



Portada y contraportada: Felipe Camacho García
Osesión II, mármol esgroleado, 2010
Linx, acrílico, 2016



La presente obra recopila investigaciones cuyos resultados enriquecen y brindan aportaciones teórico-prácticas al campo del conocimiento en materia agrícola en áreas desde ciencias básicas hasta ciencias económico-administrativas. El cúmulo de ellas son resultado del trabajo de compilación realizado por catedráticos e investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo a través del Centro de Investigación en Economía y Matemáticas Aplicadas (CIEMA) de la División de Ciencias Económico-Administrativas (DICEA).

La trascendencia de los resultados se basa en los diferentes criterios metodológicos utilizados, las diversas áreas de conocimiento, en la línea de Movilidad de los Factores de la Producción; y los enfoques multidisciplinarios. Asimismo, lo es la participación de instituciones con prestigio académico y de investigación como el Instituto Politécnico Nacional, la Universidad Autónoma del estado de México, la Universidad Nacional Autónoma de México, entre otras, que enriquecen el contenido.

Sistemas de Producción y Cultivos Agrícolas en México

Sistemas de Producción y Cultivos Agrícolas en México



Francisco Pérez Soto | Esther Figueroa Hernández
Lucila Godínez Montoya | Rosa María García Núñez
Jaime Rocha Quiroz
Compilación

Francisco Pérez Soto
Esther Figueroa Hernández
Lucila Godínez Montoya
Rosa María García Núñez
Jaime Rocha Quiroz
(Compilación)

Sistemas de Producción y Cultivos Agrícolas en México

ÍNDICE

Sistemas de Producción y Cultivos Agrícolas en México

HIDRATACIÓN DE MATRICES GRANULARES ESFÉRICAS DE TIERRA DIATOMITA ADICIONADA CON CAL PARA ALOJAR NEMÁTODOS ENTOMOPATÓGENOS <i>Laura Virginia Bustamante Espinosa, Pedro Montes García, Araceli Castañeda Ovando; Judith Callejas Hernández, Marco Aurelio Nava Licona</i>	9
MODELO DE ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL FRIJOL CON BASE A SUS COMPONENTES FISIOLÓGICOS Y MORFOLÓGICOS <i>José Alberto Salvador Escalante Estrada, María Teresa Rodríguez González, Yolanda Isabel Escalante Estrada</i>	23
OPTIMIZACIÓN DE AGUA DE RIEGO EN ALFALFA (<i>Medicago sativa</i> L.) UTILIZANDO SENSORES DE HUMEDAD EN EL SUELO <i>Gustavo Espinoza García, Miguel Servín Palestina, Carlos Alberto Olvera Olvera, José Ismael de la Rosa Vargas, Martín García Bandala, Mireya Moreno Lucio</i>	31
CARACTERIZACIÓN MOLECULAR DE ESPECIES DEL GÉNERO AGAVE, MEDIANTE SSR E ISTR, DE LA COLECCIÓN NACIONAL DE AGAVES UG-SAGARPA <i>Lisset Herrera Isidrón, Angélica Nieto González, Miriam Isidrón Pérez, Graciela María Luz Ruiz Aguilar, Julio Pérez Guzmán, María del Rosario Abraham Juárez, Vicente Javier Villafaña, Héctor Gordon Núñez Palenius</i>	42

Primera edición en español 2018

ISBN: 978-607-98112-5-9

D.R. © Asociación Mexicana de Investigación Interdisciplinaria A.C. (ASMIIA, A.C.)

Editado en México

D.R. © Ilustraciones de portada y contraportada: Felipe Camacho García

Para la reproducción total o parcial de esta publicación, por cualquier medio, requiere la autorización por escrito del autor de la ASMIIA, A.C.

