



Artículo: COMEII-16001

## II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

### RESPUESTA HÍDRICA DEL MAÍZ MEDIANTE RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO

**Cándido Mendoza Pérez<sup>1\*</sup>; Ernesto Sifuentes Ibarra<sup>2</sup>; Waldo Ojeda Bustamante<sup>3</sup>;  
Jaime Macías Cervantes<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Técnico del Programa Riego por Gravedad Tecnificado (RIGRAT) en el Distrito del Riego 075, Rio Fuerte. Los Mochis, Ahome, Sinaloa, México. C.P. 81255. candidompl@hotmail.com. (\*Autor para correspondencia).

<sup>2</sup>INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Valle del Fuerte. km 1609 carretera México-Nogales, Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa. esiba68@yahoo.com.mx.

<sup>3</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac No. 8535, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, México. C.P. 62550. wojeda@tlaloc.imta.mx.

#### Resumen

El maíz es el insumo básico de la dieta del mexicano, el cual es cultivado en la tercera parte de la superficie nacional. Sinaloa es el principal productor de maíz bajo riego en México, regado principalmente por gravedad. Ante la competencia de los recursos hídricos por sectores no agrícolas, así como la variabilidad alta espacial y temporal de los volúmenes anuales disponibles para riego, es cada vez más urgente optimizar el uso del agua. Una alternativa en años secos es aplicar riego deficitario controlado. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar esta técnica en maíz regado por gravedad, con tres tratamientos deficitarios y un testigo, al que se le aplicó el requerimiento hídrico que demanda el cultivo. Los niveles de déficit hídrico aplicados fueron: 10, 20, 30 y 0 %, para T1, T2, T3 y TES, respectivamente. Para la programación de los riegos se utilizó un sistema de calendarización del riego que emplea el concepto de días grado. La evaluación del efecto de los niveles de déficit hídrico se realizó en términos de eficiencia de aplicación, productividad del agua y rendimiento. El tratamiento con mayor déficit generó la mejor eficiencia de aplicación y productividad del agua. Los rendimientos fueron estadísticamente similares en los tratamientos y el testigo. Los resultados indicaron que la aplicación de la técnica de riego deficitario es una opción viable en periodos críticos de disponibilidad de agua, al tener un efecto reducido en los rendimientos obtenidos con respecto de los convencionales.

**Palabras claves:** Riego por surcos, eficiencia en el uso del agua, déficit hídrico, sequía.



## Introducción

La superficie bajo riego mundial es del orden del 20% de la superficie cultivada, principalmente localizadas en zonas áridas y semiáridas, que requieren del riego para asegurar rendimientos comerciales, que muestran condiciones de alta variabilidad espacial y temporal en los volúmenes disponibles de sus fuentes de abastecimiento (FAO, 2011). En México, la agricultura bajo riego está concentrada en zonas costeras que son muy vulnerables a los efectos de la variabilidad y cambio climático, en particular los fenómenos meteorológicos extremos, como ciclones, heladas, sequías, etc. (Ojeda *et al.*, 2011).

El maíz es el insumo básico de la dieta del mexicano. El 60% de la producción de maíz se destina para consumo humano, con un valor per cápita de 127 kg año<sup>-1</sup> (Nadal y Wise, 2005) y se cultiva en una superficie anual de 7 a 8.5 millones de hectáreas, el 85% de esta superficie se realiza bajo condiciones de temporal, y 15% bajo riego (Muñoz y Hernández, 2004). Sin embargo, el maíz bajo riego es 3.5 veces más productivo que el de secano.

En México, el estado de Sinaloa es el principal productor de maíz bajo riego, al establecer anualmente de 400 a 500 mil hectáreas en sus 8 Distritos de Riego, con una producción de 3.5 a 5 millones de toneladas (CONAGUA, 2015), sin embargo, aunque México es uno de los principales productores de maíz en el mundo, el consumo de este grano es superior a su producción, por lo que es uno de los principales países importadores del mismo, con más de 7 millones de toneladas anuales (SIAP, 2016).

La aplicación del agua a nivel parcela en México y en el estado de Sinaloa es deficiente al utilizarse principalmente el riego por gravedad principalmente en la modalidad por surcos, sin un diseño, trazo y seguimiento acorde a los avances tecnológicos, por lo que existe presión para optimizar el riego parcelario (Ojeda *et al.*, 2012). Se estima que se aprovecha menos del 45% del agua aplicada a las parcelas, el resto se pierde por drenaje y por percolación profunda, con la consiguiente pérdida de fertilizantes móviles y suelo (Ojeda *et al.*, 2012). Ante la recurrencia de periodos de baja disponibilidad de agua, es común la restricción de los volúmenes disponibles para riego generando estrés hídrico a los cultivos.

