

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN CULTIVOS FORRAJEROS
CONVENCIONALES Y ALTERNATIVOS BAJO RIEGO POR GOTEO EN LA
COMARCA LAGUNERA

Tesis

Que presenta FELIPE ZAVALA BORREGO
como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

Torreón, Coahuila

Septiembre 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



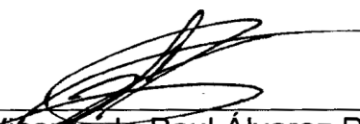
Productividad del agua en cultivos forrajeros convencionales y alternativos bajo
riego por goteo en la Comarca Lagunera

Tesis

Que presenta FELIPE ZAVALA BORREGO

Como requisito parcial para obtener el Grado de

DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS


Dr. Vicente de Paul Álvarez Reyna
Director UAAAN


Dr. Arturo Reyes González
Director Externo

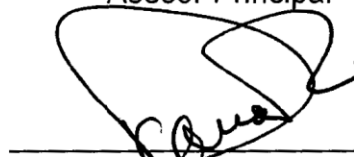
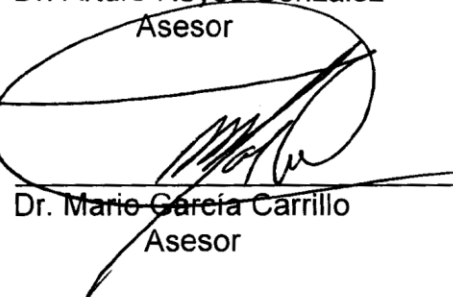
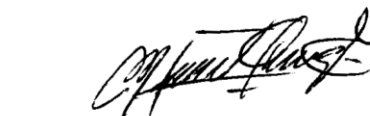
Torreón, Coahuila

Septiembre, 2021

Productividad del agua en cultivos forrajeros convencionales y alternativos bajo
riego por goteo en la Comarca Lagunera

Tesis

Elaborada por FELIPE ZAVALA BORREGO como requisito parcial para obtener
el grado de Doctor en Ciencias Agrarias con la supervisión y aprobación del
Comité de Asesoría


Dr. Vicente de Paul Alvarez Reyna
Asesor Principal
Dr. Pedro Sano Ríos
Asesor
Dr. Vicente Hernández Hernández
Asesor
Dra. Leticia Romána Gaytán Alemán
Jefe del Departamento de Postgrado
Dr. Arturo Reyes González
Asesor
Dr. Mario García Carrillo
Asesor
Dr. Héctor Mario Quiroga Garza
Asesor
Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a Dios; que nos da la vida, la oportunidad de ser y hacer nuestros metas alcanzables.

A la casa de estudios (UAAAN), que me dio la oportunidad de cursar los estudios de Posgrado en Ciencias Agrarias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), que facilitó el apoyo monetario para la realización y obtención del grado de doctorado.

A los doctores del comité de asesoría: Ph. D. Vicente Álvarez Reyna; Ph. D. Arturo Reyes González; Ph. D. Pedro Cano Ríos; Dr. Mario García Carillo; Ph. D. Héctor Mario Quiroga Garza y al Ph. D. Vicente Hernández Hernández, quienes con su experiencia me proporcionaron las herramientas para poder concluir satisfactoriamente mis estudios de doctorado.

A mi familia y amigos que siempre confiaron en mí, quienes en momentos difíciles siempre estuvieron a mi lado para fortalecerme y alentarme a seguir.

Dedicatorias

A Dios

Por darme la oportunidad de concluir esta etapa de crecimiento personal, por la fortaleza espiritual y salud para poder realizar un logro más en mi carrera profesional.

A mi Padre

El Señor Dionicio Zavala Ovando, quien, aunque ya no está conmigo, me enseñó los valores y principios para formarme en esta vida. ¡hasta el cielo papá, te amo!

A mi Madre

La Señora Maricela Borrego Montes, porque siempre ha velado por mi bienestar, orando en cada momento a Dios para que pudiera salir siempre triunfante en todos mis caminos. ¡Te Amo mamá!

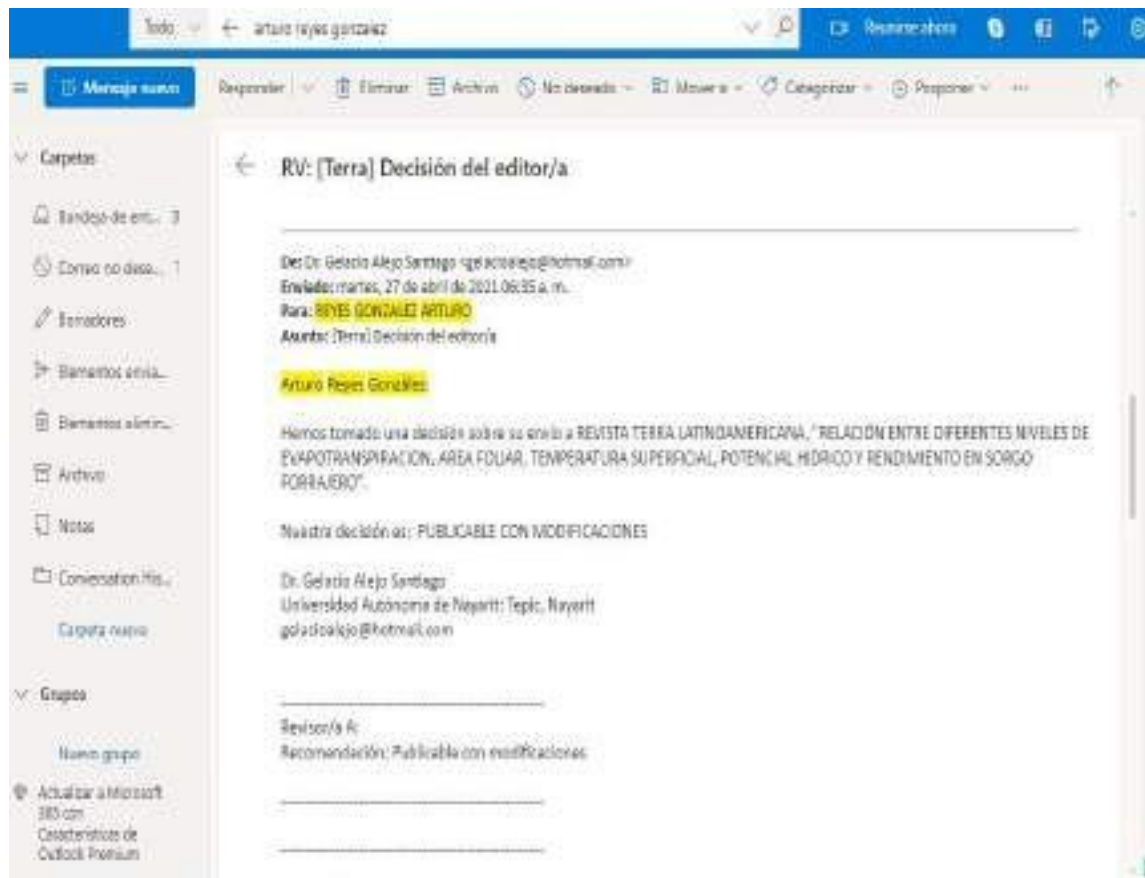
A mi esposa e hijos

Porque han sido el motor que me impulsa a seguir adelante, a luchar por ser mejor persona, mejor padre y esposo, los amo y agradezco a Dios por tenerlos en mi vida.

A mis hermanos

Quienes han sido siempre motivo de orgullo tenerles en mi vida, han sido una bendición, los amo.

Carta de aceptación de Artículos



EFFECTO DE LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACION EN AREA FOLIAR, POTENCIAL HIDRICO Y RENDIMIENTO DE MAIZ FORRAJERO

Antonio Reyes-González, Felipe Zavala-Borrego, Vicente De Paul Al...

Envío

Revisión

Editorial

Producción

Ronda 1

Ronda 2

Ronda 3

Ronda 4

Estado de ronda 4

Envío aceptado.

Archivos adjuntos del revisor/a

🔍 Buscar

📎 19550-1 Revisor externo, 2234-Texto del artículo-15522-1-4-20200825 (1).pdf

Revisiones

🔍 Buscar

Subir archivo

No hay ficheros

Índice General

Contenido

Agradecimientos.....	i
Dedicatorias.....	ii
Carta de aceptación de Artículos.....	iii
Índice General	v
1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- JUSTIFICACIÓN.....	2
3.- OBJETIVO PRINCIPAL	2
3.1.- Objetivos Específicos	3
4.- HIPÓTESIS.....	3
5.- REVISIÓN DE LITERATURA	3
5.1.- Problemática de agua a nivel mundial.....	3
5.2.- Uso del agua en el mundo	4
5.3.- Problemática del agua en México.....	5
5.4.- Problema del agua en la Comarca Lagunera.....	7
5.5.- Sistema de riego por goteo	8
5.6.- Cultivos Alternativos para la región de la Comarca Lagunera.....	9
5.7.- Evapotranspiración.....	10
5.8.- Índice de Área Foliar.....	11
5.9.- Potencial Hídrico de la planta.....	11
5.10.- Temperatura superficial de la hoja.....	12
5.11.- Uso Eficiente del Agua.....	13
6.- LITERATURA CITADA.....	14
7.- ARTICULOS	23
7.1.- Artículo 1.....	23
7.2.- Artículo 2.....	37
8.- DISCUSIÓN GENERAL.....	59
8.1.- Discusiones Sorgo.....	59
8.- Discusiones Maíz	59
9.- CONCLUSIÓN GENERAL.....	60

1.- INTRODUCCIÓN

La proyección en las próximas cinco décadas sobre la accesibilidad al agua dulce, condicionada por la falta y problemas de contaminación de los cuerpos de almacenamiento de agua, es una gran interrogante que aqueja hoy a la humanidad, debido a que afecta la vida de los habitantes del planeta. Mientras que, el agua es cada vez más escasa la demanda mundial de esta, es cada vez mayor, debido al exponencial crecimiento de la población en el mundo, se proyección futura deja ver que para dentro de 30 años la población mundial estará por encima de los 10,000 millones, de toda la demanda de agua dulce en el mundo el 80% corresponde a la agricultura (OMM/ONU, 1997).

Según la ONU (1994), México tienen una extensión de su territorio que abarca 1,964 millones de km², el 98% aproximado de ese territorio es considerado tierra continental y el 2% restante corresponde a formaciones de islas, además, tienen un derecho de mar o aguas internacionales de aproximadamente 3,000,000 de km², que se extiende 370 km mar adentro a todo la largo de los límites costeros del país. México participa como objeto de estudio de escala internacional para monitorear los tipos de sequía y las condiciones climáticas que se generan en la parte norte del continente, en alianza con EUA y Canadá (Conagua 2016).

El aumento poblacional en la región lagunera, los sectores industriales y ganaderos son una limitante que reducen el agua destinada para la agricultura en el distrito de riego 017 donde los cultivos principales son la alfalfa principalmente, además, de algunos cultivos hortícolas y frutales, esta superficie varía según el volumen de agua destinada para riego condicionado por la baja disponibilidad y uso eficiente del agua. (SAGARPA-CEIEGDRS, 2003).

Algunas de las alternativas propuestas para regular y combatir la escasez del agua en los procesos de producciones del sector agropecuario en la región de la comarca lagunera, es elevar la eficiencia en el uso del agua mediante sistemas

especializados de riegos localizados (Riego con cintilla) y el reemplazo de los cultivos tradicionales por cultivos alternativos que contenga la misma calidad y mejoren los rendimientos con el menor uso de agua posible.

2.- JUSTIFICACIÓN

El agua es considerada un recurso natural de mucha importancia en la existencia de los organismos eucariotas y procariotas, incluyendo a la humanidad. Más, sin embargo, este vital líquido es cada vez más escaso y limitado en varias zonas del mundo principalmente en regiones áridas y semiáridas como la Comarca Lagunera.

En la región lagunera, los principales problemas que han afectado directamente a la agricultura, ganadería, industria y a la sociedad civil, son la escasez y la mala eficiencia del uso de agua, por tal motivo ha sido necesario iniciar la búsqueda para poder encontrar herramientas que estimen con mayor precisión los requerimientos hídricos de las plantas y las estrategias adecuadas de irrigación que permitan mejorar el uso eficiente del agua. Con el uso de estas herramientas se podrá incrementar el rendimiento del agua al producir un cultivo y al mismo tiempo permitirá el desarrollo sustentable del medio ambiente y la sociedad.

3.- OBJETIVO PRINCIPAL

Evaluar la productividad del agua en cultivos forrajeros convencionales bajo riego por goteo en la comarca lagunera.

3.1.- Objetivos Específicos

- Evaluar los patrones de cultivo bajo riego por goteo subsuperficial de los ciclos productivos otoño/invierno y primavera/verano.
- Disminuir la lámina de riego, mediante estimaciones precisas de evapotranspiración y uso de riego por goteo en patrones de cultivo en los ciclos productivos otoño/invierno y primavera/verano.
- Mejorar la productividad del agua en patrones de cultivo establecidos en los ciclos otoño/invierno y primavera/verano.

4.- HIPÓTESIS

- La aplicación de riegos con base en la Evapotranspiración actual cubrirá los requerimientos de humedad de la planta incrementando la productividad del agua sin disminuir los rendimientos de forraje seco en los ciclos vegetativos de otoño-invierno y primavera-verano.

5.- REVISIÓN DE LITERATURA

5.1.- Problemática de agua a nivel mundial

Desde hace ya varias décadas con el aumento de la exponencial de la población, la industria, el sector doméstico, los cambios de patrones de consumo, además de los efectos del cambio climático, han incrementado el uso del agua en

promedio 1% cada año, por lo que se espera que para las próximas tres décadas el uso de agua se incremente de hasta un 30% de lo que actualmente se estima. Datos actuales arrojan que el 27% de la población mundial sufren la falta de agua de manera aguda y el 54% la sufren al menos un mes al año (ONU, 2019).

En las próximas cinco décadas el principal problema que afectará a la humanidad será la falta del agua ocasionada por la contaminación de los cuerpos de agua existentes (OMM/ONU, 1997).

De toda el agua dulce existente en el planeta solamente el 0.007% está disponible para el consumo humano, lo que nos arroja un panorama muy gris para las generaciones futuras ya que se estima que la falta de agua en el mundo comenzara a agudizarse a partir del año 2025 afectando la vida social de dos terceras partes de los habitantes del planeta (L'vovich *et al.* 1995, Simonovic 1999).

Existen regiones en el mundo donde la escasez del agua es más marcada y el aumento de la población sigue aumentando desproporcionadamente, originando un desequilibrio entre oferta y demanda de agua que pudiera tener un desenlace catastrófico incluso de alcance global (OMM/ONU, 1997).

5.2.- Uso del agua en el mundo

Hay una gran presión a nivel global por resolver los problemas de la creciente demanda de agua, ya que mientras el índice de crecimiento de la población global se incrementó en una tasa tres veces mayor, las extracciones de agua siguieron una tendencia mayor al sextuplicarse (EAM, 2011). Del 100% de las extracciones de agua a nivel global es el sector agrícola por mucho el mayor consumidor con el 69%, seguido del sector industrial con 19%, mientras que el consumo doméstico es de solamente el 12% (ONU, 2019).

Mientras que, el agua es cada vez más escasa la demanda mundial de esta, es cada vez mayor, debido al exponencial crecimiento de la población en el mundo, se proyección futura deja ver que para dentro de 30 años la población mundial estará por encima de los 10,000 millones, de toda la demanda de agua dulce en el mundo el 80% corresponde a la agricultura (OMM/ONU, 1997).

Análisis actual sobre el uso del agua en el mundo arrojan proyecciones a 50 años de un incremento en el uso del agua de hasta 30% del valor que actualmente se tiene, aunque esto pudiera variar ligeramente atribuible a los requerimientos de sectores sociales e industriales (OCDE, 2012; Burek et al., 2016).

En el mundo aproximadamente el 30% de los países no sufren por la falta de agua los cuales están clasificados como umbral mínimo de estrés, mientras que el 70% restante sufren estrés severo por la falta de agua, originando que más de 2,000 millones de personas estén envueltas en estas circunstancias (ONU, 2018). El acelerado aumento de la escasez de agua nos conllevara a un uso más eficiente y sostenible del agua, además, de posibles problemas entre los que quieren hacer uso del agua (ONU, 2019).

La sobreexplotación excesiva de los mantos de acuíferos o cuerpos de agua causada por la demanda de agua ocasiona que el recurso hídrico cada vez sea más escaso y más aún en periodos prolongados de sequía. Los costos para extraer el agua a mayor profundidad se han elevado debido a la dificultad de bombear agua a niveles de mantos freáticos muy bajos y no existe una recarga natural que permita la sostenibilidad de los acuíferos, al mismo tiempo, estos niveles han originado que ríos con caudales pequeños y que se alimentaban de los acuíferos se sequen por completo causando periodos de sequías más prolongados (OMM/ONU, 1997).

5.3.- Problemática del agua en México

Según la FAO es la agricultura con un 72% de la extracción total, la que más agua consume a nivel global, mientras que el sector industrial que promueve el

crecimiento económico solo consume el 20% del total de extracciones, México se ubica ranqueado como el octavo país con mayor extracción de agua (EAM, 2011).

A pesar de que el agua es vital en todos los sectores y niveles sociales, existe en México la desigualdad marcada cuando se habla de accesibilidad y disponibilidad del agua, mientras que el 70% de la población del país se concentra en zonas urbanas; el 80% con servicio de agua potable y el 77% tiene alcantarillado, el resto vive en zonas indígenas, marginadas o rurales los cuales al no poder adquirir el servicio sufren las consecuencias de la escasez del agua (Monforte y Cantú, 2009).

México tienen una extensión de su territorio que abarca 1,964 millones de km², el 98% aproximado de ese territorio es considerado superficie de tierra continental y el 2% restante corresponde a formaciones de islas, además, tienen un derecho de mar o aguas internacionales de aproximadamente 3,000,000 de km², que se extiende 370 km mar adentro a todo la largo de los límites costeros del país ONU, (1994), la precipitación en el país es aproximadamente de 1,449,471 millones de m³, en dos tercios del territorio nacional solamente llueve 500 milímetros y en el tercio restante la precipitación en ocasiones sobrepasan los 2000 milímetros. De la precipitación total el 72.5% retorna a la atmósfera por evapotranspiración, el 21.2% se pierde por escorrentía y el 6.3% sobrante recarga los acuíferos por medio de la infiltración profunda. Después de hacer el balance entre exportaciones e importaciones de agua con países vecinos México cuenta con un saldo a favor de agua dulce renovable de 446, 777 millones de m³ (ONU, 1994).

México participa como objeto de estudio de escala internacional para monitorear los tipos de sequía y las condiciones climáticas que se generan en la parte norte del continente, en alianza con EUA y Canadá (Conagua 2016).

5.4.- Problema del agua en la Comarca Lagunera

El aumento de la población en la comarca lagunera, los sectores industriales y ganaderos son una limitante que reducen el agua destinada para la agricultura en el distrito de riego 017 que cuenta con una superficie agrícola aproximada de 96,000 hectáreas, los cultivos principales son la alfalfa principalmente y otros forrajes, además, de algunos cultivos hortícolas y frutales, esta superficie varía según el volumen de agua destinada para riego condicionado por la baja disponibilidad y uso eficiente del agua. (SAGARPA-CEIEGDRS, 1990-2003)

Según Godoy (2000) se destinaron 1700 millones de m³ para riego agrícola en la última mitad de la década, teniendo a los acuíferos centrales de la región como principal proveedor con un 62% del volumen concesionado, el resto proviene de agua almacenada en las presas, de esto, 800 millones de m³ son necesarios para cubrir la demanda de agua de los cultivos, el volumen restante se pierde por la falta de tecnificación de riego.

Del 100% de la población de la comarca lagunera de Durango y Coahuila el 70% se concentra en las zonas urbanas, generando la mayor demanda de agua para uso humano en la región, en el año 2004 en Torreón contabilizaban 154,000 tomas domiciliarias (SIMAS-SIDEAPA, 1999).

