

Producción de maíz forrajero con dos sistemas de riego y tres niveles de la evaporación aplicada

Ulises Noel Gutiérrez-Guzmán¹
María Esther Ríos-Vega^{1§}
Gregorio Núñez-Hernández¹
Amaury Esquivel-Romo¹
José Manuel Vázquez-Navarro¹
Antonio Anaya-Salgado²

¹Facultad de Agricultura y Zootecnia-Universidad Juárez del Estado de Durango. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 35, ejido Venecia, Gómez Palacio, Durango. CP. 35111. (ulises.gutierrez@ujed.mx; amauryer@ujed.mx; manuelvazna@hotmail.com). ²Campo Experimental La Laguna-INIFAP. Blvd. José Santos Valdez 1200, col. Centro, Matamoros, Coahuila, México. CP. 7440. (anaya.antonio@inifap.gob.mx).

§Autora para correspondencia: esther.rios@ujed.mx.

Resumen

La eficiencia en el uso del agua para la producción de forraje agrupa una serie de componentes relacionados con el cultivo y el sistema de riego que consiste en obtener una mayor producción por unidad de agua consumida. El objetivo del trabajo fue conocer el rendimiento, calidad nutricional y la eficiencia en el uso del agua (EUA) del cultivo del maíz forrajero (*Zea mays* L.) en dos sistemas de riego bajo tres niveles de evaporación aplicada. El trabajo se estableció el 19 de abril de 2019, en el Campo Experimental La Laguna (CELALA) del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ubicado en Matamoros, Coahuila, México. Los sistemas de riego evaluados fueron: goteo subsuperficial y riego por superficie. En ambos sistemas, las láminas aplicadas correspondieron al 100, 75 y 50% de evaporación libre del tanque evaporímetro clase 'A'. La cosecha se realizó cuando el grano se encontraba en la etapa de grano lechoso R3. El diseño experimental utilizado fue de parcelas divididas con cuatro repeticiones. La interacción sistema de riego por goteo subsuperficial -100% de evaporación fue superior ($p < 0.05$) en las variables altura con 2.05 m, rendimiento de forraje verde con 55.08 t y rendimiento de forraje seco 14.85 t. La combinación con mejor comportamiento en EUA en rendimiento con 1.98 kg m⁻³ y valores más altos en EUA en calidad del forraje, fue el sistema de riego por superficie -75% de evaporación. Se mostraron diferencias significativas entre sistemas de riego en las variables de calidad con mejores resultados en el sistema de riego por superficie.

Palabras clave: *Zea mays* L., eficiencia en el uso del agua, goteo subsuperficial, riego por superficie.

Recibido: mayo de 2022

Aceptado: agosto de 2022

Introducción

La agricultura representa 72% de todas las extracciones de aguas superficiales y subterráneas a nivel mundial principalmente para fines de riego FAO (2021). Se prevé que el crecimiento del consumo de productos ganaderos persistirá hasta el año 2030 y más allá de este año, pero su ritmo variará. En los países de altos ingresos, donde el aumento de la población es lento, habrá menos margen de crecimiento porque el consumo de productos ganaderos (carne y leche) es ya muy elevado (305 kg per cápita). En cambio, en los países de ingresos bajos y medios el consumo per cápita es de 60 kg, mientras que la media mundial es de 115 kg (FAO, 2011).

El sistema intensivo de producción de leche es el principal usuario del agua de riego en las principales cuencas lecheras de México. Del agua utilizada en las explotaciones lecheras, la relacionada con la producción de forrajes representa la mayor cantidad, la empleada en ordeña y bebederos constituye una pequeña porción de la destinada a la producción de leche (Herrero *et al.*, 2000). La eficiencia en el uso del agua para la producción de forraje agrupa una serie de componentes relacionados con el cultivo y con el sistema de riego, el cual consiste en aumentar la productividad agronómica y económica de forma que se obtenga una mayor producción por unidad de agua consumida (FAO, 2011).

Una estrategia de investigación ha sido evaluar la eficiencia en el uso del agua (EUA) de las especies más comunes de la región y su calidad nutricional (Cruz *et al.*, 2012). Otra estrategia ha sido el estudio de los sistemas de riego con alta eficiencia en la aplicación de agua para la producción del patrón de cultivos de la región.

En la Región Lagunera, los sistemas de riego por superficie son los más comunes, con eficiencias de aplicación de 40 a 65% en los distritos de riego en el país, debido principalmente a que no hay incentivos para que lleven a cabo acciones que permitan mejorar dicha eficiencia (Mejía *et al.*, 2002). Por otra parte, estudios han demostrado que el sistema de riego por goteo subterráneo permite alcanzar un ahorro de agua promedio de 23% en comparación con el sistema de riego por superficie, manteniendo niveles de humedad más constantes sin comprometer el rendimiento, lo que aumenta la eficiencia del uso del agua (Martínez-Gimeno *et al.*, 2018).