En el cultivo de maíz se considera que la etapa de floración y llenado de grano son críticas para asegurar rendimientos óptimos (Pasquale *et al.*, 2012). Debido a esto, la presencia de temperaturas altas, complementada con periodos de estrés hídrico, puede afectar los procesos de polinización, fecundación y desarrollo del grano (Bassetti y Westgate, 1993; Wilhelm *et al.*, 1999; Suzuki *et al.*, 2001). La etapa fenológica más crítica al estrés hídrico (Cakir, 2004) es la floración masculina, que puede reducir la producción de biomasa en 30% y el rendimiento en grano del 40%, ante la presencia de periodos con déficit hídrico.

Durante el desarrollo reproductivo, el estrés hídrico reduce el número de granos debido a caída en la tasa de fotosíntesis y en el flujo de asimilados hacia los



órganos en desarrollo del cultivo (Schussler y Westgate, 1995). Se considera que la floración y las etapas iniciales de llenado de grano del cultivo de maíz son críticas para la determinación del rendimiento del grano.

El riego deficitario es una técnica estudiada y utilizada en diversas regiones del mundo con problemas de disponibilidad de agua (Chai *et al.*, 2016), que consiste en una reducción del riego, por abajo de las demandas hídricas potenciales, que se aplica durante las etapas fenológicas con mayor tolerancia al estrés hídrico (Ojeda *et al.*, 2012).

El riego deficitario controlado es una técnica que ha mostrado ventajas por los volúmenes potenciales de ahorro de agua (Rázuri *et al.*, 2008; Chai *et al.*, 2014). Hargreaves y Samani (1984) indicaron que el riego deficitario puede proporcionar mejores retornos económicos por unidad de superficie, iguales o superiores que los obtenidos bajo riego completo para rendimiento máximo, lo que evidentemente produce mayores eficiencias en el uso del agua. Aunque la aplicación del riego deficitario se ha aplicado exitosamente en varias partes del mundo, su adopción requiere de su validación local. Para el caso de México, existe información limitada sobre la respuesta de distintos cultivos al riego deficitario, para los cultivos: de pimentón fue reportada por Rodríguez *et al.* (2014), de chile por Serna y Zegbe (2012), y de melocotón por Tapia *et al.* (2010).

Ante la recurrencia de sequías y su intensificación con el cambio climático, que impactarán la disponibilidad de volúmenes para riego, se requiere estudiar la aplicabilidad potencial de acciones de adaptación para el ahorro de agua para las condiciones actuales y futuras de México en cultivos de importancia nacional (Ojeda *et al.*, 2011).

Es posible disminuir las láminas de riego, aplicando un estrés hídrico controlado en etapas fenológicas con tolerancia al estrés sin afectar sustancialmente el rendimiento potencial. Con la finalidad de evaluar la técnica de riego deficitario en maíz bajo riego por surcos en una zona de riego de México para su aplicación práctica que contribuya a incrementar la eficiencia en el uso del agua, se desarrolló un trabajo experimental con diferentes niveles de déficit hídrico, 10%, 20% y 30%, etiquetados como T1, T2, T3, respectivamente, y el tratamiento testigo (TES), al que se le aplicó el requerimiento de riego que demanda el cultivo.

## **Materiales y métodos**

El trabajo se realizó durante el ciclo agrícola otoño-invierno (O-I) 2012-2013, en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) localizado en la zona árida del norte de Sinaloa, México, con coordenadas geográficas de 25° 48' 39.6" latitud norte, 109° 01' 30" longitud oeste y a 20 m de altitud. El experimento se estableció en suelo típico de la región: textura arcillosa, humedad volumétrica aprovechable de 0.155 cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>, densidad aparente de 1.15 g·cm<sup>-3</sup> y contenido de materia orgánica de 1 %. La parcela forma parte del distrito de riego 075, Rio



Fuerte, Sinaloa, uno de los de mayor superficie de México (CONAGUA, 2015). La precipitación anual acumulada en la zona de estudio es de 350 mm y se concentra de julio a septiembre con 70 % de la precipitación acumulada en el año, mientras que de febrero a mayo es insignificante. Los valores anuales de la evapotranspiración de referencia acumulada (ET<sub>o</sub>), varían de 1600 a 1700 mm; esta excede a la precipitación todo el año y, por lo tanto, se requiere de riego para asegurar rendimientos comerciales.

La precipitación acumulada durante el ciclo de cultivo de maíz intermedio, de 191 días de duración después de la siembra (dds), fue de 42.4 mm, concentrándose 37.8 mm en el mes de diciembre, que corresponde al mes de siembra, y fue considerada para estimar los requerimientos de riego. Los valores de las temperaturas máxima, media y mínima promedio en el ciclo fueron de 29.61, 20.30 y 11.83 °C, respectivamente. La ET<sub>o</sub> fue de 947.7 mm con acumulación de 1,898 grados día acumulado (°DA). Estos datos meteorológicos fueron obtenidos en la estación meteorológica automatizada instalada a 100 metros del lugar del experimento.