El sector industrial con sus más de 871 empresas se ha constituido un activo muy importante en cuanto a la aportación al PIB (44.6%) de la región lagunera, convirtiendo a la región en un foco de inversión provocando un incremento en las fuentes de empleos atrayendo mucha mano de obra que se asentaron en la metrópolis y zonas rurales, este movimiento generó un incremento en la demanda del agua para su consumo reduciendo aún más el volumen destinado a riego agrícola (INEGI-BIE, 2005).

Con el incremento exponencial del ganado en la última década en la comarca lagunera a 1.138 millones de cabezas, también crece la demanda de forrajes para su alimentación, y aunque se halla incrementado la superficie un 4.5% al año para producir alimentos para el ganado esta, es insuficiente por lo que se

tiene que importar de estados vecinos o incluso de los Estados Unidos de Norteamérica (SAGARPA-CEIEGDRS, 1990-2003).

La escasez del agua ocasionada por el abatimiento de los acuíferos incrementa los costos de producción agropecuarios, esto afecta directamente a la región lagunera, ya que al ser una importante cuenca lechera del país, existe un déficit de producción de forrajes de un 40% para ser autosuficiente alimentariamente hablando, por lo que hay una marcada demanda de alimentos para ganado de excelente (Sánchez et al, 1998), aunado al exceso de metales pesados encontrados a profundidades de extracción cada vez mayores condicionan buena calidad del agua extraída; principalmente a las sales y sodio intercambiable, hace difícil el uso del agua para fines agrícolas pues originan la degradación del suelo (González, 1992; Brouste, 1996; Brouste et al, 1997)

Santamaría et al., (2006) encontraron que en la mayoría de los pozos que operan en el distrito de riego 017 el agua es de mala calidad ya que generalmente presentan salinidad y/o sodicidad, por lo que se tiene que hacer una selección precisa sobre los cultivos tolerantes a las sales que se tienen que establecer.

5.5.- Sistema de riego por goteo

Los sistemas de irrigación presurizados o localizados tienen inferencia directa positiva en el rendimiento y calidad de los cultivos, además, que incrementa considerablemente el uso eficiente del agua (Camp, 1998). Algunas de las ventajas de utilizar el riego por goteo subsuperficial es que a diferencia del riego por inundación; en el riego por goteo se entrega el agua en tiempo y cantidad correctamente indicada evitando anegamiento del cultivo y al mismo tiempo al estar constantemente teniendo el control de los requerimientos de agua del cultivo se evita el estrés hídrico que propicia el cierre estomático afectando la transpiración y otras funciones esenciales en las plantas como la asimilación de CO₂ y O₂ (Clark y Smaistra, 1996).

Camp (1998) cuando se conoce y se atienden los requerimientos de humedad y fertilización de las plantas y se suministra adecuadamente con riego por goteo de manera que siempre estén disponibles para la planta en cantidad y tiempo adecuado permitirá que la planta exprese su potencial fotosintético neto, lo cual se traducirá al final del ciclo en aumento en la producción de biomasa y en la calidad de esta. Mead, et al., (1993) registraron un incremento de rendimiento en el cultivo de alfalfa de 20 a 50% utilizando un sistema de riego localizado contra el riego por inundación típico para este cultivo en la región lagunera (Mead et al., 1993).

Los sistemas de riego presurizados o localizados presentan perdidas mínimas por evaporación del suelo y percolación o infiltración, debido a que el agua se entrega directamente a la zona radicular sin tener contacto directo con la superficie del suelo expuesta a la luz solar, ni tan profunda que pudiera infiltrarse, todo esto, pudiera permitir con un buen manejo de cultivo un ahorro hasta del 50% de agua en el ciclo productivo del cultivo (Phene, 1999; Hanson et al., 1997; Hartz, 1996).

5.6.- Cultivos Alternativos para la región lagunera

Aunque el cultivo de la alfalfa tiene muy baja eficiencia en el uso del agua con tan solo 1.07 Kg de biomasa por cada m³ de agua utilizado; es considerado como el principal forraje cultivado en la región lagunera de Durango y Coahuila ya que por ser una planta perenne se cultiva prácticamente durante todo el año, además de no contar con muchas opciones de cultivos para implementarse como alternativos para la producción de forraje (Moreno et al., 2000).

Faz et al., (2006) Se ha demostrado que el cultivo del maíz presentó valores de 2.81 Kg de biomasa por cada m³ de agua utilizado y por lo tanto valores más altos del uso eficiente del agua. Más, sin embargo, principalmente por las temperaturas elevadas en el ciclo productivo verano-otoño el cultivo del maíz

puede llegar a reducir la producción de biomasa hasta en un 28.6% (González et al., 2006).

5.7.- Evapotranspiración

Si se desea tener una referencia más concreta de los requerimientos de agua para solventar exitosamente un ciclo vegetativo debemos tomar en cuenta el concepto de evapotranspiración del cultivo (transpiración de la planta + evaporación del suelo), los valores de la evapotranspiración son menores en etapas tempranas del cultivo, cuando la planta es pequeña el valor de la evaporación del suelo es mayor a la transpiración de la planta, a medida que el cultivo comienza a crecer y a ocupar mayor superficie estos valores comienza a invertirse, aunque se comporta de manera independiente la suma de ambos factores proporcionan nos ayudan a comprender la necesidad de agua de las plantas (Bruna y Ortega, 2018).

La tasa de evapotranspiración (ET) generalmente se utiliza para calcular las necesidades hídricas de las plantas y es fundamental en la proyección y calendarización de los riegos (Reyes et al., 2019a). Diferentes porcentajes de ET relacionados con láminas de riego se han utilizado en la programación del riego de diversos cultivos como: Lechuga (*Lactuca sativa*) (Tarqui et al., 2017), Maíz (*Zea mays* L.) (Payero et al., 2008), alfalfa (*Medicago sativa*) (Godoy et al., 2003), Pepino (*Cucumis sativus* L.) (Abd-El-Mageeda y Samida, 2015), Chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) (Quintal et al., 2012), trigo (*Triticum aestivum* L.) (Alghory y Yazar, 2019), Quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) (Bozkurt et al., 2020), avena forrajera (*Avena sativa*) (Reyes et al., 2011), algodón (*Gossypium hirsutum* L.) (Kalfountzos et al., 2006) y Vid (*Vitis vinifera* L.) (Payan et al., 2013). En la Comarca Lagunera son pocos los estudios que evaluaron diferentes niveles de ET en sorgo forrajero.

5.8.- índice de Área Foliar

La repartición de área foliar y la luz solar al interior de la hoja en 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). Los valores óptimos para IAF caen dentro de los 400 0 700 nanómetros, en este rango la energía lumínica visible es óptima para que la planta realice la fotosíntesis para poder desarrollarse y crecer adecuadamente, lo cual al final se ve reflejado en el aumento de materia seca (Intagri, 2016).

Generalmente se usa el índice de área foliar, para generar patrones que nos permitan saber los tiempos futuros de cosecha y la capacidad de la hoja para interceptar la luz solar (Gao *et al.*, 2013). Además, el índice de área foliar está asociado en las estimaciones de los índices de crecimiento y desarrollo vegetativo, las necesidades de agua, los daños ocasionados por agentes invasores y enfermedades de las hojas (Acosta *et al.*, 2008).

5.9.- Potencial Hídrico de la planta

El estrés hídrico es de las principales causas que inciden sobre el desarrollo de los cultivos y que puede ocasionar pérdidas económicas para los agricultores, es el estrés hídrico (Gao *et al.*, 2007). El estrés hídrico reduce el desarrollo adecuado de las hojas y restringe el agrandamiento celular de la misma. Al reducirse el tamaño de las hojas se disminuye la superficie foliar fotosintética afectando directamente los procesos metabólicos de la planta, reduciendo la transpiración e incrementando el cierre estomático de la planta (Parra *et al.*, 1999). Al incrementarse el estrés ocasionado por la falta de agua debido a la restricción de humedad en el cultivo los valores para el diferencial de presión de la hoja también son más negativos, generando un crecimiento de cultivo inadecuado y reduciendo el rendimiento de biomasa (Ismail, 2010; May *et al.*, 2011). Para la estimación aproximada del estado hídrico de la planta se deben

considerar valores tomados del potencial hídrico foliar, 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).

Debido a la estrecha relación entre contenido de humedad del suelo y diferencial de potencial hídrico es confiable usar ψ_h de la hoja como alternativa para la calendarización de la aplicación de los riegos a cultivos agrícolas (García et al., 2010). La falta de agua en la planta incide en el intercambio de gases de las especies vegetales, el cual permite a las plantas tolerar condiciones de climas adversos, la calidad, el suministro de agua y salinidad para no afectar la transformación de energía, translocación, el transporte de nutrientes y reducción de la producción de los cultivos (Rodríguez, 2006).

5.10.- Temperatura superficial de la hoja

La temperatura foliar del dosel afecta los procesos fisiológicos como: difusión de gases, líquidos en la planta, solubilidad de iones, viscosidad, velocidad de transporte y la transpiración, no obstante, las fitohormonas de las plantas sirven como iniciadores y reguladores de las funciones metabólicas, desarrollo y crecimiento, cuando la temperatura del vegetal se eleva pueden morir (Fisher et al., 1997). Morales et al., (2006) encontraron que plantas con exposición a temperaturas altas afectan negativamente algunas variables de crecimiento cómo son la producción de biomasa, velocidad de crecimiento, tasa de captación de CO₂, superficie de las hojas y el intercambio gaseoso. Rada et al. (2005); comentan que la temperatura foliar se incrementa hasta el grado de causar daños por calor, debido a que la falta de agua aumenta reduciendo la apertura de los estomas de la hoja.

Jarma et al., (2012) señalan que las altas temperaturas ambientales generan altas temperaturas al interior de la planta afectando la fotosíntesis neta (al aumentar la fotorrespiración, la fotosíntesis neta decrece por efecto de temperaturas elevadas), quema de energía, la absorción y transporte de líquidos,

turgencia de la pared celular de la membrana, equilibrio de las fitohormonas, procesos metabólicos secundarios, reduciendo el crecimiento de las especies vegetales especialmente aquellas categorizadas dentro del grupo de plantas C3. Chaves *et al.* (2017) encontraron que, las temperaturas altas producen estrés térmico en las plantas afectando las funciones metabólicas de las plantas, dentro de las cuales destacan, la turgencia celular, división celular, la transpiración, la adaptación de la coenzima Q₁₀, la rigidez de la pared celular, la producción de proteínas para estrés, fotosíntesis, las hormonas que regulan la respuesta de las plantas al estrés biótico o abiótico en campo y la adaptación al estrés térmico.

Panda *et al.* (2003) reportaron que la temperatura superficial de la hoja está estrechamente relacionada con la radiación solar que las hojas interceptan, a medida que se incrementa la intercepción de radiación, la hoja incrementará de manera directa su temperatura, de este modo, la temperatura de la hoja condiciona al equilibrio energético en las capas superiores de las hojas. 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).

5.11.- Uso Eficiente del Agua

Por otro lado, es necesario incrementar el uso eficiente del agua en agricultura para producir el doble de alimentos en los próximos 30 años (Salazar *et al.*, 2014). Medrano *et al.* (2007) comentan que el precio del agua gastada por la planta (respiración) es inevitablemente alto debido a que la producción de biomasa (fotosíntesis) está en función del agua destinada para su producción. Esto se debe a que ambos procesos son simultáneos, ya que ambos suceden por la misma estructura vegetal, los estomas; tanto la captación del CO₂ y la salida de agua, al tiempo que se permite la entrada de CO₂ al mismo tiempo se evapora el agua.

6.- LITERATURA CITADA

- Abd-El-Mageeda, T. A. y Semida, W. M. (2015). Organo mineral fertilizer can mitigate water stress for cucumber production (*Cucumis sativus* L.). *Agricultural Water Management*. Holanda. Volume 159. Pp: 1-10.
- Acosta-Díaz, E., Acosta-Gallegos, J. A., Amador-Ramírez, M. D. y Padilla-Ramírez, J. S. (2008). Relación entre el índice de área foliar y rendimiento de del frijol boja condiciones de secano. Texcoco, México. *Agricultura Técnica de México*. 34 (1), 13-20.
- Alghory, A. y Yazar, A. (2019). Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. Germany. *Irrigation Science*. 37, 61-77. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0603-y>.
- Bozkurt-Çolak, Y., Yazar, A., Alghory, A. y Tekin, S. (2020). Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for differentially irrigated quinoa with surface and subsurface drip systems. *Irrigation Science*. Alemania. 39, 81-100. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00681-4>.

- Brouste, L. 1996. Hydrochimie et géochimie isotopique de la nappe phréatique de la Comarca Lagunera (Nord-Mexique). Tesis Universidad Paris XI-Orsay. 220 p.
- Brouste, L., C. Marlin, L. Dever y J.L. González Barrios. 1997. Hidroquímica y geoquímica isotópica del manto freático de la Comarca Lagunera (Norte de Mexico). Memorias del 25 aniversario del CENID-RASPA-INIFAP-SAGAR. Gómez Palacio. Dgo. México. Pp. 87-100.
- Bruna, L. P y Ortega, S. M. 2018. Introducción a la evapotranspiración del agua en plantas cultivadas. Informaciones Técnicas del Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad del Gobierno de Aragón. No.269. I.S.S.N.: 1137/1730
- Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M. T., Scherzer, A., Tramberend, S., Nava, L. F., Wada, Y., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Magnuszewski, P., Cosgrove, B. y Wiberg, D. 2016. Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report). IIASA Documento de trabajo. Laxenburg, Austria, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). pure.iiasa.ac.at/13008/
- Camp, C. R. 1998. Subsurface drip irrigation: A review. Trans. of the Am. Soc. Agric. Eng. 41: 1353-1367.
- Chaves, B. N. F. y Gutiérrez, S. M. V. 2017. Respuesta al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. Agronomía mesoamericana. Costa Rica. 28(1):237-253. 2017 ISSN 2215-3608.
- Clark, G.A. y A.G. Smaistra. 1996. Design considerations for vegetable crop drip irrigation systems. Hort Technology 6:155-159.
- Conagua. 2016. Clasificación de la intensidad de sequía. Consultado en: http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=237:clasificacion-de-la-severidad-de-la-sequia&catid=16:general (04/10/2018).

- Estadística del agua en México. 2011. Agua en el mundo. Mexico. Pp: 114-126.
- Faz Contreras, R., U. Figueroa Miramontes., R Jaso Ibarra y L.H. Maciel Pérez. 2006. Fertilización y riego. En: Martínez R., J.G., Y.I. Chew M., I. Reyes J., G. Núñez H. (Eds). Maíz forrajero de alto rendimiento y calidad nutricional. Libro Científico No. 3. INIFAP-CIRNOC-CELALA. pp. 141-173.
- Fisher, G., Torres-Carbajal, F. y Torres-Bazurto, J. (1997). Efecto de la temperatura del suelo sobre la planta. 1. Crecimiento y desarrollo. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Revista Comalfi. 24 (3), 78-92.
- Gálvez-Pavez, R., Callejas-Rodríguez, R. y Reginato-Meza, G. (2011). Comparación de la cámara de presión tipo Scholander modelo Pump-up respecto a la cámara de presión tradicional en vides de mesa. Santiago Chile. IDESIA. (29(2):175-179). ISSN-0073-4675.
- Gao, S., Niu, Z., Huang, N. y Hou, X. (2013). Estimating the leaf area index, height and biomass of maize using Hj-1 and RADARSAT-2. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 24, 1-8. doi.org/10.1016/j.jag.2013.02.002
- Gao, J. P.; Chao, D. Y. y Lin H. X. (2007). Understanding abiotic stress tolerance mechanisms: recent studies on stress response in rice. Shanghai China. Journal of Integrative Plant Biology. (6(49):742-750). doi: 10.1111/j.1672-9072.2007. 00495.x
- García-López, A., Cun-González, R. y Montero-San Jose, L. (2010). Efecto de la hora del día en el potencial hídrico foliar del sorgo y su relación con la humedad en el suelo. La Habana, Cuba. Revista Ciencia Técnicas Agropecuarias. (19(3):7-11).
- Godoy A., C. 2000. Problemas asociados con la disponibilidad del agua. pp 43-48. In: Tecnología de riego en nogal pecanero Libro Científico No. 1. Primera Edición. SAGAR. INIFAP. CIFAP-Comarca Lagunera. 116p.

- Godoy-Ávila, C., Pérez-Gutiérrez, A., Torres, E., Ciria, A., Hermosillo, L. J. y Reyes, J. I. (2003). Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial. *Revista Agrociencia* 3 (2), 107-115.
- González Castañeda, F., G. Núñez Hernández., A. Peña Ramos., D.G. Reta Sánchez., R. Faz Contreras y J. Zavala Díaz. 2006. Fecha de siembra, densidad de plantas y estado de madurez del maíz forrajero. En: Martínez R., J.G., Y.I. Chew M., I. Reyes J., G. Núñez H. (Eds). Maíz forrajero de alto rendimiento y calidad nutricional. Libro Científico No. 3. INIFAP-CIRNOC-CELALA. pp. 99-139.
- González Barrios J.L. 1992. Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine: exemple dans la Comarca Lagunera. Tesis. Universidad Montpellier II. France. 315 p.
- Hanson, B. R., L. Schwankl, S. Grattan, and T. Prichard. 1997. Drip irrigation for row crops. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California, Davis. Publication 3376. 238 p.
<https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2003/mar-abr/art-1.pdf>
- Hartz, T.K. 1996. Water management in drip irrigated vegetable production. *Hort Technology* 6: 165-167.
- INEGI-BIE (Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática-Banco de Información Económica). 2005. Producto Interno Bruto: Nacional y por Entidad Federativa. Marzo. Consultado en: <http://www.inegi.gob.mx> (04/10/1028).
- Intagri. 2016. El Índice de Área Foliar (IAF) y su Relación con el Rendimiento del Cultivo de Maíz. Intagri. Guanajuato. México. 3p. Available from: <https://www.intagri.com/articulos/cereales/el-indice-de-area-foliar-iaf>
- Ismail, S. M. 2010. Influence of deficit irrigation on water use efficiency and bird pepper production (*Capsicum annum* L.). Jeddah, Saudi Arabia. Department of Arid Land Agriculture, Faculty of Meteorology, Environment and Arid Land

- Agriculture, King Abdulaziz University. 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. Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica. Colombia. 15 (1):63-76.
- Liu, G.; Li, Y. y Alva, A. K. 2012. "Water potential vs. pressure in relation to water movement and transpiration in plants". Gainesville Florida USA. International Journal of Agronomy and Plant Production. 10 (3): 369-373. ISSN: 2051-1914.
- L'vovich, M.I., G.F. White., A.V. Belyaev, J. Kindler, N.I. Koronkevic, T. R. Lee y G.V. Voropaev. 1995. "Use and Transformation of Terrestrial Water Systems". En: B.L. Turner II (ed.). The Earth As Transformed by Human Action. Cambridge University Press. Cap. 14.
- 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. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 3 (14):1039-1045. *versión On-line* ISSN 1870-0462.
- Mead, R. M., R. B. Hutmacher, and C. J. Phene. 1993. Subsurface drip irrigation of alfalfa. In: Subsurface Drip Irrigation-Theory, Practices and Application. Fresno, California. California State University. Pub. No. 92. pp145-146.
- Medrano, H.; Bota, J.; Cifre, J.; Flexas, J.; Ribas, C. M. y Gulías, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. Investigaciones geográficas. México. 4:63-84. ISSN: 0213-4691.
- Monforte, G. G y Cantú, M. P.C. 2009. Escenario del agua en México. Culcyt / Recursos hídricos. México. Año 6, No 30. Pp:31-40.
- Moreno Díaz, L., D. García Arellano y R. Faz Contreras. 2000. Manejo de riego en la alfalfa. En: Núñez, H., G., Y.I. Chef M., I. Reyes J., H.J. Godina G. (Eds).

Producción y utilización de la alfalfa en la zona norte de México. Libro Técnico No. 2. SAGAR-INIFAP-CIRNOC-CELALA. pp. 109-132.