El maíz forrajero es de los tres cultivos forrajeros más importantes en la región por el alto valor energético que aporta a las raciones del ganado bovino lechero. La superficie sembrada en el año 2021 fue de 56 105 ha, seguido por la alfalfa 51 321.2 ha y sorgo forrajero con 35 397.5 ha. El empleo de maíz en la alimentación animal tiene una gran versatilidad, ya que puede ser consumido en verde, ensilado o seco (Reta *et al.*, 2002).

Es necesario optimizar los procesos agronómicos como la eficiencia en la conducción y aplicación del agua de riego en el maíz forrajero para lograr producir la mayor cantidad y calidad de forraje con la mejor eficiencia en el uso del agua de riego. En este sentido, la interacción sistemas de riego*nivel de evaporación podrían generar efectos positivos en la productividad del cultivo. El objetivo del trabajo fue conocer el rendimiento, calidad nutricional y la eficiencia en el uso del agua del cultivo del maíz forrajero en dos sistemas de riego bajo tres niveles de evaporación aplicada.

Materiales y métodos

El trabajo de investigación se realizó en las instalaciones del Campo Experimental la Laguna (CELALA) del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Matamoros, Coahuila, México, a una altitud de 1 150 m, entre los paralelos 25° 32' latitud norte y los meridianos 103° 14' longitud oeste. La siembra se realizó en húmedo el día 19 de abril de 2019 en un suelo de textura arcillosa, con una conductividad eléctrica de 1.78 dS m⁻¹, capacidad de campo de 34%, punto de marchitez permanente de 20%, densidad aparente de 1.26 g cm⁻³ y 2.42% de materia orgánica. La variedad de maíz utilizada fue Syngenta 8285 de ciclo precoz, con una densidad de siembra de 100 000 plantas ha⁻¹ y una separación de surcos de 0.76 m.

El experimento constó de dos sistemas de riego: sistema de riego por goteo subsuperficial y sistema de riego por superficie. Se evaluaron tres láminas de riego en los dos sistemas. Las láminas de riego correspondieron al 100, 75 y 50% de evaporación libre del tanque evaporímetro clase 'A'. Para el sistema de riego por goteo subsuperficial las láminas de riego fueron 93.5 (100%), 70.4 (75%) y 47.2 cm (50%), se utilizó como líneas regantes cinta de goteo marca Ro-Drip con un espesor de pared de 0.2 mm, calibre 8 000, diámetro interior de 16 mm, con goteros espaciados a 20 cm y un gasto de 5 L h⁻¹ m⁻¹ a una presión de operación de ocho PSI, instalada a 0.36 m de profundidad del suelo. Los riegos se aplicaron con una frecuencia de tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes) y el número de riegos fue igual para todos los tratamientos. Se aplicó un riego superficial (aniego) 10 días antes de la siembra.

En el sistema de riego por superficie de las parcelas experimentales se realizó con conducción presurizada a través de tubería con un sistema por multi compuertas. Se aplicaron láminas de riego que correspondieron a 94.5 (100%), 70.4 (75%) y 53.3 cm (50%). El número de riegos varió desde cuatro hasta seis aplicaciones. El primer riego de aniego fue, a los 10 días antes de la siembra, los tratamientos se aplicaron a partir de los 28 días después de la siembra (dds). El número de riegos de auxilios fueron los siguientes: 100% (cinco riegos), 75% (cuatro riegos), 50% (tres riegos).

Se realizaron muestreos de humedad del suelo antes de cada riego para garantizar que la humedad se mantuviera en humedad aprovechable. Para la aplicación precisa del volumen de agua a cada unidad de riego, se contó con manómetros y válvulas de control que permitieron regular la presión en el sistema de riego garantizando el gasto y carga de operación.

En la instalación del sistema de riego se realizó una evaluación y prueba del sistema, además se utilizó un medidor volumétrico previamente calibrado. La dosis de fertilización fue 280-80-00 de N-P-K. Se aplicó la mitad del N y todo el P al momento de la siembra en ambos sistemas. La otra mitad de N se aplicó en el primer riego de auxilio en el sistema de riego por superficie. En el sistema de riego por goteo subsuperficial, la otra mitad de N se aplicó a través del sistema de riego con ayuda de un Venturi. Las fuentes de fertilización fueron urea, UAN-32 y MAP. Las parcelas experimentales fueron de 24.32 m². La parcela útil fue de 7.6 m² para estimar el rendimiento de forraje verde (RFV) (t ha⁻¹).

La cosecha se realizó cuando el grano se encontraba en la etapa de grano lechoso R3 lo cual ocurrió a los 105 dds para el sistema de riego por superficie y 109 dds para el sistema de riego por goteo subsuperficial. Posteriormente, se tomó una muestra de un kilogramo y se secó en estufa de aire forzado a una temperatura de 65 °C durante 72 h para determinar el porcentaje de materia seca (MS) y estimar el rendimiento de forraje seco (RFS) (t ha⁻¹).