Para la calendarización del riego en tiempo real se empleó el sistema computacional IrriModel, una versión mejorada del sistema Spriter (Ojeda-Bustamante, González-Camacho, Sifuentes-Ibarra, & Rendón-Pimentel, 2007). Este *software* ofrece los siguientes beneficios: 1) calcula la demanda hídrica del cultivo, 2) genera planes de riego bajo diferentes escenarios de disponibilidad de agua y tipos de sistemas de riego, 3) pronostica el riego usando un modelo de balance hídrico con alto nivel de precisión, de acuerdo con el desarrollo fenológico del cultivo, utilizando el concepto de grados día (°D), documentado por Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, y Unland-Weiss (2006), y 4) facilita realizar el seguimiento del riego de una o más parcelas en un ciclo agrícola.

La superficie total del lote experimental fue de 1.72 ha, en el cual se establecieron cuatro tratamientos (T<sub>n</sub>) con cinco repeticiones, mismos que consistieron en reducir la lámina de riego aplicada, recomendada por el *software* IrriModel, para generar déficit en las etapas fenológicas menos críticas al estrés hídrico utilizando riego por gravedad (surcos). Cada tratamiento tuvo el mismo déficit hídrico a lo largo de sus etapas fenológicas a excepción de la etapa de floración (R1), en la cual los tratamientos recibieron riego normal. Los niveles de déficit hídrico aplicados fueron, respectivamente, 10, 20, 30 y 0 %, para T1, T2, T3 y TES (Cuadro 1). El seguimiento de las etapas fenológicas del cultivo se realizó de acuerdo con los trabajos de Abendroth *et al.* (2009) y Ojeda-Bustamante *et al.* (2006).

Los niveles de déficit hídrico utilizados en este trabajo fueron similares a los aplicados por Rázuri *et al.* (2008) en cuatro tratamientos, que consistieron en el suministro de diferentes volúmenes de agua (láminas), los cuales correspondieron a la reposición de 100, 80, 70 y 60 % de la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) en tomate bajo riego localizado, y reportaron que no hubo diferencias significativas en rendimientos entre los



**Cuadro 1.** Aplicación de los riegos con etapa fenológica en que se sometieron tratamientos a estrés hídrico

Riego	Etapa fenológicas	Tratamientos de déficit hídrico			
		T1	T2	T3	TES
1er Auxilio	V6	10%	20%	30%	0%
2do Auxilio	R1	0%	0%	0%	0%
3er Auxilio	R2	10%	20%	30%	0%
4to Auxilio	R3	10%	20%	30%	0%

V6= seis hojas verdaderas, R1= floración, R2= grano acuoso, R3= grano lechoso

La longitud y gasto óptimos del surco fueron estimados con el programa RIGRAV 3.0 desarrollado por Rendón *et al.* (1997); de acuerdo a las condiciones y variables del sitio experimental. El principal método de aplicación del riego en la zona es por surcos a través de tubos en forma de sifón en la cabecera de cada surco. Se aplicó el gasto en los surcos con sifones, para lo cual se estableció la carga para obtener el gasto requerido, de acuerdo a la curva carga-gasto de los sifones previamente calibrados. Por lo general, los productores no tienen un control riguroso de la carga de entrada a los surcos, teniendo una gran variación en los gastos y volúmenes aplicados a cada surco.

El cultivo de maíz se sembró en seco el 12 de diciembre de 2012 usando una sembradora de precisión y al día siguiente se aplicó el riego de germinación. Se sembró la variedad DK-3000 de ciclo intermedio. En los tratamientos T1, T2, T3 se aplicó una fertilización base, previo a la siembra, de 250 kg ha<sup>-1</sup> de la mezcla física de 30-10-12 de N-P-K, respectivamente; al testigo (TES) se le aplicó una dosis de 450 kg ha<sup>-1</sup> del mismo fertilizante de acuerdo a prácticas de productores líderes de la zona. Durante la aparición de la quinta hoja verdadera (V5) se aplicó la fertilización complementaria de 100 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante urea (46-00-00) en todos los tratamientos, incluyendo el TES. La densidad de siembra fue de 100,000 semillas ha<sup>-1</sup>, con una separación entre plantas de 12.5 cm. Cuando el cultivo alcanzó 50 cm de altura, se procedió a cultivar y abrir surcos en forma simultánea para aplicar los riegos de auxilios de acuerdo a los tratamientos hídricos deficitarios.

