

# MODELO PARA ESTIMAR EL RENDIMIENTO DE MAÍZ EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

## Model to Estimate Maize Grain Yield as a Function of Soil Moisture

Marco A. Inzunza-Ibarra<sup>1†</sup>, Magdalena Villa-Castorena<sup>1</sup>, Ernesto A. Catalán-Valencia<sup>1</sup> y S. Felipe Mendoza-Moreno<sup>1</sup>

### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue obtener un modelo matemático para estimar el rendimiento de grano del maíz en función del contenido de humedad del suelo en el momento del riego, expresado como la tensión de humedad o potencial mátrico del agua del suelo, en dos periodos de desarrollo del cultivo: desde la siembra hasta el inicio de la floración, y desde el inicio de la floración hasta la madurez fisiológica. La metodología consistió en inducir diferentes grados de abatimiento de la humedad disponible en el suelo durante cada uno de los periodos de desarrollo considerados. Los grados de abatimiento de la humedad del suelo para cada tratamiento se definieron con base en un diseño factorial incompleto de tratamientos utilizando la matriz cuadrado doble. Los resultados mostraron que el modelo lineal de segundo orden, o modelo cuadrático, fue el que mejor representó la relación entre el rendimiento de grano de maíz y la tensión de humedad en el momento del riego. De este modelo se dedujo que es posible obtener una producción de grano máxima de 8.1 t ha<sup>-1</sup> cuando se riega el cultivo a una tensión de humedad del suelo de -0.66 MPa desde la siembra hasta el inicio de la floración, y a una tensión de humedad de -0.23 MPa desde el inicio de la floración hasta la madurez fisiológica. También se dedujo que se requiere de una lámina de agua de 79.4 cm en su ciclo vegetativo para obtener el rendimiento de grano máximo.

**Palabras clave:** *Zea mays L.*, consumo de agua, evapotranspiración relativa, periodos de crecimiento.

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CENID-RASPA, km 6.5 margen derecha canal Sacramento, 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

<sup>†</sup> Autor responsable ([inzunza.marco@inifap.gob.mx](mailto:inzunza.marco@inifap.gob.mx)).

Recibido: julio de 2003. Aceptado: agosto de 2005.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 24: 179-185.

### SUMMARY

The goal of this study was to obtain a mathematical model to estimate maize corn yield as a function of soil water content at irrigation time, expressed as the soil water tension or matric potential, at two crop development periods: from sowing to beginning of flowering, and from beginning of flowering to physiological maturity. The methodology consisted of inducing different available soil water depletion levels during each crop development period. The soil water depletion levels for each treatment were defined from an incomplete factorial design of treatments using the double square matrix. Results showed that the second order linear model or quadratic model was the best model explaining the relationship between maize crop yield and soil water tension at the irrigation time. From this model it was deduced that it is possible to obtain a maximum grain yield of 8.1 t ha<sup>-1</sup> when the crop is irrigated at a soil water tension of -0.66 MPa from sowing to beginning of flowering, and at a soil water tension of -0.23 MPa from beginning of flowering to physiological maturity. It was also deduced that a water depth of 79.4 cm for the whole crop growing cycle is required to obtain the maximum grain yield.

**Index words:** *Zea mays L.*, water consumption, relative evapotranspiration, growth stages.

### INTRODUCCIÓN

El maíz para grano es el cultivo más importante en México, ya que representa la base de la alimentación y cubre, en forma aproximada, 59 por ciento del área total cultivada. Sin embargo, se tiene una producción deficitaria porque de las 8.5 millones hectáreas sembradas en México, 7.5 millones se establecen en condiciones de temporal con un rendimiento medio de 1.5 t ha<sup>-1</sup> y únicamente un millón en condiciones de riego, con un rendimiento promedio de 3.5 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA,