Morales, D.; Rodríguez, P.; Dell'Amico, J. A.; Torrecillas, A. y Sánchez, B. M. J. 2006. Efecto de las temperaturas en algunas variables de crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. Amalia). Cultivos tropicales. Cuba. 1 (27):45-48.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2012. OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. París, OECD Publishing. doi.org/10.1787/9789264122246

Organización Meteorológica Mundial/ Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 1997. OMM-Nº 857. ISBN 92-63-30857-8 Consultado en: [http://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_1/aguamundo.pdf\(04/05/2021\)](http://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_1/aguamundo.pdf(04/05/2021))

ONU. 1994. Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar. Consultado en: http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/convemar_es.pdf (Consultado: 04/07/2021).

ONU. 2018. Sustainable Development Goal 6: Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation. Nueva York, Naciones Unidas. www.unwater.org/app/uploads/2018/07/SDG6_SR2018_web_v5.pdf

ONU. 2019. Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos. Place de Fontenoy, París, Francia. [Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás \(acnur.org\)](https://www.un.org/es/development/desa/policy/water/Informe_Mundial_de_las_Naciones_Unidas_sobre_el_Desarrollo_de_los_Recursos_Hidricos_2019:_No_dejar_a_nadie_atras_(acnur.org)) (Consultado: 05/06/2021).

Panda, R.; Behera, S. y Kashyap P. S. 2003. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions. Bhubaneshwar Odisha India. Agricultural Water Management. 1 (63):37–56. DOI: 10.1016/S0378-3774(03)00099-4

- Parra-Quezada, R. A., Rodríguez-Ontiveros, J. L. y González-Hernández, V. A. (1999) Transpiración, potencial hídrico y prolina en zarzamora bajo déficit hídrico. México. TERRA Latinoamericana. 17 (2), 125-130. E-ISSN: 2395-8030.
- Payan-Ochoa, S., Morales-Maza, A., Valdez-Gascón, B., Martín-Rivera, M. H. e Ibarra-Flores, F. A. (2013). Programación del riego en vid (*Vitis vinífera* L.) de mesa perlette y sugraone con sensores de humedad. Revista Chapingo Serie Horticultura. México. 19 (2), 163-172. doi: 10.5154/r.rchsh.2012.04.024.
- Payero, J. O., Tarkalson, D. D., Irmak, S., Davison, D. y Petersen, J. L. (2008). Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. U.S. Department of Agriculture: Agricultural Research Service, Lincoln, Nebraska. (Pp. 1-15). doi:10.1016/j.agwat.2008.02.015.
- Phene, C. J. 1999. Subsurface drip irrigation. Irrigation Journal 48: 1-8.
- Quintal-Ortiz. W. C., Pérez-Gutiérrez, A., Latournerie-Moreno, L., May-Lara, C., Ruiz-Sánchez, E. y Martínez-Chacón, A. J. (2012). Uso de agua, potencial hídrico y rendimiento en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Revista Fitotecnia Mexicana. México. 35 (2), 155 –160.
- 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. Mérida Venezuela. Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ). 22:112-120.
https://www.researchgate.net/publication/28089647_Relaciones_hidricas_e_intercambio_de_gases_en_Theobroma_cacao_var_Guasare_bajo_periodos_de_deficit_hidrico
- Reyes-González, A., Rivera-González, M., Delgado-Ramírez, G., Reta-Sánchez, D. G. y Sánchez-Duarte, J. I. (2019a). Programación del riego mediante el

uso de un atmómetro. AGROFAZ – Journal of environmental and agroecological science. México. 1 (1), 68-79.

Reyes-González, A., Martínez-Rodríguez, J. G., Palomo-Rodríguez, M., Faz-Contreras, R., Cruz-Chaires, J. J. y Sánchez-Duarte, J. I. (2011). Producción de avena forrajera con riego por goteo subsuperficial en la Comarca Lagunera. Memoria de la XXIII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED, noviembre, 2011. (Pp. 189-195).

Rodríguez-Pérez, L. (2006). Implicaciones fisiológicas de la osmorregulación en plantas. Bogotá, Colombia. Agronomía Colombiana. 24 (1), 28-37).

Salazar, M. R.; Rojano, A. A. y López, C, I. L. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. Tecnología y ciencias del agua. México. 2 (5):177-183.

SAGARPA-CEIEGDRS (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Comités Estatales de Información Estadística y Geográfica para el Desarrollo Rural Sustentable). 1990-2003. Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria de la Región Lagunera Durango-Coahuila. Delegación en la Región Lagunera Durango-Coahuila. Subdelegación de Planeación y Desarrollo Social. Cd. Lerdo. Durango. 163 p.

Santamaria, C.J., D. G. Reta S., J.F.J. Chávez G., J.A. Cueto W. y J.I. Romero P.R. 2006. Caracterización del medio físico en relación a cultivos forrajeros alternativos para la Comarca Lagunera. Libro Técnico No. 2. INIFAP-CIRONC-CELALA. 240 p.

Sánchez Cohen, I., J.L. González Barrios y L. Descroix. 1998. Situación actual y perspectiva del recurso hídrico en le región hidrológica No. 36. Análisis fundamentado en investigación científica. Informe Proyecto CENID RASPA ORSTOM. Gómez Palacio, Durango. México.

- Simas-Sideapa (Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento Sistema Descentralizado de Agua Potable y Alcantarillado). 1999. Estadísticas de Agua y Drenaje en la Laguna. Torreón, Coahuila. 8 p.
- Simonovic, S. P. 2000. "Tools for Water Management One View of the Future". Water International Vol. 25(1): 76-88.
- Tarqui-Delgado, M., Chipana-Rivera, R., Mena-Herrera, F. C., Quino-Luna, J. J., Tallacagua-Terrazas, R. y Gutiérrez-Villalobos, V. (2017). Índice de estrés hídrico del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*), mediante termometría infrarroja a diferentes láminas de riego. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales. La Paz. 4 (1), 7-18. ISSN: 2518-6868.
- Wall, G. W. y Kanemasu, E. T. (1990). Carbon dioxide exchange rates in wheat canopies. II. Photosynthetic and phytomass production efficiencies. Amsterdam. Agricultural and Forest Meteorology. 49 (2), 103-122. DOI:10.1016/0168-1923(90)90045-8.

7.- ARTÍCULOS

7.1.- Artículo 1

Efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre área foliar, temperatura superficial, potencial hídrico y rendimiento en sorgo forrajero

Effect of different levels of evapotranspiration on leaf area, temperature, water potential and yield of forage sorghum

Felipe Zavala-Borrego¹, Arturo Reyes-González^{2*}, Vicente De Paul Álvarez-Reyna¹, Mario García-Carrillo¹, Víctor M. Rodríguez-Moreno³ y Pablo Preciado-Rangel⁴

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, Carretera a Santa Fe y Periférico s/n, colonia Valle Verde, 27054 Torreón, Coahuila, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Laguna, Blvd. José Santos Valdez no. 1200 pte., colonia Centro, 27440 Matamoros, Coahuila, México.

³ Autor para correspondencia (reyes.arturo@cnifap.gob.mx)

⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)- Campo Experimental Pabellón, Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, 20660 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México

⁵ Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Torreón, Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, ejido Ana, 27170 Torreón, Coahuila, México.

RESUMEN

Se estima que para el año 2050 la población mundial alcance los 9.7 billones de habitantes a una tasa de crecimiento lento. Esto representa un panorama grave en cuanto al abasto del agua y a la producción de alimentos. El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre el índice de área foliar (IAF), temperatura superficial (T_s), potencial hídrico (Ψ_s) y rendimiento en sorgo forrajero (*Sorghum vulgare* Pers.) bajo 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%) utilizados para indicar la lámina de riego a aplicar con los tratamientos de riego por goteo y un tratamiento testigo (riego con melgas irrigadas por gravedad). Se utilizaron dos variedades de sorgo forrajero tolerantes a sequía y de alto rendimiento, Súper Sorgo (SS) y Sorgo Silo Miel (SSM). El diseño experimental utilizado fue parcelas divididas en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se observó diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$,

Tukey) en rendimiento verde y seco en los tratamientos de riego y variedades. Los mayores rendimientos se observaron en los tratamientos de 80 y 100% de ET, en la variedad SSM. La variedad SS presentó sus mejores rendimientos en los tratamientos con cintilla (80 y 100% de ET), ya que con el riego por gravedad el rendimiento disminuyó en un 26%. En general las diferentes láminas de riego afectaron el IAF, T_s , Ψ_s y rendimiento, siendo el tratamiento de 60% el más afectado reduciendo su rendimiento alrededor de un 25%. El volumen de agua aplicado en los tratamientos de riego con cintilla fue de 24 a 39% menor con respecto al aplicado en el riego por inundación.

Palabras clave: materia seca, riego por goteo, *Sorghum vulgare* Pers.

SUMMARY

It is estimated that by the year 2050 the world population will reach 9.7 billion people at a slow growth rate, this represents a serious scenario in terms of water supply and Food production. The objective of this Research was to determine the effect of different

Cita recomendada:

Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. de P., García-Carrillo, M., Rodríguez-Moreno, V. M. y Preciado-Rangel, P. (2021). Efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre área foliar, temperatura superficial, potencial hídrico y rendimiento en sorgo forrajero. *Terra Latinoamericana*, 39, ...e954. <https://doi.org/10.28940/terra.v39n0.954>

Recibido: 16 de marzo de 2021. Aceptado: 12 de julio de 2021.
Artículo, Volumen 39, agosto de 2021.

levels of evapotranspiration on leaf area index (LAI), surface temperature (St), water potential (Ψ_w) and yield in forage sorghum (*Sorghum vulgare* Pers.) under drip irrigation. The Research was carried out in the summer of 2019 at the facilities of the Campo Experimental la Laguna in Matamoros, Coahuila, México. Three evapotranspiration levels (ET) (60, 80 and 100 %) were evaluated to indicate the sheet of water to apply with the drip irrigation treatments and a control treatment (flood irrigation). There were use two varieties of sorghum tolerant to drought and high yield, Super Sorgo (SS) and Sorgo Silo Miel (SSM). The experimental design used was divided plots in a randomized block design with four replications. A statistically significant different ($P \leq 0.05$, Tukey) was observed in green and dry yield between irrigation treatments and varieties. The highest yields were observed in treatments of 80 and 100% ET, in the SSM variety. The SS variety had its best yields in drip irrigation treatments (80 and 100% ET), however with flood irrigation the yield decreased by 26%. In general, the different irrigation sheets affected the IAF, Ts, Ψ_w and yield, with the treatment of 60% the most affected reducing its yield by 25%. The volume of water applied in drip irrigation treatments was 24 to 39% less than that applied in flood irrigation.

Index words: dry matter, drip irrigation, *Sorghum vulgare* Pers.

INTRODUCCIÓN

Se estima que para el año 2050 la población mundial alcance los 9.7 billones de habitantes a una tasa de crecimiento lento (ONU, 2019). Esto representa un panorama grave en cuanto al abasto del agua y a la producción de alimentos, pues al contrario de lo que sucede con la población, el recurso hídrico disminuye con el paso del tiempo. Además, si a lo anterior se le suma que la agricultura, el mayor consumidor de agua en el mundo utiliza el 80% de esa agua destinada para fines de riego, no deja mucho margen para el abastecimiento de agua para consumo humano (CONAGUA, 2016).

La tasa de evapotranspiración (ET) generalmente se utiliza para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos y es fundamental en la programación de los riegos (Reyes-González, Rivera, Delgado, Reta y Sánchez, 2019a). Diferentes porcentajes de ET relacionados con láminas de riego se han utilizado en la programación del riego de diversos cultivos como:

lechuga (*Lactuca sativa*) (Tarqui et al., 2017), maíz (*Zea mays* L.) (Payero, Tarkalson, Irmak, Davison y Petersen, 2008), alfalfa (*Medicago sativa*) (Godoy-Avila, Pérez, Torres, Hermosillo y Reyes, 2003), pepino (*Cucumis sativus* L.) (Abd-El-Mageeda y Samida, 2015), chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) (Quintal et al., 2012), trigo (*Triticum aestivum* L.) (Alghory y Yazar, 2019), quinoa (*Chenopodium quinoa* wild.) (Bozkurt, Yazar, Alghory y Tekin, 2021), trébol rojo (*Trifolium pratense*) (López y Ortega, 2021), avena forrajera (*Avena sativa*) (Reyes-González et al., 2011), papa (*Solanum tuberosum*) (Patel y Rajput, 2007), algodón (*Gossypium hirsutum* L.) (Kalfountzos, Alexiou, Kotsopoulos, Zavakos y Vyrilas, 2006) y vid (*Vitis vinifera* L.) (Payán, Morales, Valdez, Martín e Ibarra, 2013). En la Comarca Lagunera son pocos los estudios que evaluaron diferentes niveles de ET en sorgo forrajero.

Por otro lado, la capacidad fotosintética de las plantas puede ser estimada utilizando el índice de área foliar (IAF), ya que la capacidad fotosintética ayuda a comprender la relación entre la producción de materia seca y el rendimiento. El IAF es útil para el desarrollo de modelos predictivos de cosecha y una forma precisa de estimar la capacidad de captura de luz del dosel; aunque la intercepción de luz tiende a saturarse en $IAF > 3$ (Gao, Niu, Huang y Hou, 2013). El IAF también sirve para evaluar el desarrollo y crecimiento de los cultivos en los estudios de requerimientos hídricos y evaluaciones sobre la eficiencia bioenergética o asociarlo al daño producidos por plagas y enfermedades sobre el follaje (Acosta, Acosta, Amador y Padilla, 2008). 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 (*Zea mays* L.) forrajero, a mayor energía luminica captada mayor será la eficiencia fotosintética de la planta (Wall y Kanemasu, 1990).

La temperatura foliar del dosel afecta los procesos fisiológicos como: difusión de gases, líquidos en la planta, solubilidad de iones, viscosidad, velocidad de transporte y la transpiración, no obstante, las fitohormonas de las plantas sirven como iniciadores y reguladores de los procesos de metabolismo, crecimiento y desarrollo, cuando la temperatura de la planta se eleva pueden morir (Fisher, Torres y Torres, 1997). Panda, Behera y Kashyap (2003) reportaron que la temperatura superficial de la hoja está estrechamente

relacionada con la radiación solar que las hojas interceptan, a medida que se incrementa la interceptación de radiación, la hoja incrementará de manera directa su temperatura, de este modo, la temperatura de la hoja condiciona al equilibrio energético en las capas superiores de las hojas. 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, Callejas y Reginato, 2011).

Parra, Rodríguez y González (1999) encontraron que el estrés hídrico foliar reduce el crecimiento de las hojas y restringe el crecimiento celular de la misma, al reducirse el tamaño de las hojas se reduce la capacidad fotosintética de la planta, afectando directamente los procesos fisiológicos de la planta, reduciendo la tasa de transpiración y aumentando el cierre estomático de la planta, por otra parte, la hora del día en la cual se realizan las mediciones de potencial hídrico (Ψ_s) influye en los valores de esta variable. Debido a la estrecha relación entre la humedad volumétrica del suelo y el potencial hídrico es posible utilizar Ψ_s foliar como alternativa para la programación del riego en cultivos agrícolas (García-López, Cun y Montero, 2010). El estrés hídrico de la planta incide sobre el proceso de osmorregulación de las plantas, el cual genera la capacidad para tolerar condiciones de escasez de agua y salinidad elevada, con la expresión de mecanismos adaptativos que evitan disminución de la fotosíntesis, alteraciones en la translocación, distribución de fotoasimilados y pérdidas en rendimiento, hechos significativos en el funcionamiento normal de la planta y en la productividad de los cultivos (Rodríguez, 2006).

En la Comarca Lagunera se establecieron en el 2020, 19 564 ha de sorgo para forraje, 13 681 ha se sembraron con agua por gravedad, 5672 ha con agua proveniente del subsuelo (rebombeo) y 211 ha se acreditaron a la siembra condicionada por las lluvias (agricultura de temporal). Se obtuvo una producción total de forraje de 85 2459 toneladas con un valor comercial de 633 433 555 pesos (SADER, 2020¹). Con estos indicadores, el sorgo forrajero se ha constituido como el tercer cultivo de mayor importancia en la producción de forraje en la Comarca Lagunera superado solo por los cultivos de alfalfa (*Medicago sativa*) (39 343 ha) y maíz (*Zea mays* L.) forrajero (53 283 ha).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre el índice de área foliar, temperatura foliar, potencial hídrico y rendimiento en sorgo forrajero bajo riego por goteo en un clima árido como en la Comarca Lagunera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones del Campo Experimental La Laguna (CELALA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) con coordenadas geográficas 102° 00' y 104° 47' O y 24° 22' y 26° 23' N. En el CELALA se presentan veranos calurosos e inviernos fríos, se pueden alcanzar temperaturas máximas de hasta 45 °C y temperaturas mínimas de 0 °C. Además, se presenta una temperatura media anual de 21.5 °C, precipitación media anual de 227 mm y evapotranspiración (ET) media anual de 2000 milímetros.

La siembra se realizó en un suelo seco a una distancia de 13 cm entre semilla y 75 cm entre surcos para alcanzar una densidad de población de 102 500 plantas por ha. Se utilizaron dos variedades de sorgo (*Sorghum vulgare* Pers.) resistentes a altas temperaturas, de rápido crecimiento y de ciclo vegetativo intermedio, Super Sorgo (SS) y Sorgo Silo Miel (SSM). Las dosis de fertilización que se utilizó fue 200-100-00 (NPK). Las mezclas químicas que se utilizaron fueron urea como fuente de nitrógeno (N) y MAP para fósforo (P_2O_5). Se aplicó todo el fósforo y la mitad de nitrógeno al momento de la siembra. La otra mitad de nitrógeno se fraccionó cada dos semanas durante el ciclo del cultivo utilizando el sistema de fertirriego en el riego por goteo. Para el caso de riego por inundación con melgas irrigadas por gravedad las aplicaciones fueron, todo el fósforo y la mitad de nitrógeno al inicio de la siembra y la mitad restante de nitrógeno a los 40 días después de la siembra (DDS), la aplicación se realizó en forma manual.

Para este trabajo se estableció un diseño experimental de parcelas divididas en bloques al azar con cuatro repeticiones. Los diferentes niveles de ET (tratamientos de riego) se consideraron como parcela grande, mientras que las dos variedades de sorgo (SS y SSM) se les denominaron parcela chica.

¹ SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2020). Delegación en la Región Lagunera. Sector Agropecuario, 2020: *El Siglo de Torreón. Suplemento especial*. Diciembre 31. 2019. (Pp. 28).

Los tratamientos de riego fueron: riego por goteo subsuperficial (RGS), donde se aplicó el 60, 80 y 100% de la lámina determinada por la ET estimada por el atmómetro y un tratamiento testigo que fue el riego por inundación con melgas irrigadas por gravedad (Figura 1).

El tratamiento de 100% de ET, este se multiplicó por el coeficiente de cultivo (K_c) correspondiente a la etapa fenológica del cultivo para calcular el consumo de agua o evapotranspiración del cultivo. Los valores de ET de referencia se tomaron de un atmómetro (ETgage, modelo A comercializado por ETgage Company Loveland, Colorado, EUA), el cual sobreestima un 2% los valores de ETo provenientes de la estación meteorológica (Reyes-González *et al.*, 2019a). El K_c se obtuvo de la ecuación ($K_c = 1.1705 \cdot NDVI + 0.0535$) desarrollada por Reyes-González *et al.* (2019a) para maíz forrajero bajo riego por goteo subsuperficial. El establecimiento de las variedades de sorgo o parcelas chicas fueron cuatro surcos de 5 m de largo por 0.75 m de separación, con un área de 15 m². La superficie total sembrada para los cuatro tratamientos fue de aproximadamente 480 metros cuadrados.

El sistema de riego por goteo subsuperficial consistió en una tubería principal de PVC y líneas regantes de tres pulgadas de diámetro. La cintilla utilizada fue Toro Aqua-Traxx enterrada a 0.25 m,

calibre 8 mil con diámetro interno de 16 mm, espesor de pared de 0.200 mm, emisor a 0.2 m y un caudal de 2.65 L h⁻¹ por metro lineal. Las líneas regantes se establecieron a 0.75 m de separación. La presión de operación del sistema de riego fue de 10 libras por pulgada cuadrada (psi), intervalos entre riegos de cada tercer día. El riego para el tratamiento testigo (gravedad), se diseñó una melga de 8 m de ancho por 20 m de largo.