La lámina del riego inicial se realizó estimando la humedad volumétrica del suelo apoyados con un sensor calibrado de reflectometría tipo TDR (Time Domain Reflectometry) y después se calculó la lámina de riego para llevar el suelo a capacidad de campo (CC), para el resto de los riegos de auxilios se utilizó el *software* IrriModel para estimar la fecha y la láminas de riego neta (L<sub>n</sub>), de acuerdo a los tratamientos deficitarios, usando la metodología presentada por Ojeda *et al.* (2006).

La evaluación de los riegos se realizó en términos de eficiencias de aplicación (E<sub>a</sub>), utilizando la fórmula  $E_a = (L_n / L_b) \times 100$ , donde E<sub>a</sub> representa la eficiencia de



aplicación (%), la lámina neta requerida ( $L_n$ ) y lámina bruta o aplicada ( $L_b$ ) (Bolaños *et al.*, 2001). La estimación de  $L_b$  en metros se calculó mediante la ecuación  $L_b = (Q T)/A$ , donde  $Q$  es el gasto de riego aplicado a la parcela en metros cúbicos por segundo ( $m^3 s^{-1}$ );  $T$  es el tiempo de riego, en segundos (s);  $L_b$  es la lámina bruta de riego aplicada, en metros (m); y  $A$  es la superficie regada en metros cuadrados ( $m^2$ ) (Martin, 2001).

Se estimó también la productividad del agua (PA) y el rendimiento (R) de los tratamientos; la primera indica la relación de la producción total obtenida (RC) expresada en kg con respecto al volumen de agua total aplicada (VA) en  $m^3$  (Bessembinder *et al.*, 2005) y la segunda la producción obtenida en  $kg ha^{-1}$ .

La cosecha de los tratamientos se realizó el 20 de junio de 2013 que corresponde 191 dds o 1898 grados día acumulados, de siembra hasta cosecha, de acuerdo al trabajo de Ojeda *et al.* (2006). Se realizaron cinco muestreos para estimar el rendimiento en sitios representativos localizados en los dos surcos centrales de cada tratamiento en una área de  $7.6 m^2$ , en cada sitio. Este procedimiento de muestreo se realizó en todos los tratamientos, incluyendo el testigo.

Para determinar la diferencia significativa de los rendimientos, se realizó un análisis de varianza para comparación de medias con la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ), usando un diseño de bloques al azar, utilizando el paquete estadístico *Statistical Analysis System*, ver. 9.2 (SAS, 1999).

Se estimó la diferencia relativa  $\Delta$  de las cuatro variables de respuesta de interés de los tratamientos ( $\Delta R$ ,  $\Delta L_b$ ,  $\Delta E_a$  y  $\Delta PA$ ), con respecto del testigo, que corresponden, respectivamente, al  $R$  en  $t \cdot ha^{-1}$ ,  $L_b$  en cm,  $E_a$  en porcentaje y  $PA$  en  $kg \cdot m^{-3}$ , utilizando la siguiente relación general:

$$\Delta = \frac{T_n - TES}{TES} \times 100 \quad (1)$$

Donde  $T_n$  es el tratamiento  $n$ , TES es el valor obtenido del testigo.

Como ejemplo, para el caso de la diferencia relativa del rendimiento, la ecuación para  $\Delta R$  sería:

$$\Delta R = \frac{R_n - R_{TES}}{R_{TES}} \times 100 \quad (2)$$

Donde  $R_n$  es el rendimiento del tratamiento  $n$  y  $R_{TES}$  es el rendimiento obtenido en el testigo.

### **Análisis y discusión de resultados**

En cada tratamiento se aplicó un total de cinco riegos. Las láminas iniciales aplicadas a los tratamientos fueron de 10.9, 10.0, 10.0 y 14.7 cm para T1, T2, T3 y TES, respectivamente.

Los riegos aplicados al tratamiento T1 (10% de déficit hídrico) durante todo el ciclo agrícola se presenta en el Cuadro 2. Se observa que los riegos de auxilio, en



términos de  $L_n$ , fluctuaron entre 11.3 y 14.8 cm de  $L_b$ , aplicando una lámina acumulando de 63 cm, que representa un volumen de 2792 m<sup>3</sup>, con una  $E_a$  de 63%, durante todo el ciclo agrícola. La reducción de lámina de riego aplicada mediante el riego deficitario permite mejorar la eficiencia en el uso del agua en maíz, como reportado por Chai *et al.* (2016).