Para la evaluación de la calidad nutricional, se tomaron muestras de plantas completas de aproximadamente un kilogramo y se siguió el mismo proceso de secado. Se determinó contenido de proteína cruda (PC), atendiendo a las técnicas establecidas y estandarizadas para el análisis de forraje AOAC (2000). Fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácida (FDA), carbohidratos no fibrosos (CNF), lignina (LIG), total de nutrientes digeribles (TND) y energía neta de lactancia (ENL) mediante espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRS) previamente calibrado mediante los procedimientos reportados por Van Soest *et al.* (1994).

Para estimar la eficiencia en el uso del agua (EUA) en las variables de calidad, se consideró el rendimiento de la variable en kg: RFS, PC, FDA, FDN, LIG, CNF, TND y ENL en Mcal por el volumen de agua aplicado (m^3). Para ello se determinó el volumen de agua aplicada con la siguiente ecuación: $V = LR * A$. Donde: V = volumen de agua aplicada (m^3); LR = lamina de riego (m); y A = área (m^2). Para determinar la EUA en RFS se utilizó la siguiente ecuación: $EUA_{RFS} = RFS / V$. Donde: EUA_{RFS} = eficiencia en el uso del agua en rendimiento de forraje seco ($kg\ m^{-3}$); RFS = rendimiento de forraje seco (kg); y V = volumen de agua aplicada (m^3).

Para determinar la EUA en las variables de calidad (PC, FDA, FDN, LIG, CNF y TND) se determinaron los $kg\ ha^{-1}$ y posteriormente los $kg\ m^{-3}$. Se utilizaron las siguientes ecuaciones: $kg\ ha^{-1} = (\% * RFS) / 100$. Donde: $kg\ ha^{-1}$ = kilogramo de la variable de calidad por hectárea; $\%$ = porcentaje de la variable; y RFS = rendimiento de forraje seco (kg). $kg\ m^{-3} = kg\ ha^{-1} / V$. Donde: $kg\ m^{-3}$ = kg de la variable de calidad por m^3 ($kg\ m^{-3}$); $kg\ ha^{-1}$ = kg de la variable de calidad por ha ($kg\ ha^{-1}$); y V = volumen de agua aplicada (m^3). Para determinar la EUA en ENL se utilizó la siguiente ecuación: $EUA_{ENL} = (RFS * ENL) / V$. Donde EUA_{ENL} = eficiencia en el uso del agua en energía neta de lactancia ($Mcal\ m^{-3}$); RFS = rendimiento de forraje seco (kg); ENL = energía neta de lactancia ($Mcal\ kg^{-1}$); y V = volumen de agua aplicada (m^3). Se tomaron datos de altura en cinco plantas al momento de la cosecha. El diseño experimental que se utilizó fue de parcelas divididas con cuatro repeticiones. Se realizó un análisis de varianza con el programa SAS 9.2 bajo los procedimientos GLM y múltiple comparación de medias para cada una de las variables.

Resultados y discusión

Al evaluar la producción de maíz forrajero con dos sistemas de riego y tres porcentajes de evaporación, se encontró diferencia altamente significativa ($p < 0.01$) entre porcentajes de evaporación y se obtuvo diferencia significativa ($p < 0.05$) en la interacción sistema*evaporación principalmente en las variables de altura de planta, rendimiento de forraje verde (RFV) y rendimiento de forraje seco (RFS) (Cuadro 1).

En altura de planta, la combinación sistema de riego por goteo subsuperficial -100% de evaporación y sistema de riego por superficie -75% de evaporación, fueron superiores ($p < 0.05$) a los otros tratamientos, quienes obtuvieron valores de altura de 2.05 y 1.86 m (Cuadro 1), estos valores difieren con los obtenidos por Montemayor-Trejo *et al.* (2012), quienes al comparar tres sistemas de riego obtuvieron 2.89 m en el sistema de riego por goteo subsuperficial y 1.58 m en el sistema de riego superficial.

Cuadro 1. Respuesta de las variables agronómicas en maíz forrajero en función del sistema de riego y la evaporación.

Sistema	Evaporación (%)	Altura (m)	RFV (t)	RFS (t)	MS (%)
GS	100	2.05 a	55.08 a	14.85 a	26.79 a
	75	1.73 ab	41.09 bc	9.35 b	23.1 a
	50	1.38 b	36.78 bc	8.46 b	22.42 a
RPS	100	1.66 ab	43.45 abc	11.91 ab	27.85 a
	75	1.86 a	49.26 ab	13.87 ab	28.24 a
	50	1.67 ab	32.8 c	8.67 b	26.43 a
Sistema		ns	ns	ns	ns
Evaporación		**	**	**	ns
Sist*Eva		**	*	*	ns

GS= goteo subsuperficial; RPS= riego por superficie; RFV= rendimiento de forraje verde; RFS= rendimiento de forraje seco; MS= porcentaje de materia seca; abc= medias en la misma columna sin una literal en común son diferentes ($p < 0.05$); *, ** = $p \leq 0.01$ y 0.05 , respectivamente; ns= no significativo.

