

Rendimiento de forraje del maíz forrajero a diferentes condiciones hídricas en el suelo

Forage yield of maize under different soil water conditions

Marco Antonio Inzunza-Ibarra^{1*}, Sergio Iván Jiménez-Jiménez¹, Ignacio Sánchez-Cohen¹, Mariana de Jesús Marcial-Pablo¹ y Ernesto Sifuentes-Ibarra²

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmosfera CENID RASPA del INIFAP, Gómez Palacio, Dgo.

²Campo Experimental Valle del Fuerte. Juan José Ríos, Guasave, Sin.

*Autor para correspondencia: inzunza.marco@inifap.gob.mx; inzunzama@gmail.com

RESUMEN

El incrementar la eficiencia del uso del agua de riego es una acción indispensable para disminuir el problema de la escasez de este recurso para uso agrícola en regiones áridas y semiáridas que representan más del 50 % del territorio nacional. En primera instancia se requiere conocer el requerimiento hídrico de los cultivos actuales y de nueva introducción, que sean más eficientes en la conversión del agua de riego a materia seca. Con este enfoque, se realizó este estudio con los objetivos de determinar la respuesta del cultivo al estrés hídrico en el suelo, cuantificar su evapotranspiración resultante y la productividad del agua para cada tratamiento. Con tal fin, se probaron cuatro tratamientos de humedad aprovechable consumida (HAC): 40, 60, 80 y 100 %. Se colocaron en forma aleatoria para su estudio, en un diseño de bloques al azar con tres repeticiones en el lote experimental del CENID RASPA INIFAP. Se midió la humedad en el suelo con el método de reflectometría mediante un TDR previamente calibrado con el método gravimétrico. Los resultados mostraron una tendencia lineal al contenido de humedad en el suelo, común en los cultivos forrajeros. El mayor rendimiento de materia verde y seca se obtuvo con el tratamiento del 40 y 60 % de la HAC, con un consumo de agua de 52 cm y una EUA de 2.7 kg m⁻³.

Palabras clave: Evapotranspiración, reflectometría, biomasa, humedad aprovechable consumida.

ABSTRACT

Increasing the efficiency of irrigation water use is essential to mitigating the problem of water scarcity for agricultural use in arid and semi-arid regions, which represent more than 50% of the national territory. The first step is to understand the water requirements of current and newly introduced crops that are more efficient at converting irrigation water into dry matter. With this approach, this study was conducted to determine the crop's response to soil water stress, quantify the resulting evapotranspiration, and assess water productivity for each treatment. To this end, four available water consumption (HAC) treatments were tested: 40, 60, 80, and 100%. These treatments were randomly assigned to the experimental plot at the CENID RASPA INIFAP experimental facility in a randomized block design with three replicates. Soil moisture was measured using reflectometry with a time-domain reflectometer (TDR) previously calibrated using the gravimetric method. The results showed a linear trend with respect to soil moisture content, common in forage crops. The highest yield of green and dry matter was obtained with the 40% and 60% HAC treatments, with a water consumption of 52 cm and a EUA of 2.7 kg m⁻³.

Keywords: Evapotranspiration, reflectometry, dry matter, available water consumption

INTRODUCCIÓN

La optimización del aprovechamiento del agua de riego es una acción indispensable para disminuir el gran problema de la escasez de este recurso para uso agrícola en la Comarca Lagunera y en más del 50% del territorio nacional. Para esto se necesita conocer el requerimiento de los cultivos explotados actuales y los de nueva introducción, que sean más eficientes en la conversión del agua de riego a materia seca. En este contexto, Inzunza et al. (2025), establecieron un estudio en maíz forrajero en un lisímetro gravimétrico de alta precisión, en el CENID RASPA, bajo condiciones de no estrés hídricas, para obtener la evapotranspiración máxima del maíz forrajero (Etm), este parámetro resulta de la demanda climática y de su desarrollo (Cruz-González et al., 2025). Los resultados de la Etm del cultivo mostraron valores pico hasta de 16 mm por día en floración y coeficientes de ajuste por desarrollo (Kc) hasta de dos, en la misma etapa de máxima demanda de agua. Los valores de Kc se ajustaron en forma excelente a un modelo de segundo grado con una R² del 95%, al relacionarse con las unidades calor acumulados del ciclo vegetativo de desarrollo.