**Cuadro 2.** Calendario de riego aplicado para el T1

NR	Inicio	Tiempo	Gasto	Superficie	Volumen	$L_n$	$L_b$	$E_a$
		h	L s <sup>-1</sup>	ha	m <sup>3</sup>	cm	cm	%
1	12/12/2012	3.2	42	0.4332	553	5.5	10.9	50
2	01/03/2013	2.3	59	0.4332	487	6.75	11.25	60
3	24/03/2013	3.0	34	0.4332	498	8.1	11.50	70
4	09/04/2013	4.5	25	0.4332	615	9.95	14.20	70
5	27/04/2013	2.5	43	0.4332	639	9.72	14.75	66
<b>Total</b>					<b>2792</b>	<b>40</b>	<b>63</b>	<b>63</b>

**NR:** número de riegos,  **$L_n$ :** lámina neta,  **$L_b$ :** lámina bruta,  **$E_a$ :** eficiencia de aplicación

Los riegos aplicados al tratamiento T2 (20% de déficit hídrico) se presenta en el Cuadro 3. Se observa que los riegos de auxilio fluctuaron entre 10.5 y 13.5 cm de  $L_b$ , aplicando una lámina acumulada de 57 cm, que representa un volumen total de 2460 m<sup>3</sup>, con una  $E_a$  de 65%. También se observa que a partir del segundo riego de auxilio empieza a incrementar la eficiencia de aplicación. La lámina aplicada en este tratamiento coincide con los resultados obtenidos por (Rivetti, 2006) con un consumo bruto de 57 cm durante todo el ciclo agrícola del maíz.

**Cuadro 3.** Calendario de riego aplicado para el T2

NR	Inicio	Tiempo	Gasto	Superficie	Volumen	$L_n$	$L_b$	$E_a$
		h	L s <sup>-1</sup>	ha	m <sup>3</sup>	cm	cm	%
1	13/12/2012	3.2	43	0.43	430	5.5	10.0	55
2	28/02/2013	2.5	59	0.43	452	6.0	10.5	57
3	24/03/2013	2.6	38	0.43	439	7.2	10.2	71
4	09/04/2013	4.6	29	0.43	558	10.0	13.0	77
5	27/04/2013	2.5	58	0.43	581	8.6	13.5	64
<b>Total</b>					<b>2460</b>	<b>37.3</b>	<b>57</b>	<b>65</b>

**NR:** número de riegos,  **$L_n$ :** lámina neta,  **$L_b$ :** lámina bruta,  **$E_a$ :** eficiencia de aplicación

Los riegos aplicados al tratamiento T3 (30% de déficit hídrico) se presentan en el Cuadro 4. Se observa que los riegos de auxilio fluctuaron entre 8.5 y 11.5 cm de  $L_b$ , aplicando una lámina bruta acumulada de 50 cm, que representa un volumen total de 2150 m<sup>3</sup>, con una  $E_a$  de 69%. La reducción de lámina de riego aumenta la eficiencia parcelaria y posiblemente el aprovechamiento de nutrientes disponibles en el suelo, por lo tanto, aumenta el rendimiento del grano como reportado por Hargreaves y Samani (1984).



**Cuadro 4.** Calendario de riego aplicado para el T3

NR	Inicio	Tiempo	Gasto	Superficie	Volumen	L <sub>n</sub>	L <sub>b</sub>	Ea
		h	L s <sup>-1</sup>	ha	m <sup>3</sup>	cm	cm	%
1	13/12/2012	3.2	43	0.43	430	5.5	10.0	55
2	28/02/2013	2.3	40	0.43	366	5.3	8.5	62
3	24/03/2013	2.3	40	0.43	387	7.2	9.0	80
4	09/04/2013	4.7	30	0.43	495	9.7	11.5	85
5	27/04/2013	3.0	60	0.43	473	6.9	11.0	62
<b>Total</b>					<b>2150</b>	<b>34.6</b>	<b>50</b>	<b>69</b>

NR: número de riegos, L<sub>n</sub>: lámina neta, L<sub>b</sub>: lámina bruta, Ea: eficiencia de aplicación

Los riegos brutos aplicados al tratamiento testigo (TES) fluctuaron entre 14.3 y 15.6 cm de L<sub>b</sub>, aplicando una lámina bruta acumulada de 73.5 cm, que representa un volumen total de 3159 m<sup>3</sup>, con un valor Ea de 58% Cuadro 5. Los riegos y láminas aplicados en este tratamiento se basaron en la forma convencional de aplicación y manejo de los agricultores líderes de la zona de estudio. Estos datos son similares a lo reportado por Ojeda *et al.* (2010) para el cultivo de maíz, encontrándose las mayores pérdidas por efecto de escurrimientos y percolación.