Para la variable RFV, se mostró diferencia significativa en la interacción sistema de riego por goteo subsuperficial -100% de evaporación, que obtuvo la producción más alta con 55.08 t ha^{-1} , la producción más baja se observó en la combinación sistema de riego superficial -50% de evaporación con 32.8 t ha^{-1} . Estos resultados muestran la misma tendencia a los consignados por Yescas *et al.* (2015) quienes encontraron que al incrementar el riego conforme aumenta la evapotranspiración (de 60 al 100%), obtuvieron rendimientos desde 47.6 hasta 57.6 t ha^{-1} . Estos resultados demuestran la influencia de la cantidad de agua aplicada y el sistema de riego utilizado en la producción de maíz forrajero.

Algo semejante se observó en la variable RFS, en el que, la combinación sistema de riego por goteo subsuperficial -100% de evaporación fue superior a las demás ($p < 0.05$), con 14.85 t ha^{-1} y el rendimiento más bajo se obtuvo en el sistema de riego superficial -50% de evaporación con 8.67 t ha^{-1} (Cuadro 1). Valores similares fueron reportados por Yescas *et al.* (2015); Wang *et al.* (2022) quienes mencionan que los valores más altos de RFS se obtuvieron en el tratamiento con lámina de riego correspondiente al 100% de la evapotranspiración diaria con 14.78 t ha^{-1} y que el RFS en el sistema de riego por goteo, fue 16.24% superior al del sistema de riego por inundación.

Con relación a MS, no se presentaron diferencias significativas entre sistemas de riego, evaporación e interacciones sistema*evaporación, el rango fue de 22.42 a 28.24%, la media de 25.8% (Cuadro 1), valores por debajo de lo recomendado por Núñez *et al.* (2005) para realizar la cosecha de maíz para ensilado, con el que se obtiene la mayor calidad nutritiva y el mayor rendimiento en materia seca. En los resultados agronómicos obtenidos en este experimento, se evidencian dos fenómenos, uno es que no existe diferencia significativa entre sistemas de riego, esto quiere decir que se comportaron de forma similar; sin embargo, se observaron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) entre los niveles de evaporación y significativas ($p < 0.05$) en la interacción sistema*evaporación.

El otro fenómeno es que existe interacción entre el sistema de riego por goteo subsuperficial con el 100% de evaporación aplicada en altura de planta, RFV y RFS; es decir, se obtuvieron los valores más altos en productividad. Esto puede deberse principalmente a que en el sistema de riego por goteo subsuperficial el agua está más disponible para la planta con mayor frecuencia y aumenta el proceso de transpiración lo que incide en intercambio de dióxido de carbono y por lo tanto mayor producción de biomasa (Coelho y Or, 1999).

En cuanto a la variable EUA, la combinación que demostró ser superior estadísticamente ($p < 0.05$) fue el sistema de riego por superficie -75% de evaporación con 1.98 kg m^{-3} . Las interacciones que fueron menos eficientes fueron sistema de riego por goteo subsuperficial -75% de evaporación y sistema de riego por superficie -100% de evaporación, que demostraron ser estadísticamente similares con 1.34 y 1.27 kg m^{-3} (Figura 1). No se encontraron diferencias significativas entre sistemas de riego, por lo que el efecto positivo del riego por superficie fue ocasionado por los niveles de evaporación y la interacción sistema*evaporación. Además, estos resultados sugieren que, al incrementar la lámina de agua aplicada, se observa a una disminución de la EUA.

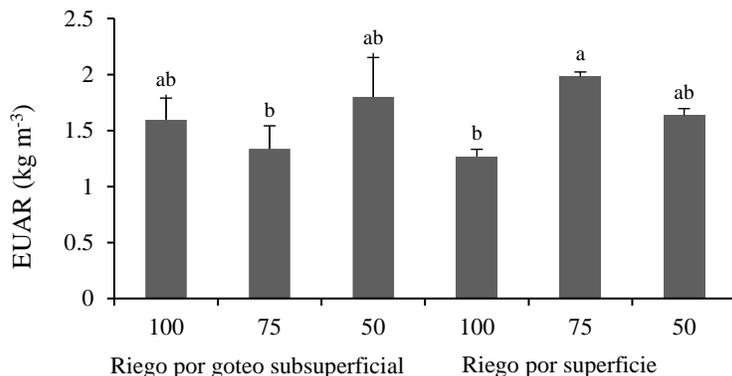


Figura 1. Eficiencia en el uso del agua en rendimiento de maíz forrajero en función del sistema de riego y la evaporación.

Estos resultados difieren con los encontrados por Montemayor-Trejo *et al.* (2012); Salomó *et al.* (2019) que señalan que la mayor producción de forraje de maíz por unidad de volumen aplicado de agua fue de 2.7 a 4.07 kg m^{-3} utilizando sistema de riego por goteo subsuperficial comparado con riego superficial con 1.8 kg m^{-3} y de 2.84 a 3.24 kg m^{-3} aplicando laminas que fluctuaron de 60 a 100% de la evapotranspiración potencial (Yescas *et al.*, 2015).

