

Efecto de la tasa de evapotranspiración en área foliar, potencial hídrico y rendimiento de maíz forrajero

Felipe Zavala-Borrego¹
Arturo Reyes-González^{2§}
Vicente de Paul Álvarez-Reyna¹
Pedro Cano-Ríos¹
Víctor Manuel Rodríguez-Moreno³

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Unidad Laguna. Carretera a Santa Fé y Periférico s/n, Col. Valle Verde, Torreón, Coahuila, México. CP. 27054. Tel. 871 3320577 (freedom78_@hotmail.com). Tel. 871 7279211 (vdpar.190754@hotmail.com). Tel. 871 1749164 (canorp49@hotmail.com). ²Campo Experimental La Laguna-INIFAP. Blvd. José Santos Valdez No. 1200 pte, Col. Centro, Matamoros, Coahuila. CP. 27440. Tel. 800 088222, ext. 82414. (reyes.arturo@inifap.gob.mx). ³Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Col. Pabellón de Arteaga Centro, Aguascalientes. CP. 20670. Tel. 800 088222, ext. 82525. (rodriguez.victor@inifap.gob.mx).

§Autor para correspondencia: reyes.arturo@inifap.gob.mx.

Resumen

Debido a la creciente demanda de agua dulce, es necesario mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de diferentes láminas de riego sobre el índice de área foliar (IAF), temperatura foliar (Tf), potencial hídrico foliar (ψ_h) y rendimiento en maíz forrajero (*Zea mays* L.) bajo un sistema de riego por goteo. El estudio se llevó a cabo en el verano de 2019 en las instalaciones del Campo Experimental La Laguna en Matamoros, Coahuila, México. Se evaluaron tres niveles de evapotranspiración (ET) (60, 80 y 100%) y un tratamiento testigo (riego por inundación). Se utilizaron tres variedades de maíz tolerantes a la sequía y alto rendimiento. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones, con arreglo de tratamientos en parcelas divididas. La parcela principal fueron los tratamientos de riego y la parcela secundaria las variedades de maíz. Las variables medidas fueron índice de área foliar (IAF), temperatura foliar (Tf), potencial hídrico foliar (ψ_h), rendimiento de forraje seco y eficiencia en el uso de agua. Los diferentes niveles de ET afectaron el IAF, ψ_h , Tf y rendimientos del cultivo, condicionando la producción de biomasa del cultivo. Los resultados indicaron que el volumen de agua aplicado en los tratamientos con riego por goteo subsuperficial fue 27 a 40% menor con respecto al riego por inundación. Se evaluó la eficiencia en el uso de agua, los mejores resultados se obtuvieron cuando el agua fue aplicada de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo con el tratamiento de 100% de ET afectada por un coeficiente de cultivo (Kc).

Palabras clave: *Zea mays* L., diferencial térmico, materia seca, riego por goteo.

Recibido: febrero de 2022

Aceptado: abril de 2022

Introducción

Los efectos del cambio climático sobre el comportamiento de las fuentes hidrológicas son desconcertantes. Por lo que los estudios regionales sobre el agua se han transformado en imprescindibles, con el propósito de fortalecer la certidumbre científica sobre el conocimiento de los sistemas eco-agrológicos y dar respuesta a los objetivos del uso racional para la atenuación de los daños de los cultivos. Investigadores sobre la gestión del recurso hídrico indican que la demanda de agua en el mundo a menudo se ha incrementado de manera exponencial como efecto del crecimiento de la población, siendo la agricultura el mayor consumidor del agua en el mundo utilizando 80% de agua para usos de irrigación (CONAGUA, 2016).

De manera que las predicciones futuras no son del todo favorables, pues la población mundial estimada para el año 2050 será de 10 a 12 mil millones de personas, el cual ocasionaría un desabasto en el suministro de agua, ya que el recurso hídrico disminuye con el tiempo. La calidad del agua es también un factor que limita el uso del agua para la agricultura en la Comarca Lagunera. Azpilcueta *et al.* (2017) encontraron que los altos contenidos de sal, sodio y metales pesados en el agua subterránea de la Comarca Lagunera sobrepasan los límites máximos permisibles por la norma oficial del agua para uso agrícola y con el consecuente riesgo para la salud humana y el ambiente.

El problema de la disponibilidad y calidad de agua para la agricultura se debe a que otros sectores como la población, industria y ganadería se han incrementado generando una mayor demanda de agua y reduciendo el volumen de agua destinado para la agricultura. Asimismo, la baja eficiencia en el uso del agua, al aplicar volúmenes mayores a los que requiere el cultivo, agrava el problema (Reyes *et al.*, 2019a). Uno de los factores que influyen en el crecimiento de las plantas y que puede ocasionar pérdidas económicas para los agricultores, es el estrés hídrico (Gao *et al.*, 2007).

La dinámica de estudios sobre el agua ha sido direccionada también hacia el sistema pecuario. El maíz es utilizado como forraje verde o ensilaje, el cual sirve como alimento para el ganado bovino (Piccioni, 1970). En Estados Unidos de América, Argentina y en algunos países de Europa, es común el uso del maíz para ensilaje, debido a su alto rendimiento que oscila entre 40 a 95 t ha⁻¹ (Aldrich y Leng, 1974; Wang *et al.*, 1995). Producción en corto tiempo y excelente valor nutritivo hacen del maíz un cultivo apto para forraje (Aldrich y Leng, 1974).

No obstante, la diversidad metodológica para una evaluación exacta del estado hídrico de la planta se deben considerar valores tomados del potencial hídrico de la hoja, ya que la parte foliar es la que controla el movimiento del agua a nivel celular, en el tejido y órganos de la planta (Liu *et al.*, 2012). La distribución del área foliar y la radiación dentro del dosel de la planta son algunos de los factores que afectan los procesos fotosintéticos de la planta que inciden directamente en el rendimiento del cultivo del maíz forrajero, a mayor energía lumínica captada mayor será la eficiencia fotosintética de la planta (Wall y Kanemasu, 1990).

Si se desea medir la cantidad total de la radiación fotosintética absorbida por la planta es indispensable considerar como parámetro el índice de área foliar (IAF). El IAF y la producción de biomasa están estrechamente ligados, si aumenta el IAF, la producción de biomasa aumentará (Lucchesi, 1978; Acosta y Adamas, 1991).