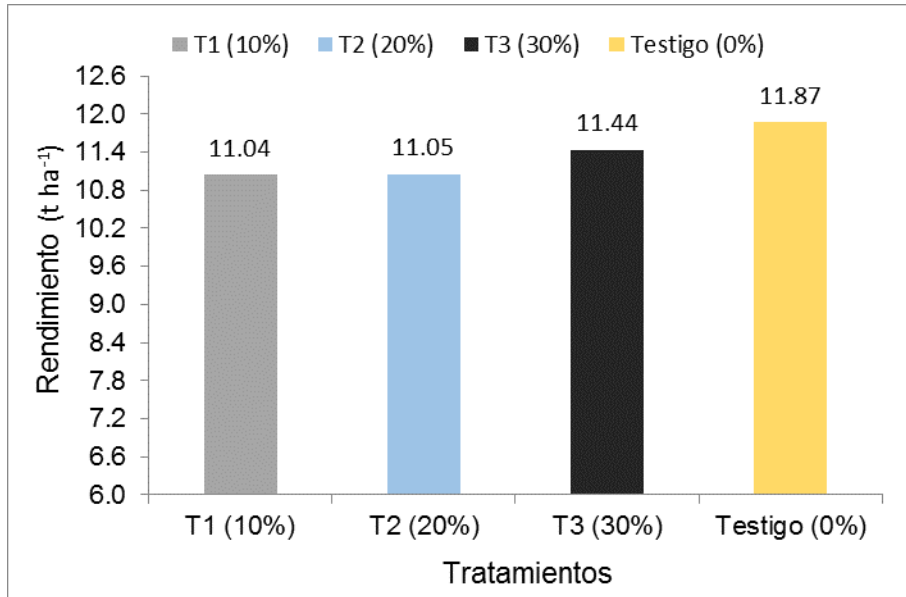
**Cuadro 5.** Calendario de riego aplicado para el TES

NR	Inicio	Tiempo	Gasto	Superficie	Volumen	L <sub>n</sub>	L <sub>b</sub>	Ea
		h	L s <sup>-1</sup>	ha	m <sup>3</sup>	cm	cm	%
1	12/12/2012	8.0	22	0.43	631	5.5	14.7	37
2	28/02/2013	7.9	26	0.43	671	7.8	15.6	50
3	24/03/2013	4.5	29	0.43	559	9.0	14.5	69
4	09/04/2013	6.9	23	0.43	602	9.8	14.4	70
5	27/04/2013	5.0	29	0.43	602	10.8	14.3	77
<b>Total</b>					<b>3159</b>	<b>42.9</b>	<b>73.5</b>	<b>58</b>

NR: número de riegos, L<sub>n</sub>: lámina neta, L<sub>b</sub>: lámina bruta, Ea: eficiencia de aplicación

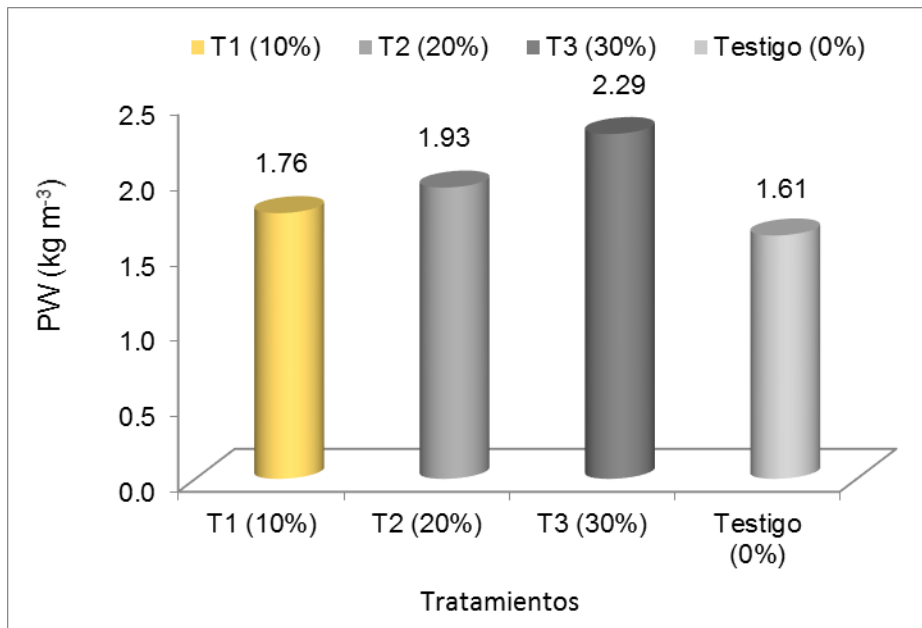
La Figura 1 compara los rendimientos promedio obtenidos en cada uno de los tratamientos, los cuales fueron los siguientes 11.04, 11.05 y 11.44 t ha<sup>-1</sup>, para T1, T2, T3, respectivamente. Para TES el rendimiento fue de 11.87 t ha<sup>-1</sup>. No se encontró diferencia significativa entre los tratamientos con respecto al TES, a pesar de que en el TES se le aplicó 200 kg ha<sup>-1</sup> adicionales de fertilizante de acuerdo a prácticas locales. Los resultados de este trabajo de investigación son similares a los resultados obtenidos por Ferré (2010) en maíz bajo riego deficitario.