2003). Esta productividad se considera inferior a su potencial, ya que, de acuerdo con resultados de investigación, las variedades de maíz actuales son capaces de producir más de  $10 \text{ t ha}^{-1}$  de grano (Steele *et al.*, 1994; O'Brien *et al.*, 2001; Bergez *et al.*, 2002). En la Comarca Lagunera, la superficie promedio sembrada con maíz en los últimos diez años fue de 35 400 ha, con un rendimiento medio de  $2.32 \text{ t ha}^{-1}$  y un valor de la producción de 98 140 millones de pesos (SAGAR, 1999). Considerando el potencial del cultivo, así como la tecnología disponible, el maíz puede representar una alternativa rentable para el productor regional y contribuir para disminuir la dependencia alimentaria del extranjero. Para lograr esto, se requiere optimizar las diversas prácticas de manejo de los sistemas productivos entre las que destaca el riego, el cual debe ser aplicado en el momento oportuno y con la cantidad de agua necesaria para satisfacer el requerimiento para un rendimiento óptimo. Uno de los enfoques clásicos para optimizar el riego consiste en analizar la respuesta del cultivo a diferentes grados de estrés hídrico cuantificados indirectamente mediante indicadores edáficos, como el contenido de humedad y el potencial mátrico del agua del suelo. De este análisis se obtienen relaciones funcionales que permiten maximizar el rendimiento por unidad de agua usada, así como estimar la producción del cultivo cuando este recurso es restringido (Reck y Overman, 1996; Llewelyn y Featherstone, 1997; Reza *et al.*, 2001).

Estudios con este enfoque han sido reportados por Liang *et al.* (1991) quienes obtuvieron un modelo para estimar el rendimiento de grano del maíz en función de su consumo de agua para altas densidades de plantas. Dicha relación fue explicada por un modelo lineal con un  $R^2 = 0.71$ . De manera similar, Howell *et al.* (1995) reportaron un modelo lineal con  $R^2 = 0.88$  para explicar la relación entre el rendimiento de grano y el consumo de agua del maíz, con un rendimiento máximo mayor que  $10 \text{ t ha}^{-1}$  y un consumo de agua de 97 cm. Por otro lado, en Turquía, la misma relación se explicó con un modelo lineal ( $R^2 = 0.99$ ), pero sin incluir todo el intervalo de la humedad aprovechable del suelo (Irmak *et al.*, 2000). En este estudio se reportó un rendimiento máximo de  $6.6 \text{ t ha}^{-1}$ , con un consumo de agua de 44.1 cm y un contenido de humedad aprovechable en el suelo de 50% en el momento de aplicar el riego. Calviño *et al.* (2003) obtuvieron un modelo para estimar el rendimiento de grano del maíz en función del consumo de agua en diferentes etapas de desarrollo de este cultivo. Se reportó

que el rendimiento varió de 4.2 a  $10 \text{ t ha}^{-1}$  y que dicha relación fue explicada con un modelo polinomial cuadrático ( $R^2 = 0.84$ ), siendo la etapa de floración la más sensible al déficit de humedad en el suelo. Como puede notarse, la mayoría de los trabajos aquí referidos hacen énfasis en la relación entre el rendimiento y el consumo de agua. Sin embargo, es más importante enfatizar la relación entre el rendimiento con algún índice edáfico del estrés hídrico para determinar no sólo el cuánto, sino el cuándo regar de manera más precisa. Es también importante utilizar indicadores edáficos del estrés hídrico que tengan una mayor generalización o extrapolabilidad, al menos a escala regional, como el potencial mátrico del agua del suelo. Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue obtener un modelo para estimar el rendimiento del maíz en función de la tensión de humedad del suelo en dos períodos de desarrollo de este cultivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en Gómez Palacio, Durango, a  $25.58^\circ \text{ N}$ ,  $103.45^\circ \text{ O}$  y a 1138 m de altitud. El clima es seco, desértico y cálido, con una temperatura media anual de  $21.1^\circ \text{ C}$ , precipitación media anual de 230 mm y período libre de heladas de abril a octubre. El suelo del lote experimental se clasifica como Xerosol háplico de acuerdo con la FAO/UNESCO modificada por INEGI (1990) y pertenece a la serie Coyote, de gran representatividad regional por la superficie que domina. Las características físico-químicas más importantes del suelo se muestran en el Cuadro 1. El agua utilizada en el estudio se clasifica como C1S1 (Richards *et al.*, 1977), bajo en contenido de sales y sodio. De acuerdo con el objetivo planteado, la metodología consistió en inducir al cultivo a diferentes grados de estrés hídrico con base en el abatimiento controlado de la humedad disponible del suelo en dos períodos de desarrollo del maíz: etapa uno o etapa vegetativa, E1, que comprende del establecimiento del cultivo al inicio de la floración; y etapa dos o etapa reproductiva, E2, que comprende del inicio de la floración a la madurez fisiológica. Se seleccionaron los siguientes valores de humedad del suelo, expresados como potencial mátrico o la tensión de humedad que el suelo debe de alcanzar antes de la aplicación del riego: -0.05, -0.35, -0.65, -0.95 y -1.25 MPa. Estos valores de humedad cubren la mayor parte del intervalo de la humedad disponible o humedad aprovechable del suelo. Los tratamientos ensayados en

