

# REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO POTENCIAL EN MAÍZ FORRAJERO EN CALENDARIOS CON TRES Y CUATRO RIEGOS

## Potential Yield Reduction of Forage Maize under Irrigation Schedules with Three and Four Irrigations

Jesús Santamaría César<sup>1‡</sup>, David G. Reta Sánchez<sup>1</sup>, Rodolfo Faz Contreras<sup>1</sup> e Ignacio Orona Castillo<sup>2</sup>

### RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar y comparar la reducción del rendimiento potencial (RRP) del maíz forrajero con calendarios de tres y cuatro riegos durante el ciclo, considerando las condiciones climáticas y la humedad aprovechable (HA) de los suelos en el Distrito de Riego 017, Comarca Lagunera, México. Se compararon los valores de la RRP, estimados mediante el modelo CropWat, para dos fechas de siembra y suelos con 120 y 150 mm m<sup>-1</sup> de HA. Se utilizaron los coeficientes de cultivo Kc obtenidos en experimentos realizados en la Comarca Lagunera en 1997, 1998 y 2000. Se consideraron registros climatológicos de 31 años (1975-2005). La aplicación de un cuarto riego en suelos con una HA de 120 mm m<sup>-1</sup> reduce la RRP en 15%, lo que equivale a un incremento en rendimiento de 4.6 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca, mientras que en suelos con 150 mm m<sup>-1</sup> un cuarto riego disminuye la RRP en 9% e incrementa el rendimiento de materia seca en 2.7 Mg ha<sup>-1</sup>, debido a mejores condiciones de humedad en el suelo durante la fase de llenado del grano. En suelos con 120 mm m<sup>-1</sup> de HA es necesario la aplicación de cuatro riegos para alcanzar rendimientos de materia seca de 17.7 Mg ha<sup>-1</sup>, con un nivel de probabilidad no superior a 0.793. En suelos con 150 mm m<sup>-1</sup> de HA el calendario de tres riegos permite obtener rendimientos hasta de 18.8 Mg ha<sup>-1</sup> y, con un cuarto riego, se pueden alcanzar rendimientos hasta de 21.2 Mg ha<sup>-1</sup>, lo que constituye la mejor opción para la producción de maíz forrajero en

el Distrito de Riego 017. Para cualquiera de las condiciones evaluadas en este estudio, el nivel de rendimiento igual o superior al 80% del rendimiento máximo experimental (23.92 Mg ha<sup>-1</sup>) se tiene una probabilidad inferior al 0.168.

**Palabras clave:** *Zea mays L., modelo CropWat, calendarios de riego, humedad aprovechable del suelo.*

### SUMMARY

The objective of this study was to determine and to compare the potential yield reduction (PYR) of forage maize under irrigation schedules with three and four postplanting irrigations considering climatic and soil available water (AW) conditions in the Irrigation District 017, Comarca Lagunera, Mexico. Values of PYR estimated using the CropWat model were compared for two sowing dates and two soils with different AW (120 and 150 mm m<sup>-1</sup>). Kc coefficients for maize obtained in experiments established in the Comarca Lagunera in 1997, 1998, and 2000 were used in this study. Climatic data over 31 years (1975-2005) were used. Application of a fourth irrigation in soils with 120 mm m<sup>-1</sup> of AW reduces PYR by 15%, which is equal to a dry matter yield increase of 4.6 Mg ha<sup>-1</sup>; whereas in soils with 150 mm m<sup>-1</sup> a fourth irrigation reduces PYR by 9% and increases dry matter yield by 2.7 Mg ha<sup>-1</sup> due to better soil moisture conditions during the grain fill phase. In soils with 120 mm m<sup>-1</sup> of AW four irrigations are necessary to reach dry matter yields of 17.7 Mg ha<sup>-1</sup>, with a probability of up to 0.793. In soils with 150 mm m<sup>-1</sup> of AW the irrigation schedule with three irrigations dry matter yields of 18.8 Mg ha<sup>-1</sup> are obtained, and with a fourth irrigation dry matter yields up to 21.2 Mg ha<sup>-1</sup> can be achieved; this is the best option for forage maize production in Irrigation District 017. For all conditions evaluated in this study, the yield level equal to or higher than 80% of maximum experimental yield (23.92 Mg ha<sup>-1</sup>) has a probability below 0.168.

