







Uso del atmómetro y coeficiente de cultivo en la programación del riego en maíz forrajero

Atmometer and crop coefficient use in irrigation scheduling in silage corn

Arturo Reyes-González^{1*} 
David G. Reta-Sánchez² 
Juan I. Sánchez-Duarte¹ 
Pablo Preciado-Rangel³ 
Víctor M. Rodríguez-Moreno⁴ 
Osias Ruiz-Alvarez⁵ 

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Blvd. José Santos Valdez No. 1200 pte. Col. Centro. CP. 27440. Matamoros, Coahuila, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Delicias. Labor Ejido Rosales Kilómetro 2, CP. 33000. Delicias, Chihuahua, México.

³TecNM-Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro Km 7.5, Ejido Anna CP. 27170. Torreón, Coahuila, México.

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Pabellón. Km 32.5 Carretera Aguascalientes-Zacatecas, Col. Pabellón de Arteaga Centro. CP. 20670. Aguascalientes, México.

⁵Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Centro de Chiapas. Carretera Ocozocoautla-Cintalapa, Km. 3, Ocozocoautla. CP. 29140, Chiapas, México.

*Autor de correspondencia:
reyes.arturo@inifap.gob.mx

Artículo científico

Recibido: 20 de octubre 2021

Aceptado: 07 de marzo 2023

Como citar: Reyes-González A, Reta-Sánchez DG, Sánchez-Duarte JI, Preciado-Rangel P, Rodríguez-Moreno VM, Ruiz-Alvarez O (2023) Uso del atmómetro y coeficiente de cultivo en la programación del riego en maíz forrajero. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 10(1): e3160. DOI: 10.19136/era.a10n1.3160

RESUMEN. La programación del riego es un factor clave para el manejo eficiente del agua en la agricultura. El objetivo del estudio fue programar los riegos con el uso del atmómetro y el coeficiente de cultivo (Kc) en maíz (*Zea mays* L.) forrajero para evaluar su efecto en la altura de planta, índice de área foliar, rendimiento de materia seca (MS) y eficiencia en el uso del agua (EUA) bajo diferentes tratamientos de riego. El estudio se realizó en el Campo Experimental la Laguna del INIFAP ubicado en Matamoros, Coahuila, México. Se utilizaron tres híbridos de maíz (H-431, H-383 y SB-302) con un sistema de riego por goteo subsuperficial, donde se aplicaron los tratamientos del 60, 80 y 100% de la evapotranspiración (ET) y un testigo (riego por gravedad). El diseño experimental fue bloques completamente al azar con parcelas divididas y cuatro repeticiones. La programación del riego con el atmómetro y el Kc del maíz propiciaron un mayor rendimiento de MS (18.83 t ha⁻¹) y EUA (3.66 kg de MS m⁻³) en los tres híbridos con el 100% de ET. La EUA en el 100% de ET fue 1.36, 1.63 y 40% mayor con respecto al 60%, 80% de ET y riego por gravedad, respectivamente. Por lo tanto, programar el riego mediante el uso del atmómetro y el Kc del cultivo en un sistema de riego por goteo subsuperficial ayuda a obtener un mayor uso eficiente del agua en maíz forrajero.

Palabras clave: Coeficiente de cultivo, forraje, productividad del agua, riego por goteo.

ABSTRACT. Irrigation scheduling is a key factor for efficient water management in agriculture. The objective of the study was to program the irrigations with the use of the atmometer and the crop coefficient (Kc) in forage corn (*Zea mays* L.) to evaluate its effect on plant height, leaf area index, dry matter yield (DM) and water use efficiency (WUE) under different irrigation treatments. The study was carried out in the Experimental Field La Laguna of INIFAP located in Matamoros, Coahuila, Mexico. Three corn hybrids (H-431, H-383 and SB-302) were used with a subsurface drip irrigation system, applying 60, 80 and 100% evapotranspiration (ET) treatments and a control (gravity irrigation). The experimental design was completely randomized blocks with divided plots and four replications. Irrigation scheduling with the atmometer and Kc of corn led to a higher DM yield (18.83 t ha⁻¹) and WUE (3.66 kg DM m⁻³) in the three hybrids with 100% ET. The WUE in 100% ET was 1.36, 1.63 and 40% higher with respect to 60%, 80% ET and irrigation by gravity, respectively. Therefore, scheduling irrigation using the atmometer and crop Kc in a subsurface drip irrigation system helps to obtain more efficient water use in forage corn.

Key words: Crop coefficient, forage, water productivity, drip irrigation.

INTRODUCCIÓN

La estimación confiable de los requerimientos hídricos de los cultivos mediante la evapotranspiración (ET), es importante en la programación de los riegos y el manejo eficiente del agua (Chen y Robinson 2009). En estudios sobre el balance de humedad en el suelo, para los sistemas de producción el reto es estimar con precisión los aportes también conocidas como entradas (lluvia, riego, roció) y las salidas (evaporación, drenaje o escorrentía y percolación) de humedad en un determinado estrato del suelo. La ET se define como la pérdida de agua desde la superficie de la tierra hacia la atmósfera a través de dos procesos; evaporación y transpiración (Allen *et al.* 1998). Se han desarrollado diferentes métodos para estimar la ET dentro de los que se recomienda el método de Penman-Monteith (Allen *et al.* 2005); sin embargo, este método requiere registros con baja disponibilidad en muchos lugares (Irmak *et al.* 2005), como velocidad del viento, radiación solar, temperatura del aire y humedad relativa (Allen *et al.* 1998). Por lo tanto, contar con esta base de datos para alimentar ecuaciones empíricas es una tarea difícil para los agricultores (Alam y Trooien 2001). Debido a lo anterior, es importante contar con alternativas para medir la evapotranspiración de referencia (ET_o) en forma rápida y confiable; el valor de salida de la ET_o después será ajustado de acuerdo al tipo de cultivo, etapa fenológica y contenido de humedad en el suelo.