El preservar en forma sustentable este recurso, es un importante reto que obliga al manejo cada vez más eficiente del agua, especialmente en el sector agrícola por ser el mayor demandante de este recurso, al consumir alrededor del 70% del agua fresca disponible a nivel global (Singh, 2010). Por lo anterior, el sector tiene la responsabilidad de incrementar la eficiencia de uso del agua, mejorar la productividad del agua de los cultivos en áreas con escasez del recurso (Ali y Talukder, 2008) y generar tecnología para aprovechar otras fuentes de abastecimiento como podrían ser las aguas residuales o el agua de mar.

Gheysari et al. (2021) Realizaron un estudio en maíz forrajero donde probaron dos estrategias de estrés hídrico (ESH): igual número de riegos con diferente lamina (RDL) y misma Lamina aplicada en diferente número de riego (LDR) en tres etapas del maíz. Concluyen que el rendimiento por unidad de agua utilizada, (Kg m⁻³), resultó más alta para la estrategia RDL comparado con los obtenidos con LDR. Los valores del factor de respuesta del rendimiento al estrés (Ky) para área foliar y biomasa total de maíz

forrajero, fueron mayores con LDR, comparado con RDL. Esto indicó que RDL puede emplearse como un sistema eficaz de gestión del riego deficitario en riego por goteo en el cultivo del maíz forrajero en zonas áridas con escasez de agua.

Con el objetivo de documentar la tolerancia del maíz a condiciones de humedad extremas, Mangani et al. (2018), realizaron un estudio de dos años donde evaluaron la tolerancia del maíz a condiciones extremas de sequía y de condiciones extremas de humedad o inundaciones prolongadas. El efecto de la sequía en el rendimiento fue más pronunciado desde la mitad del período vegetativo hasta floración, el rendimiento se disminuyó con respecto al testigo entre un 53 y un 58 % en el primer año y entre un 34 a un 42 % en el segundo. El efecto negativo de condiciones extremas de humedad redujo la producción de maíz entre un 26 a un 30 %. El impacto resulta mayor en maíces intolerantes a estas condiciones extremas por lo que concluyen que deben obtenerse variedades tolerantes a estos eventos.

Por otro lado, Gutiérrez-Guzmán et al. (2022), realizaron un estudio en maíz forrajero en La Laguna con el objetivo de encontrar el rendimiento, calidad nutricional y la eficiencia en el uso del agua (EUA) para dos sistemas de riego y tres niveles de evaporación aplicada. Los resultados mostraron que la combinación sistema de riego por superficie y aplicación láminas de riego en base al 75 % de evaporación, logró los valores más altos en eficiencia en el uso del agua de 1.98 kg m⁻³, rendimiento de forraje verde de 49.3 y forraje seco de 13.9 t ha⁻¹ así como en la calidad del forraje. Por lo que se recomienda este tratamiento para ser aplicado en la gestión del riego.

Un estudio en la Comarca Lagunera por Pedroza et al. (2014), concluyen que el maíz forrajero fue más eficiente que la alfalfa, puesto que un m³ de agua subterránea produjo 5.72 kg de biomasa, \$0.67 de ganancia por m³ de agua usada y 100 000 m³ de agua produjeron 0.65 empleos durante el ciclo del cultivo; mientras que la alfalfa produjo 0.215 kg de biomasa, \$0.90 de ganancia y se generaron 0.43 empleos con los mismos volúmenes de agua indicados en el maíz. Los autores deducen que el utilizar en forma combinatoria estas dos especies

forrajeras, podría alcanzarse un equilibrio, entre calidad de forraje, productividad, un mayor beneficio social y un menor impacto ambiental.