<sup>1</sup> Campo Experimental La Laguna, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Blvd. José Santos Valdés 1200, Col. Mariano Matamoros, 27440 Matamoros, Coahuila, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (jesussc@yahoo.com)

<sup>2</sup> Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango. Apdo. Postal 1-142, Gómez Palacio, Durango, México.

**Index words:** *Zea mays L., CropWat model, irrigation schedules, soil available water.*

## INTRODUCCIÓN

En la Comarca Lagunera, México, el agua de riego se utiliza principalmente en la producción de cultivos forrajeros, como alfalfa, maíz, sorgo y cereales de invierno, los cuales, en 2006, alcanzaron una superficie cosechada de 95 977 ha (SAGARPA, 2006). El maíz forrajero con una superficie cosechada de 28 533 ha (SAGARPA, 2006) es considerado como uno de los cultivos forrajeros más importantes en la región, debido a su alta productividad (Núñez *et al.*, 2003), alta eficiencia en el uso del agua y alto contenido energético. La principal limitante para la producción es la escasez de agua, ya que este cultivo depende, principalmente, del agua de las presas de la región y sólo es posible la aplicación de un riego de presiembra y entre tres y cuatro riegos, dentro del ciclo de crecimiento.

Las fases fenológicas críticas del cultivo a deficiencias de humedad en orden de importancia son: periodos cortos alrededor de la emergencia de estigmas, el periodo de inicio del crecimiento de la mazorca y, en seguida, el periodo vegetativo (Reta y Faz, 1999). Durante el llenado de grano, deficiencias de humedad prolongadas pueden reducir el rendimiento de 29 a 53%, al disminuir el peso medio de grano de 19 a 49% (Reta y Faz, 1999). Reta y Faz (1999) encontraron que para suelos con textura franco arcillosa la mejor respuesta del maíz en rendimiento de grano y uso del agua evapotranspirada se obtuvo cuando el cultivo tuvo condiciones adecuadas de humedad en la fase de diferenciación de órganos reproductivos de 35 a 51 días después de la siembra (DDS), inicio del crecimiento de la mazorca (52 a 65 DDS), inicio de emergencia de estigmas (65 a 69 DDS) y grano lechoso (85 a 120 DDS). Además, indican que en un año con baja precipitación, la aplicación de sólo tres riegos de auxilio provoca en maíz una reducción de la evapotranspiración de 13% durante el llenado de grano, con lo cual el peso medio de grano puede disminuir en 17%. En 1993, en la Comarca Lagunera se obtuvo el rendimiento máximo experimental en la región (RME) de 29.9 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca con la aplicación de siete riegos durante el ciclo de crecimiento, densidades de población de 11.2 plantas m<sup>2</sup> y el uso de la variedad de ciclo intermedio H-422 en suelos de textura franco arcillosa (Reta *et al.*, 2000).

El rendimiento promedio de maíz forrajero en la región es de 15.33 Mg ha<sup>-1</sup>, aproximadamente el 50% del RME.

Otro de los factores importantes en el abastecimiento de agua al cultivo es la humedad aprovechable del suelo (HA), medida en mm m<sup>-1</sup>, la cual se define como la cantidad de agua que almacena el suelo en la zona radical y depende de la textura y la profundidad de las raíces del cultivo (Castellanos-Ramos *et al.*, 2000). Ojeda-Ortega (1947) reporta que en La Laguna la mayor superficie de suelos corresponde a texturas franco arcillo limosas y arcillosas con un 89% de la superficie y, de acuerdo con Castellanos-Ramos *et al.* (2000), estos suelos tienen una HA entre 130 y 193 mm m<sup>-1</sup>.