El atmómetro es una herramienta útil para estimar la tasa de ET_o, pues tiene ventajas sobre los registros de la estación meteorológica: es simple, económico y de fácil mantenimiento (Alam y Trooien 2001, Mendoza-Pérez *et al.* 2019). Mide la cantidad de agua evaporada a la atmósfera desde una superficie húmeda y porosa (Alam y Trooien 2001). Está compuesto por una capsula de cerámica porosa montada en la parte superior de un depósito cilíndrico lleno de agua destilada, y un tubo de succión que se extiende hasta la parte inferior del depósito. La capsula está recubierta por una malla verde que puede cambiarse según el cultivo de referencia del que se quiera medir la ET, ya sea pasto (malla #30) o alfalfa (malla #54). El atmómetro en la parte exte-

rior del depósito tiene un tubo de cristal con una escala graduada (mm) que permite la lectura del nivel de agua del depósito. Para determinar la cantidad de agua perdida por el ambiente, se debe realizar una primera lectura y después lecturas sucesivas, según el periodo en el que se desea cuantificar la ET_o. Así, la diferencia en el nivel del agua entre dos lecturas consecutivas es el agua evaporada por el atmómetro. Dicho valor representa la ET_o para ese periodo de tiempo (Magliulo *et al.* 2003). La ET_o estimada con el atmómetro se correlaciona con grado moderado ($r^2 = 0.70$) con el lisímetro de pesada (Casanova *et al.* 2009); y con grado alto ($r^2 = 0.90$) con el tanque evaporímetro (Kidron 2005), mientras se correlaciona en un grado muy alto ($r^2 = 0.95$) con la estación meteorológica (Taghvaeian *et al.* 2014).

Para programar el riego en los cultivos se multiplica el valor de ET_o por un coeficiente de cultivo (K_c) (Allen *et al.* 1998); el K_c, en general, se toma de la literatura (Allen *et al.* 1998), o bien, se le calcula en forma directa a través de observaciones que se asocian con la etapa fenológica y variedad del cultivo. Algunos factores externos a la planta como estrés biótico y abiótico (deficiencia o humedad excedente por tiempo prolongado, fitosanidad, plagas y deficiencias de nutrientes), pueden afectar el valor de K_c y generar valores diferentes a los publicados. Por este motivo, se sugiere utilizar valores de K_c que represente la situación actual del cultivo (Lei y Yang 2014, Adamala *et al.* 2016, Reyes-González *et al.* 2019a).

En la Comarca Lagunera, no se ha estudiado el calendario de riego donde se utiliza el dato de ET_o del atmómetro y el K_c reportado para maíz forrajero bajo riego por goteo. El maíz forrajero es el principal cultivo de la región con una superficie de 50 mil hectáreas (SIAP 2021). Por lo anterior el objetivo del estudio fue programar los riegos con el uso del atmómetro y el coeficiente de cultivo (K_c) en maíz forrajero para evaluar su efecto en la altura de planta, índice de área foliar, rendimiento de materia seca (MS) y eficiencia en el uso del agua (EUA) bajo diferentes tratamientos de riego. La hipótesis planteada es que el rendimiento de MS y la EUA se incrementaran si el sistema de producción se ajusta al calendario de riego con el uso del atmómetro y el

valor estimado de Kc en seguimiento de las etapas fenológicas del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el Campo Experimental La Laguna del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ubicado en Matamoros, Coahuila, México (25° 32' LN, 103° 14' LO, altitud de 1100 m y clima muy seco semicálido (Bwh)) (García 2004), con humedad atmosférica escasa, temperatura media anual de 22.6 °C, precipitación promedio de 215.5 mm y evaporación media anual de 2 000 mm (Villa-Castorena et al. 2005).

Siembra y fertilización

La siembra se realizó el 18 de junio de 2019 en suelo seco que contiene una capacidad de campo de 29.9% y punto de marchitez permanente de 17.5%, a una distancia de 12 cm entre plantas y 76 cm entre surcos para obtener una densidad de población de alrededor de 110 mil plantas ha⁻¹. Se utilizaron híbridos de maíz forrajero con ciclo intermedio (H-431, H-383 y SB-302) que son aptos para la siembra en verano (junio-octubre). La dosis de fertilización utilizada fue: 200-100-00 (N P K), como fuente de nitrógeno se usó urea y de fósforo fosfato monoamónico (MAP). A la siembra se aplicó todo el fósforo y la mitad del nitrógeno; el resto del nitrógeno se aplicó cada 15 días durante el desarrollo del cultivo de acuerdo a su requerimiento mediante el sistema de riego por goteo usando un inyector Venturi. En el riego por gravedad se aplicó la otra mitad de nitrógeno en forma manual a los 35 días después de la siembra (DDS).

Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental fue bloques completos al azar en parcelas divididas con cuatro repeticiones. Las parcelas mayores fueron los tratamientos de riego y las parcelas menores los híbridos de maíz. Las parcelas experimentales fueron de cuatro surcos de 5 m de largo y 0.76 m de separación entre surcos

(15.2 m²). Los tratamientos de riego fueron: riego por goteo subsuperficial (RGS), donde se aplicó el 60, 80 y 100% de ET y un tratamiento testigo que fue el riego por gravedad. El tratamiento del 100% de ET fue el único tratamiento que se multiplicó por un Kc proveniente de índices de vegetación para obtener la ET del cultivo (ETc). La ET_o se tomó del atmómetro (Figura 1).

Atmómetro

Las lecturas del atmómetro (ETgage, modelo A comercializado por ETgage Company Loveland, Colorado, EUA) se tomaron todos los días a las 8:30 am y se multiplicaron por un Kc para estimar la ETc. El Kc se obtuvo de la ecuación ($Kc = 1.1705 \cdot NDVI + 0.0535$) desarrollada por Reyes-González et al. (2019a) para maíz forrajero con riego por goteo subsuperficial. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se tomó cada tercer día con el GreenSeeker (Trimble Inc., Sunnyvale, CA, EUA), antes del riego.

Riego por goteo y gravedad

El sistema de riego que se usó es por goteo subsuperficial (RGS). La cintilla utilizada fue la RO DRIP 8 mil (Rivulis Irrigation Inc., San Diego, CA, EUA) con espesor de pared de 0.2 mm y diámetro interior de 16 mm, con emisores a 0.2 m y caudal de 0.5 L h⁻¹ por emisor. La cintilla se enterró a 0.3 m de profundidad, con distancia entre ellas de 0.76 m. El riego se aplicó cada tercer día. La presión de operación del sistema de riego fue 0.05 Mpa. En el riego por gravedad se aplicó un riego a la siembra (11 cm) y cuatro de auxilio (15 cm), con intervalos de 15 días entre ellos.

Altura e índice de área foliar (IAF)

La altura de planta se midió con una cinta métrica en dos plantas escogidas al azar en cada parcela y tratamiento durante todo el ciclo del cultivo. Las mediciones se realizaron desde la superficie del suelo hasta la penúltima hoja del cultivo cada semana a partir de los 15 DDS. El IAF se midió utilizando el ceptómetro PAR/LAI modelo Lp-80 de AccuPAR (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA). La barra



Figura 1. Vista lateral del atmómetro donde se observa la escala gráfica (mm).

del ceptómetro se colocó en ángulo de 45° a través del surco del cultivo para medir la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR). La energía absoluta interceptada se obtuvo por diferencia entre lecturas de PAR arriba y PAR abajo del dosel del cultivo en cada parcela y en cada tratamiento en dos puntos y tres repeticiones por punto. Las lecturas se tomaron entre las 12:00 y 14:00 horas en días despejados con intervalo de siete días.