**Figura 1.** Resultados de rendimiento que se obtuvieron en los tratamientos

La Figura 2 presenta la productividad del agua para cada uno de los tratamientos obtenidos. El T3 presentó la mayor productividad del agua aplicada, con un valor 2.29 kg m<sup>3</sup> de grano en comparación con el TES que fue el de menor valor con 1.61 kg m<sup>3</sup>. Esto indica que la técnica de déficit hídrico es viable si se reduce o evita en etapas críticas del cultivo como la floración. Estos resultados son similares a los reportados por Rivetti en 2006 en el cultivo de maíz en trabajos de riego deficitario.



**Figura 2.** Resultados de productividad del agua en los tratamientos

En Cuadro 6 presenta la comparación estadística de los rendimientos donde se observa que no hubo diferencia significativa de rendimiento en las cinco repeticiones de los tres tratamientos y el testigo.

**Cuadro 6.** Resultados de comparación de medias obtenidas por tratamiento para las cinco repeticiones

Tratamientos	R1	R2	R3	R4	R5
<b>T1 (10%)</b>	10.56 a	10.79 a	10.62 a	11.82 a	11.38 a
<b>T2 (20%)</b>	10.07 a	12.2 a	10.23 a	11.17 a	11.58 a
<b>T3 (30%)</b>	11.47 a	10.92 a	11.07 a	11.88 a	11.86 a
<b>TES (0%)</b>	11.59 a	11.91 a	11.95 a	11.56 a	12.36 a

**Nota:** Medias indicadas con la misma letra en una columna no son significativamente diferentes, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p > 0.05$ ), con una coeficiente de variación de 4.5.

El Cuadro 7 presenta las diferencias relativas de las variables rendimiento ( $\Delta R$ ), lamina bruta ( $\Delta L_b$ ), eficiencia de aplicación ( $\Delta E_a$ ) en porcentaje, y  $\Delta PA$  productividad del agua ( $\text{kg m}^{-3}$ ). Se observa que al incrementar los niveles de déficit hídrico, se incrementa la eficiencia de aplicación y la productividad del agua, y se reduce la lámina bruta aplicada, sin afectar drásticamente los rendimientos. Los resultados indican que el riego deficitario controlado es una técnica viable para mejorar la eficiencia y la productividad en el mejor aprovechamiento del agua, similar a lo reportado por Chai *et al.* (2016).

**Cuadro 7.** Resultados de las diferencias relativas en % de los tratamientos para la variables estudiadas con respecto al testigo (TES)

Tratamientos	$\Delta R$	$\Delta L_b$	$\Delta E_a$	$\Delta PA$
<b>T1 (10%)</b>	-7.0	-14.3	8.6	9.3
<b>T2 (20%)</b>	-6.9	-22.5	12.1	19.9
<b>T3 (30%)</b>	-3.6	-32.0	19.0	42.2

## Conclusiones

Para el testigo con riego completo, a pesar de que se le adicionó 200 kg más de fertilizante nitrogenado, no se encontraron diferencias significativas en rendimiento con respecto de los tratamientos con déficit hídrico. Resultando que el tratamiento con mayor déficit hídrico, T3 (30 % de déficit hídrico), fue el mejor tratamiento, desde el punto de vista de eficiencia, ahorro, productividad del agua y rendimiento. Lo que indica que el riego deficitario controlado en maíz bajo riego por surcos es una alternativa que contribuye a incrementar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. Además, es una opción para afrontar el escenario de escasez de agua en la zona de riego estudiada. El riego deficitario es una técnica de fácil aplicación y manejo cuando se cuenta con suficiente información de campo para generar una calendarización del riego robusta. Sin embargo, no se puede generalizar el uso de los tratamientos para los diferentes tipos de suelos, por eso se recomienda validar localmente su aplicación para cada zona de riego y cultivo específico.



El riego deficitario es una técnica de fácil aplicación y manejo cuando se cuenta con suficiente información de campo para generar una calendarización robusta de riego. Sin embargo, no se puede generalizar el uso de los tratamientos para los diferentes tipos de suelos; por eso se recomienda validar localmente su aplicación para cada zona de riego y cultivo específico.