**Cuadro 1. Principales características físicas-químicas del suelo experimental.**

Profundidad	Arena	Limo	Arcilla	Textura <sup>†</sup>	CC	PMP	Da	pH	CE	PSI	MO
cm	----- % -----				--- % ---	---	g cm <sup>-3</sup>		dS m <sup>-1</sup>	--- % ---	
0 a 30	41.4	29.4	29.2	F	30.6	15.9	1.3	7.7	2.7	0.9	1.1
30 a 60	39	31.8	29.2	M	30	14.7	1.2	7.7	2	1.2	0.8
60 a 90	41.4	35.4	23.2	F	29.3	14.4	1.3	7.7	2.4	1.7	0.5

<sup>†</sup> F = franco, M = franco arcilloso. <sup>1</sup> CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; Da = densidad aparente; CE = conductividad eléctrica; PSI = porcentaje de sodio intercambiable; MO = materia orgánica.

campo se derivaron de la aplicación de un diseño factorial incompleto matriz cuadrado doble, donde el factor A son las etapas fenológicas y el factor B los grados de abatimiento de la humedad disponible en el suelo. La matriz cuadrado doble hace una selección estratégica de 13 combinaciones de un total de 25 que resultarían de un diseño factorial completo 5<sup>2</sup> (Cuadro 2). Se usaron la olla y la membrana de presión para determinar la función de retención de humedad del suelo, la cual describe la relación entre el potencial mátrico o tensión de humedad T (MPa) con el contenido de humedad del suelo Ps (kg agua kg<sup>-1</sup> suelo). Se utilizó una ecuación potencial para describir esta relación dentro del rango de la humedad disponible o humedad aprovechable del suelo. Las ecuaciones resultantes para tres profundidades del suelo se presentan en el Cuadro 3.

Durante la estación de crecimiento del cultivo se realizaron muestreos continuos de la humedad en el perfil de suelo explorado por las raíces para conocer la dinámica o régimen de la humedad del suelo a través el tiempo. Estos muestreos se hicieron con una barrena tipo Veihmeyer y un aspersor de neutrones marca Troxler Modelo 3222 previamente calibrado. A partir de esta información se determinó el momento de aplicación de los riegos y el consumo de agua por tratamiento. El consumo de agua para cada tratamiento se determinó mediante un balance hídrico en el perfil del suelo y el momento de aplicación de los riegos con base en la estimación del potencial mátrico o tensión de humedad representativa de todo el perfil del suelo. Esto último se hizo de acuerdo con el método de Fereres *et al.* (1978), el cual involucra la ponderación del potencial mátrico del suelo por el consumo relativo de agua en cada estrato de suelo según la ecuación:

$$T_p = \sum_{j=1}^n T_j \frac{C_j}{C_t} \quad (1)$$

donde: T<sub>p</sub> = potencial mátrico ponderado en el perfil de suelo explorado por las raíces (MPa); T<sub>j</sub> = potencial