Una forma de medir el impacto del estrés por déficit de humedad en los cultivos es estimar la reducción del rendimiento potencial (RRP). En el caso del maíz forrajero es necesario conocer los valores de RRP bajo el plan de tres y cuatro riegos durante el ciclo, que incorporen la información de la HA del suelo y las condiciones del clima de la región. Lo anterior es posible realizarlo mediante el empleo de un modelo de simulación, como el CropWat (Doorenbos y Pruitt, 1977). Este modelo se ha empleado para evaluar la demanda de agua de los cultivos, así como el diseño del plan de riegos, mediante la simulación de la RRP del cultivo debido al estrés por el déficit de agua (Smith, 1992; Caveró *et al.*, 2000). CropWat se ha utilizado en estudios regionales con sistemas de información geográfico sobre el balance de humedad del suelo, incluyendo información de imágenes de satélite en las áreas de riego en Irán (Jamshid, 2003). Después de ser transferida la operación de los módulos de riego a los usuarios del Distrito de Riego 017 en la Comarca Lagunera del estado de Durango, México, en 1993, se evaluó el grado de éxito de la transferencia al medir la uniformidad en la distribución del agua entre los usuarios al inicio y final de la aplicación del riego en los módulos. El criterio fue estimar la uniformidad del estrés por déficit de agua al que estuvieron sometidos los cultivos (Etc/Etm, porcentaje del requerimiento de agua consumida), estimado mediante el modelo CropWat (Levine *et al.*, 1998).

El modelo CropWat requiere, para estimar el requerimiento de agua del cultivo, de la siguiente información: a) evapotranspiración de referencia del cultivo (Eto) estimada mediante la ecuación de Penman-Montieth basada en información mensual del clima, o bien, utilizar la Eto obtenida directamente en la localidad,

b) precipitación acumulada mensual, c) padrón de cultivos en el cual se incluye la fecha de siembra, coeficientes de cultivo  $K_c$ , duración de las etapas del cultivo, profundidad de las raíces y fracción de abatimiento de humedad.

Para proporcionar información sobre el plan de riego, el modelo requiere de información adicional sobre características del suelo, como la HA ( $\text{mm m}^{-1}$ ), profundidad máxima de raíces (m) y abatimiento inicial de humedad (% del total de la HA). Con la información anterior, el modelo proporciona información sobre la  $E_{to}$  ( $\text{mm periodo}^{-1}$ ),  $K_c$ , precipitación efectiva (pp, mm) por etapa, la cual es la cantidad de precipitación retenida en el suelo, requerimiento de agua por el cultivo ( $E_{tm}$ ,  $\text{mm periodo}^{-1}$ ), evapotranspiración real del cultivo ( $E_{tc}$ , mm), porcentaje de la evapotranspiración máxima consumida por el cultivo ( $E_{tc}/E_{tm}$ , %), déficit diario de humedad del suelo (mm), intervalo (d), profundidad (mm) de aplicación del riego y la estimación de la reducción RRP (%) debido al estrés por déficit de agua (cuando  $E_{tc}/E_{tm} < 100\%$ ). Mediante el coeficiente de cultivo  $K_c$  se estima el efecto del estrés por déficit de humedad sobre el rendimiento, expresado como la RRP (Doorenbos y Pruitt, 1977; Burman *et al.*, 1980; Allen *et al.*, 2000). Para su determinación se emplean trabajos de campo, como los propuestos por Doorenbos *et al.* (1979), mediante los cuales se obtiene la respuesta del cultivo al déficit de humedad, para diferentes etapas de desarrollo.

Con base en lo anterior, el objetivo fue determinar y comparar la RRP del maíz forrajero con calendarios de tres y cuatro riegos durante el ciclo, considerando las condiciones climáticas y HA de los suelos en el Distrito de Riego 017, Comarca Lagunera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante el modelo CropWat, se estimó la RRP de forraje en el maíz híbrido SB-302 (ciclo intermedio), establecido en calendarios de tres y cuatro riegos, en dos suelos con diferente HA ( $120$  y  $150 \text{ mm m}^{-1}$ ) y bajo la variación aleatoria de las condiciones climatológicas en el Distrito de Riego 017. Se utilizaron los coeficientes de cultivo  $K_c$  obtenidos en las condiciones ambientales del Distrito de Riego 017 en experimentos de maíz forrajero en los ciclos de primavera de 1997, 1998 y 2000 (Faz *et al.*, 2005).

Debido a que Cavero *et al.* (2000) presentan resultados de la evaluación del modelo CropWat en los que se muestra una buena estimación de la RRP del maíz,

pero una sobreestimación de la evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ) y, por lo tanto, de la  $E_{Tc}$  ( $E_{Tc} = K_c \times E_{To}$ ), se empleó la opción en el modelo CropWat de proporcionar directamente la  $E_{To}$  mensual en el ciclo del cultivo para cada año de registro (30 años), obtenida mediante información de la evaporación libre ( $E_v$ ,  $\text{mm mes}^{-1}$ ) del tanque evaporímetro tipo A (Samani y Pessarakli, 1986; Faz *et al.*, 2005) de la estación climatológica del Campo Experimental La Laguna. Para el cálculo de la  $E_{to}$ , se consideró la expresión (Doorenbos y Pruitt, 1977):

$$E_{To} = K_p \times E_v$$

donde:  $K_p$  es el coeficiente del tanque tipo A.