Rendimiento y eficiencia en el uso del agua

La cosecha del cultivo se realizó a los 95 DDS en el riego por goteo y a los 102 DDS en el sistema de riego por gravedad. La producción de forraje verde se calculó con el peso de la biomasa de tres metros lineales en los dos surcos centrales de cada tratamiento (4.56 m^2). Después, se tomó una muestra de 500 g y se secó en una estufa de aire forzado a temperatura de 65°C durante 72 h para deter-

minar la producción de materia seca (MS). Con la producción de forraje verde y el porcentaje de MS del forraje se estimó el rendimiento de MS. La eficiencia en el uso del agua se obtuvo al dividir el peso de MS cosechado por ha (kg de MS ha^{-1}) entre el volumen total de agua aplicado (m^3) en cada tratamiento. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), con el paquete estadístico SAS 9.3 (SAS 2012).

RESULTADOS

Altura de la planta

La tasa de crecimiento fue similar entre los tratamientos con goteo (Figura 2). Sin embargo, en el de riego por gravedad el crecimiento fue más lento, alcanzado su valor máximo a los 64 DDS, una semana después que los tratamientos con goteo. En el riego con goteo (tratamiento del 100% de ET) durante el periodo de 10 a 20 DDS el crecimiento diario fue de 2 cm; y en el de gravedad de 1 cm. En los siguientes periodos de 20 a 30, 30 a 40 y 40 a 50 DDS respectivamente, el crecimiento fue de 5 y 2, 8 y 3 y 6 y 6 cm día^{-1} en el tratamiento con goteo y gravedad para el híbrido SB-302. Cabe señalar que en el periodo de desarrollo vegetativo o crecimiento rápido (30 a 40 DDS) en el riego por goteo se obtuvo un crecimiento de 8 cm día^{-1} , mientras que en el de gravedad fue de 3 cm día^{-1} . Esto demuestra que con el riego frecuente y programación del riego apropiada se obtienen crecimientos rápidos, lo que resulta en cosechas adelantadas. Los tratamientos de 80 y 100% de ET mostraron la mayor altura al compararlos con el tratamiento de 60% de ET y el riego por gravedad. El híbrido SB-302 alcanzó la altura promedio mayor (2.41 m) con respecto a los otros dos híbridos (H-383, 2.24 m; H-431, 2.14 m). Como se esperaba, las alturas mayores se obtuvieron en el tratamiento donde la programación del riego se realizó de acuerdo con el Kc y a la ETo del atmómetro.

Índice de área foliar (IAF)

Las tendencias de los valores del IAF de tres híbridos de maíz evaluados bajo diferentes niveles de ET fueron similares y alcanzaron su valor máximo

hasta los 50 DDS en los tratamientos con goteo, después se presentan valores constantes (meseta) hasta los 85 DDS y al final del ciclo verano 2019 disminuyeron ligeramente (Figura 3). En el riego por gravedad los valores máximos de IAF se obtuvieron a los 57 DDS, 7 días después que los de goteo. En general los tratamientos de 80 y 100% de ET mostraron los valores más altos en comparación con el tratamiento de 60% de ET y al de riego por gravedad.

Por otro lado, la dinámica en el valor del IAF se relaciona de manera estrecha con la etapa fenológica del cultivo y esta a su vez con los requerimientos hídricos (Figura 4). En el tratamiento del 100% ET de riego por goteo el híbrido SB-302 se tuvo una ET acumulada o lámina de riego neta de 518 mm, mientras que en el riego por gravedad la ET acumulada fue de 710 mm. En el tratamiento del 100% de ET los valores de IAF fueron constantes y con un comportamiento normal, mientras que en el riego por gravedad los valores fueron retardados y con altibajos.

A partir de lo anterior, se puede decir que en los tratamientos con goteo se obtienen cosechas más tempranas que cumplen con su fenología antes que los regados por gravedad. Los resultados demuestran que el riego por goteo y la programación adecuada del riego están asociados con la acumulación temprana de biomasa y con el ahorro de agua (192 mm) en comparación con el riego por gravedad.

Materia seca (MS)

El análisis de varianza para la producción de MS mostró diferencias significativas entre los tratamientos de riego (Figura 5A). Los tratamientos que sobresalieron fueron el de 80% ET (18.76 Mg ha^{-1}) y 100% de ET (18.83 Mg ha^{-1}) de MS que fueron iguales estadísticamente. Los tratamientos con producción menor y estadísticamente iguales fueron el de 60% de ET (15.59 Mg ha^{-1}) y gravedad (15.73 Mg ha^{-1}).

Con relación a los tres híbridos evaluados, los de mayor producción fueron el H-431 y SB-302, los cuales son iguales estadísticamente con valores de 18.45 y 17.57 Mg ha^{-1} de MS, respectivamente, pero