La medición del índice de área foliar m² m⁻² (IAF) se realizó semanalmente, las mediciones se realizaron mediante el uso del ceptómetro PAR / LAI modelo Lp-80 de AccuPAR (Decagon Devices, Inc. Pullman, WA, EUA). La barra del ceptómetro se colocó en un ángulo de 45 grados de separación con respecto a la línea vertical del surco del cultivo. Las mediciones de la interceptación PAR se realizaron 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 horas en días despejados para minimizar la radiación difusa del cielo por las nubes (Stewart *et al.*, 2003).

El potencial hídrico (Ψ_s) MPa (Mega Pascales) se midió en días soleados. Se seleccionó la hoja que estuviera en buen estado, la cual al momento de ser cortada se cubría con tela humedecida para evitar la pérdida de agua en el traslado (Alghory y Yazar, 2019).

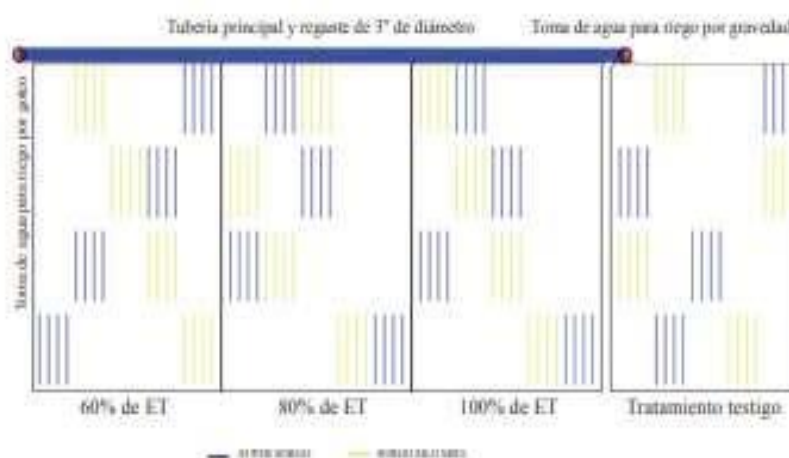


Figura 1. Croquis del experimento de dos variedades de sorgo y cuatro tratamientos de riego. Cabe señalar que en los espacios vacíos se encontraba sembrado maíz. Fuente: Elaborado con la información generada en esta investigación.

Figure 1. Sketch of the experiment of two varieties of sorghum and four irrigation treatments. It should be noted that corn was planted in empty spaces. Source: Prepared with the information generated in this research.

Se realizaron dos muestreos para cada tratamiento dentro de cada repetición entre las 12:00 y 14:00 horas, utilizando la bomba de presión propuesta por (Scholander, Bradstreet, Hemmingsen y Hammel, 1965).

Los muestreos para la medición de la temperatura superficial $^{\circ}\text{C}$ (grados centígrados) de la hoja se llevaron a cabo en días completamente despejados y con velocidades de viento menor a 1 m s^{-1} . Las temperaturas se tomaron a 25 cm por encima de la parte aérea del cultivo con ángulo de inclinación hacia el cultivo de 20 grados con respecto al nivel perpendicular del dosel del cultivo orientado de norte a sur. Se utilizó un termómetro digital infrarrojo modelo 42530 (Extech instruments Inc., Boston, MA, EUA), con 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). Se tomaron dos lecturas por tratamiento y repetición a partir de los 36 DDS cuando la planta de sorgo alcanzó 1.2 m de altura y $4.0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ de índice de área foliar.

La cosecha de las dos variedades de sorgo se realizó a los 107 DDS. La producción de forraje verde se calculó pesando tres metros lineales en los dos surcos centrales de cada parcela o unidad experimental dentro de cada tratamiento. Después de pesar la parcela útil, se tomó una muestra de 600 g y se secó en una estufa de aire forzado a temperatura constante de 65°C durante 72 horas, para después estimar el rendimiento de forraje seco de las variedades en estudio y extrapolarlos a rendimiento por hectárea.

Para determinar si hubo diferencia significativa entre tratamientos de riego, rendimiento de forraje verde y seco, los datos se procesaron mediante análisis de varianza, y las medias tanto de tratamientos como de variedades se compararon utilizando la prueba de comparación de medias por el método Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el programa estadístico SAS system for Windows 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índice de Área Foliar (IAF)

Al inicio de la etapa de desarrollo del sorgo, 22-57 días después de la siembra (DDS), los valores de IAF comienzan a incrementarse, después se presentan valores constantes hasta los 92 DDS y al final del ciclo los valores disminuyen ligeramente (99 DDS) (Figura 2). Los valores de IAF para el SSM fueron

ligeramente superiores (7%) a los valores registrados para el SS durante la estación de crecimiento, no se observó diferencia estadística significativa entre las dos variedades de sorgo utilizadas en este experimento.

Los valores de IAF para cada variedad de sorgo bajo diferentes niveles de ET y riego por inundación con melgas irrigadas por gravedad se presentan en la Figura 2. Los valores más bajos de IAF se presentaron en los primeros muestreos, sin embargo, para los 29 DDS el tratamiento de riego con melgas irrigadas por gravedad comenzó a arrojar los valores más bajos de todos los tratamientos de riego utilizados en el experimento y así continuo hasta los 57 DDS. Se observó diferencia significativa entre los tratamientos de riego y entre variedades de sorgo utilizadas cuando se compararon las medias de los tratamientos y variedades utilizando el método Tukey ($P \leq 0.05$). Los valores más altos de IAF se alcanzaron a los 57 DDS y se prolongaron hasta los 78 DDS para ambas variedades; bajo riego por goteo y riego por gravedad. Durante este periodo los tratamientos de 80 y 100 % de ET fueron los que presentaron los valores ligeramente altos en comparación con los otros dos tratamientos (60% de ET y riego por gravedad). La variedad SSM presentó su valor máximo (7.92) a los 64 DDS, en el tratamiento de 80% de ET, con una desviación estándar de 0.53. Mientras que para la variedad SS el valor máximo fue de 7.24 en el tratamiento del 100% de ET, con una desviación estándar de 0.94. Después de los 86 DDS los valores de IAF para ambas variedades

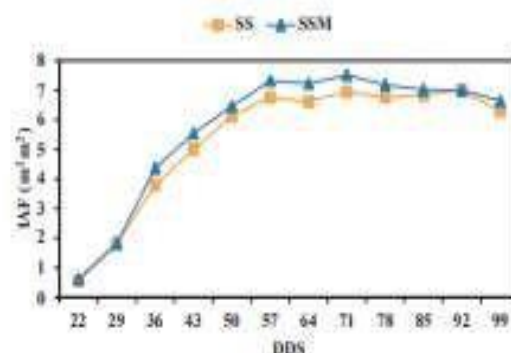


Figura 2. Comportamiento de índice de área foliar (IAF) ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) de dos variedades de sorgo durante el ciclo de producción de verano 2019. Fuente: Elaborado con la información generada en esta investigación.

Figure 2. Behavior of the leaf area index (IAF) ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) of two varieties of sorghum during the summer 2019 production cycle. Source: Prepared with the information generated in this research.

en los diferentes tratamientos de riego empezaron a descender ligeramente, indicando la senescencia del cultivo. En general la variedad SSM presentó valores ligeramente más altos que el SS durante el ciclo del cultivo, esto debido a que el SSM es una variedad que está adaptada a las condiciones climáticas de la región mientras que el SS se desarrolla mejor en climas tropicales (García-Berber, Ramírez y Santoscoy, 2016).

Los resultados reportados en esta investigación están en el rango de valores reportados por (Carrillo y Ruiz, 2004) quienes observaron valores de IAF de 8.96 para el primer corte y 5.6 para el segundo corte en sorgo para forraje, indicando que en estos rangos hay una mayor correlación entre el IAF y la tasa de crecimiento del cultivo (Figura 3). Los resultados de IAF observados en este documento son superiores a los reportados por

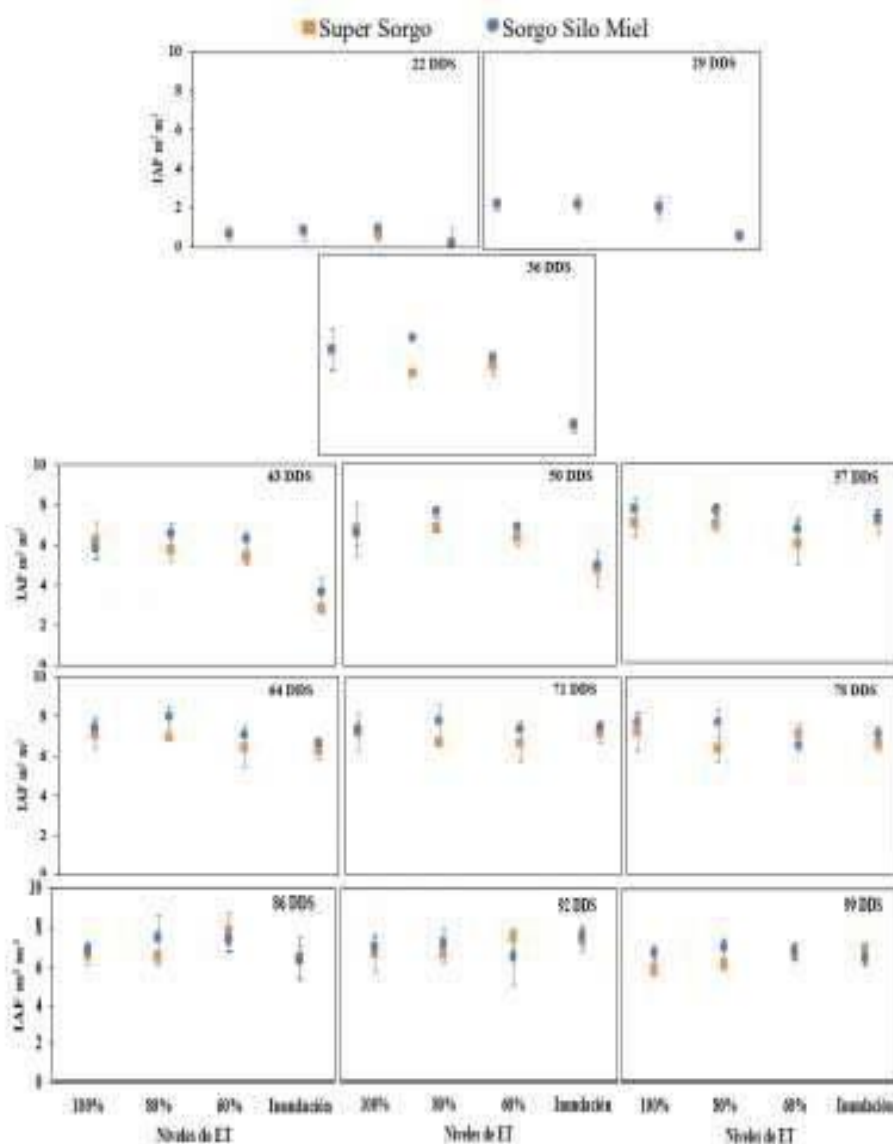


Figura 3. Valores de índice de área foliar (IAF) de dos variedades de sorgo y cuatro tratamientos de riego. Las burras verticales indican la desviación estándar. Fuente: elaborado con la información generada en esta investigación.
Figure 3. Leaf area index (IAF) values of two varieties of sorghum and four irrigation treatments. The vertical bars indicate the standard deviation. Source: prepared with the information generated in this research.

(Montemayor *et al.*, 2012), quienes reportaron valores máximos de IAF (5.0) en maíz regado con riego por goteo en un experimento desarrollado en la Comarca Lagunera, México. En nuestro trabajo la restricción de agua limitó el desarrollo adecuado de las hojas, por lo que la capacidad de la planta para captar la energía luminosa se vio afectada al igual que los valores de índice de área foliar.

Temperatura Foliar

La temperatura foliar tuvo un comportamiento similar en las dos variedades de sorgo durante el ciclo

del cultivo (Figura 4). A los 57 DDS se presentaron los valores máximos de temperatura de 35.93 y 35.18 °C en las variedades SS y SSM, respectivamente, en el tratamiento de 60% de ET. Mientras que a los 43 DDS se presentaron los valores mínimos 28.05 °C en la variedad SS y 28.08 °C en la variedad SSM con los tratamientos de riego de 60 y 80% de ET, respectivamente.

Los datos obtenidos en esta investigación mostraron que los valores mínimos de temperatura superficial de la hoja se presentaron en la etapa temprana de desarrollo del cultivo cuando aún no se han diferenciado los procesos fisiológicos de producción más importantes para el rendimiento de materia seca

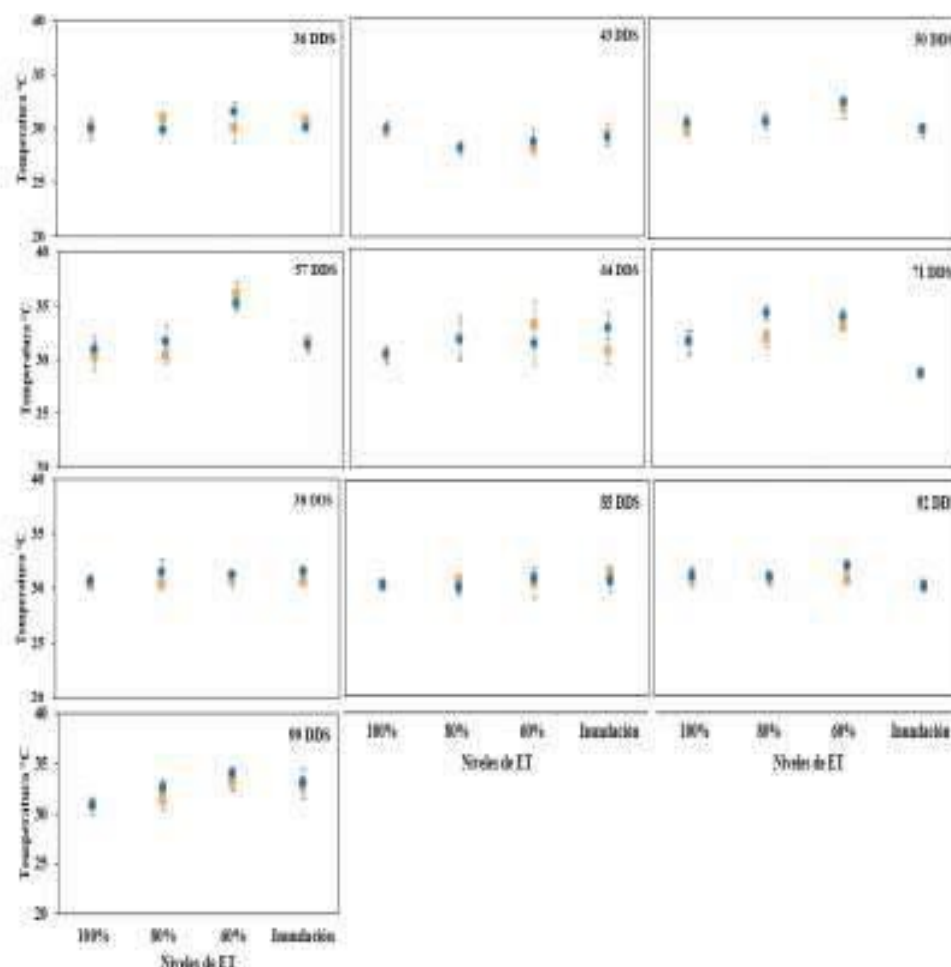


Figura 4. Temperatura foliar de dos variedades de sorgo bajo diferentes niveles de evapotranspiración (ET) e inundación. Las barras verticales indican la desviación estándar. Fuente: elaborado con la información generada en esta investigación. Figure 4. Leaf temperature of two varieties of sorghum under different levels of evapotranspiration (ET) and flooding. The vertical bars indicate the standard deviation. Source: prepared with the information generated in this research.

de la planta, este comportamiento y evolución de la temperatura en la planta es descrito por (Fernández y Johnston, 2006). En un estudio realizado por Him-Lo *et al.* (2020) en el cultivo de maíz, concluyeron que la temperatura superficial de la hoja estuvo influenciada por diversos factores climáticos y por diferentes regímenes de humedad, donde asociaron las temperaturas más cálidas con el déficit de humedad en el suelo. La temperatura de la superficie de la hoja y la conductancia estomática están muy relacionadas, ya que existe una relación directa que determina que al incrementarse los valores de temperatura de la hoja también se incrementa la conductancia estomática de la planta (Pino, Montalván, Vera y Ramos, 2019). De igual manera, Anderson y Kustas (2008), Durigon y de Jong van Lier (2013) y Reyes-González *et al.* (2019b) concluyen que, el cierre de estomas y la reducción de la transpiración, incrementan los valores de temperatura foliar, debido principalmente a los bajos niveles de humedad en la zona radical del cultivo.

Potencial Hídrico (Ψ_s)

Durante el ciclo del cultivo se realizaron 12 mediciones de potencial hídrico (Ψ_s) a las dos variedades de sorgo forrajero (Figura 5). En las primeras seis mediciones el valor de Ψ_s fue alrededor de -1.0 MPa y para las seis siguientes el valor de Ψ_s fue de -1.5 MPa. Después de los 64 DDS los valores fueron más negativos, esto debido a que los requerimientos hídricos del cultivo fueron mayores, comparados con los valores de las primeras etapas de desarrollo. Posterior a los 64 DDS las diferencias entre los valores de potencial hídrico fue visibles entre niveles de ET o regímenes de riego, siendo el tratamiento de 60% de ET y riego con melgas irrigadas por gravedad los más negativos. Esto era de esperarse ya que después de los 57 DDS las necesidades hídricas de la planta aumentan, sin embargo, las láminas de riego fueron constantes para el tratamiento del 60% de ET. Por otro lado, a los 36 DDS se registraron los valores mínimos de Ψ_s para la variedad SS fue de -0.7 MPa y para la variedad SSM fue -0.73 MPa en el tratamiento de 60% de ET. Aunque, para este mismo tratamiento, a los 71 DDS se encontraron los valores más negativos para la variedad SS (-1.89 MPa) y para la variedad SSM (-1.73 MPa). Estos valores contrastantes se debieron principalmente a las exigencias hídricas del cultivo de acuerdo con su etapa fenológica. En general el estado hídrico del

cultivo mostró una relación directa con el tratamiento del riego aplicado: en el tratamiento donde se aplicó el 100% de ET los valores fueron menos negativos que cuando se aplicó el 60% de ET.

Los valores más negativos obtenidos en esta investigación se encuentran dentro del rango de valores para Ψ_s de -1.65 a -2.12 MPa descritos por Alghory y Yazar (2019) en un experimento realizados en trigo (*Triticum aestivum* L.). Sin embargo, resultados semejantes fueron reportados por Reyes-González *et al.* (2011) los cuales oscilaron entre -0.7 y -1.9 MPa en un experimento de avena (*Avena sativa*) forrajera con riego por goteo en la Comarca Lagunera. Aunque valores promedios menos negativos (-0.35 MPa) fueron reportados por Godoy-Avila *et al.* (2003) en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) irrigada con riego por goteo subsuperficial. Los valores de Ψ_s por encima de -1.3 y -2.3 MPa limitan la formación de nuevos brotes en la planta según Castro, López y González (2009) condiciona el crecimiento y desarrollo de la planta (Westgate y Boyer, 1985). La mejor condición hídrica de la hoja (100% de ET) está relacionada con la disponibilidad de agua en el suelo, dando como resultado mayores rendimientos de forraje seco.