Zheng *et al.* (2020) hacen ver la importancia de generar índices o parámetros como la productividad hídrica (PH) del maíz en kg m^{-3} para detectar ineficiencias en los sistemas de producción en diferentes regiones de China. Se analizaron 282 artículos de un período de 18 años de estudios con el objetivo fundamental de cuantificar la productividad hídrica actual y sus factores limitantes para estimar el potencial de la PH de tres zonas agroecológicas de China. Se cuantificó un promedio de 2.2 kg m^{-3} del maíz, sin embargo, se estimó que el potencial de la PH puede alcanzar 4.2, 3.7 y 4.0 kg m^{-3} para el noroeste, parte central y noreste de China aplicando una gestión de riego óptimo.

El maíz forrajero es un cultivo relevante en la dieta animal, esto se refleja por el área que se destina a su explotación de 553,227 ha en México bajo riego y temporal, con rendimientos significativamente bajos de 34.5 t ha^{-1} con respecto a su potencial (SIAP, 2025). Por lo tanto, es fundamental generar información de la respuesta del maíz forrajero en rendimiento de materia fresca y seca para diferentes niveles de estrés hídrico en el suelo y diferentes consumos de agua para incrementar su producción y así incrementar su eficiencia de uso del agua, lo cual sería un muy significativo ahorro de agua por la importancia del área irrigada de 193,698 ha a nivel nacional (SIAP, 2025). Los objetivos de la presente actividad fue determinar la respuesta del maíz forrajero a diferentes déficits hídricos en el suelo, así como obtener su evapotranspiración actual y la eficiencia de uso del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se desarrolló en el Campo Experimental del CENID-RASPA, ubicado en Gómez Palacio, Dgo. Geográficamente se localiza a $25^{\circ} 35' \text{ LN}$, $103^{\circ} 27' \text{ LW}$ y a una altitud de 1135 msnm (Figura 1). El clima de la región se clasifica como BW(h')h w(e); que corresponde a muy árido, cálido con temperatura media anual de 22°C y temperatura media del mes

más frío de 18°C ; es extremoso con una oscilación anual en las temperaturas medias mensuales de entre 7 y 14°C , precipitación media anual de 230 mm, períodos libres de heladas de abril a octubre y pueden presentarse granizadas durante mayo. Las lluvias son en verano, con un porcentaje de lluvias invernales que va de 5 a 10.2 % (García, 2004). El suelo del lote experimental es clasificado como Xerosol Háplico de acuerdo a la FAO/UNESCO modificada por INEGI y pertenece a la serie Coyote, de gran representatividad regional con suelos profundos, con poca variabilidad de textura (migajón arcilloso). El agua utilizada en el estudio es clasificada como: C1S1, bajo en contenido de sales y sodio.

Con el propósito de caracterizar el suelo del lote experimental, se realizó un muestreo de cuatro repeticiones, a tres profundidades o estratos del suelo (0-30, 30-60 y 60-90 cm). Las principales características químicas que se determinaron se muestran en la Tabla 1, estos fueron: la disponibilidad de nitratos (método de Kjeldahl), de fósforo (método de Duval) y potasio (espectrofotometría); los carbonatos totales (volumetría), la conductividad eléctrica (conductimetría), la capacidad de intercambio catiónico (con extracción de yeso) y el pH (pasta de saturación). Las características físicas del suelo que se evaluaron se muestran en la Tabla 2 y fueron: contenido de materia orgánica (método de Walkley y Black); arena, limo y arcilla en la textura (método de la pipeta de Robinson); capacidad de campo y punto de marchitez permanente (método de la olla y membrana de presión); y densidad aparente (Método del cilindro) (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010). El suelo del sitio experimental contenía baja disponibilidad de nitratos, moderadamente baja de fósforo y alta de potasio, bajos contenidos de sales solubles, de sodio y de materia orgánica. El trabajo se estableció en un experimento con un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. Se establecieron en el campo cuatro tratamientos de humedad aprovechable consumida por el cultivo (HAC), estos tratamientos fueron: 40, 60, 80 y 100 % de la HAC del suelo.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio



Figura 2. Establecimiento del experimento en el lote experimental.