**Cuadro 2. Tratamientos de riego ensayados en campo.**

Trata- miento	Tensión de humedad del suelo	
	Siembra a inicio de floración (E1)	Inicio de floración a madurez fisiológica (E2)
	----- MPa -----	
1	-0.05	-0.05
2	-0.05	-0.65
3	-0.05	-1.25
4	-0.35	-0.35
5	-0.35	-0.95
6	-0.65	-0.05
7	-0.65	-0.65
8	-0.65	-1.25
9	-0.95	-0.35
10	-0.95	-0.95
11	-1.25	-0.05
12	-1.25	-0.65
13	-1.25	-1.25

**Cuadro 3. Ecuaciones de retención de humedad del suelo.**

Profundidad	Ecuación	R <sup>2</sup>
cm		
0-30	T = -0.000183142 Ps <sup>-6.104</sup>	0.98
30-60	T = -0.000456315 Ps <sup>-5.56</sup>	0.98
60-90	T = -0.000424874 Ps <sup>-5.68</sup>	0.98

mátrico en el estrato i (MPa); C<sub>i</sub> = consumo de agua en el estrato i (cm); C<sub>t</sub> = consumo de agua total en el perfil de suelo explorado por las raíces (cm); n = número de estratos donde ocurre consumo de agua.

La unidad experimental consistió de una parcela de 5 m de ancho por 10 m de largo; la parcela útil se ubicó en la parte central de la parcela experimental con el fin de eliminar el efecto de orilla. Se utilizó el híbrido de maíz H-419 y la siembra se efectuó en húmedo con una densidad de siembra de 66 mil plantas ha<sup>-1</sup>. Este híbrido de maíz inicia la floración a 55 días, el llenado del grano a 85 días y logra su madurez fisiológica a 115 días

después de la siembra (DDS), aproximadamente. Se fertilizó de acuerdo con la fórmula 120-40-00 de NPK y los productos comerciales usados fueron urea y superfosfato triple de calcio. Las variables evaluadas fueron rendimiento de grano, consumo de agua o evapotranspiración y tensión de humedad del suelo ponderada por consumo de agua.

Para describir la respuesta del cultivo a los distintos grados de abatimiento de la humedad disponible en el suelo se utilizó un modelo polinomial de segundo orden cuya expresión es:

$$R = b_0 + b_1T_1 + b_2T_2 + b_3T_1^2 + b_4T_2^2 + b_5T_1T_2 \quad (2)$$

donde: R = rendimiento de grano ( $t\ ha^{-1}$ );  $T_1, T_2$  = tensión de humedad del suelo para las etapas vegetativa y reproductiva del maíz, respectivamente (MPa);  $b_0$  = ordenada al origen,  $b_1$  a  $b_5$  = coeficientes de la regresión.

Además del modelo polinomial de segundo orden, también se utilizó el modelo lineal propuesto por Doorenbos y Kassam (1996) para describir el efecto del déficit hídrico sobre el rendimiento del cultivo. Dicho modelo relaciona el déficit del rendimiento relativo ( $1 - Y/Y_m$ ) con el déficit de la evapotranspiración relativa ( $1 - ET/ET_m$ ):

$$\left[ 1 - \frac{Y}{Y_m} \right] = K_Y \left[ 1 - \frac{ET}{ET_m} \right] \quad (3)$$

donde: Y = rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ );  $Y_m$  = rendimiento máximo ( $t\ ha^{-1}$ );  $K_Y$  = coeficiente de ajuste del cultivo; ET = evapotranspiración o consumo de agua (cm);  $ET_m$  = evapotranspiración máxima (cm).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evapotranspiración o Consumo de Agua por Etapa de Desarrollo