Rendimiento de Forraje Verde y Seco

El análisis estadístico para forraje verde y forraje seco resultó en diferencias significativas entre variedades ($P \leq 0.05$, Tukey) y entre tratamientos de riego ($P \leq 0.05$, Tukey) (Cuadro 1). En forraje verde hubo diferencia entre variedades ($P \leq 0.05$, Tukey), siendo la variedad SS la que alcanzó los máximos rendimientos (109 y 97 Mg ha⁻¹) con los tratamientos de riego de 80 y 100% de ET, respectivamente y los menores se registraron con la variedad SSM en el tratamiento testigo (77 Mg ha⁻¹) y en el de 60% de ET (66 Mg ha⁻¹). En cuanto a forraje seco también hubo diferencia significativa entre variedades ($P \leq 0.05$, Tukey) como fue el caso del riego por inundación, sin embargo, en los otros tratamientos no hubo diferencias ($P > 0.05$, Tukey). En los tratamientos de riego hubo diferencia significativa para esta variable, siendo los tratamientos de 80 y 100% de ET los de mayor producción (34 Mg ha⁻¹) y el de 60% de ET e inundación los de menor producción con la variedad SS (25 Mg ha⁻¹). La producción final de forraje seco se vio afectada por el volumen de agua aplicado en los diferentes niveles de ET o tratamientos de riego.

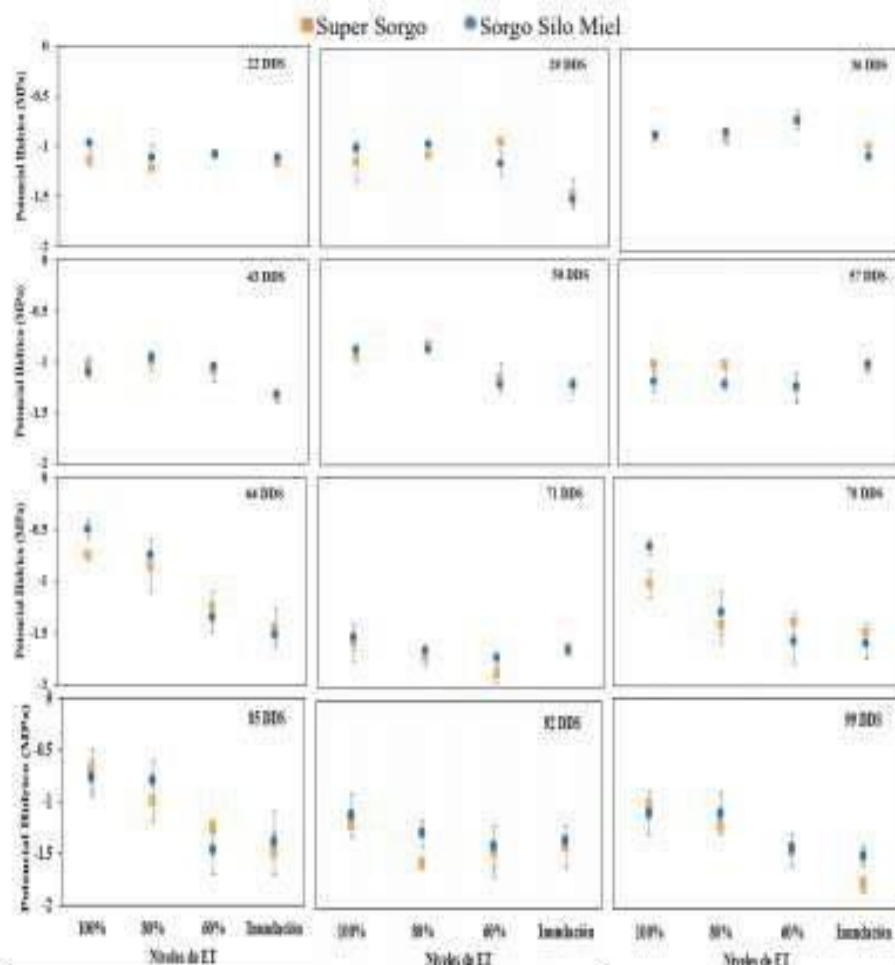


Figura 5. Potencial hídrico de dos variedades de sorgo bajo diferentes niveles de evapotranspiración (ET) e inundación. Las barras verticales indican la desviación estándar. Fuente: elaborado con la información generada en esta investigación.

Figure 5. Water potential of two varieties of sorghum under different levels of evapotranspiration (ET) and flooding. Source: prepared with the information generated in this research.

Para el caso de la variedad SS hubo una diferencia en rendimiento del 33% entre los tratamientos de 100% y el de 60% de ET. Para la variedad SSM la diferencia fue del 21% entre los tratamientos donde se aplicó el 100% de ET y el tratamiento donde se aplicó el 60% de la evapotranspiración.

De acuerdo con los rendimientos de forraje seco reportado en este trabajo, se puede señalar que los rendimientos se encuentran dentro del rango de producción de materia seca de sorgo forrajero a nivel nacional. Martínez, Silva y Cuéllar (2005) mencionan

que los rendimientos de forraje seco de sorgo (*sorghum vulgare* Pers.) forrajero oscilan entre 13 y 40 Mg ha⁻¹. Sin embargo, en la presente investigación se encontraron rendimientos inferiores a los reportados por (Vargas, 2005; Bolaños, Emile y Audebert, 2012; Nava *et al.*, 2017; Anaya, Reyes, Torres, Isidro y Martínez, 2018; Reyes-González *et al.*, 2019b). Aunque, Ríos, Torres, Castro, Torres y Ruiz (2015) reportaron producciones superiores de 37.65 hasta 48.65 Mg ha⁻¹, no obstante que estas producciones se obtuvieron en el ciclo de primavera.

Cuadro 1. Altura, forraje verde y seco para dos variedades de sorgo y diferentes niveles de evapotranspiración e inundación. Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Fuente: elaborado con la información generada en esta investigación.
Table 1. Height, green and dry forage for two varieties of sorghum and different levels of flooding evapotranspiration. Means with different letters are statistically different ($P \leq 0.05$). Source: prepared with the information generated in this research.

Niveles de ET	Variedad	Altura	Forraje verde	Forraje seco
		m	Mg ha ⁻¹	
100%	SS	4.0 a	97 b	33 a
100%	SSM	3.2 bc	83 c	34 a
80%	SS	3.9 a	109 a	35 a
80%	SSM	3.2 bc	81 c	32 a
60%	SS	2.9 c	78 c	24 c
60%	SSM	2.5 d	66 d	26 c
Inundación	SS	3.5 ab	76 c	25 c
Inundación	SSM	2.9 c	77 c	31 ab

SS = super sorgo, SSM = sorgho silo miel, M = metros, Mg ha⁻¹ = toneladas por hectárea.

SS = super sorghum, SSM = sorghum silo honey, M = meters, Mg ha⁻¹ = tons per hectare.

Evapotranspiración Acumulada (ET)

La acumulación de ET utilizada para diferentes tratamientos de riego de sorgo forrajero se muestra en la Figura 6. En el sistema de riego por gravedad se aplicó una lámina acumulada de 710 mm, la lámina de riego promedio aplicada por riego fue de 10 cm y se aplicaron siete riegos en total. En el sistema de riego por goteo se aplicaron láminas acumuladas de 432, 542 y 518 mm para 60, 80 y 100% de ET, respectivamente. Diferentes láminas de riego fueron reportadas por diversos investigadores en cultivos forrajeros como maíz (*Zea mays* L.) (Montemayor *et al.*, 2007), avena (*Avena sativa*) (Reyes-González *et al.*, 2011) y alfalfa (*Medicago sativa*) (Godoy-Avila *et al.*, 2003).

Interacciones entre ET Acumulada e IAF, Temperatura, Potencial Hídrico y Rendimiento

La relación entre ET acumulada (variable independiente) e índice de área foliar (variable dependiente) se presentan en la Figura 7a. La correlación fue de tipo polinomial de segundo orden, empezando con un efecto lineal y después cuadrático. Los coeficientes de determinación (r^2) se presentaron en un rango de 0.89 a 0.96. Resultados similares fueron reportados por Bozkurt *et al.* (2021) en el cultivo de

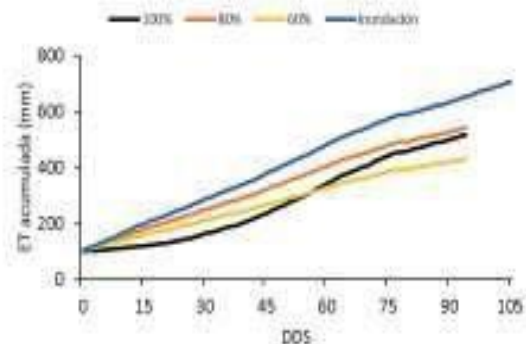


Figura 6. Evapotranspiración (ET) acumulada en diferentes niveles de ET y riego por inundación durante el ciclo del cultivo. Fuente: elaborado con la información generada en esta investigación.
Figure 6. Evapotranspiration (ET) accumulated at different levels of ET and flood irrigation during the crop cycle. Source: prepared with the information generated in this research.

Quinoa (*Chenopodium quinoa willd*) quienes reportaron correlaciones de tipo polinomial entre IAF y el índice de estrés hídrico, donde los mayores valores de IAF se encontraron en el tratamiento de menor estrés por agua.

La relación lineal entre ET acumulada y temperatura foliar fueron bajas (Figura 7b). Como era de esperarse el tratamiento 60% de ET presentó los valores más altos de temperatura, debido a que se le suministro menor lámina de riego. Correlaciones similares fueron

obtenidas por Zarazúa (2013)² en el cultivo de tomate (*Physalis ixocarpa*) quienes obtuvieron correlaciones con coeficientes de correlación de 0.14. También Tarqui *et al.* (2017) presentaron baja correlación (0.49) al comparar la temperatura foliar con diferentes porcentajes de ET (75 y 100%) en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) sembrada en Bolivia.

La correlación entre la ET acumulada y el potencial hídrico variaron de 0.001 hasta 0.61 (Figura 7c). Al igual que la temperatura foliar, el potencial hídrico aumento en el tratamiento con menor lámina de riego (60% de ET). Relaciones lineales semejantes fueron reportados por Williams, Baeza y Vaughn (2012) en un viñedo de California, EUA quienes reportaron valores de potenciales hídricos más negativos en los tratamientos con menor lámina de riego. Similares comportamientos se observaron en plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L.), donde los mayores valores de

potencial hídrico se presentaron con los menores valores de humedad volumétrica en el suelo (García-López *et al.*, 2010).

Una relación polinomial de segundo orden se presentó entre la ET acumulada y el rendimiento de forraje seco (Figura 7d). La mejor correlación se obtuvo con la variedad de sorgo SSM ($r^2 = 0.99$), mientras que con la variedad SS fue de 0.85, lo que indica que no siempre se obtendrá los mejores rendimientos con las mayores láminas de riego. Curvas similares fueron reportadas por Bozkurt *et al.* (2021) con coeficientes de determinación de 0.96 para el cultivo de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) regado con el sistema de riego por goteo subsuperficial. Aunque relaciones lineales fueron reportadas por Alghory y Yazar (2019) en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.), reportando mayores rendimientos en el cultivo menos estresado.

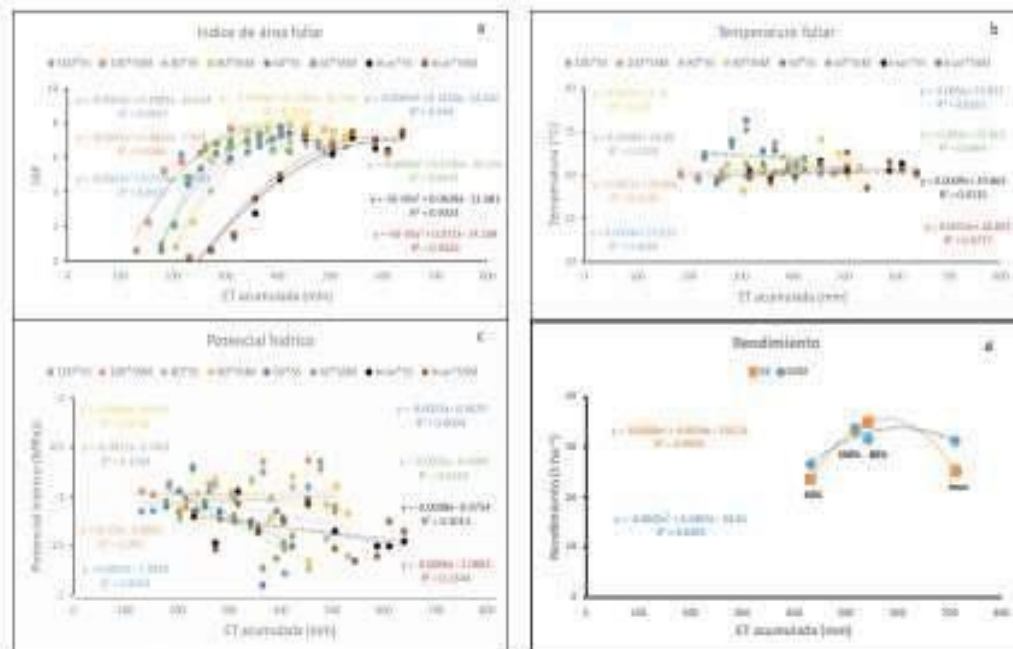


Figura 7. Interacciones entre evapotranspiración (ET) acumulada e índice de área foliar, temperatura foliar, potencial hídrico y rendimiento de dos variedades de sorgo con diferentes niveles de ET y riego por inundación. Fuente: elaborado con la información generada en esta investigación.

Figure 7. Interactions between accumulated evapotranspiration (ET) and leaf area index, leaf temperature, water potential and yield of two varieties of sorghum with different levels of ET and flood irrigation. Source: prepared with the information generated in this research.

² Zarazúa-Bolaños, I. P. (2013). Relaciones físicas entre Evapotranspiración, Temperatura Foliar y variables climáticas. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería. Tesis. <http://hdl.handle.net/123456789/1270>

CONCLUSIONES

Los tratamientos de riego o diferentes niveles de evapotranspiración (ET) afectaron significativamente los valores de índice de área foliar (IAF), temperatura superficial (Ts), potencial hídrico (Ψ_s) y rendimientos en ambas variedades de sorgo durante el ciclo del cultivo. Los tratamientos de 80 y 100% de ET son los que mostraron mayor IAF, menor Ts, mínimos valores de Ψ_s y como resultado mayor rendimiento de forraje seco con respecto a los tratamientos de 60% de ET y riego por gravedad.

En lo que respecta a los rendimientos de forraje verde y seco hubo diferencia estadística significativa entre tratamientos de riego y variedades. Los tratamientos de 80 y 100% de ET mostraron los mayores rendimientos al igual que la variedad Sorgo Silo Miel (SSM) en los diferentes niveles de ET. La variedad Súper Sorgo (SS) tuvo sus mejores producciones en los tratamientos con cintilla (80 y 100% de ET), ya que con el riego por inundación el rendimiento disminuyó en un 26%. En general las diferentes láminas de riego afectaron el IAF, Ts, Ψ_s y rendimiento, siendo el tratamiento de 60% el más afectado reduciendo el rendimiento alrededor de un 25%. En cuanto al volumen de agua aplicado en los tratamientos de riego con cintilla fue de 24 a 39% menor con respecto al aplicado en el riego por inundación con melgas irrigadas por gravedad.

De acuerdo con los resultados encontrados en este trabajo es recomendable programar los riegos tomando en cuenta la ET de referencia y los coeficientes de cultivo (Kc's) del cultivo, dependiendo de las diferentes etapas fenológicas del cultivo. Esta programación del riego es de vital importancia para eficientar el uso y manejo del agua en la agricultura.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados y analizados para este estudio se encuentran disponibles con el autor principal de esta

redacción (Felipe Zavala Borrego) o con el autor por correspondencia (Arturo Reyes González).

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores descritos en este documento declaran no tener ningún interés en competencia.

FONDOS

La inversión económica utilizada en esta investigación fue otorgada por el Campo Experimental La Laguna (INIFAP) de Matamoros, Coahuila, México.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Desarrolló la parte esencial de este experimento, recopilación e interpretación de datos y redacción literaria: F.Z.B. y A.R.G. Dirección principal y estructura de la investigación, redacción literaria y correcciones: A.R.G. Apoyó para el manejo teórico de la metodología: V.M.R.M. Ayudó en la definición de los cuestionamientos que generaron la investigación y canalización del experimento V.D.P.A.R. Apoyó en la consecución de la información e interpretación de datos: P.P.R. Apoyó en la revisión ortográfica y conceptualización: M.G.C.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Campo Experimental La Laguna (INIFAP) de Matamoros, Coahuila y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Unidad Laguna, por el trabajo conjunto que permitió el desarrollo de la investigación. Al personal técnico que ayudó en la instalación y desarrollo del experimento.

LITERATURA CITADA

- Abd-El-Mageed, T. A., & Semida, W. M. (2015). Organo mineral fertilizer can mitigate water stress for cucumber production (*Cucumis sativus* L.). *Agricultural Water Management*, 159, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.020>
- Acosta-Díaz, E., Acosta-Gallegos, J. A., Amador-Ramírez, M. D., & Padilla-Ramírez, J. S. (2008). Relación entre el índice de área foliar y rendimiento de del frijol hoja condiciones de secano. *Agricultura Técnica de México*, 34(1), 13-20.
- Alghory, A., & Yazur, A. (2019). Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. *Irrigation Science*, 37, 61-77. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0603-y>