Tabla 1. Características químicas del suelo del sitio experimental

Prof. (cm)	NO ₃ (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	CO ₃ (g kg ⁻¹)	Ce (dS m ⁻¹)	CIC (cmol kg ⁻¹)	pH
0-30	23.18	9.20	1045.83	53.0	0.79	24.4	8.47
30-60	37.27	8.23	912.50	68.0	1.07	23.5	8.30
60-90	43.42	9.67	833.30	86.6	1.03	23.4	8.15

NO₃ = Nitrato disponibles P = Fósforo disponible; K = Potasio disponible; CO₃ = Carbonatos totales; Ce = Conductividad eléctrica; CIC = Capacidad de intercambio catiónico.

Tabla 2. Características físicas del suelo del sitio experimental.

Prof. (cm)	MO (%)	Arena (%)	Limo (%)	arcilla (%)	Textura	CC (%)	PMP (%)	Da (g cm ⁻³)
0-30	1.21	20.0	38.0	24.0	Franco arcillo limoso	27.9	15.9	1.3
30-60	0.88	19.6	47.4	33.0	Franco arcillo Limoso	27.7	15.5	1.2
60-90	0.82	17.0	50.0	33.0	Franco	27.9	15.2	1.3

MO = Materia orgánica; CC = Capacidad de campo; PMP = Punto de marchitez permanente; Da = Densidad aparente.

Las dimensiones de la parcela experimental fueron de 10 m de largo por 8.5 m de ancho con el fin de ser compatibles con el tamaño de pixel de las imágenes de satélite y facilitar su detección y análisis.

Se midió en forma continua el contenido de humedad del suelo para cada tratamiento usando el método de reflectometría. Para determinar y monitorear el contenido de agua del suelo y su variación a través el ciclo del cultivo en cada tratamiento, se utilizaron los métodos de reflectometría en el dominio temporal (TDR) previamente calibrado con el gravimétrico como método estándar para su calibración, basado en la toma de muestras del suelo con barrenas tipo Vehimeyer.

Para la aplicación del riego a las parcelas experimentales cuando alcanzaban el nivel de HAC prefijado, mediante el entubamiento del agua de riego hasta las parcelas experimentales, se aplicó el volumen suficiente y requerido para llevar el perfil de suelo explorado por las raíces hasta capacidad de campo. Asimismo, se aplicó en forma volumétrica el agua requerido por el maíz forrajero para desarrollarse bajo condiciones favorables de humedad durante su desarrollo.

La siembra se efectuó en suelo húmedo el 27 de junio del 2024, con una densidad de siembra de 9 plantas por metro lineal y una separación de hileras de 0.76 m. Para una densidad aproximada de 106 mil plantas por ha.

Para la fertilización se aplicó la fórmula 160-50-00. Las variables a evaluar fueron, el rendimiento de forraje verde (FV) en $t\ ha^{-1}$, el rendimiento de materia seca (MS) en $t\ ha^{-1}$ y la eficiencia de uso del agua ($kg\ m^{-3}$), la lámina de agua consumida. El análisis de la información se realizará con base en el análisis de varianza, de comparación de medias (Tukey 5%) y del análisis de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presentan los valores del régimen de humedad a los que fueron sometidos los cuatro tratamientos en el cultivo del maíz forrajero. El rango del contenido de la humedad aprovechable

consumida fluctuó de 43 % en el tratamiento más favorable de contenido de humedad en el suelo al 100 % de la HAC de condiciones hídricas extremadamente restrictivas. Para el caso de la evapotranspiración actual o lámina consumida por el cultivo, el mayor consumo de 69.8 cm de agua, se presentó en el tratamiento 40, de condiciones más húmedas que el resto, el menor consumo de 28.5 cm, se mostró en el tratamiento 100 de muy bajo contenido de humedad en el suelo, la tendencia lineal resultante, concuerda con los resultados reportados por Núñez-Ramírez *et al.* (2020).