El número de riegos aplicados al cultivo varió de 2 a 5 para la etapa vegetativa, de 0 a 3 para la etapa reproductiva, y de 3 a 8 para todo el ciclo del cultivo (Cuadro 4). Como era de esperarse, el mayor y el menor número de riegos aplicados correspondieron al tratamiento más húmedo (-0.5, -0.5) y al tratamiento más seco (-1.25, -1.25), respectivamente. La evapotranspiración varió de 15.3 a 53.4 cm para la etapa

vegetativa, de 12.1 a 39.2 cm para la etapa reproductiva, y de 32.4 a 92.6 cm para todo el ciclo del cultivo (Cuadro 4). También los valores extremos de evapotranspiración se observaron en los dos tratamientos mencionados anteriormente.

### Rendimiento de Grano

El rendimiento de grano por tratamiento se presenta en el Cuadro 5. El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos ( $\alpha = 0.01$ ). Los Tratamientos 2, 4, 6 y 7 tuvieron el rendimiento de grano más alto, el cual fluctuó entre 7.36 y 8.77  $t\ ha^{-1}$ . Estos valores de rendimiento resultaron estadísticamente iguales entre sí ( $\alpha = 0.05$ ) y se obtuvieron al aplicar el riego a niveles de tensión de humedad mayores que o iguales a -0.65 MPa durante los dos períodos de desarrollo del cultivo considerados.

Al grupo anterior de tratamientos le sigue en orden descendente el Tratamiento 11, con un rendimiento de 6.67  $t\ ha^{-1}$ . En este tratamiento, el cultivo se desarrolló con una severa restricción de humedad desde la siembra hasta el inicio de la floración (-1.25 MPa), y prácticamente sin restricción de humedad desde el inicio de la floración hasta la madurez fisiológica. El rendimiento de los Tratamientos 3, 5, 9 y 10 varió de 5.77 a 6.14  $t\ ha^{-1}$ , y éstos son los tratamientos que siguen por su magnitud en el rendimiento a los anteriores. En estos tratamientos, el cultivo se desarrolló con tensiones de humedad mayores que -0.95 MPa hasta el inicio de la floración y tensiones de humedad que variaron de -0.35 a -1.25 MPa después de la floración hasta la madurez fisiológica.

Los rendimientos más bajos se obtuvieron con los Tratamientos 8 y 13 (4.46 y 0.92  $t\ ha^{-1}$ ), los cuales sometieron al cultivo a tensiones de humedad de -0.65 y -1.25 MPa durante el primer período de desarrollo, respectivamente, y a -1.25 MPa durante el segundo período de desarrollo en ambos tratamientos.

Los resultados anteriores muestran una respuesta no lineal del rendimiento de grano de maíz a la tensión de humedad del suelo en el momento del riego en los dos períodos de desarrollo analizados. Es decir, un efecto negativo sobre el rendimiento debido tanto al riego frecuente a alta tensión de humedad, como al riego menos frecuente a baja tensión de humedad. En la siguiente sección se analiza dicha relación de manera continua, con base en el modelo de regresión ajustado.

**Cuadro 4. Número de riegos aplicados y evapotranspiración o consumo de agua por tratamiento.**

Tratamiento	Tensión de humedad		Número de riegos		Evapotranspiración		
	E1	E2	E1	E2	E1	E2	
		----- MPa -----				----- cm -----	
1	-0.05	-0.05	5	3	53.4	39.2	
2	-0.05	-0.65	5	1	53.4	30.6	
3	-0.05	-1.25	5	0	53.4	12.1	
4	-0.35	-0.35	4	2	49.4	32.9	
5	-0.35	-0.95	4	2	49.4	25.0	
6	-0.65	-0.05	3	3	44.2	36.3	
7	-0.65	-0.65	3	2	44.2	29.0	
8	-0.65	-1.25	3	1	44.2	14.1	
9	-0.95	-0.35	2	2	25.6	33.9	
10	-0.95	-0.95	2	2	25.6	25.0	
11	-1.25	-0.05	2	3	15.3	37.2	
12	-1.25	-0.65	2	2	15.3	27.8	
13	-1.25	-1.25	2	1	15.3	17.1	