- Anaya-Salgado, A., Reyes-González, A., Torres-Hernández, D., Isidro Requejo, L. M., & Martínez-Rodríguez, J. G. (2018). *Producción de forraje y calidad en sorgo y mijo en condiciones agroclimáticas de la región Lagunera en ciclo primavera verano*. En memoria de la XXIII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED (pp. 237-243). Gómez Palacio, Dgo., México: FAZ-UJED.
- Anderson, M., & Kustas, W. (2008). Thermal remote sensing of drought and evapotranspiration. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 89(26), 233-240. <https://doi.org/10.1029/2008EO260001>
- Bolaños-Aguilar, E. D., Emile, J. C., & Audibert, G. (2012). Rendimiento y calidad de híbridos de sorgo con y sin nervadura café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(2), 441-449.
- Buzkurt-Çolak, Y., Yazar, A., Alghory, A., & Tekin, S. (2021). Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for differentially irrigated quinoa with surface and subsurface drip systems. *Irrigation Science*, 39, 81-100. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00681-4>
- Castro-Montes, I., López-Peralta, M. C., & González-Hernández, V. A. (2009). Evaluación morfo-fisiológica de brotes de maíz sometidos a selección in vitro bajo estrés osmótico Montecillo Texcoco México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(4), 281-288.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2016). Clasificación de la intensidad de sequía. Consultado el 08 de diciembre, 2019, desde http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=237:clasificacion-de-la-severidad-de-la-sequia&catid=16:general (08/12/2019).
- Carrillo, J. C., & Ruiz, J. (2004). Producción de forraje en sorgo y mijo: variables de crecimiento. *Agronomía Mesoamericana*, 15(1), 69-76.
- Durigon, A., & de Jong van Lier, Q. (2013). Canopy temperature versus soil water pressure head for the prediction of crop water stress. *Agricultural Water Management*, 122, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.014>
- Fernández, G., & Johnston, M. (2006). Crecimiento y temperatura. En F. A. Squeo, & L. Cardemil. *Fisiología vegetal* (1-28). Chile: Ediciones Universidad de La Serena. ISBN: 970-625-024-7.
- Fisher, G., Torres-Carbajal, F., & Torres-Bazurto, J. (1997). Efecto de la temperatura del suelo sobre la planta. I. Crecimiento y desarrollo. *Revista Comafi*, 24(3), 78-92.
- Gálvez-Pavez, R., Callejas-Rodríguez, R., & Reginato-Meza, 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*, 29(2), 175-179. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000200023>
- Gao, S., Niu, Z., Huang, N., & Hou, X. (2013). Estimating the leaf area index, height and biomass of maize using HJ-1 and RADARSAT-2. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 24, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.02.002>
- García-Berber, A., Ramírez-Valencia, F. J., & Santoscoy-Padilla, A. (2016). Super Sorgo: El sorgo dulce como una alternativa rentable para algunas regiones del trópico mexicano. [Folleto Técnico No. 15, INIFAP]. Tecmán, Colima, México.
- García-López, A., Cun-González, R., & Montero-San José, L. (2010). Efecto de la hora del día en el potencial hídrico foliar del sorgo y su relación con la humedad en el suelo. *Revista Ciencia Técnicas Agropecuarias*, 39(3), 7-11.
- Godoy-Avila, C., Pérez-Gutiérrez, A., Torres E., C. A., Hermosillo, L. J., & Reyes J., I. (2003). Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial. *Revista Agrociencia*, 3(2), 107-115.
- Him-Lu, T., Radnick, D. R., DeJonge, K. C., Bai, G., Njoku-Nakabuye, H., Katimbo, A., ... Heeren, D. M. (2020). Differences in soil water changes and canopy temperature under varying water-nitrogen sufficiency for maize. *Irrigation Science*, 38, 519-534. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00683-2>
- Kallountzos, D., Alexiou, I., Kotsopoulos, S., Zavakos, G., & Vyras, P. (2006). Effect of subsurface drip irrigation on cotton plantations. *Water Resource Management*, 21, 1341-1351. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9085-4>
- López-Olivari, R., & Ortega-Klose, F. (2021). Response of red clover to deficit irrigation: dry matter yield, populations, and irrigation water use efficiency in southern Chile. *Irrigation Science*, 39, 173-189. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00693-0>
- Martínez-Villa, J., Silva-Sáenz, R. A., & Cuéllar-Villareal, E. J. (2005). *Guía para cultivar sorgo forrajero de riego para pastoreo, verdeo y heno en el norte y centro de Coahuila* [Folleto para productores No. 7, INIFAP]. Coahuila, México.
- Montemayor-Trejo, J. A., Lara-Mirales, J. L., Woo-Reza, J. L., Munguía-López, J., Rivera-González, M., & Trucíos-Casiano, R. (2012). Producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en tres sistemas de irrigación en la Comarca Lagunera de Coahuila y Durango, México. *Agrociencia*, 46(3), 267-278.
- Montemayor-Trejo, J. A., Olague-Ramírez, J., Fortis-Hernández, M., Sam-Bravo, R., Leos-Rodríguez, J. A., Salazar-Sosa, E., ... Chavarría-Galicia, J. A. (2007). Consumo de agua en maíz forrajero con riego subsuperficial. Torreón Coahuila México. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 163-168.
- Nava-Berumen, C. A., Rosales-Serna, R., Jiménez-Ocampo, R., Carrete-Carreón, F. O., Domínguez-Martínez, P. A., & Murillo-Ortiz, M. (2017). Rendimiento y valor nutricional de tres variedades de sorgo dulce cultivadas en cuatro ambientes de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(2), 147-155. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i2.4426>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2019). Department of Economic and Social Affairs. Consultado el 05 de febrero, 2020, desde <http://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospect-2019.html>
- Panda, R. K., Behera, S. K., & Kashyap, P. S. (2003). Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions. *Agricultural Water Management*, 63(1), 37-56. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00099-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00099-4)
- Parra-Quezada, R. A., Rodríguez-Ontiveros, J. L., & González-Hernández, V. A. (1999). Transpiración, potencial hídrico y prolija en zarzamora bajo déficit hídrico. México. *Terra*, 17(2), 125-130.
- Patel, N., & Rajput, T. B. S. (2007). Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. *Agricultural Water Management*, 88(1-3), 209-223. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.017>

- Payán-Ochoa, S., Morales-Maza, A., Valdez-Gascón, B., Martín-Rivera, M. H., & Barra-Flores, F. A. (2013). Programación del riego en vid (*Vitis vinifera* L.) de mesa perlette y sustrato con sensores de humedad. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 19(2), 163-172. <https://doi.org/10.5154/r.chsh.2012.04.024>
- Peyero, J. O., Tarkenton, D. D., Irmak, S., Davison, D., & Petersen, J. L. (2008). Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 95(8), 895-908. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.02.015>
- Pino V., E., Montalván D., Vera M., A., & Ramos F., L. (2019). La conductancia estomática y su relación con la temperatura foliar y humedad del suelo en el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), en periodo de maduración de frutos, en zonas áridas: La Yarada, Tacna, Perú. *IDESIA*, 37(4), 55-64. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000400055>
- Quintal-Ortiz, W. C., Pérez-Gutiérrez, A., Latournerie-Moreno, L., May-Lara, C., Ruiz-Sánchez, E., & Martínez-Chacón, A. J. (2012). Uso de agua, potencial hídrico y rendimiento en chile habanero (*Capiscum chinense* Jacq.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(2), 155-160.
- Reyes-González, A., Rivera-González, M., Delgado-Ramírez, G., Reta-Sánchez, D. G., & Sánchez-Duarte, J. I. (2019a). Programación del riego mediante el uso de un atmómetro. *AGROFAZ - Journal of Environmental and Agroecological Science* 1(1), 68-79.
- Reyes-González, A., Reta-Sánchez, D. G., Sánchez-Duarte, J. I., Ochoa-Martínez, E., Rodríguez-Hernández, K., & Preciado-Rangel, P. (2019b). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones *in situ*. *Terra Latinoamericana* 37(3), 279-290. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485>
- Reyes-González, A., Martínez-Rodríguez, J. G., Palomo-Rodríguez, M., Faz-Comeras, R., Cruz-Chaires, J. J., & Sánchez-Duarte, J. I. (2011). Producción de avena forrajera con riego por goteo subsuperficial en la Comarca Lagunera. En memoria de la XXIII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED (pp. 189-195). Gómez Palacio, Dgo., México: FAZ-UJED.
- Ríos-Flores, J. L., Torres-Moreno, M., Castro-Franco, R., Torres-Moreno, M. A., & Ruiz-Torres, J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del D9-017, Comarca Lagunera, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 47(1), 93-107.
- Rodríguez-Pérez, L. (2006). Implicaciones fisiológicas de la osmorregulación en plantas. *Agronomía Colombiana*, 24(1), 28-37.
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). Sap pressure in vascular plants. Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 148(3668), 339-346. <https://doi.org/10.1126/science.148.3668.339>
- Stewart, D. W., Costa, C., Dwyer, L. M., Smith, D. L., Hamilton, R. I., & Ma, B. L. (2003). Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agronomy Journal*, 95(6), 1465-1474. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1465>
- Tarqui-Delgado, M., Chipana-Rivera, R., Mena-Herrera, F. C., Quino-Luna, J. J., Tallacagua-Terrazas, R., & Gutiérrez-Villalobos, S. (2017). Índice de estrés hídrico del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*), mediante termometría infrarroja a diferentes láminas de riego. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 4(1), 7-18.
- Vargas-Rodríguez, C. F. (2005). Valoración nutricional y degradabilidad ruminal de genotipos de sorgo forrajero (*Sorghum* sp). *Agronomía Mesoamericana*, 16(2), 215-223.
- Wull, G. W., & Kanemasu, E. T. (1990). Carbon dioxide exchange rates in wheat canopies. II. Photosynthetic and phytomass production efficiencies. *Amsterdam. Agricultural and Forest Meteorology*, 49(2), 103-122. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90045-8](https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90045-8)
- Westgate, M. E., & Boyer, J. S. (1985). Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem, and silk growth at low water potentials in maize. *Planta*, 164(4), 540-549. <https://doi.org/10.1007/BF00395973>
- Williams, L. E., Baeza, P., & Vaughn, P. (2012). Midday measurements of leaf water potential and stomatal conductance are highly correlated with daily water use of Thompson Seedless grapevines. *Irrigation Science*, 30, 208-212. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0276-2>

7.2.- Artículo 2

EFFECTO DE LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACION EN AREA FOLIAR, POTENCIAL HIDRICO Y RENDIMIENTO DE MAIZ FORRAJERO EVAPOTRANSPIRATION RATE EFFECT ON LEAF AREA, WATER POTENTIAL AND YIELD OF FARAGE CORN

FELIPE ZAVALA BORREGO¹, ARTURO REYES GONZÁLEZ^{2*}, VICENTE DE PAUL ALVAREZ
REYNA^{1*}, PEDRO CANO RÍOS^{1**}, VICTOR MANUEL RODRÍGUEZ MORENO³.

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna Carretera a Santa Fé y Periférico s/n
Col Valle Verde C.P. 27054 Torreón Coahuila, México. Tel. 8713320577. (freedom78_@hotmail.com).

^{1*}Tel. 8717279211. (vdpar_190754@hotmail.com). ^{1**}Tel. 8711749164. (canorp49@hotmail.com).

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental La
Laguna. Blvd. José Santos Valdez No. 1200 pte Col. Centro. 27440 Matamoros Coahuila. Tel. 01
(800) 088222, ext. 82414. (reyes.arturo@inifap.gob.mx), ORCID 0000-0002-6983-0905.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental
Pabellón. Km 32.5 Carretera Aguascalientes-Zacatecas, Col. Pabellón de Arteaga Centro. 20670.
Aguascalientes. Tel. 01 (800) 088222, ext. 82525. (rodriguez.victor@inifap.gob.mx), ORCID
0000-0003-0238-5381.

^{*}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), 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), potencial hídrico foliar (ψ_s), temperatura superficial (T_s), rendimiento de forraje seco y eficiencia en el uso de agua. Los diferentes niveles de ET afectaron el IAF, ψ_s , T_s 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 (K_c).

PALABRAS CLAVE

Zea mays L., diferencial térmico, materia seca, riego por goteo.

ABSTRACT

Due to the increasing demand for fresh water in the world, it is necessary to apply more accurate the irrigation in agriculture. The objective of this work was to determinate the effect of different irrigation treatments on the leaf area index (LAI), leaf water potential (ψ_h) and yield in forage corn (*Zea mays* L.) using drip irrigation system. The study was carried out in summer of 2019 at the INIFAP Matamoros, Coahuila, Mexico. Three levels of evapotranspiration (ET) were used (60, 80, and 100%) and a flood irrigation system as a control. Three drought tolerant and high yielding corn varieties were used. The experimental design was randomized complete block design with four replications, with treatments arrangement in divide plots. The main plot was the irrigation treatments and the secondary plot corn varieties. The variables measured were foliar area index (LAI), leaf water potential (ψ_s), surface temperature (T_s), dry forage yield and water use efficiency. The different levels of ET affected IAF, ψ_h , T_s and crop yields, conditioning the biomass crop production. The results indicated that the volume of water applied in treatments with subsurface drip irrigation was 27 to 40% lower compared to flood irrigation. The water use efficiency was evaluated; the best results were obtained when the water was

1 applied according with the crop phenological stages with treatment of 100% ET affected by a crop
2 coefficient (Kc).

3 **KEY WORDS**

4 *Zea mays* L., thermal differential, dry matter, drip irrigation.

5 **INTRODUCCIÓN**

6 Las predicciones futuras no son del todo favorables, pues la población mundial estimada para el año 2050
7 será de 10 a 12 mil millones de personas. Esto ocasionaría un desabasto en el suministro del agua, ya que
8 el recurso hídrico disminuye con el tiempo. La agricultura es el mayor consumidor de agua en el mundo
9 utilizando más del 80% de agua para usos de irrigación (CONAGUA, 2016). El problema de la
10 disponibilidad y calidad de agua para la agricultura se debe a que otros sectores como la población,
11 industria y ganadería se han incrementado generando una mayor demanda de agua y reduciendo el
12 volumen de agua destinado para la agricultura. Además, la baja eficiencia en el uso del agua, al aplicar
13 volúmenes mayores a los que requiere el cultivo, agrava el problema (Reyes et al., 2019a).

14 La calidad del agua es también un factor que limita el uso del agua para la agricultura en la Comarca
15 Lagunera. Azpilcueta et al. (2017) encontraron que los altos contenidos de sal, sodio y metales pesados en
16 el agua subterránea de la Comarca Lagunera sobrepasan los límites máximos permisibles por la norma
17 oficial del agua para uso agrícola y con el consecuente riesgo para la salud humana y el ambiente.

18 La Comarca Lagunera pertenece al distrito de riego 017 y cuenta con una superficie para riego de 167 mil
19 ha, donde los cultivos predominantes son los forrajes como: maíz, alfalfa, sorgo y avena. El maíz forrajero
20 en los últimos cuatro años ha sido el principal cultivo en la región con una superficie actual de 54 mil ha
21 (SADER, 2019). En la actualidad la disponibilidad y calidad del agua genera la necesidad de adaptar y
22 modificar los sistemas de producción del maíz para forraje en la Comarca Lagunera mediante el uso de
23 nuevas tecnologías de riego (Montemayor et al., 2018).

24 La distribución del área foliar y la radiación dentro del dosel de la planta son algunos de los factores que
25 afectan los procesos fotosintéticos de la planta que inciden directamente en el rendimiento del cultivo del
26 maíz forrajero, a mayor energía luminica captada mayor será la eficiencia fotosintética de la planta. (Wall

1 y Kanemasu, 1990). El IAF está en función de la radiación dentro del espectro visibles de 400 a 700
2 nanómetros que está disponible para ser usada por el cultivo y así realizar fotosíntesis e impactar el
3 crecimiento y desarrollo de las plantas, esto afecta la acumulación de materia seca la cual es influenciada
4 por la tasa fotosintética que la planta logra interceptar y la nutrición mineral que recibe (Intagri, 2016)

5 Uno de los principales factores que influyen en el crecimiento de las plantas y que puede ocasionar
6 pérdidas económicas para los agricultores, es el estrés hídrico (Gao et al., 2007). El estrés hídrico reduce
7 el crecimiento de las hojas y restringe el crecimiento celular de la misma. Al reducirse el tamaño de las
8 hojas se reduce el área foliar fotosintética afectando directamente los procesos metabólicos de la planta,
9 reduciendo la transpiración y aumentando la resistencia estomática de la planta (Parra et al., 1999). Al
10 incrementarse el estrés hídrico debido a la restricción de humedad en el cultivo los valores para el
11 potencial hídrico de la hoja también son más negativos, generando un crecimiento vegetativo inadecuado
12 y menor producción de biomasa (Ismail, 2010; May et al., 2011). Para una evaluación aproximada del
13 estado hídrico de la planta se deben considerar valores tomados del potencial hídrico foliar, ya que la parte
14 foliar es la que controla el movimiento del agua a nivel celular, en el tejido y órganos de la planta (Liu et
15 al., 2012).

16 Morales et al. (2006) encontraron que plantas con exposición a temperaturas altas afectan negativamente
17 algunas variables de crecimiento como son la producción de biomasa, tasa relativa de crecimiento, tasa de
18 asimilación de CO₂, superficie foliar y el intercambio gaseoso. Rada et al (2005); comentan que la
19 temperatura foliar se incrementa hasta el grado de causar daños por calor, debido a que el estrés hídrico
20 aumenta reduciendo la conductancia estomática de la hoja. La temperatura de la hoja está en función de la
21 radiación solar que esta intercepta, entre más radiación capte la hoja mayor será su temperatura, ya que la
22 temperatura de la hoja condiciona al equilibrio energético del dosel (Panda et al. 2003). Jarma et al. (2012)
23 señalan que las altas temperaturas ambientales generan altas temperaturas al interior de la planta afectando
24 la fotosíntesis neta (con altas temperaturas se reduce por efecto del aumento de la fotorrespiración),
25 respiración, relaciones hídricas, estabilidad de las membranas, regulación hormonal, el metabolismo
26 secundario, reduciendo el crecimiento de las plantas especialmente aquellas categorizadas dentro del

1 grupo de plantas C3. Chaves et al. (2017) encontraron que, las temperaturas altas producen estrés térmico
2 en las plantas afectando las respuestas moleculares, bioquímicas y fisiológicas de las plantas, dentro de las
3 cuales destacan estructura y el metabolismo celular, la respiración, la aclimatación de la Q_{10} , la estabilidad
4 de las membranas, la producción de proteínas de estrés, la fotosíntesis, los cambios hormonales que
5 regulan la respuesta de las plantas en el campo y la aclimatación al estrés térmico.

6 Por otro lado, es necesario incrementar el uso eficiente del agua en agricultura para producir el doble de
7 alimentos en los próximos 30 años (Salazar et al., 2014). Medrano et al. (2007) comentan que el precio del
8 agua gastada por la planta (respiración) es inevitablemente alto debido a que la producción de biomasa
9 (fotosíntesis) está en función del agua destinada para su producción. Esto se debe a que ambos procesos
10 son simultáneos, la entrada del dióxido de carbono y la salida del agua utilizan la misma vía, los estomas
11 en las hojas y cuanto más abiertos están, más fácilmente entra el CO_2 pero también más rápidamente se
12 escapa el agua.

13 El objetivo fue evaluar el efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre el índice de área foliar,
14 relaciones hídricas, temperatura foliar y rendimiento en maíz forrajero bajo un sistema de riego por goteo
15 en un clima árido como La Comarca Lagunera, con la finalidad de estimar el régimen de riego que tenga
16 mayor relación con el uso eficiente del agua, relacionando la producción de materia seca final y el
17 volumen total de agua utilizado.

18 MATERIALES Y MÉTODOS

19 El estudio se realizó en las instalaciones del Campo Experimental La Laguna, ubicado en Matamoros,
20 Coahuila, México. Esta región se localiza entre los $102^{\circ} 00'$ y $104^{\circ} 47'$ O y $24^{\circ} 22'$ y $26^{\circ} 23'$ N. Se pueden
21 alcanzar temperaturas máximas de hasta 45 grados, las temperaturas mínimas oscilan de 8 a 0 grados con
22 una temperatura media anual de $24^{\circ}C$, la precipitación media anual es de 242 mm por año y la humedad
23 relativa varía desde 31% en abril hasta 60% de agosto a octubre. La Comarca Lagunera es una zona que se
24 caracteriza por sus limitados recursos hídricos, por su clima seco muy caluroso en verano y con inviernos fríos.
25 La siembra se realizó en un suelo de textura migajón arcillosa-arenosa, en seco, colocando una semilla a
26 una distancia de siembra de 12 cm y 76 cm de separación entre surcos para alcanzar una densidad de

1 población de 105 mil plantas por ha. Las variedades de maíz utilizadas fueron MH 431, MH 383 y SB
2 302. La dosis de fertilización que se utilizó fue: 200-100-00 (NPK), esto es 200 unidades de nitrógeno,
3 100 unidades de fósforo por hectárea, utilizando como fuente de nitrógeno urea y sulfato de amonio y
4 como fuente de fósforo el MAP. Se aplicó todo el fósforo y la mitad del nitrógeno con urea al 46%, al
5 momento de la siembra y el resto del nitrógeno con sulfato de amonio inyectándose cada 15 días de
6 acuerdo a la fenología del cultivo mediante el sistema de riego por goteo utilizando un inyector Venturi.
7 En el tratamiento testigo por inundación se aplicó la otra mitad de nitrógeno manualmente a los 35 Días
8 Después de la Siembra (DDS), utilizando como fuente de Nitrógeno sulfato de amonio.

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

18 La infraestructura del RGS incluyó cintilla enterrada a 0.3 m, con un espaciamiento entre líneas de 0.76 m.
19 La cinta utilizada fue la RO DRIP 8 mil con espesor de pared de 0.200 mm y diámetro interior de 16 mm,
20 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
21 riego fue de 8 PSI. La frecuencia de riego con el RGS fue cada tercer día. En cuanto al riego por gravedad
22 se diseñó una melga de 15 m de ancho por 30 m de largo. Se dieron siete riegos de auxilio con una lámina
23 promedio de 100 mm cada uno.

24 El índice de área foliar (IAF) se midió utilizando el ceptómetro PAR / LAI modelo Lp-80 de AccuPAR
25 (Decagon Devices, Inc. Pullman, WA, EE. UU.). La barra del ceptómetro se colocó en un ángulo de 45° a
26 través del surco del cultivo para medir la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa (PAR). La

intercepción 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 horas en días despejados para minimizar la radiación difusa del cielo por las nubes (Stewart et al., 2003). Las mediciones de IAF se realizaron semanalmente.

El potencial hídrico (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 horas cada semana. Estas se hicieron en la segunda hoja superior del cultivo, tomando dos hojas por tratamiento y repetición.

Para la medición de la temperatura 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 metros, IAF de $4.0 \text{ m}^2/\text{m}^2$ y una cobertura vegetal del suelo del 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).