El comportamiento del rendimiento de materia verde ($t\ ha^{-1}$) del maíz, como respuesta a las condiciones diferentes de humedad del suelo en cada tratamiento ensayado en el campo, se muestra en el citado Tabla 3. El análisis de varianza de la Tabla 4 mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($\alpha = 0.01$). El tratamiento 40 de HAC tuvo el rendimiento promedio más alto, de $61.9\ t\ ha^{-1}$. Este valor de producción, de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey (Tabla 3), resultó estadísticamente igual al tratamiento 60 pero significativamente diferente y de más producción que los tratamientos 80 y 100, Similar resultado reporta Yescas *et al.* (2015) con $57.7\ t\ ha^{-1}$. Con respecto a la respuesta de materia seca del maíz forrajero a estos tratamientos de humedad, el mismo Tabla muestra que el tratamiento más húmedo, 43 % de HAC, produjo $18.4\ t\ ha^{-1}$ y fue significativamente más alto que los restantes 3 tratamientos ensayados, Yescas *et al.* (2015) reporta $14.8\ t\ ha^{-1}$ de materia seca.

Tabla 3. Rendimientos del maíz forrajero de acuerdo al régimen de humedad en el suelo

Tratamiento	HAC (%)	ET (cm)	RMV (tha ⁻¹)	RMS (tha ⁻¹)	EUA (Kg m ⁻³)
40	43	69.8	61.9 a*	18.4 a*	2.64a
60	62	52.1	51.2 ab	13.9 b	2.67a
80	80	41.4	40.6 b	8.8 c	2.12ab
100	100	35.6	37.7 b	7.09 c	1.98b

HAC = Humedad aprovechable consumida; ET= Evapotranspiración; RMV=Rendimiento de materia verde; RMS= Rendimiento de materia seca EUA= Eficiencia del uso del agua; *Valores con la misma letra son estadísticamente iguales al 5% de significancia.

En lo que respecta a la eficiencia del uso del agua (USA) del maíz forrajero, el estudio mostró diferencias significativas entre tratamientos y como se observa en la Tabla 3, los tratamientos 60, 40 y 80 en ese orden presentaron diferencias, pero no estadísticamente significativas de acuerdo con el análisis de comparación de medias de Tukey (0.05). En este caso es importante resaltar que de acuerdo con estos resultados el maíz forrajero presentó la misma productividad del agua en un rango amplio de consumo de agua que va desde 41.4 a 69.8 cm durante su ciclo vegetativo, lo cual se explica por la oportunidad del riego en etapas sensibles del cultivo

como fue inicio de embuche y durante floración, Gutiérrez-Guzmán *et al.* (2022) reportan valores similares por 1.98 kg m⁻³.

Por medio del procedimiento del análisis de regresión, se ajustaron los datos observados del rendimiento de materia verde del maíz forrajero como variable dependiente y la humedad aprovechable consumida al momento del riego (HAC) como variable independiente, la función obtenida es la siguiente:

$$RMV=79.11275-0.43901*HAC; R^2 = 0.78$$

Tabla 4. Análisis de varianza del rendimiento de forraje verde

Fuente de variación	Grados de libertad	SC	CM	F	Pr>F
Bloque	2	62.762	31.381	1.16	NS
Tratamiento	3	1096.113	365.371	13.52	**
Error	6	162.152			
CV %	10.8				

** : P ≤ 0.001. gl: grados de libertad; CV: coeficiente de variación

Donde los coeficientes de la regresión de cada uno de los coeficientes de regresión, fueron altamente significativos por lo que contribuyen en el modelo a explicar la respuesta del maíz forrajero. De acuerdo a sus parámetros estadísticos del coeficiente de determinación (R²), el modelo obtenido explica en forma satisfactoria el fenómeno representado.