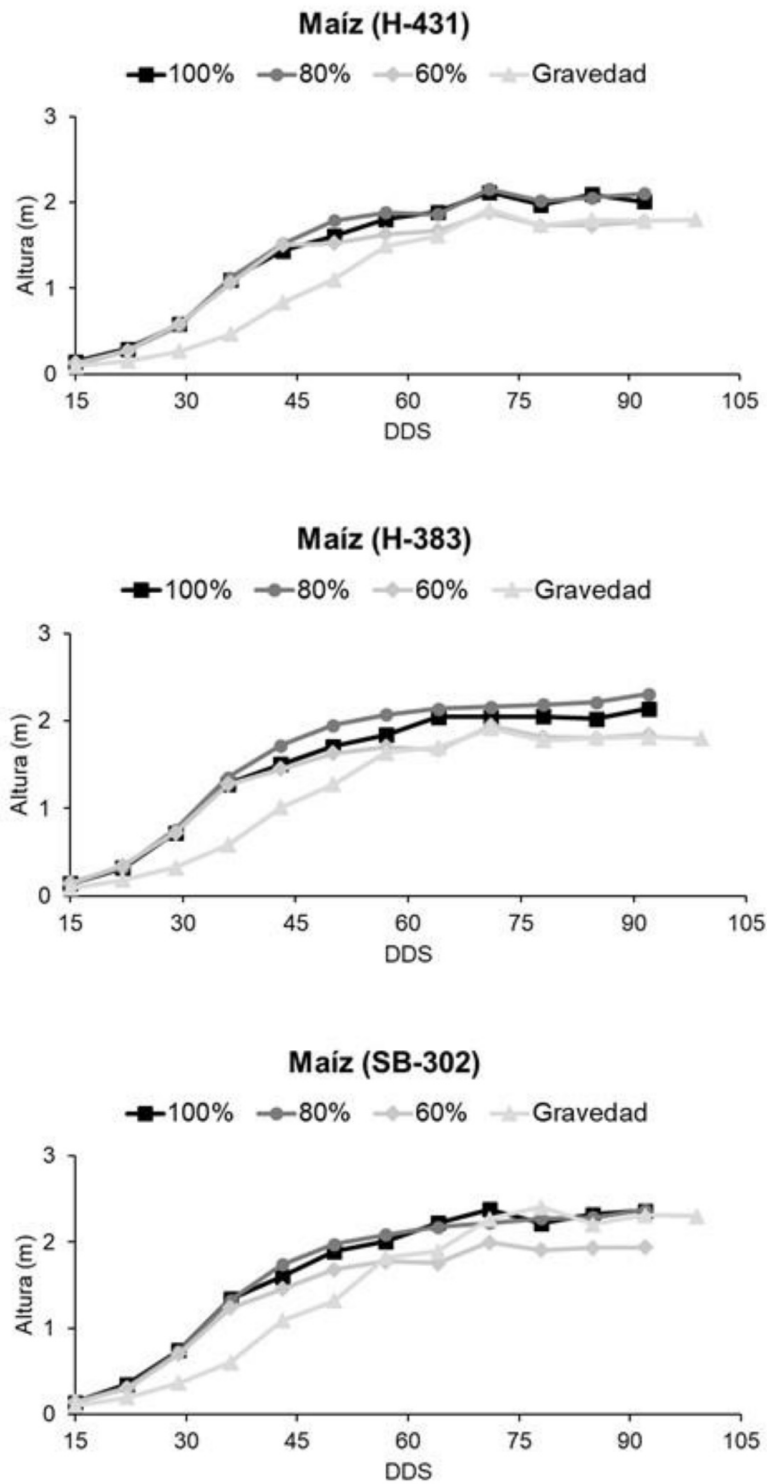


Figura 2. Altura de planta de tres híbridos de maíz bajo tres niveles de ET y de gravedad durante el ciclo de verano de 2019.

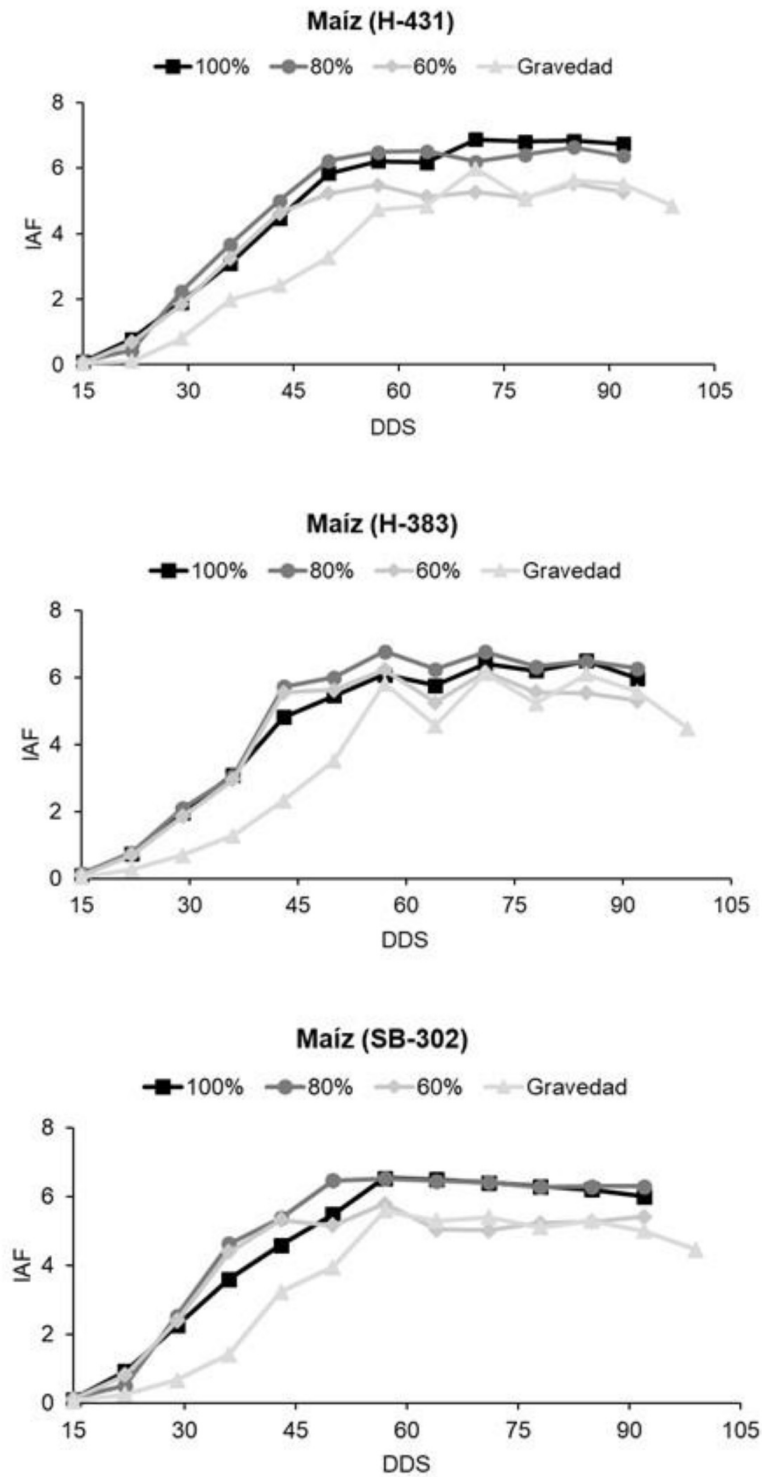


Figura 3. Índice de área foliar de tres híbridos de maíz bajo tres niveles de ET y gravedad durante el ciclo de verano de 2019.