Allen *et al.* (2000) presentan tablas para determinar  $K_p$ , considerando intervalos de la velocidad del viento ( $u_2$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ), humedad relativa ( $HR_{\text{media}}$ , %) y distancia del cultivo a barlovento (BORDE, m). Adicionalmente, se presentan ecuaciones de regresión para el tanque tipo A de la forma:

$$K_p = 0.108 - 0.0286u_2 + 0.0422\text{Ln}(\text{BORDE}) + 0.1434\text{Ln}(HR_{\text{media}}) - 0.000631[\text{Ln}(\text{BORDE})]^2\text{Ln}(HR_{\text{media}})$$

Esta ecuación es válida para  $1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 8 \text{ m s}^{-1}$ ,  $30\% \leq HR_{\text{media}} \leq 84\%$  y  $1 \text{ m} \leq \text{BORDE} \leq 1,000 \text{ m}$ . En el caso del Distrito de Riego 017, para los meses de abril a julio, los valores considerados son: BORDE de 100 m,  $u_2$  entre 1 y 5 m y la  $HR_{\text{media}}$  entre 47 y 59%, por lo que la  $K_p$  está entre los valores de 0.79 a 0.7 con un valor promedio en el ciclo de 0.75, valor empleado en el modelo CropWat. La información sobre los variables del cultivo y suelo empleados en el modelo CropWat se presentan en el Cuadro 1.

Para el proceso de simulación con el modelo CropWat se consideró la aplicación de los riegos, según las etapas críticas encontradas por Reta y Faz (1999) de la siguiente forma: riego de presembrado a los 15 días antes de la siembra, el primer riego a los 35 DDS, el segundo riego a los 52 DDS, el tercero a los 69 DDS y, en el caso de un cuarto riego, éste se aplicó a los 84 DDS. Se consideraron valores de HA del suelo de 120 y 150  $\text{mm m}^{-1}$  que corresponden a texturas franco arcillo arenosas y franco arcillosas, respectivamente, basados en la superficie ocupada por ellas en el Distrito de Riego 017. Ésta se determinó mediante técnicas de información geográfica por interpolación de los valores de la HA estimados mediante el modelo de Saxton *et al.* (1986), que la estima

**Cuadro 1. Características del maíz híbrido SB-302 y las variables del cultivo empleadas en el modelo CropWat de los tres trabajos experimentales establecidos en el Campo Experimental Laguna. Matamoros, Coah. México.**

Característica	Etapa de crecimiento				Total
	Establecimiento	Desarrollo vegetativo	Floración	Formación de grano	
Longitud de ciclo (d)	25	30	20	24	99
Coefficiente de cultivo Kc	0.5	>>>	1.1	0.54	
Profundidad de raíces (m)	0.3	>>>	1	1	
Abatimiento de humedad (%)	0.7	>>>	0.5	0.7	
Factor de rendimiento Ky <sup>†</sup>	0.4	0.5	1.5	2.3	

<sup>†</sup> Doorenbos *et al.* (1979).

como una función de la textura del suelo. La textura del suelo se determinó mediante el análisis de 59 muestras tomadas en el Distrito de Riego 017 en el 2004.

Debido a que la precipitación y la temperatura varían durante el ciclo del cultivo, se consideraron dos fechas de siembra dentro del periodo óptimo recomendado por el Campo Experimental La Laguna, 1 de abril y 1 de mayo, sin considerar un cambio en la duración total del ciclo de cultivo (Faz *et al.*, 2005).

Considerando que la respuesta productiva del maíz forrajero a las condiciones ambientales (RRP) es un fenómeno aleatorio, entonces, se considera el riesgo en función de probabilidades de que se presente un valor de la RRP determinado. Se obtuvo la distribución de frecuencias empírica  $F(RRP_m)$  (Yevjevich, 1972), asumiendo que  $RRP_m$  es una variable aleatoria continua, mediante la expresión:

$$F(RRP_m) = P(RRP_m \leq m) = m/(N+1)$$

donde: m es la secuencia ordenada de menor a mayor de las  $RRP_m$  estimadas con el modelo CropWat,  $m = 1.2 \dots$ , N, y  $N = 31$  años.