Al relacionar estas variables para cada tratamiento ensayado en campo, se encontró que entre ellas existió una relación de tipo lineal. Dicha función obtenida, después de realizar el análisis de regresión entre ambas variables resultó:

$$RMV= 18.165 +0.61873 * ET; R^2= 0.80$$

Donde los coeficientes de regresión estimados, fueron significativos y contribuyeron a explicar la relación de las variables bajo estudio. De acuerdo a sus parámetros estadísticos encontrados el modelo ajustado en este estudio tiene una capacidad de predicción que resulta satisfactoria para este tipo de relaciones biológicas complejas donde intervienen diversos factores de la planta, del suelo y ambientales (Allen *et al.*, 2006).

El rendimiento de materia seca en los diferentes tratamientos de HAC, fue de una tendencia similar, a

la producción del RMV, ya citado. La respuesta del maíz forrajero a las condiciones hídricas en el suelo fue del tipo lineal ya que bajo condiciones hídricas favorables se produjo mayor cantidad de MS por unidad de superficie y a mayor restricción de agua en el suelo el rendimiento de materia seca tiende a disminuir. Esto se muestra en la Tabla 5, donde se presentan los resultados de MS para cada uno de los

cuatro tratamientos de HAC en el suelo. Sin embargo, a diferencia en la respuesta de materia verde donde resultaron estadísticamente iguales en su producción, los tratamientos 40 y 60 HAC, en la respuesta de materia seca se definió como de mayor producción el 40 De HAC de acuerdo a la prueba de Tukey al 5 % .

Tabla 5. Análisis de Varianza de rendimiento de materia seca (kg ha⁻¹)

Fuente de variación	Grados de libertad	SC	CM	F	Pr>F
Bloque	2	3.2705	1.635	1.03	NS
Tratamiento	3	237.805	79.268	49.73	**
Error	6	9.564			
CV %	10.5				

Sobresale la producción de MS en el tratamiento 40 % de la HAC de 18.4 tha-1 y que de acuerdo al análisis de comparación de medias (Tukey 5%) resulto significativamente superior en producción de MS y diferente al resto de los tratamientos.

El modelo obtenido al relacionar la variable respuesta Materia Seca (t ha-1) y el contenido de humedad en el suelo durante el desarrollo del cultivo fue también de tendencia lineal como puede observarse en la ecuación siguiente:

$$RMS = 25.7625 - 0.1885 \cdot HAC; R^2 = 0.86$$

donde los coeficientes obtenidos fueron significativos estadísticamente (< del 5%) por lo que contribuyen en forma significativa al modelo.

El modelo obtenido al relacionar la variable respuesta Materia Seca (t ha-1) y la lámina consumida durante el desarrollo del cultivo, fue de tendencia lineal como puede observarse en la función siguiente:

$$RMS = -0.4821 + 0.3393 \cdot LC; R^2 = 0.93$$

donde los coeficientes obtenidos fueron significativos estadísticamente (< del 5%) por lo que contribuyen en forma significativa al modelo.

CONCLUSIONES

De acuerdo al rango de los niveles de humedad del estudio en campo, el maíz forrajero presentó un comportamiento lineal en su rendimiento de materia verde y seca, a las condiciones hídricas del suelo y a su consumo de agua. El maíz forrajero obtuvo su

mayor rendimiento de materia verde al ser irrigado con el 40 % de la humedad aprovechable consumida del suelo, sin embargo, estadísticamente fue igual al irrigar el cultivo con el 60 de la humedad aprovechable consumida, esto resulta importante porque representa un ahorro del recurso hídrico. En producción de materia seca presentó la mayor producción en el tratamiento 40 de HAC consolidando su tendencia lineal con respecto a la humedad del suelo. En cambio, en la productividad del agua resultaron igual de eficientes los tratamientos 40, 60 y 80 de HAC por lo que se optaría por el último ya que representa mayor ahorro del recurso agua de riego.