Al incrementarse el estrés hídrico debido a la restricción de humedad en el cultivo los valores para el potencial hídrico de la hoja también son más negativos, generando un crecimiento vegetativo inadecuado y menor producción de biomasa (Ismail, 2010; May *et al.*, 2011). La transpiración, la conductancia estomática y la temperatura foliar, son algunos de las diferentes variables que sirven como parámetros para estimar el estado hídrico de las plantas (Gálvez *et al.*, 2011). Rada *et al.* (2005); comentan que la temperatura foliar se incrementa hasta el grado de causar daños por calor, debido a que el estrés hídrico aumenta reduciendo la conductancia estomática de la hoja.

La temperatura de la hoja está en función de la radiación solar que esta intercepta, entre más radiación capte la hoja mayor será su temperatura, ya que la temperatura de la hoja condiciona al equilibrio energético del dosel (Panda *et al.* 2003). Jarma *et al.* (2012) señalan que las altas temperaturas ambientales generan altas temperaturas al interior de la planta afectando la fotosíntesis neta (con altas temperaturas se reduce por efecto del aumento de la fotorrespiración), respiración, relaciones hídricas, estabilidad de las membranas, regulación hormonal, el metabolismo secundario, reduciendo el crecimiento de las plantas especialmente aquellas categorizadas dentro del grupo de plantas C3 (Chaves *et al.*, 2017).

En este escenario, la Comarca Lagunera pertenece al distrito de riego 017 y cuenta con una superficie para riego de 167 000 ha, donde los cultivos predominantes son los forrajes como: maíz, alfalfa, sorgo y avena. El maíz forrajero en los últimos cuatro años ha sido el principal cultivo en la región con una superficie actual de 54 000 ha (SADER, 2019).

En consecuencia, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre el índice de área foliar, temperatura foliar, potencial hídrico foliar y rendimiento en maíz forrajero bajo el sistema de riego por goteo en un clima árido como la Comarca Lagunera, con la finalidad de estimar el régimen de riego que tenga mayor relación con el uso eficiente del agua, relacionando la producción de materia seca final y el volumen total de agua utilizado.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en las instalaciones del Campo Experimental La Laguna, ubicado en Matamoros, Coahuila, México, Esta región se localiza entre los 102° 00' y 104° 47' latitud oeste y 24° 22' y 26° 23' latitud norte. Se pueden alcanzar temperaturas máximas de hasta 45 grados, las temperaturas mínimas oscilan de 0 a 8 grados con una temperatura media anual de 24 °C, la precipitación media anual es de 242 mm por año y la humedad relativa varía desde 31% en abril hasta 60% de agosto a octubre. La Comarca Lagunera es una zona que se caracteriza por sus limitados recursos hídricos, por su clima seco muy caluroso en verano y con inviernos fríos. La siembra se realizó en un suelo de textura migajón arcillosa-arenosa, en seco, colocando una semilla a una distancia de siembra de 12 cm y 76 cm de separación entre surcos para alcanzar una densidad de población de 105 mil plantas ha⁻¹. Las variedades de maíz utilizadas fueron MH 431, MH 383 y SB 302.

La dosis de fertilización que se utilizó fue: 200-100-00 (NPK), esto es 200 unidades de nitrógeno, 100 unidades de fosforo por hectárea, utilizando como fuente de nitrógeno urea y sulfato de amonio y como fuente de fósforo el MAP. Se aplicó todo el fósforo y la mitad del nitrógeno con urea al

46%, al momento de la siembra y el resto del nitrógeno con sulfato de amonio inyectándose cada 15 días de acuerdo con la fenología del cultivo mediante el sistema de riego por goteo utilizando un inyector Venturi. En el tratamiento testigo por inundación se aplicó la otra mitad de nitrógeno manualmente a los 35 días después de la siembra (DDS), utilizando como fuente de nitrógeno sulfato de amonio.

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones, con arreglo de tratamientos en parcelas divididas. La parcela principal fueron los tratamientos de riego y la parcela secundaria las variedades de maíz (MH 431, MH 383 y SB 302). Las parcelas secundarias fueron cuatro surcos de 5 m de largo (15 m^2). Los tratamientos de riego fueron: riego por goteo subsuperficial (RGS), donde se aplicó el 60, 80 y 100% de la evapotranspiración (ET) y un testigo que fue el riego con melga irrigada por gravedad, en este tratamiento la frecuencia de riego fue cada 15 días, aplicándose un total de siete riegos con una lámina promedio de 100 mm. El tratamiento de 100% de ET se multiplicó por el Kc diario para aplicar la ET actual. El Kc utilizado fue desarrollado localmente por Reyes *et al* (2019a) para maíz forrajero. La ET de referencia se tomó de un atmómetro.

La infraestructura del RGS incluyó cintilla enterrada a 0.3 m, con un espaciamiento entre líneas de 0.76 m. La cinta utilizada fue la RO DRIP 8 mil con espesor de pared de 0.2 mm y diámetro interior de 16 mm, con emisores a 0.2 m y una descarga de 2.5 L h^{-1} por metro lineal. La presión de operación del sistema de riego fue de 8 PSI. La frecuencia de riego con el RGS fue cada tercer día. En cuanto al riego por gravedad se diseñó una melga de 15 m de ancho por 30 m de largo. Se dieron siete riegos de auxilio con una lámina promedio de 100 mm cada uno. El índice de área foliar (IAF) se midió utilizando el ceptómetro PAR / LAI modelo Lp-80 de AccuPAR (Decagon Devices, Inc. Pullman, WA, EE. UU). La barra del ceptómetro se colocó en un ángulo de 45° a través del surco del cultivo para medir la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR).

La interceptación PAR se midió en cada parcela y en cada tratamiento en tres puntos y tres repeticiones por punto por encima y por debajo del dosel del cultivo. Las lecturas se tomaron entre las 12:00 y 14:00 h en días despejados para minimizar la radiación difusa del cielo por las nubes (Stewart *et al.*, 2003). Las mediciones de IAF se realizaron semanalmente. Para la medición de la temperatura foliar del cultivo se utilizó un termómetro digital infrarrojo modelo 42530 (Extech instruments Inc., Boston, MA, USA). Las lecturas se tomaron cada siete días a partir del 23 de julio (36 DDS), cuando el maíz tenía una altura de 1.2 m, IAF de $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ y una cobertura vegetal del suelo de 100%.