Con la finalidad de evaluar la  $P(RRP_m \leq m)$ , se ajustó la función de probabilidad normal, con variables  $\mu$  y  $\sigma$  estimados mediante la media y la desviación estándar muestral ( $\bar{x}_n$  y  $S_n$ ) y se aplicó la prueba de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilks para muestras pequeñas ( $n \leq 50$ ) (Conover, 1980) para probar la hipótesis nula de que la  $RRP_m \sim N(\bar{x}_n, S_n)$ . Se compararon, para los dos calendarios de riegos, dos HA del suelo y dos fechas de siembra, las  $P(RRP_m) \leq (10, 20, 30, 40$  y  $50\%)$ , intervalo seleccionado debido a que una  $RRP \geq 50\%$  del RME significa un rendimiento menor de  $14.95 \text{ Mg ha}^{-1}$  de materia seca, inferior al rendimiento medio de la región ( $15.33 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Distribución Espacial de la HA del Suelo en el Distrito de Riego 017

Del análisis de la distribución espacial de la HA se obtuvo que los suelos con valores entre  $120$  y  $150 \text{ mm m}^{-1}$ , que corresponden a texturas franco arcillo arenosas y franco arcillosas, ocupan la mayor parte de la superficie del distrito con  $218\,078 \text{ ha}$  ( $81.3\%$ ); valores de HA inferiores a  $120 \text{ mm m}^{-1}$  con  $40\,656 \text{ ha}$  representan el  $15.2\%$ ; mientras que valores superiores a  $150 \text{ mm m}^{-1}$  con  $9\,425 \text{ ha}$  son el  $3.5\%$ . Lo anterior indica que el intervalo de valores de HA entre  $120$  y  $150 \text{ mm m}^{-1}$  corresponden a la mayoría de los suelos en el Distrito de Riego 07, en la Comarca Lagunera.

### Reducción del Rendimiento Potencial (RRP) en Función del Consumo de Agua

En el Cuadro 2 se presenta el promedio de 30 años del requerimiento máximo de agua (Etm), agua consumida (Etc), el porcentaje del requerimiento de agua consumido (Etc/Etm), el porcentaje de la HA residual al final del ciclo del maíz y la RRP de maíz en dos fechas de siembra, dos calendarios de riego y dos niveles de HA del suelo analizados.

La fecha de siembra presentó un efecto reducido en el comportamiento del cultivo debido a calendarios de riego, ya que el consumo de agua por el cultivo (Etc) estimado para tres riegos presenta un incremento máximo en la segunda fecha de siembra de  $14$  y  $10 \text{ mm}$  en suelos con una HA de  $120$  y  $150 \text{ mm m}^{-1}$ , respectivamente, y para cuatro riegos estos incrementos son de  $11$  y  $5 \text{ mm}$ , lo cual no representa más del  $3.6\%$  de la Etc promedio en ambos niveles de HA del suelo. El agua residual al final del ciclo que refleja las diferencias de disponibilidad

**Cuadro 2. Requerimiento potencial de agua (Etm), agua consumida (Etc), porcentaje del requerimiento de agua consumido (Etc/Etm), porcentaje de la humedad aprovechable (HA) residual y la reducción del rendimiento potencial (RRP) de dos fechas de siembra de maíz en dos calendarios de riego y dos niveles de HA del suelo.**

Fecha de siembra	HA	Etm	Etc		Etc/ Etm		HA residual		RRP	
			3	4	3	4	3	4	3	4
			mm				%			
1 de abril	120	518.5	387	424	75	82	10	52	57.4	41.3
	150		432	455	84	88	16	61	(12.7) <sup>†</sup>	(17.6)
1 de mayo	120	530.9	401	435	76	82	13	55	54.4	40.5
	150		442	460	84	86	19	64	(13.6)	(17.8)
									36.6	29.0
									(19.0)	(21.2)

<sup>†</sup> [(1-RRP) × RME] Rendimientos estimados en Mg ha<sup>-1</sup> en porcentaje del rendimiento máximo experimental (RME).

de humedad entre los dos calendarios de riego se incrementa en 3% y el rendimiento estimado en un máximo de 0.9 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca entre fechas de siembra. Este incremento se relaciona con una mayor demanda máxima de agua (Etm = 12.4 mm), probablemente debido a un aumento en la temperatura promedio en el ciclo de 1.2 °C y una mayor precipitación efectiva acumulada promedio en el ciclo de 22.2 mm cuando se retrasa la siembra. Este efecto reducido es debido a que las fechas de siembra estudiadas están dentro del intervalo óptimo recomendado en el Distrito de Riego 017.