Los modelos generados estiman con precisión el rendimiento de forraje verde en base al régimen de humedad al cual se desarrolla el maíz forrajero y a su consumo de agua o su evapotranspiración. La estimación es congruente dentro de los límites de los niveles de estudio ensayados en el experimento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento del estudio al CONAHCYT como parte del proyecto de Ciencia Básica y de Frontera: "Huella hídrica de cultivos usando sensores remotos y datos de reanálisis, una aproximación a escala parcelaria" (CBF2023-2024-1092).

LITERATURA CITADA

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>.
- Ali M. and M. Talukder (2008). Increasing water productivity in crop production—A synthesis. *Agricultural water management* 95 (2008) 1201-1213.
- Cruz-González A., R. Arteaga-Ramírez, I. Sánchez-Cohen, H. Flores-Magdaleno, J. Soria-Ruiz, A. I. Monterroso-Rivas (2025). Efectos del cambio climático sobre la evapotranspiración de referencia y su impacto en la producción de maíz. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 16 (3). México.. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i3.3379>
- Flores-Delgadillo, L. & Alcalá-Martínez, J. R. (2010). Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos. Instituto de Geología. Departamento de edafología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. Serie Libros Núm. 6. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- Gutiérrez-Guzmán, U. N., M. E. Ríos-Vega, G. Núñez-Hernández, A. Esquivel-Romo, J. M., Vázquez-Navarro y J. M. Anaya-Salgado (2022). Producción de maíz forrajero con dos sistemas de riego y tres niveles de la evaporación aplicada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas publicación especial número 28*. 263-273.
- Gheysari M., F. Pirnajmedin , H. Movahedrad, M. Majidi, M. Zareian (2021) Crop yield and irrigation water productivity of silage maize under two water stress strategies in semi-arid environment: Two different pot and field experiments. *Agricultural Water Management* 255. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106999>.
- Inzunza-Ibarra M.A., N. A. López-Hernández, I. Sánchez-Cohen, S. I. Jiménez-Jiménez, R. Trucíos-Caciano (2025). Evapotranspiración máxima y coeficiente de ajuste del maíz forrajero obtenidos mediante Lisimetría. *Agrofaz - Journal of Environmental and Agroecological Sciences* 7 (1): 65-72.
- Mangani R., E. H. Tesfamariam, G. Bellocchi and A. Hassen (2018) Growth, Development, Leaf Gaseous Exchange, and Grain Yield Response of Maize Cultivars to Drought and Flooding Stress. *Sustainability* 10: 3492. doi:10.3390/su10103492.
- Núñez-Ramírez, F., I. Escobosa-García, V. Cárdenas-Salazar, J. SantillanoCázares, J. del R. Ruelas-Islas, P. Preciado-Rangel y J. Díaz-Ramírez (2020). Tensión de humedad del suelo, crecimiento, eficiencia en el uso del agua y rendimiento de maíz cultivado en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana* 38: 805-815. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.763>.
- Pedroza-Sandoval A., J. L. Ríos-Flores, M. Torres-Moreno, E. Cantú-Brito, C. Piceno-Sagarnaga y L. Yáñez-Chávez (2014). Eficiencia del agua de riego en la producción de maíz forrajero (zea mays l.) y alfalfa (medicago sativa): impacto social y económico. *Terra Latinoamericana* 32 (3):231-239.
- SIAP, Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (2025) SADER. Disponible en: <http://siap.gob.mx> (septiembre 2025).
- Singh, Y., S. S. Rao and P L. Regar (2010) Deficit irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in shallow soils of semi-arid environment *Agric. Water Manage.* 97: 965-970. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.01.028.
- Yescas C. P., M. A. Segura, L. Martínez, V. P. Álvarez, J. A. Montemayor, J. A. Orozco, J. E. Frías (2015). Rendimiento y calidad de maíz forrajero (Zea mays L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. *PYTON* 84:272-279.
- Zheng H., R. Shao, Y. Xue, H. Ying, Y. Yin, Z. Cui, Q. Yang (2020). Water productivity of irrigated maize production systems in Northern China: A meta-analysis. *Agricultural Water Management* 234: 106119. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106119> Get rights and content.