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 3 metros lineales en los 2 surcos centrales de cada tratamiento (4.56 m^2), después se tomó una muestra de 700 g y se secó en una estufa de aire forzado a temperatura de 65°C durante 72 horas, para posteriormente determinar la producción de materia seca.

La eficiencia en el uso de agua se determinó dividiendo el peso de materia seca (kg ha^{-1}) entre el volumen total de agua aplicado (m^3) 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).

1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

3 La Figura 1 muestra el comportamiento de IAF de tres variedades de maíz con diferentes tratamientos de
4 riego. Por ejemplo, la Figura 1 (a) muestra a la variedad MH 431, la cual tiene comportamiento similar en
5 los tratamientos de 100, 80 y 60% de ET desde los 15 hasta los 37 DDS. Posterior a este periodo los
6 valores de IAF son mayores en los tratamientos de 100 y 80% de ET. En el tratamiento de riego de 100%
7 de ET el valor máximo fue de $6.87 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ a los 71 DDS, mientras que para el tratamiento de riego al 80%,
8 el valor máximo fue de $6.63 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ a los 85 DDS. No obstante, el tratamiento de riego de 60% de ET
9 mostró valores superiores a los valores observados en el tratamiento de riego por gravedad, desde los
10 primeros días del cultivo hasta los 57 DDS, a partir de esta fecha los valores de IAF fueron similares en
11 ambos tratamientos.

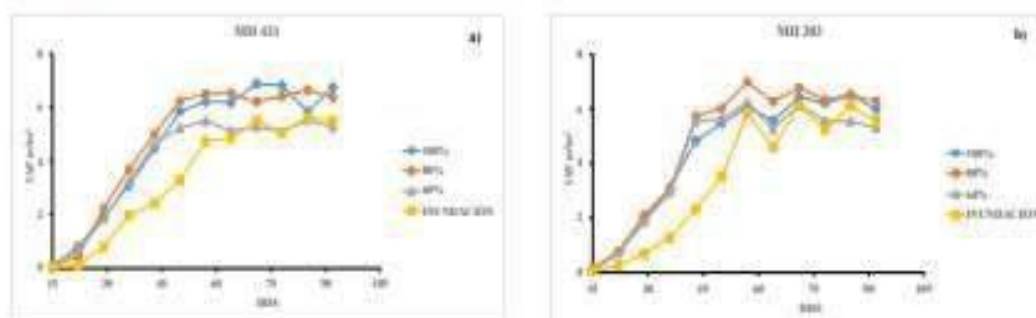
12 Respecto a las variedades MH 383 y SB 302 Figuras 1 (b) y 1 (c) el comportamiento de IAF durante el
13 ciclo del cultivo fueron similares a los discutidos anteriormente en la variedad MH 431. Donde los
14 tratamientos con riego por goteo fueron similares hasta los 37 DDS. Después los tratamientos de riego de
15 100 y 80% de ET se mantienen por arriba de los tratamientos de 60% de ET e inundación. Esto se debió a
16 que en los tratamientos de 100 y 80% las plantas tenían suficiente humedad para seguir creciendo durante
17 todo el ciclo del cultivo, mientras que en los tratamientos de 60% e inundación la humedad del suelo
18 estaba limitada o mal distribuida por la calendarización del riego en el caso del riego por inundación.
19 Resultados similares fueron reportados por Reyes et al (2019b), quienes reportaron bajos valores de IAF
20 en tratamientos donde hubo restricción de humedad de suelo en un maíz sembrado al Este de Dakota del
21 Sur, USA.

22 Intagri (2016) publicó en un estudio realizado sobre la correlación obtenida mediante un análisis de
23 regresión lineal entre el IAF y el rendimiento y acumulación de biomasa del maíz para grano a una
24 densidad de $71,000 \text{ plantas ha}^{-1}$, la relación observada fue directa; al incrementarse una unidad de IAF se
25 incrementa la producción hasta 567 kg ha^{-1} . Se establece que el IAF máximo se alcanza en la etapa de
26 floración de la planta de maíz, lo cual coincide con la etapa donde encontramos mayor valor para el IAF

1 en nuestro experimento. Después de que la planta alcanza el valor máximo de IAF esté deja de
 2 incrementarse y su tendencia es lineal como una especie de meseta, tal como se aprecia en las gráficas (a),
 3 (b) y (c), de la Figura 1.

4 Los resultados reportados en esta investigación están en el rango de valores reportados por (Carrillo y
 5 Ruiz, 2004) quienes observaron valores de IAF en sorgo de 8.96 para el primer corte y 5.6 para el segundo
 6 corte en sorgo para forraje, remarcando que en estos rangos se origina una mayor correlación entre el IAF
 7 y la tasa de crecimiento del cultivo. Yoshida (1972); menciona que la producción de biomasa y el IAF
 8 están relacionadas; a mayor área vegetal, mayor será la captación energía luminica y mayor será la
 9 producción de biomasa, señalando valores óptimos de IAF de 5 para maíz. Los valores de IAF observados
 10 en este trabajo (6.12), son mayores que los reportados por Yoshida (1972) y Montemayor et al (2012), este
 11 último reportó valores máximos de IAF (5.0) en maíz regado con riego por goteo en la Comarca Lagunera.

12 En el Cuadro 1 se observa que al comparar las medias de IAF (Tukey, $p \leq 0.05$) no hubo diferencia
 13 estadística significativa entre los tratamientos de 100 y 80% de ET, pero si se encontró diferencia
 14 significativa de los tratamientos de 100 y 80% con respecto al tratamiento donde se aplicó el 60% de la
 15 ET. De la misma manera, se observó diferencia significativa entre el tratamiento de riego al 60% de ET
 16 con el riego por inundación.



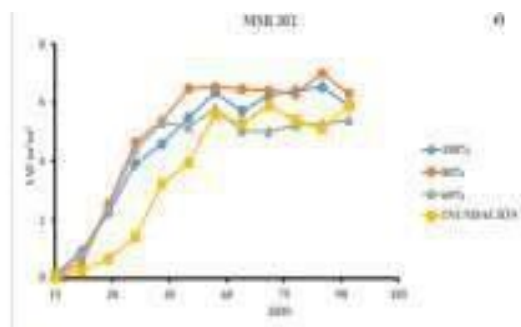


Figura 1. Valores de IAF para tres variedades de maíz con diferentes niveles de riego en el Campo Experimental Laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México.

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

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

	Tratamiento	IAF	PH	°C	MS	EUA
T ₁	RGS, 100% ET	4.50 a	-1.04 a	30.97 a	18.98 a	3.66 a
T ₂	RGS, 80% ET	4.77 a	-1.08 a	30.84 a	19.57 a	3.61 a
T ₃	RGS, 60% ET	4.12 b	-1.23 b	32.71 b	15.63 b	3.62 a
T ₄	Inundación	3.46 c	-1.37 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, $p \leq 0.05$).

POTENCIAL HÍDRICO

El potencial hídrico de tres variedades de maíz con diferentes tratamientos de riego se muestra en la Figura 2. La Figura 2 (a) muestra el potencial hídrico de la variedad MH 431, el cual es semejante en los tratamientos de riego por goteo desde el comienzo de la toma de datos hasta 43 DDS, aunque, a los 29 DDS el tratamiento de riego por gravedad mostró el valor más negativo (-1.5 MPa) con respecto a los tratamientos de riego por goteo (100, 80 y 60% de ET). A partir de los 43 DDS, los tratamientos de riego

de 100 y 80% de ET presentaron los valores menos negativos que los tratamientos de riego al 60% de ET y riego por gravedad. Los valores más negativos de potencial hídrico para la variedad MH 431 fueron a los 71 DDS, para el tratamiento de 100% de ET fue -1.25 MPa, al de 80% de ET fue -1.28 MPa, al de 60% de ET fue -1.92 MPa y para el riego por gravedad fue -2.0 MPa. Mismo comportamiento de potencial hídrico se presentó con las variedades MH 383 y SB 302 durante el ciclo de cultivo. A partir de los 50 DDS los tratamientos comienzan a mostrar el efecto causado por las diferentes láminas de agua aplicadas según la ET para cada riego (100, 80 y 60% de ET) e inundación. En general los valores menos críticos se encontraron en los tratamientos de riego de 100 y 80% de ET, mientras que los más críticos se reportaron en el tratamiento de 60% de ET y en el tratamiento de riego por inundación a partir de los 50 DDS. Cabe mencionar que los altibajos en los valores de potencial hídrico en el tratamiento de inundación después de los 64 DDS se debieron principalmente a la programación del riego.

Westgate y Boyer (1985); encontraron que un valor de potencial hídrico en la hoja del maíz de -1.0 MPa afecta el grado de tolerancia al estrés deteniendo su crecimiento. 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.

De acuerdo con el análisis estadístico (Cuadro 1), las comparaciones de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) de los tratamientos de riego no presentaron diferencia significativa entre los tratamientos de riego de 100 y 80% de ET. Sin embargo, el tratamiento de riego de 60% de ET arrojó diferencia estadística significativa con respecto a los tratamientos de riego de 100 y 80% de ET y riego por inundación. El tratamiento de riego por inundación fue estadísticamente diferente a los tres tratamientos de riego por goteo al 100, 80 y 60% de ET.

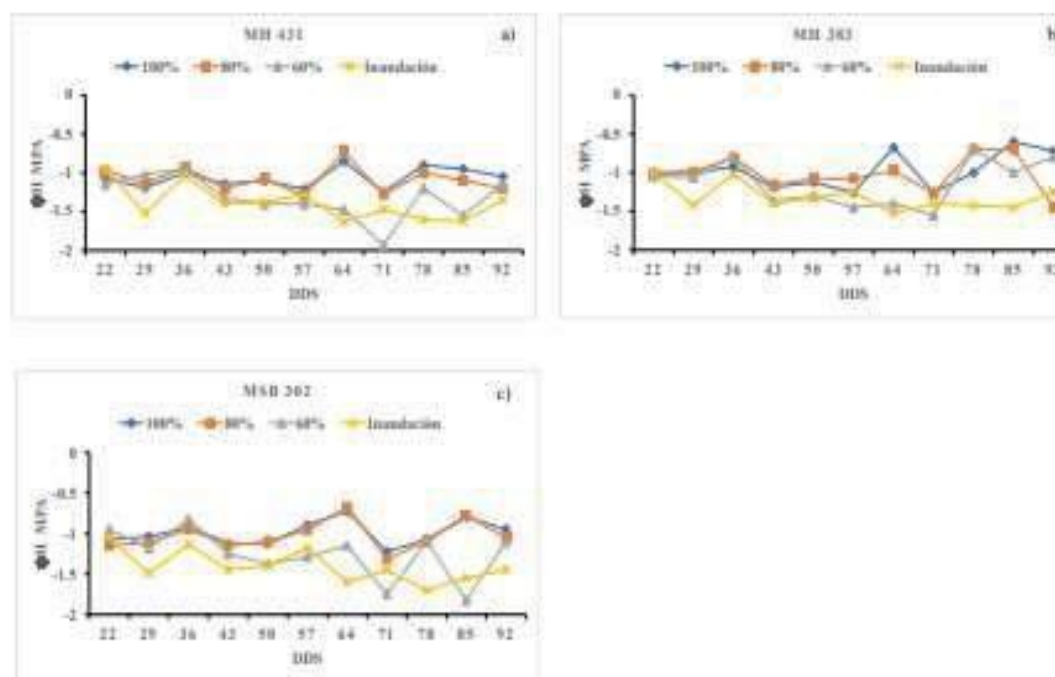


Figura 2. Valores de potencial hídrico para tres variedades de maíz bajo diferentes niveles de riego en el Campo Experimental Laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México.

TEMPERATURA FOLIAR

La Figura 3 (a) presenta los resultados de temperatura para la variedad MH 431 con los tratamientos de riego por goteo al 100, 80 y 60% de ET y el tratamiento de riego por inundación. La Figura muestra una respuesta semejante entre los tratamientos de riego al 100%, 80% y el tratamiento de riego por gravedad, mientras que el tratamiento de riego al 60% de ET fue el que mostró los valores máximos de temperatura

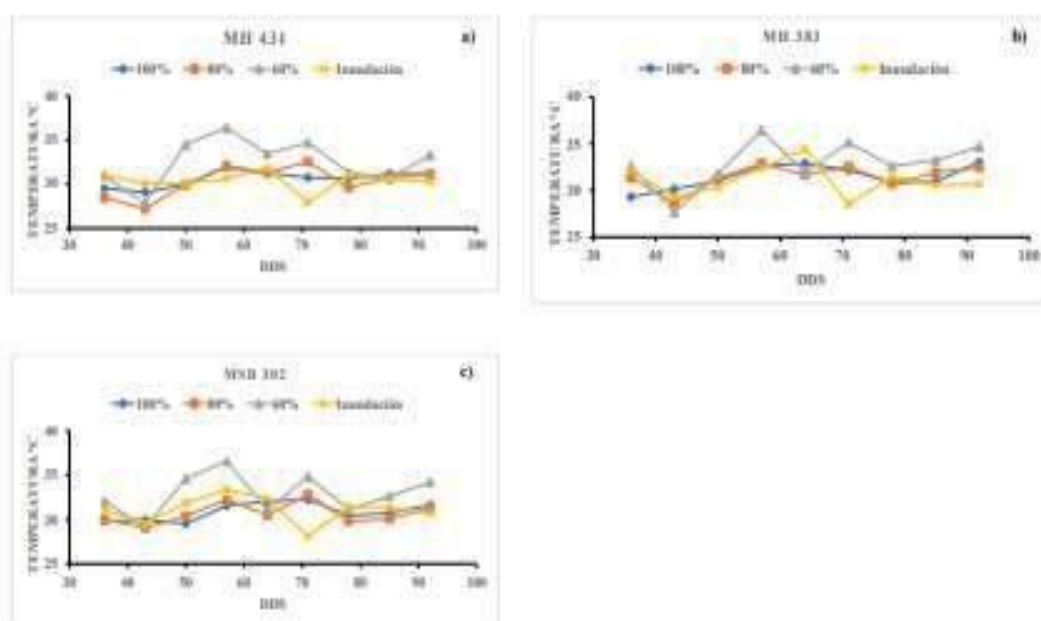
comparados con los otros tratamientos. Con el tratamiento de riego por goteo al 100% de ET, la temperatura superficial de la hoja de la variedad MH 431 osciló entre 29.08 y 31.93 °C registrados a los 43 y 57 DDS, respectivamente. En el tratamiento de riego por goteo al 80% de ET, los valores de temperatura tuvieron una variación entre 27.23 y 32.53 °C observados a los 43 y 71 DDS. Los valores de temperatura para el tratamiento de riego al 60% de ET fue 27.82 y 36.58 °C registrados a los 43 y 57 DDS, respectivamente. Los valores obtenidos con el tratamiento de riego por gravedad para la variedad MH 431 fueron; mínima de 27.93 °C a los 71 DDS y máxima de 31.8 °C registrado a los 64 DDS.

Las Figuras 3 (b) y 3 (c) muestran el comportamiento de temperatura foliar de la variedad MH 383 y SB 302 en los cuatro tratamientos de riego (100, 80, 60% de ET y riego por inundación), presentando la misma tendencia mostrada por la variedad MH 431. Donde los valores de temperatura fueron similares en los tratamientos de riego al 100, 80% de ET y el tratamiento de riego por gravedad, pero diferentes a los observados en el tratamiento de riego al 60% de ET. En todas las Figuras discutidas (Figura 3, a, b y c) se observa una disminución de temperatura en las tres variedades (MH 431, MH 383 y MSB 302) en el tratamiento de riego por gravedad a los 71 DDS, esto se debió a que la temperatura se tomó al día siguiente del riego.

Según Porter y Delecolle (1988); 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 y Bonhomme (1991), mencionan que la temperatura máxima que afecta el desarrollo del maíz está entre 40 y 44 °C. La temperatura máxima registrada en este experimento fue de 36.58 °C, por lo que se puede deducir que la variabilidad en la producción de biomasa se debe a la relación de todas las variables evaluadas en este experimento.

Aunque, por otra parte, Hou et al (2014); establecieron un experimento con un rango de temperatura base de 10 hasta 30 °C para el desarrollo adecuado del maíz. Si consideramos esta afirmación como cierta, se

1 concluiría que el tratamiento que mayor temperatura (36.58 °C) mostro en este experimento fue el que
 2 tuvo menor producción de biomasa.
 3 Al analizar el Cuadro 1, los datos de temperatura foliar mediante la prueba de (Tukey, $p \leq 0.05$) se
 4 determinó que no existe diferencia significativa entre los tratamientos de riego al 100, 80% y riego por
 5 inundación. Sin embargo, se observó diferencia estadística significativa en el tratamiento de riego por
 6 goteo al 60% de ET con respecto a los tres tratamientos de riego 80, 100% de ET y el tratamiento de riego
 7 por gravedad.



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

10

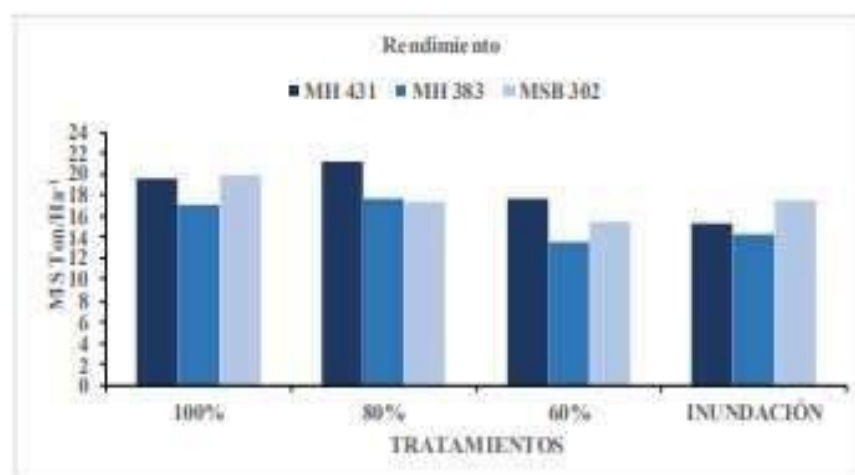
11 **MATERIA SECA**

12 La Figura 4 presenta los resultados de producción de materia seca de tres variedades de maíz con cuatro
 13 tratamientos de riego. La variedad SB 302 mostró el mayor rendimiento de materia seca en el tratamiento
 14 de 100% con una producción aproximada de 20 t ha⁻¹ y el rendimiento más bajo se obtuvo en el
 15 tratamiento de riego al 60% de ET con una producción de 15.5 t ha⁻¹. La variedad de maíz MH 431 en

combinación 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}). 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 y 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 aquí obtenidos fueron 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}).

Al someter los resultados obtenidos de la variable "materia seca" al análisis estadístico se determinaron diferencias significativas entre los tratamientos de riego al 100 y 80% respecto a los tratamientos de riego al 60% de ET y riego por inundación, más, sin embargo, no hubo 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 fueron 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.



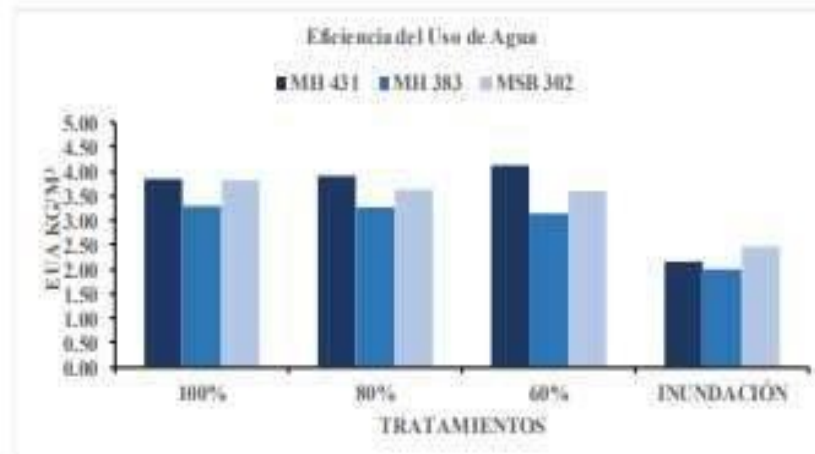
1 **Figura 4. Graficas del rendimiento de materia seca de tres variedades de maíz con diferentes**
2 **tratamientos de riego en el campo experimental laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México.**
3 **2019.**

4 **EFICIENCIA EN EL USO DE AGUA**

5 Para los tratamientos de 100, 80 y 60% de ET se aplicaron volúmenes de agua de 5,180, 5,420 y 4,320 m³,
6 respectivamente, mientras que para el tratamiento de riego por inundación el volumen fue de 7100 m³.