Las mediciones se tomaron durante días sin nubes y con poco viento, a 20 cm por encima de la parte aérea del cultivo con ángulo de inclinación hacia el cultivo de 15 grados con respecto al nivel perpendicular del dosel del cultivo orientado de norte a sur. Se tomaron dos lecturas por tratamiento y repetición y se promediaron. El termómetro infrarrojo tiene un campo de visión de 8:1 (a 8 pies (2.4 m) de distancia, el área medida es de 1 pie (0.3 m) de diámetro). El potencial hídrico foliar (Ψ_h) se midió con la bomba de presión según Scholander *et al.* (1964). Las mediciones se realizaron entre las 12:00 y 14:00 h cada semana. Estas se hicieron en la segunda hoja superior del cultivo, tomando dos hojas por tratamiento y repetición.

La cosecha se realizó a los 92 DDS en el riego por goteo y a los 99 DDS en el sistema de inundación. La producción de forraje verde se calculó pesando tres metros lineales en los dos surcos centrales de cada tratamiento (4.56 m²), después se tomó una muestra de 700 g y se secó en una estufa de aire forzado a temperatura de 65 °C durante 72 h, para posteriormente determinar la producción de materia seca. La eficiencia en uso de agua se determinó dividiendo el peso de materia seca (kg ha⁻¹) entre el volumen total de agua aplicado (m³) durante el ciclo. Los datos se procesaron mediante análisis de varianza y las medias de los tratamientos se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), con el paquete estadístico SAS 9.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC. EUA).

Resultados y discusión

De una superficie total para riego de 167 000 ha, donde los cultivos forrajeros predominantes fueron el maíz, alfalfa, sorgo y avena; se estudió el maíz forrajero, en un área 0.12 ha, los atributos de índice de área foliar, temperatura, potencial hídrico, láminas de riego y el rendimiento del maíz forrajero en un arreglo espacial de las parcelas experimentales (Figura 1). Para los tratamientos de 100, 80 y 60% de ET se aplicaron volúmenes de agua de 5 180, 5 420 y 4 320 m³, respectivamente, mientras que para el tratamiento de riego por inundación el volumen fue de 7 100 m³.

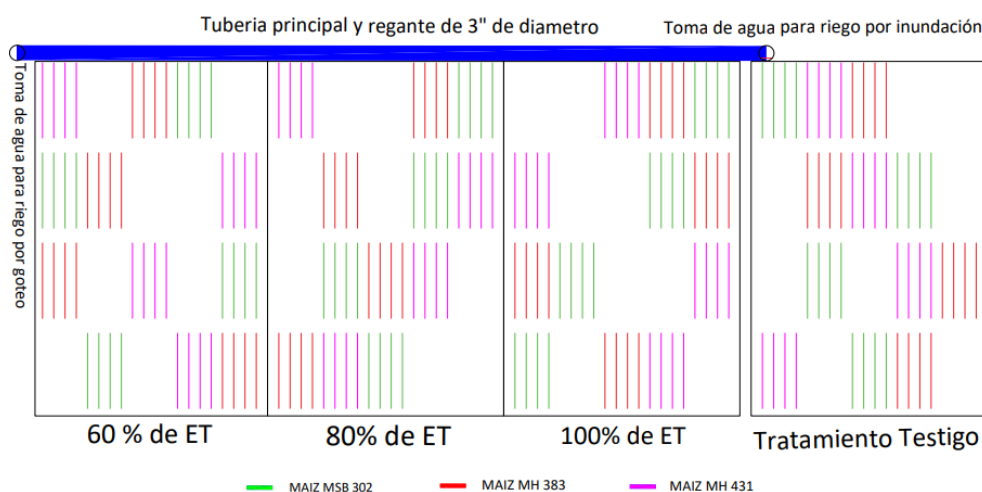


Figura 1. Croquis del experimento para tres variedades de maíz con diferentes niveles de riego en el Campo Experimental Laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México.

Índice de área foliar

En la Figura 2a se observó que las tres variedades se comportan de manera similar con el tratamiento de 100% de ET, siendo la variedad H-431 la que presentó valores ligeramente mayores entre los 70 y 80 DDS. En la Figura 2b y 2c la variedad H-383 fue la que registró los valores más altos en comparación con las otras dos variedades, registrados entre los 55 y 70 DDS. En el tratamiento de riego por inundación Figura 2d se encontró un valor máximo de IAF de 6.12 a los 70 DDS con la variedad H-383. Los tratamientos de 60% de ET e inundación fueron los que mostraron los menores valores de IAF respecto a los tratamientos de 80 y 100% de ET. Al someter los resultados obtenidos de IAF al análisis estadístico, se determinó que no existe diferencia significativa entre los tratamientos de 80 y 100% de ET; sin embargo, estos fueron diferentes al tratamiento de 60% de ET y al de riego por inundación ($p < 0.05$) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de medias de las variables medidas entre los tratamientos de riego, 2019.

	Tratamiento	IAF	PH	°C	MS	EUA
T1	RGS, 100% ET	4.5 a	-1.04 a	30.97 a	18.98 a	3.66 a
T2	RGS, 80% ET	44.77 a	-1.08 a	30.84 a	19.57 a	3.61 a
T3	RGS, 60% ET	4.12 b	-1.23 b	32.71 b	15.63 b	3.62 a
T4	Inundación	3.46 c	-137 c	30.85 a	15.68 b	2.21 b
	CV (%)	12	3.15	0.71	12.65	12.4

IAF= índice de área foliar; PH= potencial hídrico; °C= temperatura foliar; MS= materia seca; EUA= eficiencia en el uso de agua. Las letras (a, b, c) en cada columna, indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$).