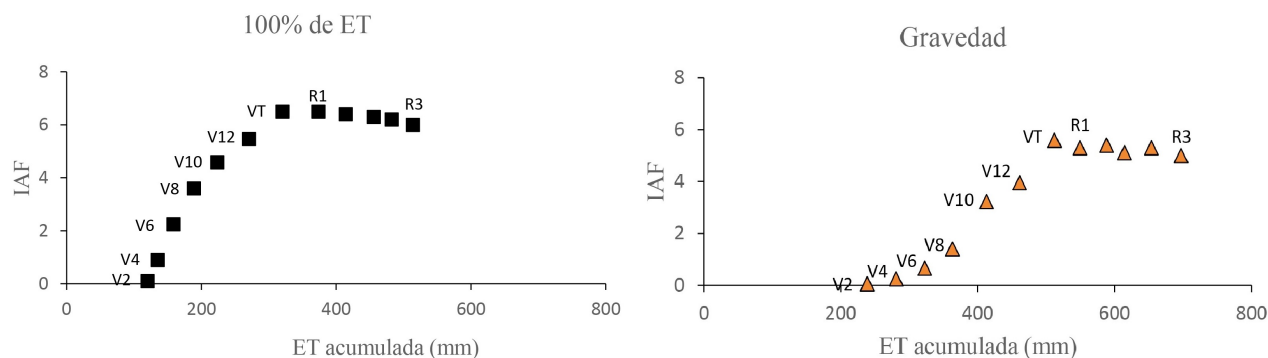


Figura 4. Dinámica de crecimiento del IAF y acumulación de ET en maíz forrajero (híbrido SB-302) con dos tratamientos de riego.

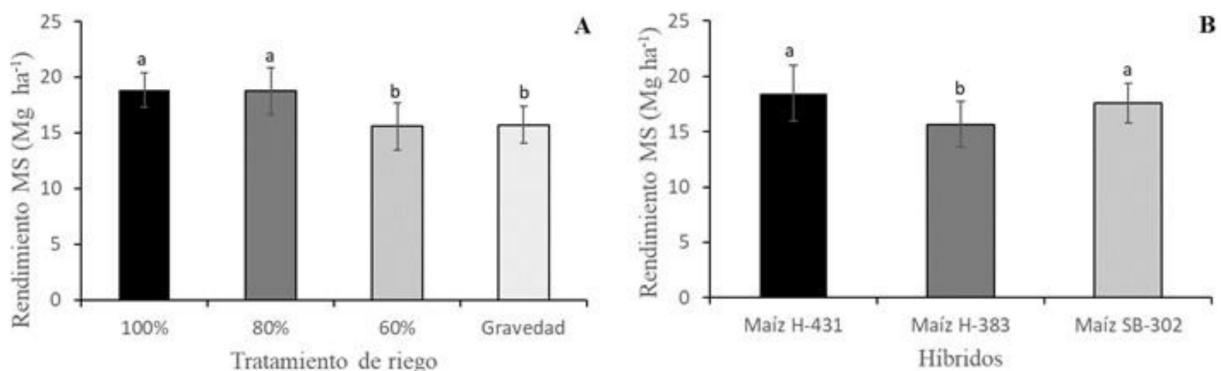


Figura 5. Rendimiento de MS en maíz forrajero con cuatro tratamientos de riego (A) y tres híbridos (B) durante el ciclo de verano de 2019. Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). Las barras verticales indican la desviación estándar.

diferente al H-383, el cual presentó una producción inferior de 15.67 Mg ha^{-1} de MS (Figura 5B). El análisis de varianza no mostró evidencia significativa de interacción entre riegos e híbridos para MS ($p = 0.4259$).

Lámina de riego aplicada y coeficiente de cultivo (Kc)

La acumulación de lámina de riego para los diferentes tratamientos de riego y el coeficiente de cultivo (Kc) utilizado para maíz forrajero se muestran en las Figuras 6A y 6B. En el sistema de riego por gravedad se aplicó una lámina acumulada neta de 710 mm y en el sistema de riego por goteo láminas acumuladas de 432, 542 y 518 mm para 60, 80 y 100% de ET, respectivamente (Figura 6A). En estas láminas va implícita la precipitación (43 mm). El valor máximo de Kc para maíz varía de 1 a 1.4 en depen-

dencia de las condiciones ambientales (Allen *et al.* 1998). En el presente trabajo el valor máximo fue uno (Figura 6B), esto de acuerdo a investigaciones realizadas en forma local y con mayor eficiencia en el uso del agua. La Figura 7 muestra el análisis de varianza (ANDEVA) de las láminas de riego, donde se detectó diferencias significativas entre los tratamientos de riego. El riego por gravedad fue el que recibió la mayor lámina de riego con 710 mm, seguido del 80% ET (543 mm), 100% ET (518 mm) y 60% de ET (432 mm), (Figura 7).

Eficiencia en el uso del agua (EUA)

El análisis de la información detectó diferencias significativas en la eficiencia en el uso del agua (EUA) entre los tratamientos de riego (Figura 8A). Los tratamientos mejores fueron con goteo; el 100% de ET sobresalió ligeramente con $3.63 \text{ kg de MS m}^{-3}$,

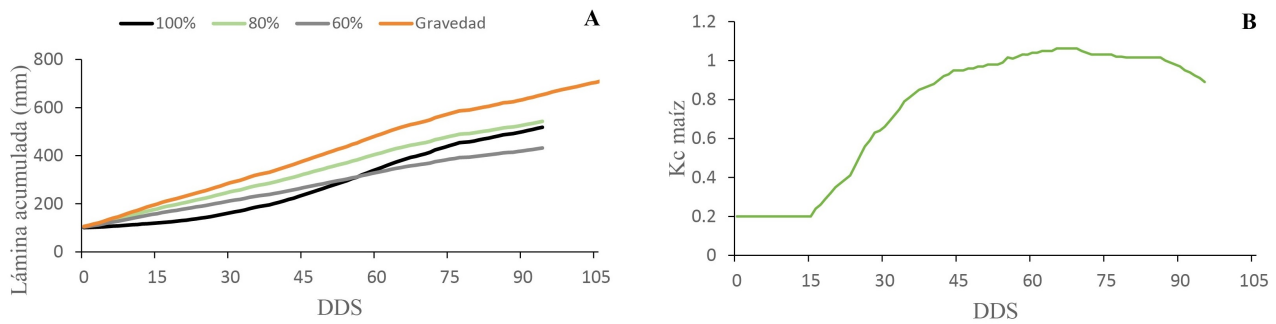


Figura 6. Lámina de riego acumulada bajo diferentes niveles de ET y Kc para maíz forrajero durante el ciclo de verano de 2019.