En respuesta a las variables de calidad nutricional en el forraje de maíz, se mostraron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) entre sistemas de riego en fibra detergente acida (FDA), fibra detergente neutra (FDN), lignina (LIG), total de nutrientes digeribles (TND) y energía neta de lactancia (ENL). Para las variables fibra detergente neutra (FDN), total de nutrientes digeribles (TND) y energía neta de lactancia (ENL) se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las interacciones sistema*evaporación. Por el contrario, en las variables proteína cruda (PC) y carbohidratos no fibrosos (CNF) no se observaron diferencias significativas entre sistemas de riego, % evaporación e interacción sistema*evaporación (Cuadro 2).

Cuadro 2. Respuesta de las variables de calidad nutricional en maíz forrajero en función del sistema de riego y la evaporación.

Sistema	Evaporación (%)	PC	FDA	FDN	LIG	CNF	TND	ENL
		(%)						(Mcal kg ⁻¹)
GS	100	10.36 a	32.98 ab	53.17 ab	4.66 abc	30.09 a	61.95 abc	1.36 ab
	75	9.52 a	36.83 a	60.53 a	4.85 ab	22.15 a	56.72 c	1.25 b
	50	10.92 a	35.14 ab	58.13 ab	5.18 a	22.99 a	57.45 bc	1.27 b
RPS	100	10.05 a	30.81 b	52.48 ab	3.92 bc	31.06 a	63.2 a	1.39 a
	75	10.51 a	31.04 ab	51.88 ab	3.68 c	30.8 a	62.8 ab	1.39 a
	50	10.15 a	30.44 b	51.27 b	3.62 c	31.77 a	63.8 a	1.41 a
Sistema		ns	**	**	**	ns	**	**
Evaporación		ns	ns	ns	ns	ns	*	*
Sist*Eva		ns	ns	*	Ns	ns	*	*

GS= goteo subsuperficial; RPS= riego por superficie; PC= proteína cruda; FDA= fibra detergente ácida; FDN= fibra detergente neutra; LIG= lignina; CNF= carbohidratos no fibrosos; TND= total de nutrientes digeribles; ENL= energía neta de lactancia; abc= medias en la misma columna sin una literal en común son diferentes ($p < 0.05$); *, **= $p \leq 0.01$ y 0.05 , respectivamente; ns= no significativo.

No hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) en las concentraciones de PC que oscilaron entre 9.52 y 10.92% en las interacciones evaluadas (Cuadro 2). Estos valores superan lo reportado por (Zaragoza-Esparza *et al.*, 2019) quienes mencionan haber obtenido un rango de 7.8 a 9% y a los considerados valores promedio en ensilados de maíz de buena calidad, los cuales varían de un rango de 7.5 a 8.6 (Mábio *et al.* 2015). Herrera (1999); Peña *et al.* (2002), mencionan que un maíz de alta calidad forrajera es considerado aquel que presenta valores de FDA de 25 a 32%. Resultados similares se observaron en el sistema de riego por superficie, cuyas cifras demostraron estar en el rango de alta calidad. Los valores oscilaron entre 30.44 y 31.04% (Cuadro 2). Estos valores fueron similares a los reportados por Sánchez e Hidalgo-Ardón (2018) que oscilaron entre 29.9 y 36.6%.

En el experimento, los valores de FDN variaron de 51.27 a 60.53% y demostraron diferencia significativa ($p < 0.05$), la interacción con el valor más alto fue sistema de riego por goteo subsuperficial -75% de evaporación, mientras que el más bajo, el sistema de riego por superficie-50% de evaporación (Cuadro 2). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Zaragoza-Esparza *et al.* (2019) y fueron superiores a los reportados por Núñez *et al.* (2006); Juráček *et al.* (2012) cuyos valores oscilaron de 44 a 48%.

Los valores considerados de alta calidad son de 40 a 52% (Herrera, 1999). Los altos contenidos de FDN dan como resultado una disminución en la digestibilidad del forraje, por tal motivo, los tratamientos con mayor FDN en el experimento mostraron bajos niveles de digestibilidad, esto trae como consecuencia una disminución en el consumo de ensilado por parte del animal lo que provoca que se reduzca la producción de leche.

Una alta concentración de lignina en los cultivos forrajeros no es deseable ya que resiste la digestión microbiana en el rumen y por lo tanto, reduce el acceso de las enzimas a los carbohidratos estructurales de las células (Cherney *et al.*, 1991). Reducir la concentración de lignina da como

resultando en una mayor digestión de la fibra del forraje aumentando así la ganancia de peso y la producción de leche por unidad de masa de forraje alimentado. El análisis de varianza mostró diferencia altamente significativa entre sistemas de riego en LIG, los valores altos se obtuvieron en el sistema de riego por goteo subsuperficial, con valores de 4.66 a 5.18%. El rango en el sistema de riego por superficie fue de 3.62 a 3.92% (Cuadro 2). Comportamiento similar a lo reportado por Carvalho *et al.* (2016) en el que mencionan que las mejores condiciones de agua proporcionan al maíz una rápida expansión celular, con anticipación al proceso de lignificación de los tejidos.