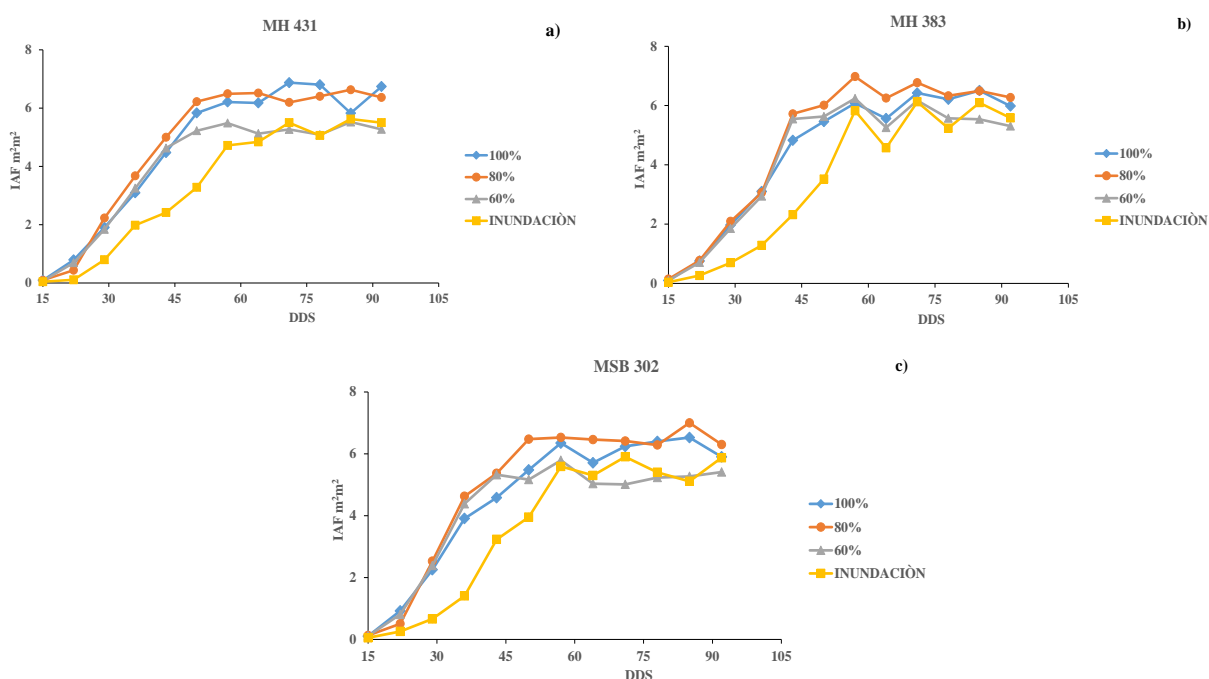


Figura 2. Valores de índice de área foliar (IAF) para tres variedades de maíz con diferentes niveles de riego en el Campo Experimental Laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México.

Los datos sugieren que en los tratamientos 80 y 100% las plantas presentaron suficiente humedad del suelo para seguir creciendo durante el ciclo del cultivo, mientras que las plantas en los tratamientos de 60% e inundación, fueron limitadas por la humedad del suelo. Resultados similares fueron reportados por Reyes *et al.* (2019b), quienes encontraron bajos valores de IAF en los tratamientos donde hubo restricción de humedad de suelo en un maíz sembrado al Este de Dakota del Sur, USA, observó que la correlación entre el IAF, rendimiento y acumulación de biomasa del maíz para grano (densidad de 71 000 plantas ha⁻¹), la relación fue directa al incrementarse una unidad de IAF con aumento de producción hasta 567 kg ha⁻¹. Yoshida (1972) menciona que la producción de biomasa y el IAF están relacionadas, a mayor área vegetal, mayor será la captación de energía lumínica y mayor producción de biomasa con valores óptimos de IAF de 5 para el maíz.

Los valores de IAF observados en el presente estudio (6.12), son mayores que los reportados por Yoshida (1972); Montemayor *et al.* (2012), estos últimos reportaron valores máximos de IAF (5) en maíz regado con riego por goteo en la Comarca Lagunera. Se establece que el IAF máximo se alcanza en la etapa de floración de la planta de maíz, el cual coincide con la etapa de mayor valor para el IAF. Después que la planta alcanza el valor máximo de IAF está de deja de incrementarse y su tendencia es lineal como una especie de meseta (Figura 2).

Temperatura foliar

Al analizar los datos de temperatura foliar se determinó que no existe diferencia entre los tratamientos de riego al 80, 100% y riego por inundación. Sin embargo, si hubo diferencia significativa al compararlos con el tratamiento al 60% ($p < 0.05$) (Cuadro 1).

La Figura 3a, con el tratamiento al 100% de ET, la temperatura superficial de la hoja osciló entre los 29 y 33 °C, la variedad que presentó mayor temperatura en la mayoría de las lecturas fue la H-383 alcanzando un valor máximo de 33 °C en la etapa final del cultivo. En las primeras etapas de desarrollo del cultivo se presentaron las temperaturas más bajas con valores que oscilan entre 26.9 y 30 °C. El tratamiento con 80% de ET (Figura 3b) presentó una variabilidad en la temperatura de la hoja, donde la temperatura mínima fue 27.23 °C en la variedad MH-431 obtenida a 43 DDS, mientras que, la temperatura máxima fue 32.8 °C registrada a 71 DDS en la variedad MSB-302.

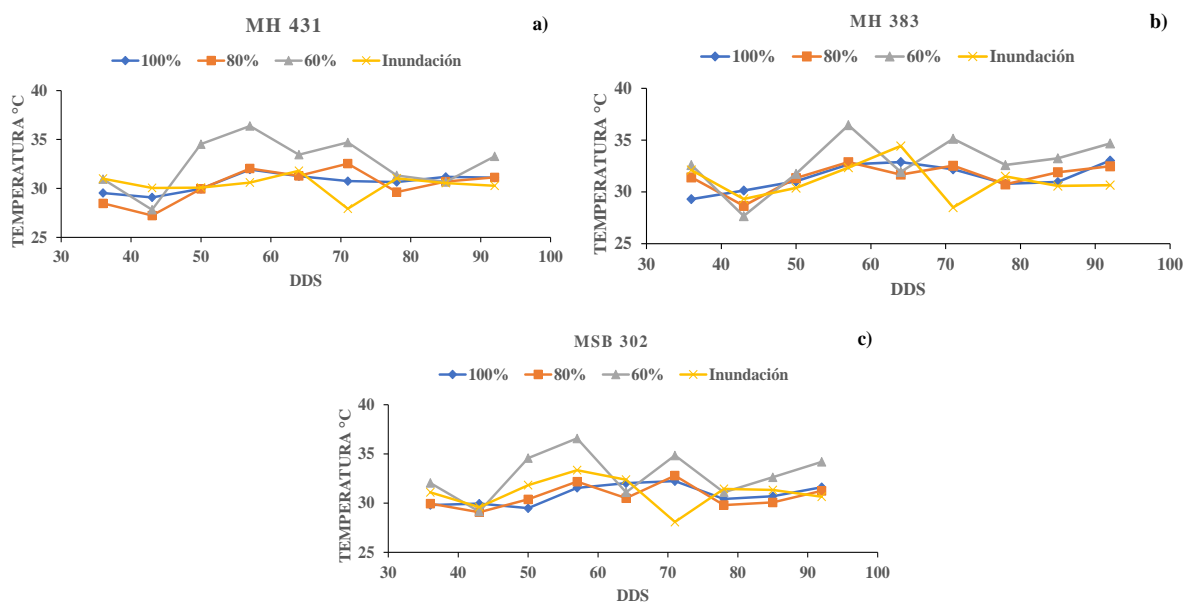


Figura 3. Valores de temperatura foliar para tres variedades de maíz con diferentes niveles de riego en el Campo Experimental Laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México.