**Cuadro 5. Rendimiento de grano de maíz promedio por tratamiento.**

Tratamiento	Tensión de humedad		Rendimiento promedio de grano
	Etapas 1	Etapas 2	
		----- MPa -----	
		t ha <sup>-1</sup>	
1	-0.05	-0.05	5.92 cde <sup>†</sup>
2	-0.05	-0.65	7.51 abc
3	-0.05	-1.25	5.77 cde
4	-0.35	-0.35	8.22 ab
5	-0.35	-0.95	6.05 cde
6	-0.65	-0.05	8.77 a
7	-0.65	-0.65	7.36 abc
8	-0.65	-1.25	4.46 e
9	-0.95	-0.35	5.94 cde
10	-0.95	-0.95	6.14 cde
11	-1.25	-0.05	6.67 bcd
12	-1.25	-0.65	5.1 de
13	-1.25	-1.25	0.92 f

<sup>†</sup> Medias seguidas por la misma letra son estadísticamente iguales según Tukey ( $\alpha = 0.05$ ,  $n = 3$ ).

### Rendimiento de Grano de Maíz en Función del Régimen de Humedad del Suelo

El modelo polinomial de segundo grado explicó de manera satisfactoria la relación entre el rendimiento de grano y la tensión de humedad del suelo. La función obtenida mediante análisis de regresión es mostrada en la ecuación:

$$R = 4.747 - 9.14 T_1 - 3.37 T_2 - 6.5 T_1^2 - 2.8 T_2^2 - 3.17 T_1 T_2 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.84 \quad CV = 13.8\%$$

donde: R es el rendimiento en t ha<sup>-1</sup>; T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> son la tensión de humedad del suelo promedio durante las etapas vegetativa y reproductiva respectivamente; R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación de la regresión; y CV es el coeficiente de variación.

El análisis de varianza de la regresión mostró que tanto el modelo seleccionado, como los coeficientes de la regresión fueron altamente significativos, lo que indica que los cambios de la tensión de humedad del suelo en las dos etapas fenológicas consideradas explicaron en 84% los cambios en el rendimiento de grano del maíz. También la prueba de falta de ajuste del modelo resultó no significativa, lo que permite decir que el modelo usado es el adecuado para explicar la relación referida. El análisis de la Ecuación 4 mostró que el rendimiento de grano se maximiza cuando el riego se aplica a T<sub>1</sub> = -0.66 MPa durante la etapa vegetativa y a T<sub>2</sub> = -0.23 MPa durante la etapa reproductiva; la sustitución de estos valores en la Ecuación 4 produce un rendimiento de grano máximo de 8.1 t ha<sup>-1</sup>.

El modelo de regresión ajustado confirma la respuesta no lineal del rendimiento de grano a la tensión de humedad del suelo en el momento del riego en los dos períodos de desarrollo analizados. Para la etapa vegetativa, la tensión óptima de humedad de -0.66 MPa resultó considerablemente menor que la tensión máxima ensayada de -0.05 MPa, el cual pudiera ser considerado como un grado de humedad adecuado para la mayoría

de los cultivos desde el punto de vista del manejo del riego. Una probable explicación de esto pudiera ser que el riego frecuente durante la etapa vegetativa favoreció una disminución de la disponibilidad de nutrientes en el suelo en el momento de la fructificación y del llenado del grano durante la etapa reproductiva. Una pérdida de nutrientes por lixiviación pudo haber ocurrido, ya que todo el fertilizante se aplicó en el momento de la siembra. Para la etapa reproductiva, la tensión óptima resultó más próxima a la tensión máxima ensayada, indicando una mayor sensibilidad del rendimiento al déficit de la humedad en el suelo en el momento del riego durante esta etapa del cultivo.