### Referencias bibliográficas

- Abendroth, L., Elmore, R., Hartzler, R. G., McGrath, C., Mueller, D. S., Munkvold, G. P., Pope, R.; Rice, M. E., Robertson, A. E., Sawyer, J. E., Schaefer, K. J. P., Tollefson, J. J., & Tylka, G. L. 2009. Corn Field Guide. Extension and Outreach Publications. Book 26. Iowa State University. pp. 4-9.
- Bassetti, P., & Westgate M. E. (1993). Water deficit affects receptivity of maize silks. *Crop Sci*, 33, 279-282.
- Bessembinder, J. E., Leffelaar, P. A., Dhindwal, A.S., & Ponsioen, T.C. (2005). Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agric. Water Manage* 73, 113-130.
- Bolaños, G. M., Palacios, V. E., Scott, C., & Exebio, G. A. (2001). Estimación del volumen de agua usado en una zona de riego mediante una imagen satélite e información complementaria. *Agrociencia*, 35: 589-597.
- Cakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stage on vegetative and reproductive growth of com. *Field Crops Research*, 89: 1-16.
- Chai, Q., Gan, Y., Turner, N. C., Zhang, R. Z., Yang C., Niu, Y., & Siddique, K. H. (2014). Water-saving innovations in Chinese agriculture. *Adv Agron*, 126: 147–197.
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R. M., Niu, Y., & Siddique, K. H. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36:1-21.
- CONAGUA. (2015). Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. Año agrícola 2013/14. Comisión Nacional del Agua. (pp. 290).
- Claassen M.M, Shaw. & R.H. 1970. Water deficit effects on grain: II Grain components. *Agronomy Journal*, 62, 652– 655.
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage*, Paper No. 33, Rome, FAO.
- Ferré, C. I. (2010). Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) al riego deficitario. Tesis Doctorado, Universitat de Lleida, Escola Técnica Superior de Enginyeria Agrària (pp. 150).



- FAO. (2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW), managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London. (pp.294).
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1984). Economic considerations of deficit irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 100: 343-358.
- Martin, E. (2001). Methods for determining when to Irrigate. Cooperative Extension, College of Agriculture & Life Sciences. The University of Arizona (pp. 7).
- Muñoz, P. D., & Hernández, R. G. (2004). Situación actual y perspectiva del maíz. Sistema de información y estadística agroalimentaria y pesquera (SIAP-SAGARPA), México, D.F. (pp. 136).
- Nadal, A., & Wise, T. A. (2005). Los costos ambientales de la liberación agrícola: el comercio de maíz entre México y EE.UU. en el marco del NAFTA. In: *Globalización y medio ambiente: lecciones desde las Américas*. H. Blanco, L.
- Togero A, K. P. Gallagher (eds). Santiago, Chile. RIDES-GDAE. 49-92.
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., & Unland, W. H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencia*, 40: 13-25.
- Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J. M., Sifuentes-Ibarra, E., & Rendón-Pimentel, L. (2007). Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agricultural Water Management*, 89, 81-88.
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., Iñiguez, C. M., & Montero, M. J.M. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimiento hídrico de los cultivos. *Agrociencia*, 45: 1-11.
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., Rojano, A. A., & Iñiguez, C. M. (2012). Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 5: 71-117.
- Pasquale, S. P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. 2012. Crop yield response to water. *FAO Irrigation and drainage paper 66*, 500. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Rázuri, L., Romero, D. G., Romero, C. E. R., Hernández, D.J., & Rosales, J. G. (2008). Efecto del riego deficitario controlado en la producción del cultivo de tomate (*Lycopersicum esculentum Mill*) bajo riego localizado. *Agricultura Andina*, 14, 31-48.



- Rendón, L., Fuentes, C., & Magaña, G. (1997). Diseño del riego por gravedad. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. México, (pp. 1-86).
- Rivetti, A.R. 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Rio Cuarto, Córdoba, Argentina, I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCCuyo*. 2:25-36.
- Rodríguez, P. R. A., Rázuri, R. L., Sworowsky, A., & Rosales, D. J. (2014). Efecto del riego deficitario y diferentes frecuencias en la producción del cultivo de pimentón. *Revista Interciencia*, 39: 591-596.
- Serna, A., & Zegbe, J. (2012). Rendimiento, calidad de fruto y eficiencia en el uso del agua del chile 'mirasol' bajo riego deficitario. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35, 53-56.
- SIAP. (2016). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Suzuki, K., Tsukaguchi, T., Takeda, H., & Egawa, Y. (2001). Decrease of pollen stainability of green bean at on high temperatures and relationship tolerance. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126: 571-574.
- Schussler JR, Westgate ME. 1995. Assimilate flux set at low water potential in maize. *Crops Science*, 35, 1075 - 1080.
- Tapia, M., Larios, A., Abrisqueta, I., Mounzer, O., Vera, J., Abrisqueta, G. J. M., & Ruiz, M. (2010). Riego deficitario en melocotonero. Análisis del rendimiento y de la eficiencia en el uso del agua. *Revista fitotecnia mexicana*, 33, 89-93.
- Wilhelm, E., P, R. F. Mullen., P.L. Keeling, and G., & W, Singletary. (1999). Heat stress during filling in maize: effects on kernel growth and metabolism. *Crop Sci*, 39, 1733-1741.