7 La Figura 5 presenta los resultados de eficiencia en el uso de agua (EUA) que se obtuvieron de tres
8 variedades de maíz en cuatro tratamientos de riego. La variedad MH-431 con el tratamiento de riego al
9 60% de ET obtuvo la mayor EUA (4.12 Kg m⁻³), mientras que la variedad MH-383 con el tratamiento de
10 riego por inundación fue la menor (2.01 Kg m⁻³). Las mayores eficiencias se obtienen con los tratamientos
11 donde se utiliza menor lámina de riego (ej. 60% de ET). Estos resultados concuerdan con los reportados
12 en la literatura, donde se obtiene mayor EUA en el riego por goteo comparado con el riego por
13 inundación. La variedad MH-431 fue la que mostró mayor EUA respecto a las otras dos variedades, ya
14 que esta variedad es más tolerante a altas temperaturas. Resultados similares de EUA fueron reportados
15 por Montemayor et al (2006); quienes condujeron un experimento para determinar el uso eficiente del
16 agua en maíz utilizando el sistema de riego por goteo, en el cual reportaron valores de EUA promedio de
17 2.9 Kg m⁻³. Zamora et al (2007); en otro estudio realizado en maíz utilizando riego por goteo bajo por
18 diferentes niveles de ET, reportaron valores que fueron desde 1.9 a 2.96 Kg m⁻³, donde la mayor EUA se
19 obtuvo al 80% de ET y la menor se registró con el tratamiento al 115% de ET.

20 Los tratamientos de riego al 100, 80 y 60% de ET mostraron valores promedios similares de EUA con
21 3.66, 3.61 y 3.62 Kg m⁻³, respectivamente, no habiendo diferencia significativa entre ellos, sin embargo,
22 estos fueron diferentes al de riego por inundación (2.21 Kg m⁻³) (Cuadro 1). Howell et al., 2008; en el
23 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
24 año 2007. Estos valores fueron similares a los observados en nuestro experimento. Aunque superiores a
25 los reportado por Yescas et al (2015) quienes reportaron valores que fluctuaron entre 2.84 y 3.21 Kg m⁻³
26 en maíz forrajero con diferentes tratamientos de riego.



1

2 **Figura 5. Graficas de Eficiencia del uso de agua de tres variedades de Maíz y cuatro tratamientos de**
 3 **riego en el campo experimental laguna INIFAP, Matamoros, Coahuila, México. 2019.**

4

5 **CONCLUSIONES**

6 Las diferentes láminas de riego aplicadas a través de los tratamientos de riego afectaron al índice de área
 7 foliar (IAF), potencial hídrico foliar (ψ_s) temperatura foliar (T_s), rendimiento y eficiencia en el uso de
 8 agua de maíz forrajero bajo riego por goteo en la Comarca Lagunera. La restricción de humedad en el
 9 cultivo afectó el IAF, ψ_s y T_s condicionando el desarrollo adecuado de las hojas de las plantas, afectando
 10 directamente la producción de forraje seco.

11 Los resultados indicaron que el volumen de agua total aplicado en los tratamientos con riego por goteo
 12 subsuperficial fue 27 a 40% menor en comparación con el riego por inundación. En cuanto a la eficiencia
 13 en el uso del agua los mejores resultados se obtuvieron cuando el agua fue aplicada de acuerdo con la
 14 etapa fenológica del cultivo con el tratamiento de 100% de ET multiplicado por un coeficiente de cultivo
 15 (K_c).

16 **LITERATURA CITADA**

17 Amador, A. L. y Boschini, C. 2000. Fenología productiva y nutricional del maíz para la producción de
 18 forraje. San José, Costa Rica. Agronomía Mesoamericana. 1 (11): 171-177. ISSN: 1021-7444.

1 Azpilcueta, P. M. E.; Pedroza, S. A.; Sánchez, C. I.; Salcedo, J. M. R. y Trejo, C. R. 2017. Calidad
2 química del agua en un área agrícola de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en la comarca lagunera, México.
3 Revista internacional de contaminación ambiental, 1 (33): 75-83. DOI: 10.20937/RICA.2017.33.01.07.

4 Carrillo, J. C. y Ruíz, J. 2004. Producción de forraje en sorgo y mijo; variables de crecimiento. Agronomía
5 mesoamericana. México. 15 (1):69-76.

6 Castro, I.; López M. C. y González, V. A. 2009. Evaluación morfo-fisiológica de brotes de maíz
7 sometidos a selección in vitro bajo estrés osmótico. Montecillo Texcoco México. Revista Fitotecnia
8 Mexicana. 4 (32): 281 – 288.

9 Chaves, B. N. F. y Gutiérrez, S. M. V. 2017. Respuesta al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos
10 moleculares, bioquímicos y fisiológicos. Agronomía mesoamericana, Costa Rica. 28(1):237-253. 2017
11 ISSN 2215-3608.

12 CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2016. Clasificación de la intensidad de sequía. Consultado
13 en: [http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=237:clasificacion-de-](http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=237:clasificacion-de-la-severidad-de-la-sequia&catid=16:general)
14 [la-severidad-de-la-sequia&catid=16:general](http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=237:clasificacion-de-la-severidad-de-la-sequia&catid=16:general) (08/12/2019).

15 Gao, J. P.; Chao, D. Y. y Lin H. X. (2007). Understanding abiotic stress tolerance mechanisms: recent
16 studies on stress response in rice. Shanghai China. Journal of Integrative Plant Biology. (6(49):742-750).
17 doi: 10.1111/j.1672-9072.2007.00495.x

18 Hou, P.; Liu, Y.; Xie, R.; Ming, B.; Ma, D.; Li, S. y Mei, X. 2014. Temporal and spatial variation in
19 accumulated temperature requirements of maize. Beijing China. Field Crops Research. 158:55-64. DOI:
20 10.1016/j.fcr.2013.12.021.

21 Howell, T.; Evett, S.; Tolk, J.; Copeland, K.; Colaizzi, P. y Gowda, P. 2008. Evapotranspiration of corn and
22 forage sorghum for silage. Bushland Texas USA. The United State Department of Agriculture (USDA).
23 Pp. 1-14.

24 Intagri. 2016. El Índice de Área Foliar (IAF) y su Relación con el Rendimiento del Cultivo de Maíz.
25 Intagri. Guanajuato, México. 3p. Available from: [https://www.intagri.com/articulos/cereales/el-indice-de-](https://www.intagri.com/articulos/cereales/el-indice-de-area-foliar-iaf)
26 [area-foliar-iaf](https://www.intagri.com/articulos/cereales/el-indice-de-area-foliar-iaf)

- 1 Ismail, S. M. 2010. Influence of deficit irrigation on water use efficiency and bird pepper production
2 (*Capsicum annum* L.). Jeddah, Saudi Arabia. Department of Arid Land Agriculture, Faculty of
3 Meteorology, Environment and Arid Land Agriculture, King Abdulaziz University. 2 (21):29-43. DOI:
4 10.4197/Met. 21-2.3.
- 5 Jarma, O. A.; Cardona, A. C. y Araméndiz, T. H. 2012. Efectos del cambio climático sobre la fisiología de
6 las plantas cultivadas: una revisión. Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica. Colombia. 15
7 (1):63-76.
- 8 Kiniry, J. R. y Bonhomme, R. 1991. Predicting maize phenology. In: T. Hodges (ed.). Physiological
9 aspects of predicting crop phenology. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. 284:115-131. ISBN
10 9780849367458 - CAT# 6745.
- 11 Liu, G.; Li, Y. y Alva, A. K. 2012. "Water potential vs. pressure in relation to water movement and
12 transpiration in plants". Gainesville Florida USA. International Journal of Agronomy and Plant
13 Production. 10 (3): 369-373. ISSN: 2051-1914.
- 14 May L. C.; Pérez G. A.; Ruiz S. E.; Ic-Camal, A. E. y García R. A. 2011. Efecto de niveles de humedad en
15 el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinense* Jacq. y su relación con el desarrollo de *Bemisia*
16 *tabaci* Genn. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 3 (14):1039-1045. *versión On-line* ISSN 1870-
17 0462.
- 18 Medrano, H.; Bota, J.; Cifre, J.; Flexas, J.; Ribas, C. M. y Guals, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua
19 por las plantas. Investigaciones geográficas. México. 4:63-84. ISSN: 0213-4691.
- 20 Montemayor, J. A.; Gómez, Á. O.; Olague, J.; Zermeno, A.; Ruiz, E.; Fortis, M.; Salazar, E. y Aldaco, R.
21 2006. Torreón Coahuila México. Técnica Pecuaria en México. 3 (44):359-364. ISSN: 0040-1889.
- 22 Montemayor, J. A.; Olague, J.; Fortis, M.; Sam, R.; Leos, J. A.; Salazar, E.; Castruita, J.; Rodríguez, J. C.
23 y Chavaria, J. A. 2007. Consumo de agua en maíz forrajero con riego subsuperficial. Torreón Coahuila
24 México. Terra Latinoamericana. 2 (25):163-168. E-ISSN: 2395-8030.

1 Montemayor J. A.; Lara, J. L.; Woo, J. L.; Munguía, J.; Rivera, M. y Trucíos, R. 2012. Producción de
2 maíz forrajero (*Zea mays* L.) en tres sistemas de irrigación en la comarca lagunera de Coahuila y Durango
3 México. *Agrociencia* 3 (46): 267-278.

4 Montemayor, T. J. A.; Suárez, G. E.; Munguía, L. J. P.; Segura, C. M. A.; Mendoza, V. R. L. y Woo, R. J.
5 L. 2018. Acolchados plásticos para la producción de maíz (*Zea mays* L.) forrajero en la comarca lagunera.
6 *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Mexico, 20 (especial):4107-4115.

7 Morales, D.; Rodríguez, P.; Dell'Amico, J. A.; Torrecillas, A. y Sánchez, B. M. J. 2006. Efecto de las
8 temperaturas en algunas variables de crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate
9 (*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. Amalia). *Cultivos tropicales*. Cuba. 1 (27):45-48.

10 Panda, R.; Behera, S. y Kashyap P. S. 2003. Effective management of irrigation water for wheat under
11 stressed conditions. Bhubaneshwar Odisha India. *Agricultural Water Management*. 1 (63):37-56. DOI:
12 10.1016/S0378-3774(03)00099-4

13 Parra, R. A.; Rodríguez, J. L. y González, V. A. 1999. Transpiración, potencial hídrico y prolina en
14 zarzamora bajo déficit hídrico. México, *TERRA Latinoamericana*. 2 (17):125-130. E-ISSN: 2395-8030.

15 Piccioni, M. 1970. *Diccionario de alimentación animal*. Editorial Acribia. Zaragoza España. Pp. 819.
16 ISBN:6500304959722.

17 Porter, J. R y Delecolle, R. 1988. Interaction of temperature with other environmental factors in
18 controlling the development of plants. In: *Plants and temperature*. S P Long, F I Woodward (eds).
19 *Symposia of the Society for Experimental Biology Number XXXXII*. Great Britain. The Company of
20 Biologists Limited, Department of Zoology, University of Cambridge. 43:133-156.

21 Rada F.; Jaimez, R. E.; García, C.; Azócar, A. y Ramírez, M. E. 2005. Relaciones hídricas e intercambio
22 de gases en *Theobroma cacao* var. Guasare bajo periodos de déficit hídrico. Mérida Venezuela. *Revista de*
23 *la Facultad de Agronomía (LUZ)*. 22:112-120.
24 [https://www.researchgate.net/publication/28089647_Relaciones_hidricas_e_intercambio_de_gases_en_Th](https://www.researchgate.net/publication/28089647_Relaciones_hidricas_e_intercambio_de_gases_en_Theobroma_cacao_var_Guasare_bajo_periodos_de_deficit_hidrico)
25 [eobroma_cacao_var_Guasare_bajo_periodos_de_deficit_hidrico](https://www.researchgate.net/publication/28089647_Relaciones_hidricas_e_intercambio_de_gases_en_Theobroma_cacao_var_Guasare_bajo_periodos_de_deficit_hidrico)

1 Reyes, G. A.; Reta, D. G.; Sánchez, J. I.; Ochoa, E.; Rodríguez, K. y Preciado, P. 2019a. Estimación de la
2 evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. Matamoros
3 Coahuila México. *Terra Latinoamericana*. 37: 279-290. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485>.

4 Reyes, G. A.; Kjaersgaard, J.; Trooien, T.; Reta, D. G.; Sánchez, J. I.; Ochoa, E.; Preciado, P. y Fortis, M.
5 2019b. Comparison of leaf area index, surface temperature, and actual evapotranspiration estimated using
6 the METRIC model and in situ measurements. *Sensors*. 19. 1857. doi:10.3390/s19081857.

7 Reyes, G. A.; Martínez, J. G.; Palomo, M.; Faz, R.; Cruz J. J. y Sánchez, J. I. 2011. Producción de avena
8 forrajera con riego por goteo subsuperficial en la Comarca Lagunera. Memoria de la XXIII Semana
9 Internacional de Agronomía FAZ-UJED, noviembre, 2011.

10 Rivera, G. M.; Palomo, R. M.; Anaya, S. A.; Reyes, G. A. y Martínez, R. J. G. 2013. Función de
11 producción hídrica para maíz forrajero (*zea mays* L.) en riego por goteo subsuperficial. Gómez Palacios
12 Durango México. *Agrofaz*. 1 (13):17-22.

13 SADER. 2018. Delegación en la Región Lagunera. Sector Agropecuario, 2019. El Siglo de Torreón.
14 Suplemento especial. Diciembre 31. 2019. Pp. 28.

15 Salazar, M. R.; Rojano, A. A. y López, C. I. L. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura
16 controlada. *Tecnología y ciencias del agua*. México. 2 (5):177-183.

17 Scholander, P. F.; Hammel H. T. y Badstreet E. D. 1964. Sap pressure in vascular plants. *Proceedings of*
18 *the National Academy of Sciences*. 52:119-125.

19 Stewart, D.; Costa, C.; Dwyer, L.; Smith, D.; Hamilton, R. y Ma, B. 2003. Canopy structure, light
20 interception, and photosynthesis in maize. *Agronomy Journal*. 6 (95):1465-1474. DOI:
21 10.2134/agronj2003.1465

22 Villalobos, G. A.; López, C. C.; Miranda, C. S.; Aguilar, R. V. H. y López, H. M. B. 2016. Relaciones
23 hídricas en maíces de Valles Altos de la Mesa Central de México en condiciones de sequía y fertilización
24 nitrogenada. Campeche México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7 (7): 1651-1665. ISSN: 2007-
25 0934

- 1 Wall, G. W. y Kanemasu, E. T. 1990. Carbon dioxide exchange rates in wheat canopies. II. Photosynthetic
2 and phytomass production efficiencies. Amsterdam. Agricultural and Forest Meteorology. 2 (49):103-122.
3 DOI:10.1016/0168-1923(90)90045-8.
- 4 Westgate, M. E. y Boyer, J. S. 1985. Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem, and silk
5 growth at low water potentials in maize. Planta. 4 (169):540-549. DOI: 10.1007/BF00395973
- 6 Yescas, C. P.; Segura, C. M. A.; Martínez, C. L.; Álvarez, R. V. P.; Montemayor, T. J. A.; Orozco, V. J.
7 A. y Frias, R. J. E. 2015. Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de
8 riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. Torreón Coahuila México. Revista Internacional de
9 Botánica Experimental. 84: 272-279. ISSN 0031 9457.
- 10 YOSHIDA, S. 1972. "Physiological Aspect of Grain Yield", en Annual Review of Plant Physiology. Palo
11 Alto. 23 (1):437-464.
- 12 Zamora, S. S.; Fenech, L. L.; Ruiz, E. F. H.; Pérez, D. W. y López, G. A. 2007. Eficiencia en el uso del
13 agua en maíz (*Zea Mays* L.) con riego por goteo, en el Valle de la Paz, Baja California Sur, México. Baja
14 California Sur México. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 3 (16):33-36. ISSN: 1010-2760.
- 15 Zaragoza, E. J.; Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; López, L. C.; García, E. J. C.; Zamudio, G. B.; Turrent, F.
16 A. y Rosado, N. F. 2019. Cuautitlán Izcalli México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 1 (10):101-
17 111.

8.- DISCUSIÓN GENERAL

8.1.- Discusiones Sorgo

Los tratamientos de riego o diferentes niveles de ET afectaron significativamente los valores de índice de área foliar (IAF), temperatura superficial (Ts), potencial hídrico (ψ_h) y rendimientos en ambas variedades de sorgo durante el ciclo del cultivo. Los tratamientos de 80 y 100% de ET son los que mostraron mayor IAF, menor Ts, mínimos valores de ψ_h y como resultado mayor rendimiento de forraje seco con respecto a los tratamientos de 60% de ET y riego por gravedad.

En lo que respecta a los rendimientos de forraje verde y seco hubo diferencia estadística significativa entre tratamientos de riego y variedades. Los tratamientos de 80 y 100% de ET mostraron los mayores rendimientos al igual que la variedad SSM en los diferentes niveles de ET. La variedad SS tuvo sus mejores producciones en los tratamientos con cintilla (80 y 100% de ET), ya que con el riego por inundación el rendimiento disminuyó en un 26%. En general las diferentes láminas de riego afectaron el IAF, Ts, ψ_h y rendimiento, siendo el tratamiento de 60% el más afectado reduciendo el rendimiento alrededor de un 25%. En cuanto al volumen de agua aplicado en los tratamientos de riego con cintilla fue de 24 a 39% menor con respecto al aplicado en el riego por inundación con melgas irrigadas por gravedad.

8.- Discusiones Maíz

Al igual como sucedió con el cultivo de sorgo, en el experimento realizado en el cultivo de maíz, las diferentes láminas de riego aplicadas a través de los tratamientos de riego afectaron al índice de área foliar (IAF), potencial hídrico foliar (ψ_h) temperatura foliar (Ts), rendimiento y eficiencia en el uso de agua de maíz forrajero bajo riego por goteo en la Comarca Lagunera. La restricción de humedad en el cultivo afectó el IAF, ψ_h , y Ts condicionando el desarrollo

adecuado de las hojas de las plantas, afectando directamente la producción de forraje seco.

Los resultados indicaron que el volumen de agua total aplicado en los tratamientos con riego por goteo subsuperficial fue 27 a 40% menor en comparación con el riego por inundación. En cuanto a la eficiencia en el uso del 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 multiplicado por un coeficiente de cultivo (K_c).

9.- CONCLUSIÓN GENERAL

Según los datos arrojados del análisis estadístico existe una correlación significativa entre la evapotranspiración fijada en este experimento como variable independiente y las demás variables medidas (IAF , $\square_h$, y T_s) consideradas variables dependiente, y también arroja relaciones existentes entre las variables dependientes; estas relaciones explican la variación del rendimiento en la producción de materia seca de los cultivos utilizados, sometidos a diversos tratamientos.

De acuerdo con los resultados encontrados en este trabajo es recomendable programar los riegos tomando en cuenta la ET de referencia y los K_c 's del cultivo, dependiendo de las diferentes etapas fenológicas del cultivo. Esta programación del riego es de vital importancia para eficientar el uso y manejo del agua en la agricultura.

Actualmente, en la comarca lagunera se pretende ser autosustentables en la producción de forrajes, para ello se tienen implementar cultivos que alternen con los cultivos convencionales para poder producir alimento de buena calidad para el ganado, además, de encontrar el equilibrio entre el uso eficiente del agua y rendimiento de biomasa de los cultivos utilizados como alternativa de producción.