Para la variable TND, se encontraron diferencias significativas entre asociaciones. El sistema de riego por superficie -100% de evaporación y el sistema de riego por superficie -50% de evaporación obtuvieron los valores más altos en digestibilidad con 63.2 y 63.8% sin diferencia significativa entre ellos. El valor más bajo se observó en el sistema de riego por goteo subsuperficial -75% de evaporación con 56.72% (Cuadro 2). Dichos resultados son similares a los obtenidos por (Núñez-Hernández *et al.*, 2015) quienes reportan que los valores de digestibilidad *in vitro* varían de 62.6 a 67.8% en los híbridos de ciclo intermedio y de 67.2 a 73.2% en los híbridos precoces.

En una investigación, realizada con vacas lactantes, se ha llegado a la conclusión de que la digestibilidad de la fibra es potencialmente el indicador más importante que determina la calidad nutricional del maíz para ensilaje, debido que al incrementar la disponibilidad de energía en fibra más digestible, también se incrementa el consumo de materia seca (Núñez *et al.*, 2015), lo que repercute en mayor producción de leche.

En energía neta de lactancia ENL se obtuvo diferencia altamente significativa entre sistemas de riego ($p < 0.01$), los valores más altos se encontraron en el sistema de riego por superficie sin encontrarse diferencia entre ellos. Los valores fueron 1.39, 1.39 y 1.41 Mcal kg⁻¹ para el 100, 75 y 50% de evaporación aplicada respectivamente (Cuadro 2). Estos resultados son superiores a los encontrados por Yescas *et al.* (2015) cuyos valores fluctuaron entre 1.036 y 1.08 Mcal kg⁻¹. El valor energético del maíz puede estar asociado negativamente con las concentraciones fibrosas y la producción de forraje seco, esto podría ocasionar que los tratamientos altos en fibra y bajos en producción sean bajos en digestibilidad y energía neta de lactancia.

No se encontraron diferencias significativas entre sistemas de riego, evaporación e interacción sistema*evaporación para la variable carbohidratos no fibrosos ($p < 0.05$), los valores oscilaron entre 22.15 y 31.77 %. Resultados similares a los reportados por Moreno-Reséndez *et al.* (2017) cuyos valores fueron 21.2 y 31.4%. Por otro lado, en el experimento, no se presentaron diferencias significativas entre sistemas de riego para las variables de EUA en PC, FDA, FDN, CNF, TND y ENL. Las variables que obtuvieron diferencias significativas en las interacciones evaluadas en EUA en calidad nutricional del maíz forrajero fueron PC, FDA, FDN, LIG, TND y ENL. En el análisis de varianza para CNF no se presentaron diferencias significativas entre sistemas, evaporaciones e interacciones (Cuadro 3).

En PC la interacción sistema de riego por superficie -75% de evaporación fue superior a las demás con un total de 0.21 kg m⁻³ (Cuadro 3). Diferentes autores han atribuido el aumento de PC al incremento de la dosis de fertilizante nitrogenado en el suelo (Cox y Charney, 2001; Islam *et al.*, 2012). En esta investigación, la dosis de fertilización no fue un parámetro de evaluación de tal manera que el volumen de agua y el sistema de riego influyeron en el contenido de PC.

Cuadro 3. Eficiencia en el uso del agua de las variables de calidad nutricional en maíz forrajero en función del sistema de riego y la evaporación.

Sistema	Evaporación (%)	(kg m ⁻³)						ENL (Mcal m ⁻³)
		PC	FDA	FDN	LIG	CNF	TND	
GS	100	0.16 ab	0.52 ab	0.83 ab	0.07 ab	0.5 a	1.00 ab	2.2 ab
	75	0.13 b	0.49 ab	0.81 ab	0.06 ab	0.3 a	0.76 b	1.69 b
	50	0.19 ab	0.6 a	0.99 a	0.09 a	0.48 a	1.07 ab	2.37 ab
SPS	100	0.13 b	0.39 b	0.66 b	0.05 b	0.39 a	0.8 b	1.77 b
	75	0.21 a	0.62 a	1.03 a	0.07 ab	0.61 a	1.24 a	2.75 a
	50	0.16 ab	0.49 ab	0.83 ab	0.06 b	0.54 a	1.05 ab	2.33 ab
Sistema		ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
Evaporación		ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
Sist*Eva		**	*	*	*	ns	**	**

GS= goteo subsuperficial; RPS= riego por superficie; PC= proteína cruda; FDA= fibra detergente ácida; FDN= fibra detergente neutra; LIG= lignina; CNF= carbohidratos no fibrosos; TND= total de nutrientes digeribles; ENL= energía neta de lactancia; abc= medias en la misma columna sin una literal en común son diferentes ($p < 0.05$); *, ** = $p \leq 0.01$ y 0.05 , respectivamente; ns= no significativo.