Si se considera la información promedio de las dos fechas de siembra se tiene que la RRP en suelos con una HA de 120 mm m<sup>-1</sup>, al aplicar un cuarto riego, presenta un decremento de 15%, ya que de 55.9% con tres riegos disminuye a 40.9%, que equivale a una producción de 4.6 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca adicionales. En estos suelos se puede obtener hasta 17.7 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca. Para suelos con 150 mm m<sup>-1</sup> de HA la aplicación de un cuarto riego disminuye la RRP en 9%, lo que equivale a 2.7 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca adicionales, y se pueden obtener rendimientos hasta de 21.4 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca. El menor incremento del rendimiento en suelos con mayor HA (150 mm m<sup>-1</sup>), al aplicar un cuarto riego, se debe a que el maíz con tres riegos llega a la fase de llenado de grano con mejores condiciones de humedad que el maíz establecido en suelos con menor HA. Esto se observa en la disponibilidad de agua residual promedio de las dos fechas de siembra en la etapa de grano lechoso (82 DDS), la cual es de 11.5% (13.8 mm) en suelos con HA de 120 mm m<sup>-1</sup> y de 17.5% (26.3 mm) en suelos con

150 mm m<sup>-1</sup>. En ambos suelos, la aplicación de sólo tres riegos durante el ciclo reduce el rendimiento de materia seca, debido a deficiencias de humedad durante el llenado de grano, como también lo indican otros estudios (Reta y Faz, 1999).

### Probabilidad de Reducción del Rendimiento Potencial (RRP)

La prueba de Shapiro-Wilks para normalidad de las RRP estimadas mostró evidencias que, bajo las condiciones estudiadas, la distribución de probabilidad de esta variable se puede aproximar mediante una distribución normal con media  $\bar{x}_n$  y desviación estándar  $S_n$ . Las estadísticas de prueba W estuvieron en el rango de 0.9553 a 0.9838 superiores a la  $W_{0.05}$  de 0.929 (Conover, 1980) para un tamaño de muestra de 31 años, por lo que, en ningún caso, se rechazó la hipótesis de normalidad.

La probabilidad de que se presente una disminución del rendimiento potencial mayor o igual al 10, 20, 30, 40 y 50% se presenta en el Cuadro 3. Como un valor de referencia al rendimiento potencial, se incluye el rendimiento máximo experimental (RME), en donde una  $RRP \leq 10\%$  se considera equivale a un rendimiento  $\geq [(1-RRP) \times RME]$ .

El retraso de la fecha de siembra del 1 de abril al 1 de mayo no modifica la probabilidad de que ocurra una RRP en más de 0.074. Por el contrario, la diferencia de HA entre suelos es un factor importante para modificar la probabilidad de obtener una RRP (Cuadro 3).

**Cuadro 3. Probabilidad de que se presente una disminución del rendimiento potencial (RRP) menor o igual a 0, 10, 20, 30, 40 y 50% en maíz forrajero con tres y cuatro riegos en dos fechas de siembra y dos niveles de humedad aprovechable (HA) del suelo.**

Fecha de siembra	RRP	RRP × RME <sup>†</sup>	Humedad aprovechable			
			120		150	
			Número de riegos			
			3	4	3	4
	%	Mg ha <sup>-1</sup>	mm m <sup>-1</sup>			
1 abril pp <sup>‡</sup> = 46.7 mm	10	26.91	0.002	0.002	0.019	0.013
	20	23.92	0.010	0.024	0.090	0.168
	30	20.93	0.045	0.148	0.277	0.613
	40	17.94	0.141	0.451	0.561	0.938
	50	14.95	0.324	0.788	0.816	0.997
1 mayo pp <sup>‡</sup> = 68.9 mm	10	26.91	0.001	0.004	0.008	0.016
	20	23.92	0.009	0.039	0.065	0.154
	30	20.93	0.045	0.184	0.273	0.545
	40	17.94	0.159	0.484	0.622	0.894
	50	14.95	0.380	0.793	0.890	0.991

<sup>†</sup> Porcentaje del rendimiento máximo experimental (RME) (29.9 t ha<sup>-1</sup>); <sup>‡</sup> pp = precipitación efectiva promedio acumulada en el ciclo (mm).