La Figura 3c con el tratamiento al 60% de ET, el valor de temperatura mínima se registro en la variedad MH-383 con 27.67 °C a los 43 DDS y la máxima se presentó en la variedad MSB-302 con 36.58 °C a los 53 DDS, este tratamiento fue el que mayor variabilidad presentó con un valor de 8.9 °C entre las lectura máxima y mínima. Los valores de temperatura obtenidos en el tratamiento de riego por inundación se presentan en la (Figura 3c), donde se observa que el valor máximo registrado fue en la variedad MH-431 con 34.43 °C a los 64 DDS, por lo contrario, el valor

mínimo observado fue en la variedad MH-431 con 27.93 °C a los 71 DDS. Este último valor confirma lo que señala la literatura respecto a la variedad MH-431, que es una variedad tolerante a altas temperaturas, la cual es una ventaja ante el clima de la Comarca Lagunera.

Porter y Delecolle (1988) determinaron que la temperatura y el fotoperiodo son dos factores climáticos que inciden fuertemente sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos, si comparamos esta conclusión con lo observado en nuestro experimento, podemos denotar que es la misma tendencia, pues al aumentar la temperatura de la hoja, disminuye la producción de materia seca, esto fue observado en el tratamiento con 60% de ET. Kiniry & Bonhomme (1991), mencionan que la temperatura máxima que afecta el desarrollo del maíz está entre 40 y 44 °C.

Potencial hídrico foliar

De acuerdo con análisis estadístico (Cuadro 1), las comparaciones de medias entre los tratamientos de riego no presentaron diferencia significativa entre los tratamientos de riego al 80 y 100%. Sin embargo, el tratamiento de riego al 60% y riego por inundación fueron estadísticamente diferentes a los tratamientos de 80 y 100% ($p < 0.05$).

En la Figura 4a que corresponden al tratamiento de ET al 100%, se aprecia que los valores más críticos se encuentran en el rango de -1.45 hasta -1.57 MPa. Estos valores se presentaron a los 71 DDS, para las tres variedades en estudio, siendo la MH-431 la que está por encima de las dos variedades con el valor menos crítico de -1.45 MPa. La variedad MH-383 fue la que mejor se comportó mostrando un valor mínimo crítico de -0.6 MPa a los 85 DDS. En el tratamiento al 80% (Figura 4b), los valores más críticos fueron superiores a los observados en el tratamiento de 100%, estos se encuentran en un rango de -1.57 hasta -1.7 MPa observados a los 71 DDS, siendo el MH-431 la variedad que presentó el valor más crítico con -1.7 MPa.

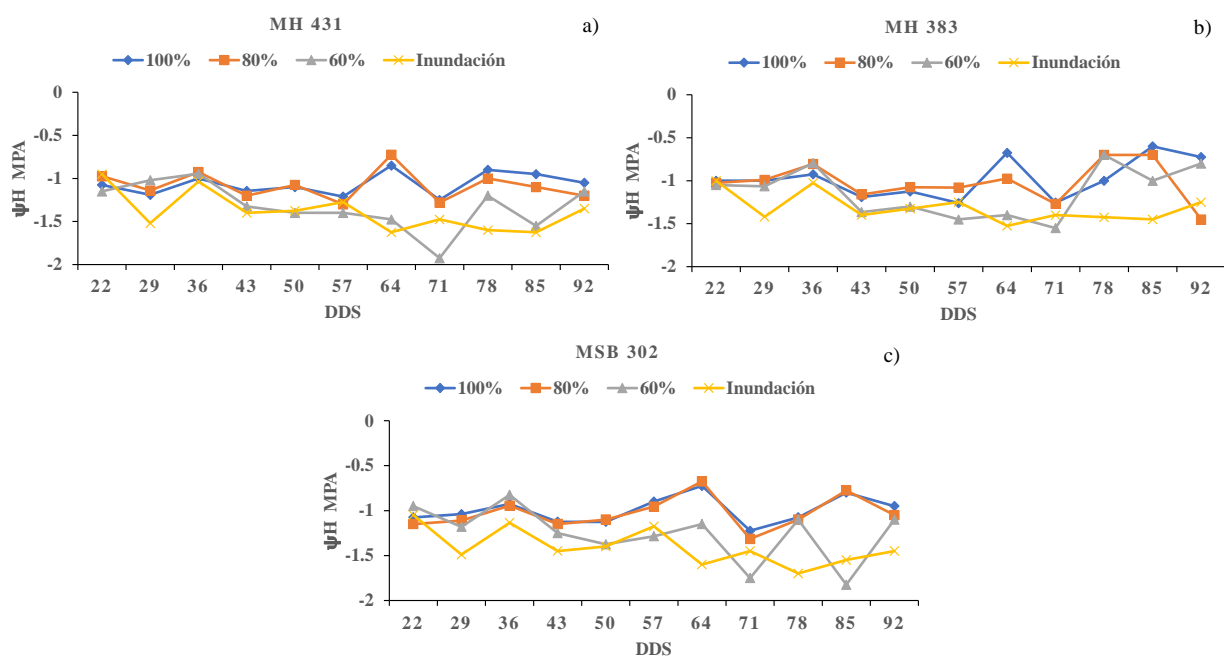


Figura 4. Valores de potencial hídrico foliar para tres variedades de maíz con diferentes niveles de riego en el Campo Experimental Laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México.

La variedad MH-383 fue la que presentó el valor menos negativo con -0.07 MPa, el cual se mantuvo desde 78 hasta 85 DDS. En la Figura 4c con el tratamiento al 60% de ET, se aprecia a la variedad MH-431 como la más susceptible a la restricción del agua, presentando un valor más negativo crítico de -1.93 MPa observados a los 71 DDS y a los 85 DDS la variedad MSB-302 con -1.80 MPa. En el tratamiento de riego por inundación (Figura 4c) los valores de potencial hídrico tienen prácticamente la misma tendencia, sin embargo, el valor más negativo crítico se presentó en la variedad MSB-302 con -1.7 MPa a los 78 DDS y el valor menos negativo se presentó en las variedades MH-431 y MH-383 con valores de -0.95 y -1 MPa respectivamente, a los 22 DDS.