Las variables FDA y FDN, tuvieron comportamiento similar, los valores más altos estadística y numéricamente se obtuvieron en las combinaciones sistema de riego por goteo subsuperficial -50% de evaporación y sistema de riego por superficie -75% de evaporación con 0.6 y 0.62 kg m⁻³ para FDA y 0.99 y 1.03 kg m⁻³ para FDN. Las interacciones con la menor cantidad de fibras fue el sistema de riego por superficie -100% de evaporación con 0.39 y 0.66 kg m⁻³ en FDA y FDN respectivamente (Cuadro 3).

La combinación sistema de riego por goteo subsuperficial -50% de evaporación obtuvo el valor más alto en LIG con 0.09 kg m⁻³, los valores bajos se presentaron en las interacciones sistema de riego por superficie -100% de evaporación y el sistema de riego por superficie -50% de evaporación con 0.05 y 0.06 kg m⁻³. Cabe mencionar que se mostraron diferencias significativas entre sistemas de riego con valores más altos en el sistema de riego por goteo subsuperficial (Cuadro 3).

El comportamiento de las variables TND y ENL fue similar, se mostró diferencia significativa entre combinaciones en las que el sistema de riego por superficie -75% de evaporación fue superior estadísticamente ($p < 0.05$) con 1.24 kg m⁻³ y 2.75 Mcal m⁻³. Este comportamiento puede deberse a la correlación significativa entre la concentración de almidón y MS ($r = 0.47$) y DMD ($r = 0.36$) que indica que a medida que los granos avanzan hacia la madurez fisiológica, aumenta la digestibilidad y el contenido de energía en toda la planta, un resultado deseable para el ensilado como alimento para el ganado (Guayader *et al.*, 2018). Las interacciones que mostraron valores más bajos fueron el sistema de riego por goteo subsuperficial -75% de evaporación y el sistema de riego por superficie -100% de evaporación (Cuadro 3).

Conclusiones

Los sistemas de riego y niveles de evaporación afectaron el rendimiento del maíz forrajero, la calidad nutricional y la eficiencia en el uso del agua. La aplicación de 100% de evaporación con el sistema de riego por goteo subsuperficial mejoró la capacidad productiva del cultivo, lo que tuvo

efectos positivos en altura, rendimiento de forraje verde y rendimiento de forraje seco. La interacción sistema de riego por superficie -75% de evaporación logró los valores más altos en eficiencia en el uso del agua en rendimiento y eficiencia en el uso del agua en calidad del forraje. Los valores de mejor calidad en términos de fibra detergente acida, fibra detergente neutra, ligninas, total de nutrientes digeribles y energía neta de lactancia se obtuvieron en el sistema de riego por superficie. La interacción con mejor comportamiento fue el sistema de riego por superficie con 75% de evaporación, en rendimiento fue superado únicamente por el sistema de riego por goteo subsuperficial -100% de la evaporación, sin embargo, considerando su eficiencia en el uso del agua se recomienda el uso del sistema de riego por superficie con 75% de la evaporación libre del tanque evaporímetro clase 'A'.

Literatura citada

- AOAC. 2012. Official methods of analysis of AOAC international 19 Ed. Vol. 1. Washington, DC. USA. 672 p.
- Carvalho, I. R.; Souza, V. Q.; Follmann, D. N.; Nardino, M.; Pelegrin, A. J.; Ferrari, M.; Konflanz, V. A.; Lazzari, R. and Uczay, J. 2016. Silage production and bromatological constitution effects of corn hybrids in different environments. Portugal. Rev. de Ciências Agrárias. 2(39):242-250.
- Cherney, J. H.; Cherney, D. J. R.; Akin, D. E. and Axtell, J. D. 1991. Potential of brown-midrib, low-lignin mutants for improving forage quality. EE.UU. Advances in agronomy. 46:157-198.
- Coelho, E. F. and Or, D. 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. Suiza. Plant Soil. 2(206):123-136.
- Cox, W. J. and Charney, D. J. R. 2001. Row spacing, plant density, and nitrogen effect on corn silage. USA. Agron. J. 3(93):597-602.
- Cruz, J. J.; Sánchez, J. I.; Faz, R. y Núñez, G. 2012. Manejo integrado de tecnologías para mejorar el rendimiento, calidad y uso del agua en forrajes. México. Agrofaz. 4(12):113-123.
- Guayader, J. X.; Baron, V. S. and Beauchemin, K. A. 2018. Corn forage yield and quality for silage in short growing season areas of the canadian prairies. Canada. Agronomy. 9(8):164-171.
- Herrera, S. R. 1999. La importancia de los maíces y sorgos mejorados para la producción de ensilaje. In: 2º taller nacional de especialidades de maíz. UAAAN Saltillo, Coahuila, México. 133-137 pp.
- Herrero, M. A.; Maldonado, V.; Sardi, G.; Flores, M.; Orlando, A. y Carbó, L. 2000. Distribución de la calidad del agua subterránea en sistemas de producción agropecuarios bonaerenses. I. Calidad fisicoquímica y utilización del agua. Argentina. Rev. Arg. Prod. Animal. 3-4(20):229-236.
- Islam, M. R.; García, S. C. and Horadagoda, A. 2012. Effect of irrigation and rates and timing of nitrogen fertilizer on dry matter yield, proportions of plant fractions of maize and nutritive value and *in vitro* gas production characteristic of whole crop maize silage. Animal Feed Sci. Technol. 3-4(172):125-135.
- Juráček, M.; Bíro, D.; Šimko, M.; Gálik, B. and Rolinec, M. 2012. The quality of maize silages from west Region of Slovakia. J. Central Eur. Agric. 4(13):695-703.
- Martínez, G. M.; Bonet, L.; Provenzano, G.; Badal, E.; Nortes, P. A.; Intrigliolo, D. S. y Ballester, C. 2018. Estrategias de riego por goteo superficial y subterráneo para incrementar la eficiencia en el uso del agua de los cítricos. España. Levante Agrícola. Rev. Inter. Cítricos. 442:168-173.