En suelos con una HA de 120 mm m<sup>-1</sup> y tres riegos de auxilio la P(RRP<sub>m</sub>) ≤ 50% del RME (14.95 Mg ha<sup>-1</sup>) no es superior a 0.38; sin embargo, al aplicar un cuarto riego, esta probabilidad se incrementa a 0.793. En este tipo de suelos, aun aplicando cuatro riegos, el maíz tiene baja probabilidad (0.184) de obtener rendimientos superiores a 20.93 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca.

En suelos con una HA de 150 mm m<sup>-1</sup> y tres riegos de auxilio, el intervalo en rendimiento es de 14.95 a 17.94 Mg ha<sup>-1</sup> y presenta probabilidades entre 0.561 y 0.89, lo cual es similar a los niveles reportados por Faz *et al.* (2005), quienes indican que en suelos de textura franco arcillosa la aplicación de tres riegos produjo rendimientos entre 11.95 y 18.87 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca. Sin embargo, rendimientos iguales o superiores a 20.93 Mg ha<sup>-1</sup> tendrán una probabilidad inferior a 0.277 y rendimientos superiores a 23.9 Mg ha<sup>-1</sup> no tienen una probabilidad superior a 0.09. En estos suelos el plan de tres riegos constituye una opción cuando se maneja el riego bajo la operación del Distrito de Riego 017.

Con cuatro riegos, en suelos con HA de 150 mm m<sup>-1</sup> el rendimiento oscila entre 14.95 y 20.93 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca, con niveles de probabilidad entre 0.613 y 0.997, respectivamente; resultados similares para estas condiciones reportados por Faz *et al.* (2005), en donde se obtienen rendimientos entre 14.58 y 19.53 Mg ha<sup>-1</sup>, por lo que este manejo constituye la mejor opción para la producción de maíz forrajero en el sistema de riego del Distrito de Riego 017. Sin embargo, para cualquiera

de las condiciones estudiadas, el nivel de rendimiento igual o superior al 80% del RME (23.92 Mg ha<sup>-1</sup>) tiene probabilidades inferiores al 0.168.

## CONCLUSIONES

- La aplicación de un cuarto riego en suelos con una humedad aprovechable (HA) de 120 mm m<sup>-1</sup> reduce la reducción del rendimiento potencial (RRP) en 15%, lo que equivale a un incremento en rendimiento de 4.6 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca. En suelos con 150 mm m<sup>-1</sup> un cuarto riego provoca también efectos favorables, aunque en menor grado, con una disminución de la RRP de 9% y un incremento de rendimiento de 2.7 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca. Esto ocurre debido a que el cultivo llega a la fase de llenado de grano en mejores condiciones de humedad en el suelo con tres riegos que en suelos con menor HA.
- En suelos con 120 mm m<sup>-1</sup> de HA es necesario la aplicación de cuatro riegos para alcanzar rendimientos de materia seca de 17.7 Mg ha<sup>-1</sup>, con un nivel de probabilidad no superior a 0.793. Aun aplicando cuatro riegos, el rendimiento tiene bajas probabilidades (0.184) de obtener rendimientos superiores a 20.93 Mg ha<sup>-1</sup> de materia seca. En suelos con 150 mm m<sup>-1</sup> el calendario de tres riegos permite obtener rendimientos hasta de 18.8 Mg ha<sup>-1</sup> y con un cuarto riego se pueden alcanzar rendimientos hasta de 21.2 Mg ha<sup>-1</sup>, lo que constituye la mejor opción de producción de maíz forrajero. Para cualquiera de las condiciones estudiadas, el nivel de

rendimiento igual o superior al 80% del rendimiento máximo experimental (RME) (23.92 Mg ha<sup>-1</sup>) tiene una probabilidad inferior al 0.168.

## AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Produce Durango, A. C. por el apoyo financiero del presente trabajo.