Cabe mencionar que los valores más negativos en el riego por goteo a los 71 DDS, se debió a los problemas de desabasto de agua. En general en los tratamientos de 80 y 100% el potencial hídrico estuvo en un rango de -1 MPa, mientras que en los tratamientos de 60% e inundación anduvieron en -1.5 MPa, esto después de los 40 DDS. Por otro lado, Castro *et al.* (2009) realizaron un ensayo *in vitro* en maíz con diferentes concentraciones de polietilenglicol (PEG-8000), registrando valores del potencial hídrico en el tejido foliar entre -1.3 a -2.3 MPa, que condicionaron el crecimiento de los brotes desfavorablemente. Villalobos *et al.* (2016) reportaron valores de potencial hídrico que oscilan entre -0.1 y -2.9 MPa en un trabajo realizado en maíz con cuatro tratamientos de riego y dos dosis de fertilización, concluyendo que los híbridos que mantuvieron altos valores de potencial hídrico (-2.9 MPa), turgencia y contenido relativo de agua son los que respondieron mejor al estrés hídrico y a las dosis de fertilización.

Los valores de potencial hídrico para este estudio variaron de -0.6 a -1.92 MPa, cuando se alcanzó el valor más negativo la planta de maíz sufrió alteraciones morfológicas que condicionaron la acumulación final de biomasa. Resultados similares de potencial hídrico fueron reportados por Reyes *et al.* (2011) en un experimento de avena forrajera con riego por goteo, reportando valores que oscilaron entre -0.7 y -1.9 MPa durante el ciclo del cultivo.

Rendimientos del maíz forrajero

La Figura 5 presenta los resultados de la producción de materia seca de tres variedades de maíz con cuatro tratamientos de riego. La variedad MSB-302 mostró el mayor rendimiento de materia seca en el tratamiento de 100% con una producción aproximada de 20 t ha⁻¹ y el rendimiento más bajo se obtuvo en el tratamiento de riego al 60% con una producción de 15.5 t ha⁻¹. La variedad de maíz MH-431 en comparación con el tratamiento de riego al 80% mostró el mayor rendimiento de materia seca (21 t ha⁻¹) y el menor se presentó con el riego por inundación (15.3 t ha⁻¹). Por último, la variedad MH 383 mostró su mayor rendimiento en el tratamiento de riego al 80% con una producción de 17.7 t ha⁻¹ y la más baja se encontró en el tratamiento de riego al 60% con una producción de 13.5 t ha⁻¹.

Los resultados obtenidos en esta investigación son similares a los reportados por Amador & Boschini (2000), con una media de producción de 14.3 t ha⁻¹ y a los obtenidos por Zaragoza *et al.* (2019), con una media de producción 23.6 t ha⁻¹ en el ciclo primavera-verano. En cuanto a la producción de materia seca con riego por superficie, los resultados obtenidos en esta investigación son superiores a los encontrados por Montemayor *et al.* (2007) (8.08 t ha⁻¹), pero similares a los reportados por Rivera *et al.* (2013) (17.58 t ha⁻¹).

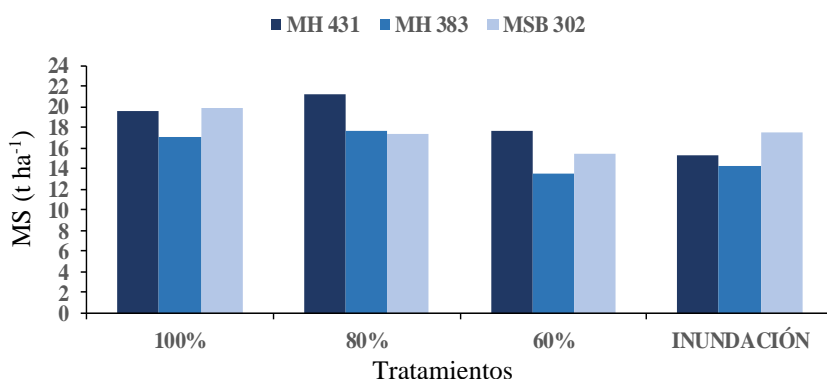


Figura 5. Gráficas del rendimiento de materia seca de tres variedades de maíz con diferentes tratamientos de riego en el campo experimental laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México. 2019.

Al someter los resultados obtenidos de la variable ‘materia seca’ al análisis estadístico se puede observar diferencias significativas entre los tratamientos de riego al 100 y 80% respecto a los tratamientos de riego al 60% y riego por inundación, más, sin embargo, no se observan diferencias significativas al comparar los tratamientos al 100 y 80%, ni tampoco al comprar el tratamiento de riego al 60% contra el riego por inundación (Cuadro 1). Resultados similares son reportados por Montemayor *et al.* (2012) y Rivera *et al.* (2013), quienes reportaron diferencia estadística entre el riego por goteo con diferentes niveles de ET y el riego por inundación en maíz forrajero. Los resultados de la investigación demuestran que los mayores rendimientos de materia seca se obtuvieron con el tratamiento de 100% de ET siendo superior en 20% al sistema de riego por inundación. En otras palabras, el rendimiento de materia seca fue mayor cuando los riegos se calendarizaron de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo.

Eficiencia en el uso de agua

El Cuadro 1 presenta los resultados de las comparaciones de las variables medidas dentro de los tratamientos de riego utilizados en el experimento. La prueba utilizada para las comparaciones fue la prueba de Tukey, con un nivel de confianza de alfa de 0.05.

La Figura 6 presenta los resultados de eficiencia en el uso de agua (EUA) que se obtuvieron de tres variedades de maíz en cuatro tratamientos de riego. La variedad MH-431 con el tratamiento de riego al 60% de ET obtuvo la mayor EUA (4.12 kg m⁻³), mientras que la variedad MH-383 con el tratamiento de riego por inundación fue la menor (2.01 kg m⁻³). Estos resultados concuerdan con los reportados en la literatura, donde se obtiene mayor EUA en el riego por goteo comparado con el riego por inundación. Las mayores eficiencias se obtuvieron con los tratamientos donde se utilizó menor lámina de riego (ej. 60% de ET). La variedad MH-431 fue la que mostró mayor EUA respecto a las otras dos variedades, ya que esta variedad es más tolerante a altas temperaturas.