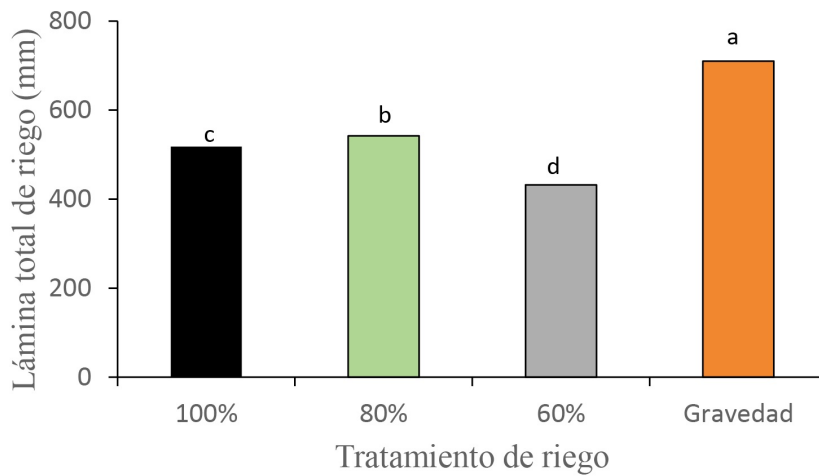


Figura 7. Lámina aplicada acumulada bajo diferentes niveles de ET y gravedad durante el ciclo de verano de 2019.

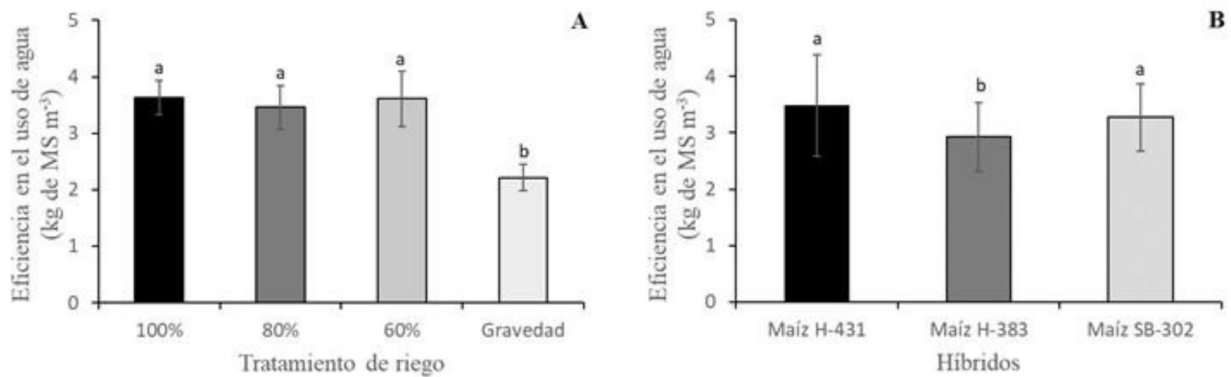


Figura 8. Eficiencia en el uso del agua en diferentes niveles de ET y gravedad (A) y tres híbridos de maíz (B) durante el ciclo de verano de 2019. Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). Las barras verticales indican la desviación estándar.

seguido por el 60 y 80% con valores de 3.60 y 3.46 kg de MS m⁻³; en comparación con el riego por gravedad donde se obtuvo la menor productividad del agua con 2.21 kg de MS m⁻³, y hubo diferencia es-

tadística con los tratamientos con goteo. La EUA en el 100% de ET fue 1.36, 1.63 y 40% mayor con respecto al 60%, 80% de ET y riego por gravedad, respectivamente.

En cuanto a los híbridos evaluados hubo diferencias significativas entre ellos. Los híbridos con mayor EUA fueron el H-431 y SB-302 los cuales son estadísticamente iguales con valores respectivos de 3.50 y 3.38 kg de MS m⁻³, pero diferentes al híbrido H-383 que obtuvo el valor más bajo (2.93 kg de MS m⁻³) (Figura 8B). El análisis de varianza no mostró evidencia significativa de interacción entre riegos e híbridos para EUA ($p = 0.2320$).

DISCUSIÓN

Altura de la planta

En diversos trabajos se ha documentado que bajos niveles de humedad o mala programación del riego afectan de manera negativa la altura de planta (Reyes-González *et al.* 2019b). Resultados similares fueron reportados por Kheira (2009) y Sánchez-Hernández *et al.* (2013) con alturas promedios de 2.44 m en maíz forrajero, pero inferiores a los reportados por Montemayor-Trejo *et al.* (2012) y Yescas-Coronado *et al.* (2015), quienes indicaron alturas de 2.89 y 2.77 m, respectivamente; en maíces sembrados en la Comarca Lagunera. Estos autores reportan las mayores alturas con riego por goteo y las menores con riego por gravedad; similar a los datos obtenidos en el presente estudio. Mientras que Duan *et al.* (2007), mencionan que el estrés hídrico provoca cambios en la estructura de la planta, lo que se refleja en una disminución de la tasa de crecimiento durante el ciclo del cultivo.

Índice de área foliar (IAF)

En el riego por gravedad, una vez que alcanzó los valores máximos de IAF en los diferentes híbridos, estos son inestables pues tienden a disminuir o aumentar a causa del estrés hídrico proporcionado por la calendarización de los riegos. Al respecto, Kheira (2009) menciona que un déficit en los riegos afecta de forma significativa los valores de altura e IAF. Mientras que El-Mageed y Semida (2015) y Reyes-González *et al.* (2019b) reportan que humedad limitada en el suelo afecta en forma directa la cobertura vegetal del cultivo, dando como resultado valores bajos de IAF. Sobre lo mismo Montemayor-Trejo *et al.*

(2012), Kang *et al.* (2016) y Reyes-González *et al.* (2019a) aportaron curvas similares de IAF en maíz, estos autores mencionan que los valores de IAF inician con un crecimiento lento (0.2), seguido por un crecimiento rápido (0.4) en la etapa vegetativa, hasta alcanzar un valor máximo (6.7) que luego disminuye (5.5), por la senescencia de las hojas y porque las plantas alcanzan la madurez fisiológica. En el presente trabajo el maíz se cosechó en la etapa R3 (grano lechoso) para forraje, por tal motivo la curva no cae al final del ciclo que es cuando el cultivo alcanza la madurez fisiológica (R6). El mejor comportamiento de IAF en los híbridos probados fue cuando en la programación del riego se tomó en cuenta el Kc y la ETo del atmómetro (tratamiento del 100% de ET), mientras que los valores más bajos fueron en el riego por gravedad.