## LITERATURA CITADA

- Allen, G. R., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2000. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- Burman, R. D., P. R. Nixon, J. L. Wright, and W. O. Pruitt. 1980. Water requirements. pp. 189-234. *In*: M. E. Jensen (ed.). Design and operation of farm irrigation systems. ASAE Monograph 3. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI, USA.
- Castellanos-Ramos, J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2ª ed. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Celaya, Guanajuato, México.
- Cavero, J., I. Farre, P. Debaeke, and J. M. Faci. 2000. Simulation of maize yield under stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agron. J.* 92: 679-690.
- Conover, W. J. 1980. Practical nonparametric statistics. 2nd ed. John Wiley. New York, NY, USA.
- Doorenbos, J. and W. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- Doorenbos, J., A. H. Kassam, C. I. M. Bentvelsen, V. Branscheid, J. M. G. A. Plusje, M. Smith, G. O. Uittenbogaard y H. K. van der Wal. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 33. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- Engel, B. A., W. D. Lembke, S. K. Sipp, and W. D. Goetsch. 1989. Irrigation crop coefficients for Illinois corn. *ASAE* 32: 1275-1280.
- Faz Contreras, R., G. Núñez Hernández y J. G. Martínez Rodríguez. 2005. Eficiencia en uso de agua en la producción de ensilados de maíz de alto valor energético. *Agrofaz* 5: 29-36.
- Goodrich, R. D. and J. C. Meiske. 1985. Corn and sorghum silages. pp. 527-536. *In*: M. E. Heath, R. F. Barnes, and D. S. Metcalfe (eds.). Forages: the science of grassland agriculture. 4<sup>th</sup> ed. Iowa State University Press. Ames, IA, USA.
- Jamshid, Y. 2003. The integration of satellite images, GIS and CROPWAT model to investigation of water balance in irrigated area. A case study of Salmas and Tasso plain, Iran. International Institute for GEO-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands. [http://www.itc.nl/library/Papers\\_2003/msc/wrem/yarahmadi.pdf](http://www.itc.nl/library/Papers_2003/msc/wrem/yarahmadi.pdf) (Consulta: febrero 8, 2007).
- Levine, G., A. D. Cruz-Galvan, D. Garcia, C. Garcés-Restrepo, and S. Johnson III. 1998. Performance of two transferred modules in the Lagunera región: water relations. International Water Management Institute. Research Report 23. Colombo, Sri Lanka. <http://www.iwmi.cgiar.org/pubs/PUB023/REPORT23.PDF> (Consulta: febrero 8, 2007).
- Montemayor-Trejo, J. A., A. O. Gómez M., J. Olague R., A. Zermeño G., E. Ruiz C., M. Fortis H., E. Salazar S. y R. Aldaco N. 2006. Efecto de tres profundidades de cinta de riego por goteo en la eficiencia de uso de agua y en el rendimiento de maíz forrajero. *Técnica Pecuaria* 44: 359-364.
- Núñez Hernández, G., E. F. Contreras G. y R. Faz Contreras. 2003. Características agronómicas y químicas importantes en híbridos de maíz para forraje con alto valor energético. *Técnica Pecuaria* 41: 37-48.
- Ojeda-Ortega, D. 1947. Estudio agrológico detallado del Distrito de Riego en la Región Lagunera. Estados de Coahuila y Durango. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Ciudad Lerdo, Durango, México.
- Reta Sánchez, D. G. y R. Faz Contreras. 1999. Respuesta del maíz a diferentes niveles de humedad en el suelo. I. Rendimiento de grano y sus componentes. *Terra* 17: 309-316.
- Reta Sánchez, D. G., A. Gaytán Mascorro y J. S. Carrillo Amaya. 2000. Respuesta del maíz para ensilaje a métodos de siembra y densidades de población. *Rev. Fitotec. Mex.* 23: 37-48.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2006. Resumen agrícola de la Región Lagunera durante 2006. Suplemento Especial 2007. Siglo de Torreón. Torreón, Durango, México.
- Samani, Z. A. and M. Pessarakli. 1986. Estimating potential crop evapotranspiration with minimum data in Arizona. *ASAE Trans.* 29: 522-524.
- Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger, and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1031-1036.
- Smith, M. 1992. CropWat: a computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper 46. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- Yevjevich, V. 1972. Probability and statistics in hydrology. Water Resources Publications. Fort Collins, CO, USA.