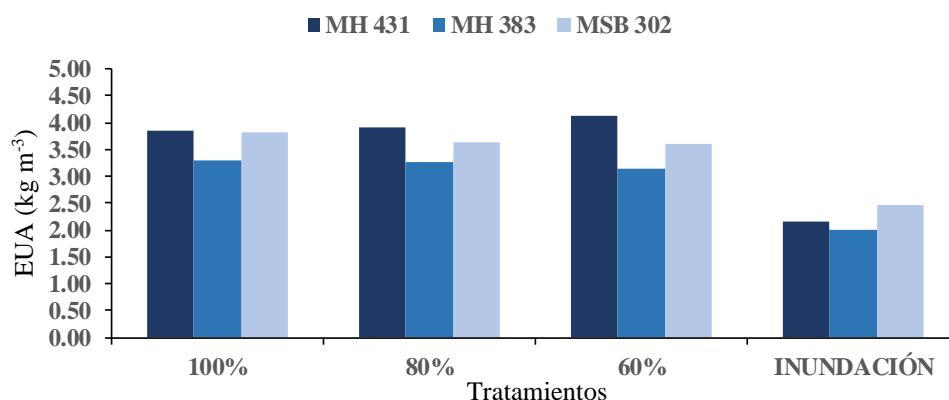


Figura 6. Gráficas de eficiencia del uso de agua de tres variedades de maíz y cuatro tratamientos de riego en el campo experimental laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México. 2019.

Resultados similares de EUA son reportados por Montemayor *et al.* (2006) quienes condujeron un experimento para determinar el uso eficiente del agua en maíz utilizando el sistema de riego por goteo, en el cual reportan valores de EUA promedio de 2.9 kg m^{-3} . Zamora *et al.* (2007) en otro estudio realizado en maíz utilizando riego por goteo bajo por diferentes niveles de ET, se reportan valores que van desde 1.9 hasta 2.96 kg m^{-3} , donde la mayor EUA se obtiene al 80% de ET y la menor se registra con el tratamiento al 115% de ET. Lo cual concuerda con lo observado en este experimento, no siempre aplicar mayores volúmenes de agua aumentará la eficiencia del uso del agua.

Los tratamientos de riego al 100, 80 y 60% mostraron valores similares de EUA con 3.66 , 3.6 y 3.62 kg m^{-3} , respectivamente, no habiendo diferencia significativa entre ellos; sin embargo, estos fueron diferentes al de riego por inundación (2.21 kg m^{-3}) (Cuadro 1). Howell *et al.* (2008) en el cultivo del maíz obtuvieron 3.63 kg m^{-3} de eficiencia del uso del agua en el año 2006 y 3.64 kg m^{-3} en el año 2007. Estos valores fueron similares a los observados en nuestro experimento. Aunque superiores a los reportado por Yescas *et al.* (2015) quienes reportan valores que fluctuaron entre 2.84 y 3.21 kg m^{-3} en maíz forrajero con diferentes tratamientos de riego. Para los tratamientos de 100, 80 y 60% de ET se aplicaron volúmenes de agua de $5\ 180$, $5\ 420$ y $4\ 320 \text{ m}^3$, respectivamente, mientras que para el tratamiento de riego por inundación el volumen fue de $7\ 100 \text{ m}^3$.

Conclusiones

En este estudio se evaluó el efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre el índice de área foliar (IAF), temperatura foliar (Tf), potencial hídrico foliar (ψ_h), y rendimiento del maíz forrajero (MS) bajo el sistema de riego por goteo, con la finalidad de estimar el régimen de riego que tenga mayor relación con el uso eficiente del agua en clima árido. Lo más valioso de la evaluación fue que se demostró que la restricción de humedad en el cultivo afectó el IAF y ψ_h porque la Tf condicionó el desarrollo adecuado de las hojas, lo que afectó directamente la producción de forraje seco; porque se condujo a tener incidencia negativa en el proceso fotosintético de las plantas.

De manera que, la mejor eficiencia del uso del agua se obtuvo cuando el agua fue aplicada de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo con el tratamiento de 100% de ET multiplicado por el coeficiente del cultivo (Kc). Los resultados indicaron que el volumen de agua aplicado en los tratamientos con riego por goteo subsuperficial fue 27 a 40% menor en comparación con el riego por inundación.

Literatura citada

- Acosta, J. A. and Adams, M. W. 1991. Plant traits and yield stability of dry bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars under drought stress. *J. Agric. Sci.* 2(117):213-219. Doi:<https://doi.org/1001017/S0021859600065308>.
- Amador, A. L. y Boschini, C. 2000. Fenología productiva y nutricional del maíz para la producción de forraje. *Agron. Mesoam.* 1(11):171-177.
- Aldrich, S. R. y Leng, E. R. 1974. Producción moderna de maíz. Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. 308 p.
- Azpilcueta, P. M. E.; Pedroza, S. A.; Sánchez, C. I.; Salcedo, J. M. R. y Trejo, C. R. 2017. Calidad química del agua en un área agrícola de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en la Comarca Lagunera, México. *Rev. Inter. Contam. Amb.* 1(33):75-83.
- Castro, I.; López M. C. y González, V. A. 2009. Evaluación morfo-fisiológica de brotes de maíz sometidos a selección in vitro bajo estrés osmótico. *Rev. Fitot. Mexic.* 4(32):281-288.
- Chaves, B. N. F. y Gutiérrez, S. M. V. 2017. Respuesta al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agron. Mesoam.* 28(1):237-253.
- CONAGUA. 2016. Comisión Nacional del Agua. Clasificación de la intensidad de sequía. http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=237:clasiicacion-de-la-severidad-de-la-sequia&catid=16:general.
- Gálvez, R.; Callejas, R. y Reginato, G. 2011. Comparación de la cámara de presión tipo scholander modelo Pump-up respecto a la cámara de presión tradicional en vides de mesa. *IDESIA.* 2(29):175-179.
- Gao, J. P.; Chao, D. Y. and Lin, H. X. 2007. Understanding abiotic stress tolerance mechanisms: recent studies on stress response in rice. *J. Integ. Plant Biol.* 6(49):742-750. Doi: 10.1111/j.1672-9072.2007.00495.x
- Howell, T.; Evett, S.; Tolk, J.; Copeland, K.; Colaizzi, P. and Gowda, P. 2008. Evapotranspiration of corn and forage sorghum for silage. The United State Department of Agriculture (USDA). 1-14 pp.
- Ismail, S. M. 2010. Influence of deficit irrigation on water use efficiency and bird pepper production (*Capsicum annum* L.). *Meteorology, Environment and Arid Land Agriculture Science.* 2(21):29-43. Doi: 10.4197/Met. 21-2.3.
- Jarma, O. A.; Cardona, A. C. y Araméndiz, T. H. 2012. Efectos del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una revisión. *Rev. U.D.C.A actualidad y divulgación científica. Colombia.* 15(1):63-76.
- Kiniry, J. R. and Bonhomme, R. 1991. Predicting maize phenology. *In: Hodges, T. (Ed.). Physiological aspects of predicting crop phenology.* CRC Press. Boca Raton, FL, USA. 284(1):115-131. ISBN: 9780849367458 - CAT# 6745.
- Liu, G.; Li, Y. and Alva, A. K. 2012. Water potential vs. pressure in relation to water movement and transpiration in plants. *Inter. J. Agron. Plant Prod.* 10(3):369-373.