Materia seca (MS)

Los resultados de materia seca son ligeramente inferiores a los obtenidos por Rivera-González *et al.* (2004) quienes reportaron rendimientos de MS de 22 Mg ha⁻¹, durante el ciclo de primavera (marzo-junio). Resultados similares (18.35 Mg ha⁻¹ de MS) fueron reportados por Montemayor-Trejo *et al.* (2012) en un maíz irrigado con el riego por goteo subterráneo y niveles de ET diferentes. En la presente investigación se obtuvieron valores superiores a los reportados por Yescas-Coronado *et al.* (2015) quienes reportaron valores de 14 Mg ha⁻¹ de MS. En estas investigaciones la ETo se tomó de un tanque evaporímetro clase "A" y de estaciones meteorológicas automáticas. Por otra parte, Reta-Sánchez *et al.* (2007) concluye que el incremento en MS se debe al mayor índice de área foliar que se desarrolla en las etapas tempranas del cultivo. Mientras que Bame *et al.* (2014) mencionan que en la producción de maíz con RGS se tuvieron incrementos en el rendimiento de MS, y lo atribuyeron a la altura de planta y al mayor peso de elotes por planta. El incremento de MS por hectárea se ha asociado con láminas de riego aplicadas conforme el cultivo las requiera (Vasilakoglou *et al.* 2011). De la misma manera, pero desde la óptica de una deficiente programación de riego, o afectaciones al crecimiento de la planta por estrés

biótico y abiótico, el rendimiento de MS y el IAF (El-Mageed y Semida 2015). Los datos demuestran que el déficit de riego afectó de forma negativa (16%) el rendimiento de MS por hectárea en maíz forrajero.

Lámina de riego aplicada y coeficiente de cultivo (Kc)

Las láminas de agua que se aplicaron en este estudio fueron diferentes a las aplicadas por Rivera-González *et al.* (2013), quienes aplicaron láminas de 596, 483, 370 y 580 mm para obtener el 100, 80, 60% de ET y gravedad. En lo respectivo al riego por gravedad Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) informaron láminas mayores (736 mm), y Montemayor-Trejo *et al.* (2012) menores (450 mm) en el cultivo de maíz. Cabe señalar que las láminas de riego acumuladas se adquirieron de estaciones meteorológicas y de tanque evaporímetro tipo "A". Al respecto, Jahanzad *et al.* (2013) mencionaron que la modificación de la ET en la reposición de agua crea condiciones de suficiencia de humedad para las plantas, lo cual se puede reflejar en el rendimiento de forraje verde, MS e incluso en la calidad nutrimental (Sánchez-Hernández *et al.* 2013). La lámina total aplicada mediante el riego por goteo representó un ahorro que va desde un 23 hasta un 39% con respecto al riego por gravedad.

En lo que respecta al Kc Reyes-González *et al.* (2018), (2019a), obtuvieron curvas semejantes con valores de 0.22 en la etapa inicial (V2), valores máximos de 1.0 en la etapa reproductiva (R1) y al final de 0.80 en la etapa de senescencia (R3). En contraste, estos valores fueron diferentes a los de Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) y Karimi y Gomrokchi (2011) quienes registraron 0.3 y 0.7 en la etapa inicial, 1.2 en la etapa reproductiva y 1.0 y 0.9 en etapa de grano lechoso (R3).

Eficiencia en el uso del agua (EUA)

Los valores de EUA obtenidos en esta investigación fueron menores a los conseguidos por Montemayor-Trejo *et al.* 2012 para maíz forrajero (4.07 kg de MS m⁻³) bajo condiciones de aridez y con riego por goteo subsuperficial. Aunque Rivera-González *et al.* (2004) y Yescas-Coronado *et al.* (2015) obtuvieron resultados similares y lograron valores de 3.5 y 3.3 kg de MS m⁻³, en maíz forrajero

establecido con riego por goteo en la Comarca Lagunera. En esas investigaciones los valores de láminas de riego se tomaron del tanque evaporímetro y de estaciones meteorológicas del INIFAP. De acuerdo a los resultados obtenidos, la EUA fluctuó de 2.21 a 3.63 kg de MS m⁻³, valores que están dentro del rango reportado en la literatura; aunque cabe señalar que este trabajo se realizó en el verano, en el cual la producción de MS baja hasta un 30% respecto al ciclo de primavera (Rivera-González *et al.* 2013). En otros estudios se han obtenido resultados que oscilan entre 2.0 y 4.5 kg de MS m⁻³ para maíz forrajero bajo estas condiciones de riego (Evet *et al.* 2006). Mientras que para el riego por gravedad se registran valores entre 1.5 y 2.7 kg de MS m⁻³ (Rivera-González *et al.* 2013). La EUA del agua es un indicador que varía entre regiones y está directamente afectado por la fertilidad del suelo, híbrido, fecha de siembra, densidades de población, prácticas culturales, sistema de riego y clima. Su valor debe ser mejorado porque la competitividad del agua en la agricultura aumenta con otros sectores que también demandan el vital líquido (Howell 2001).

CONCLUSIONES

En la programación del riego con el uso de la evapotranspiración del atmómetro y el coeficiente del cultivo de maíz se encontró que la mayor altura de la planta y el índice de área foliar se obtuvieron con el tratamiento de 100% de evapotranspiración, el cual dio como resultado mayor rendimiento de materia seca y mejor eficiencia en el uso del agua. El rendimiento de materia seca del tratamiento de 100% de evapotranspiración fue mayor hasta un 17%, con respecto al de gravedad. La eficiencia en el uso del agua con el tratamiento de 100% de evapotranspiración fue un 40% mayor respecto a gravedad, por lo que el agua aplicada en el tratamiento de 100% de evapotranspiración representó un ahorro del 27% respecto al riego por gravedad. El uso del atmómetro en combinación con el coeficiente del cultivo en un sistema de riego por goteo representó una alternativa viable para mejorar la eficiencia en el uso del agua en maíz forrajero.