### Rendimiento de Grano en Función de la Lámina de Agua Consumida

La relación entre la producción de grano y la evapotranspiración del cultivo (ET) se ajustó a un modelo del tipo cuadrático resultando la ecuación:

$$R = -8.923 + 0.413ET - 0.0026ET^2 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.66 \quad CV = 19.5\%$$

Tanto el modelo como los coeficientes de ajuste resultaron altamente significativos según el análisis de varianza de la regresión. Sin embargo, los cambios en el consumo de agua explicaron sólo 66% de la variación del rendimiento observada, el cual es un valor bajo en relación con el valor de 84% explicado por la variación de la tensión de humedad en el momento del riego. En la Figura 1 se ilustra la Ecuación 5, donde se observa que una ET de 79.4 cm produce un rendimiento máximo de 7.5 t ha<sup>-1</sup>.

### Relación entre el Déficit del Rendimiento Relativo y el Déficit de la Evapotranspiración Relativa

El ajuste de la relación lineal entre el déficit del rendimiento relativo como variable dependiente y el déficit de la evapotranspiración relativa como variable independiente (Ecuación 3) produjo un valor de  $K_y$  de 1.09, con un  $R^2$  de 0.85 y un CV de 45.2% (Figura 2). El análisis de varianza de la regresión señaló que tanto el modelo, como el coeficiente  $K_y$  fueron altamente significativos. Sin embargo, al analizar la gráfica

del modelo se observa que para un valor de déficit evapotranspirativo igual a cero, el déficit de rendimiento relativo observado es diferente de cero, distinto a lo esperado en cultivos que presentan una respuesta completamente lineal.

En este caso, en vez de cero se observaron valores del déficit de rendimiento relativo de 0.32, 0.35 y 0.45 debido a la respuesta no lineal del rendimiento al consumo de agua, puesto que el valor máximo de ET no correspondió al rendimiento máximo observado. Una respuesta no lineal o cuadrática entre el rendimiento de grano y el consumo de agua es común encontrarla, no así para el rendimiento de forraje el cual responde de manera lineal al consumo de agua (Calviño *et al.*, 2003). Esto generó una mayor variabilidad en los datos observados, lo que se reflejó en un coeficiente de variación más alto (45.2%) que el del modelo cuadrático.

## CONCLUSIONES

- Un modelo lineal de segundo orden o modelo cuadrático fue el que mejor representó la relación entre el rendimiento de grano de maíz y el contenido de humedad en el momento del riego expresado como tensión de humedad en dos períodos de desarrollo del cultivo. De acuerdo con este modelo, es posible obtener una producción de grano máxima de 8.1 t ha<sup>-1</sup> cuando se riega el cultivo a una tensión de humedad del suelo de -0.66 MPa desde la siembra hasta el inicio de la floración, y a una tensión de humedad de -0.23 MPa desde el inicio de la floración hasta la madurez fisiológica, con un consumo total de agua de 79.4 cm. Este modelo constituye una herramienta útil para optimizar

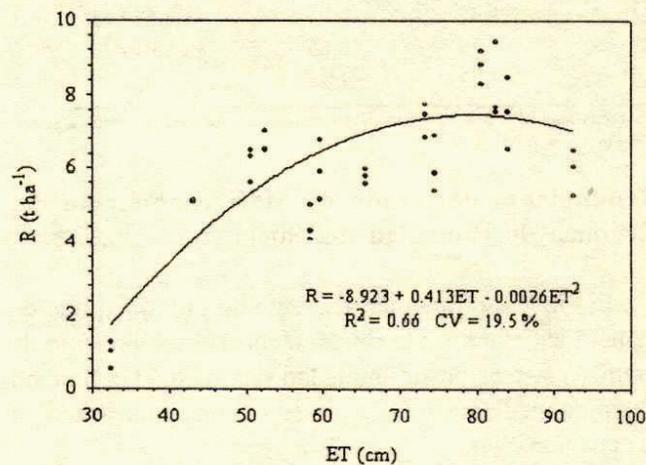


Figura 1. Rendimiento de grano (R) en función de la evapotranspiración [E (lámina de agua consumida)].