- Mejía, E.; Palacios, E.; Exebio, A. y Santos A. L. 2002. Problemas operativos en el manejo del agua en distritos de riego. México. Terra Latinoam. 2(20):217-225.
- Montemayor, T. J. A.; Lara, M. J. L.; Woo, R. J. L.; Munguía, L. J.; Rivera, G. M. y Trucíos, C. R. 2012. Producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en tres sistemas de irrigación en la Comarca Lagunera de Coahuila y Durango, México. México. Agrociencia. 3(46):267-278).
- Moreno, R. A.; Cantú, J. E.; Carrillo, R. J. L. and Contreras, V. V. 2017. Forage maize nutritional quality according to organic and inorganic fertilization. Perú. Scientia Agropecuaria. 2(8):127-135.
- Núñez, G.; Faz, R.; González, F. y Peña, A. 2005. Madurez de híbridos de maíz a la cosecha para mejorar la producción y calidad del forraje. México. Técnica. Pec. Méx. 1(43):69-78).
- Núñez, G.; Peña, A.; González, F. y Faz, R. 2006. Características de híbridos de maíz de alta calidad nutricional de forraje. *In*: maíz forrajero de alto rendimiento y calidad nutricional. Núñez, G. (Comp.). Libro científico núm. 13. INIFAP-CIRNOC-CELALA. Matamoros, Coahuila, México. 45-97 pp.
- Núñez, H. G.; Anaya, S. A.; Faz, C. R. y Serrato, M. H. A. 2015. Híbridos de maíz forrajero con alto potencial de producción de leche de bovino. México. Agrofaz. 1(15):47-56.
- FAO. 2011. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Roma y Mundi-Prensa, Madrid.
- FAO. 2021. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura-sistemas al límite. Informe de síntesis 2021. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>.
- Peña, A.; Núñez, G. y González, F. 2002. Potencial forrajero de poblaciones de maíz y relación entre atributos agronómicos con la calidad. México. Téc. Pec. Méx. 3(40):215-228.
- Reta, S. D. J.; Carrillo, S. A.; Gaytán, M. E.; Castro, M. y Cueto, W. J. A. 2002. Guía para cultivar maíz forrajero en surcos estrechos. INIFAP-CIRNOC-CELALA. Matamoros, Coahuila. México.
- Salomó, J.; Sanmartín, J. M.; Pérez, C.; Maresma, A. y Lloveras, J. 2019. Riego por goteo subterráneo en cultivos de maíz y alfalfa. Estudio técnico-económico comparativo entre riego por inundación y riego por goteo enterrado. Vida Rural. 1:43-48.
- Sánchez, W. X. e Hidalgo, A. C. 2018. Potencial forrajero de nueve híbridos de maíz en la zona alta lechera de costa rica. Costa Rica. Agron. Mesoam. 1(29):153-164.
- Van, S. P. J. 1994. Nutritional ecology of the ruminant. 2nd Ed. Cornell University Press. Ithaca, New York, USA. 476 p.
- Wang, L.; Ren, B.; Zhao, B.; Liu, P. and Zhang, J. 2022. Comparative yield and photosynthetic characteristics of two corn (*Zea mays* L.) hybrids differing in maturity under different irrigation treatments. Suiza. Agriculture. 3(12):365).
- Yescas, C. P.; Segura, M. A.; Martínez, L.; Álvarez, V. P.; Montemayor, J. A.; Orozco, J. A. y Frías, J. E. 2015. Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. Argentina. Phytion. 2(84):272-279.
- Zaragoza, E. J.; Tadeo, R. M.; Espinoza, 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. México. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 1(10):101-111.