- Lucchesi, A. A. 1978. Fatores da produção vegetal. *In*: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O. y Yamada, T (Ed.). *Ecofisiologia da produção agrícola piracicaba: associação brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato*. 1-11 pp.
- May L. C.; Pérez G. A.; Ruiz S. E.; Ic-Camal, A. E. y García R. A. 2011. Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinense* Jacq. Y su relación con el desarrollo de *Bemisia tabaci* (Genn.). *Trop. Subtrop. Agroecosys*. 3(14):1039-1045.
- Montemayor, J. A.; Gómez, Á. O.; Olague, J.; Zermeño, A.; Ruiz, E.; Fortis, M.; Salazar, E. y Aldaco, R. 2006. Efecto de tres profundidades de cinta de riego por goteo en la eficiencia de uso de agua y el rendimiento de maíz forrajero. *Téc. Pec. Méx.* 44(3):359-364.
- Montemayor, J. A.; Olague, J.; Fortis, M.; Sam, R.; Leos, J. A.; Salazar, E.; Castruita, J.; Rodríguez, J. C. y Chavarría, J. A. 2007. Consumo de agua en maíz forrajero con riego subsuperficial. *Terra Latinoam*. 2(25):163-168.
- Montemayor J. A.; Lara. J. L.; Woo, J. L.; Munguía, J.; Rivera. M. y Trucíos. R. 2012. Producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en tres sistemas de irrigación en la comarca lagunera de Coahuila y Durango México. *Agrociencia*. 3(46):267-278.
- Panda, R.; Behera, S. and Kashyap, P. S. 2003. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions. *Agric. Water Manag.* 1(63):37-56. Doi: 10.1016/S0378-3774(03)00099-4
- Piccioni, M. 1970. *Diccionario de alimentación animal*. Ed. Acribia. Zaragoza, España. 819 p. ISBN: 6500304959722.
- Porter, J. R and Delecolle, R. 1988. Interaction of temperature with other environmental factors in controlling the development of plants. *In*: plants and temperature. S P Long, F I woodward (Ed). symposia of the society for experimental biology number. Great Britain. The company of biologists limited. Department of Zoology-University of Cambridge. 43(1):133-156.
- Rada F.; Jaimez, R. E.; García, C.; Azócar, A. y Ramírez, M. E. 2005. Relaciones hídricas e intercambio de gases en *Theobroma cacao* var Guasare bajo periodos de déficit hídrico. *Rev. Facultad de Agronomía de la Universidad de Zulia*. 22(2):112-120.
- Reyes, G. A.; Reta, D. G.; Sánchez, J. I.; Ochoa, E.; Rodríguez, K. y Preciado, P. 2019a. Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones *in situ*. *Terra Latinoam*. 37(3):279-290. Doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485>.
- Reyes, G. A.; Kjaersgaard, J.; Trooien, T.; Reta, D. G.; Sánchez, J. I.; Ochoa, E.; Preciado, P. and Fortis, M. 2019b. Comparison of leaf area index, surface temperature, and actual evapotranspiration estimated using the METRIC model and in situ measurements. *Sensors*. 19(8):1-21. Doi: 10.3390/s19081857.
- Reyes, G. A.; Martínez, J. G.; Palomo, M.; Faz. R.; Cruz J. J. y Sánchez, J. I. 2011. Producción de avena forrajera con riego por goteo subsuperficial en la Comarca Lagunera. *In*: memoria de la semana internacional de agronomía FAZ-UJED. 189-195 pp.
- Rivera, G. M.; Palomo, R. M.; Anaya, S. A.; Reyes, G. A. y Martínez, R. J. G. 2013. Función de producción hídrica para maíz forrajero (*Zea mays* L.) en riego por goteo subsuperficial. *Agrofaz*. 1(13):17-22.
- SADER. 2019. Delegación en la Región Lagunera, sector agropecuario, 2019. El Siglo de Torreón. Suplemento especial. 28 p.
- Scholander, P. F.; Hammel H. T. and Badstreet E. D. 1964. Sap pressure in vascular plants. *Proceedings of the national academy of sciences*. 52(1):119-125.

- Stewart, D.; Costa, C.; Dwyer, L.; Smith, D.; Hamilton, R. and Ma, B. 2003. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agron. J.* 6(95):1465-1474. Doi: 10.2134/agronj2003.1465.
- Villalobos, G. A.; López, C. C.; Miranda, C. S.; Aguilar, R. V. H. y López, H. M. B. 2016. Relaciones hídricas en maíces de Valles Altos de la Mesa Central de México en condiciones de sequía y fertilización nitrogenada. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7(7):1651-1665.
- Wang, CH.; Lee, L.; Cheng, W.; Wang, Y. C.; Lee, M. and Cheng, W. 1995. Effect of planting density and nitrogen application rates on growth characteristics, grass yield and quality of forage maize. *J. Taiwan Livestock Res.* 2(28):125-132
- Westgate, M. E. and Boyer, J. S. 1985. Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem, and silk growth at low water potentials in maize. *Planta.* 4(169):540-549. Doi: 10.1007/BF00395973.
- Yescas, C. P.; Segura, C. M. A.; Martínez, C. L.; Álvarez, R. V. P.; Montemayor, T. J. A.; Orozco, V. J. A. y Frías, R. J. E. 2015. Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. *Phyton.* 84(2):272-279.
- Yoshida, S. 1972. Physiological aspect of grain yield, in annual review of plant physiology. Palo Alto. 23(1):437-464.
- Zamora, S. S.; Fenech, L. L.; Ruiz, E. F. H.; Pérez, D. W. y López, G. A. 2007. Eficiencia en el uso del agua en maíz (*Zea mays* L.) con riego por goteo, en el Valle de la Paz, Baja California Sur, México. *Rev. Cienc. Técn. Agropec.* 3(16):33-36.
- Zaragoza, E. J.; Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; López, L. C.; García, E. J. C.; Zamudio, G. B.; Turrent, F. A. y Rosado, N. F. 2019. Rendimiento y calidad de forraje de híbridos de maíz en Valles Altos de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1(10):101-111.