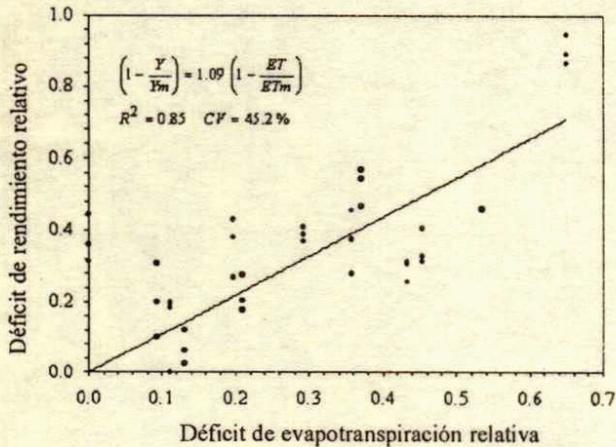


Figura 2. Relación entre el déficit de rendimiento relativo y el déficit de la evapotranspiración relativa.

la producción de grano de maíz con base en la aplicación oportuna y en cantidad suficiente del agua de riego, lo cual es fundamental para lograr un uso más racional de este recurso en las zonas áridas del norte del país donde se practica el riego y el agua es escasa.

**LITERATURA CITADA**

Bergez, J. E., J. M. Deumier, B. Lacroix, P. Leroy y D. Wallach. 2002. Improving irrigation schedules by using a biophysical and a decisional model. *Eur. J. Agron.* 16: 123-135.

Calviño, P. A., F. H. Andrade y V. O. Sadras. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agron. J.* 95: 275-281.

Doorenbos, J. y A. H. Kassam. 1996. Yield response water. *Irrigation and Drainage paper 33.* Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.

Fereres, E., E. Acevedo, D. W. Henderson y T. C. Hsiao. 1978. Seasonal changes in water potential and turgor maintenance in sorghum and maize under water stress. *Physiol. Plant* 44: 261-267.

Howell, T. A., A. Yazar, A. D. Schneider, D. A. Dusek y K. S. Copeland. 1995. Yield and water use efficiency of corn in response to LEPA irrigation. *Trans. ASAE.* 38: 1737-1747.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1990. Guías para la interpretación de Cartografía. Edafología. Aguascalientes, México.

Irmak, S., D. Z. Haman y R. Bastug. 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agron. J.* 92: 1221-1227.

Liang, B. C., A. F. Mackenzie, P. C. Kirby y M. Remillard. 1991. Corn production in relation to water inputs and heat units. *Agron. J.* 83: 794-799.

Llewelyn, R. V. y A. M. Featherstone. 1997. A comparison of crop production functions using simulated data for irrigated corn in western Kansas. *Agric. Systems* 54: 521-538.

O'Brien, D. M., F. R. Lamm, L. R. Stone y D. H. Rogers. 2001. Corn yields and profitability for low-capacity irrigation systems. *Appl. Eng. Agric.* 17: 315-321.

Reca, J., J. Roldan, M. Alcalde, R. López y E. Camacho. 2001. Optimization model for water allocation in deficit irrigation systems. I. Description of the model. *Agric. Water Manage.* 48: 103-116.

Reck, W. R. y A. R. Overman. 1996. Estimation of corn response to water and applied nitrogen. *J. Plant Nutr.* 19: 201-214.

Richards, L. A. 1977. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México, D. F.

SAGAR (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural). 1999. Anuario estadístico de la producción agropecuaria. Región Lagunera Coahuila-Durango. Sistema de Información Agropecuaria. Lerdo, Durango, México.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2003. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.siea.sagarpa.gob.mx>.

Steele, D. D., E. C. Stegman y B. L. Gregor. 1994. Field comparison of irrigation scheduling methods for corn. *Trans. ASAE* 37: 1197-1203.