LITERATURA CITADA

- Adamala S, Rajwade Y, Reddy YVK (2016) Estimation of wheat crop evapotranspiration using NDVI vegetation index. *Journal of Applied and Natural Science* 8: 159-166.
- Alam M, Trooien T (2001) Estimating reference evapotranspiration with an atmometer. *Applied Engineering in Agriculture* 17: 153-158.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 300p.
- Allen RG, Clemmens AJ, Burt CM, Solomon K, O'Halloran T (2005) Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 24-36.
- Bame IB, Hughes JC, Titshall LW, Buckleyb CA (2014) The effect of irrigation with anaerobic baffled reactor effluent on nutrient availability, soil properties and maize growth. *Agricultural Water Management* 134: 50-59.
- Casanova MP, Messing I, Joel A, Cañete AM (2009) Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69: 60-70.
- Chen F, Robinson PJ (2009) Estimating reference crop evapotranspiration with ETgages. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 135: 335-342.
- Duan B, Yang Y, Lu Y, Korpelainen H, Berninger F, Li C (2007) Interactions between water deficit, ABA, and provenances in *Picea asperata*. *Journal Experimental Botany* 58: 3025-3036.
- El-Mageed TA, Semida WM (2015) Organo mineral fertilizer can mitigate water stress for cucumber production (*Cucumis sativus* L.). *Agricultural Water Management* 159: 1-10. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.05.020.
- Evelt SR, Peters RT, Howell TA (2006) Controlling water use efficiency with irrigation automation: Cases from drip and center pivot irrigation of corn and soybean. In: Proc. 28th Annual Southern Conservation Systems Conference, Amarillo, TX. USA. pp: 57-66.
- García E (2004) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Series Libros No.6, Instituto de Geografía, UNAM. México. 90p.
- Howell TA (2001) Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal* 93: 281-289.
- Irmak S, Dukes MD, Jacobs JM (2005) Using modified Bellani plate evapotranspiration gauges to estimate short canopy reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 131: 164-175.
- Jahanzad E, Jorat M, Moghadam H, Sadeghpour A, Chaichi MR, Dashtaki M (2013) Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. *Agricultural Water Management* 117: 62-69.
- Kang Y, Ozdogan M, Zipper SC, Roman MO, Walker J, Hong SY, Marshall M, Magliulo V, Moreno J, Alonso L, Miyata A, Kimball B, Loheide SP (2016) How universal is the relationship between remotely sensed vegetation indices and crop leaf area index? A global assessment. *Remote Sensing* 8: 597. DOI: 10.3390/rs8070597.
- Karimi M, Gomrokchi A (2011) Yield and water use efficiency of corn planted in one or two rows and applying furrow or drip tape irrigation systems in Ghazvin Province, Iran. *Irrigation and Drainage* 60: 35-41.

- Kheira AA (2009) Comparison among different irrigation systems for deficit-irrigation corn in the Nile Valley. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal XI: Manuscript LW 08 010*.
- Kidron GJ (2005) Measurements of evaporation with novel mini atmometer in the Negev. *Weather* 60: 268-272.
- Lei H, Yang D (2014) Combining the crop coefficient of winter wheat and summer maize with remotely sensed vegetation index for estimating evapotranspiration in the North China Plain. *Journal of Hydrology Engineering* 19: 243-251.
- Magliulo V, d'Andria A, Rana G (2003) Use of the modified atmometer to estimate reference evapotranspiration in Mediterranean environments. *Agricultural Water Management* 63: 1-14.
- Mendoza-Pérez C, Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Quevedo-Nolasco A, Flores-Magdaleno H, Ramírez Ayala C, Ascencio-Hernández R (2019) Estimación de la evapotranspiración de referencia mediante atmómetro con fines de calendarización de riego. *IDESIA* 37: 65-72.
- Montemayor-Trejo JA, Lara-Mireles JL, Woo-Reza JL, Munguía-López J, Rivera-González M, Trucíos-Caciano R (2012) Producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en tres sistemas de irrigación en la Comarca Lagunera de Coahuila y Durango México. *Agrociencia* 46: 267-278.
- Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Unland-Weiss H (2006) Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 40: 13-25.
- Reta-Sánchez DG, Cueto-Wong JA, Gaytan-Mascorro A, Santamaria-Cesar J (2007) Rendimiento y extracción de nitrógeno, fósforo y potasio de maíz forrajero en surcos estrechos. *Agricultura Técnica en México* 33: 145-151.
- Reyes-González A, Kjaersgaard J, Trooien T, Hay C, Ahiablame L (2018) Estimation of crop evapotranspiration using satellite remote sensing-based vegetation index. *Advances in Meteorology* 2018: ID4525021. DOI: 10.1155/2018/4525021.
- Reyes-González A, Reta-Sánchez DG, Sánchez-Duarte JI, Ochoa-Martínez E, Rodríguez-Hernández K, Preciado-Rangel P (2019a) Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. *Terra Latinoamericana* 37: 279-290.
- Reyes-González A, Kjaersgaard J, Trooien T, Reta-Sánchez DG, Sánchez-Duarte JI, Preciado-Rangel P, Fortis-Hernandez M (2019b) Comparison of leaf area index, surface temperature, and actual evapotranspiration estimated using the METRIC model and in situ measurements. *Sensors* 19: 1857. DOI: 10.3390/s19081857.
- Rivera-González M, Estrada-Avalos J, Orona-Castillo I, Martínez-Rodríguez JG (2004) Producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en surco estrecho y riego por goteo subsuperficial. *Agrofaz* 4: 443-447.
- Rivera-González M, Palomo-Rodríguez M, Anaya-Salgado A, Reyes-González A, Martínez-Rodríguez JG (2013) Función de producción hídrica para maíz forrajero (*Zea mays* L.) en riego por goteo subsuperficial. *Agrofaz* 13: 17-22.
- SIAP (2021) Anuario estadístico de la producción agrícola. Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta: 07 septiembre 2021.
- Sánchez-Hernández MA, Aguilar-Martínez CU, Valenzuela-Jiménez N, Joaquín-Torres BM, Sánchez-Hernández C, Jiménez-Rojas MC, Villanueva-Verduzco C (2013) Rendimiento en forraje de maíces del trópico húmedo de México en respuesta a densidades de siembra. *Revista Mexicana de Ciencias. Pecuarias* 4: 271-288.
- Taghvaeian S, Chávez JL, Bausch WC, DeJonge KC, Trout TJ (2014) Minimizing instrumentation requirement for estimating crop water stress index and transpiration of maize. *Irrigation Science* 32: 53-65.

- Vasilakoglou I, Dhima K, Karagiannidis N, Gatsis T (2011) Sweet sorghum productivity for bio-fuels under increased soil salinity and reduced irrigation. *Field Crops Research* 120: 38-46.
- Villa-Castorena MM, Catalan-Valencia EA, Inzunza-Ibarra MA (2005) Análisis de la información climática para usos agrícolas. *Agrofaz* 5: 717-724.
- Yescas-Coronado P, Segura-Castruita MA, Martínez-Corral L, Álvarez-Reyna VP, Montemayor-Trejo JA, Orozco-Vidal JA, Frías-Ramírez JE (2015) Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. *Revista Internacional de Botánica Experimental* 84: 272-279.