad del agua ha sido la principal motivación para adoptar tecnologías de conservación del agua en módulos de riego.

CONCLUSIONES

Mediante estimaciones micrometeorológicas, basadas en el método de Bowen, se calculó un consumo de agua de 44 cm, un valor máximo del coeficiente de cultivo de 1.25 y un valor acumulado de 1451 °D de siembra a madurez fisiológica, para variedades intermedias de maíz sembradas en el norte de Sinaloa, México. Los valores estimados de los parámetros (coeficiente de cultivo, factor de abatimiento hídrico y profundidad radical) basados en los días grado crecimiento acumulados, pueden usarse para calendarizar el riego bajo diferentes métodos de riego, tipos de suelo y condiciones ambientales. Estos valores producen programas de riego más consistentes y robustos que los usados actualmente, basado en días después de siembra o emergencia, debido a que consideran las condiciones de manejo del riego y las características climáticas de la zona. La predicción de la fenología usando el concepto de día grado crecimiento simplifica la predicción del programa de riegos al considerar intrínsecamente la variabilidad en las fechas de siembra y en las condiciones climáticas. Los resultados obtenidos se pueden usar para generar programas de riego con diferentes esquemas

affecting the usual yields of the zone. This indicates that it is possible to generate irrigation programs that are specific to an irrigation zone with different scenarios of water availability, considering the local phenological, climatic, and soil conditions of the plots. For the type of clay-loam soil which predominates in the region, it is possible to reduce the conventional irrigation program used by the farmers by at least one irrigation, applying almost the same net water depth, but redistributing the irrigations considering the corn's growth stages that are most sensitive to water stress. This results in great savings of water.

The restriction of the planting period and the timing of the irrigations according to the phenology of the corn following the methodology presented here, has made it possible to reduce the number of auxiliary irrigations in the Batequis irrigation module: from five in the agricultural year 2000-01 to three in the year 2003-04. The restriction in the water availability has been the principal motivation for adopting technologies of water conservation in irrigation modules.

CONCLUSIONS

By means of micrometeorological estimations, based on the Bowen method, a water consumption of 44 cm was calculated, with a maximum crop coefficient of 1.25 and a cumulative value of 1451 °D from planting to physiological maturity, for intermediate varieties of corn sown in northern Sinaloa, México. Estimating the parameter values (crop coefficient, water depletion factor and rooting depth) based on cumulative growing-degree days, can be used to schedule irrigation under different irrigation methods, soil types and environmental conditions. These values produce irrigation programs that are more consistent and robust than those now in use, based on days after planting or emergence, due to the fact that they consider the conditions of irrigation management and the climatic characteristics of the region.

de disponibilidad de agua, como se muestra en un caso de aplicación.

AGRADECIMIENTO

Se agradece el apoyo de la Fundación Produce Sinaloa para el desarrollo del proyecto "Manejo del riego de precisión a gran escala aplicando el concepto grados-día en el distrito de riego 075" en la zona de los Mochis, Sinaloa, México, durante los años agrícolas 2003-04 y 2004-05.

LITERATURA CITADA

Abramowitz, M., and I. Stegun. 1972. Handbook of Mathematical Functions. Dover. New York, USA. 299 p.

Bowen, I. S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* 27: 779-787.

Campbell, G. S. 1977. An Introduction to Environmental Biophysics. Springer Verlag. New York, USA. 159 p.

Doorenbos, J., and W. O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. FAO paper 24. Roma, Italia. 144 p.

Fox, F. A. Jr., T. Scherer, D. C. Slack, and L. J. Clark. 1992. AZCHED. Arizona Irrigation Scheduling. User's manual. Version 1.01. University of Arizona Cooperative Extension. Agricultural and Biosystem Engineering. Tucson, Arizona, USA. 12 p.

Moguel-Ordoñez, E., L. Tijerina-Chávez, A. Quevedo-Nolasco, G. Crespo-Pichardo, y G. Haro-Aguilar. 2001. Evapotranspiración y balance de energía en el cultivo de alfalfa. *Agrociencia* 35: 13-21.

Monteith, J. L., and M. H. Unsworth. 1990. Principles of Environmental Physics. 2nd. Ed. Edward Arnold. London, England. 289 p.

Muñoz, P. D., y R. G. Hernández. 2004. Situación actual y perspectiva del maíz. 2004. Sistema de información y estadística

Phenology forecasting using the growing-degree day concept simplifies the prediction of the irrigation program by intrinsically considering the variability in the planting dates and the climatic conditions. The results obtained can be used to generate irrigation programs with different schemes of water availability as is shown in this study.

—End of the English version—



agroalimentaria y pesquera (SIAP). SAGARPA. Mexico, D. F. 136 p.

Neild R. E., and J. E. Newman. 1987. Growing season characteristics and requirements in the corn belt. *In: National Corn Handbook*. Project leader R. Nielsen. Purdue University. West Lafayette, Indiana. USA. 16 p.

Neild, R. E., and D. T. Smith. 1997. Maturity dates and freeze risks based on growing degree days. University of Nebraska. Paper G83-673-A. 5 p.

Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes, D. C. Slack, and M. Carrillo. 2004. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*. 53: 251-261.

Shaw, R. H., and J. E. Newman. 1987. Weather stress in the corn crop. *In: National Corn Handbook*. Project leader: R. Nielsen. Purdue University. West Lafayette, Indiana. USA. 6 p.

Ritchie, S. W., J. J. Hanway, and G. O. Benson. 1992. How a corn plant develops. Special report No. 48. Iowa State University of Science and Technology. Ames, Iowa, USA. 21 p.

Unland, H., P. R. Houser, W. J. Shuttleworth, and Z. Yang. 1996. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert Site. *Agric. For. Meteorology* 82: 119-153.

Wanjura, D. F., and D. R. Upchurch. 2000. Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status. *Trans. of the ASAE* 43: 867-875.