<i>PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA PLANTA DE HIGUERILLA RELACIONADAS CON EL DISEÑO DE COSECHADORAS</i> <i>José Humberto López Díaz, Eric Rafael Suárez Gaona, Efrén Fitz Rodríguez, Ramón Jiménez Regalado</i>	54
COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO DE VARIEDADES SINTÉTICAS DE MAÍZ PARA EL TRÓPICO HÚMEDO DE MÉXICO <i>Sierra Macías Mauro, Rodríguez Montalvo Flavio, Andrés Meza Pablo, Gómez Montiel Noel, Espinosa Calderón Alejandro, Tadeo Robledo Margarita, Barrón Freyre Sabel</i>	67
INJERTO EN PIMIENTO MORRÓN: EFECTO DE LA SALINIDAD EN LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS <i>Blanca Estela Orozco-Alcalá, Héctor Gordon Núñez-Palenius, Luis Pérez-Moreno, Mauricio Valencia-Posadas, Libia Iris Trejo-Téllez, Fidel René Díaz-Serrano, Oscar Alejandro Martínez-Jaime, María del Rosario Abraham-Juárez</i>	80
FERTILIZACIÓN ORGÁNICA EN MANGO: CALIDAD Y MACRONUTRIENTES EN FRUTOS <i>Nain Peralta-Antonio, Andrés Rebolledo-Martínez, Alberto Enrique Becerril-Román, David Jaén-Contreras, Marco Antonio Toral-Juárez</i>	93
ENRAIZAMIENTO IN VITRO DE ARÁNDANO (<i>Vaccinium SP.</i>) VAR. BILOXI <i>María del Carmen Rocha-Granados, José López-Medina</i>	109
EFICIENCIA DE REGENERACIÓN DE TRES SELECCIONES DE FRESA (FRAGARIA X ANANASSA DUCH.) <i>Blanca Rojas Sánchez, Patricio Apáez Barrios, José López Medina, María del Carmen Rocha Granados</i>	121
PRODUCCIÓN DE LECHUGAS EN HIDROPONÍA CON SISTEMA DE SOLUCIÓN ESTÁTICA Y AIREACIÓN CAPILAR, DESDE UN ENFOQUE DE HORTICULTURA URBANA <i>Marco Antonio Toral Juárez, Nain Peralta Antonio, Maurilio Mendoza Mexicano</i>	132

Presentación

El desarrollo agrícola es un aspecto fundamental y prioritario en la agenda pública de cualquier gobierno que busque un crecimiento regional en zonas rurales. Las investigaciones en Ciencia Básica y Aplicada que se desarrollan bajo esta línea temática brindan elementos y resultados valiosos para lograr un crecimiento, desarrollo y la sustentabilidad del campo mexicano. Preocupados por estos aspectos, Catedráticos e Investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo a través del Centro de Investigación en Economía y Matemáticas Aplicadas (CIEMA) de la División de Ciencias Económico Administrativas (DICEA), han desarrollado el presente libro que expone investigaciones cuyos resultados enriquecen y brindan aportaciones teórico-prácticas al campo del conocimiento en materia agrícola.

Los editores de esta obra agradecemos ampliamente a todos los Investigadores participantes así como a las Instituciones que apoyaron el desarrollo de la misma. De forma específica expresamos nuestro agradecimiento a la Rectoría de la Universidad Autónoma Chapingo, a sus Direcciones Generales, particularmente a la Dirección General de Investigación y Posgrado así como al Departamento de Preparatoria Agrícola. Igualmente manifestamos nuestro agradecimiento al Colegio de Posgraduados, a la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

El presente volumen contiene 11 capítulos arbitrados que se ocupan de asuntos sobre Sistemas de Producción y Cultivo.

Bustamante-Espinosa y colaboradores inician la obra con un estudio sobre la hidratación de matrices granulares esféricas de tierra diatomita adicionada con cal para

Singh, P. S. (1995). Selection for water stress tolerance in interracial populations of common bean. *Crop Sci.* 35:118-124.

Statistical Analysis System (SAS Institute). (2001). SAS/STAT. User's Guide Release 9.1 ed, Cary, NC, USA.

Gustavo Espinoza García¹, Miguel Servín Palestina²,
Carlos Alberto Olvera Olvera³, José Ismael de la Rosa Vargas⁴,
Martín García Bandala⁵, Mireya Moreno Lucio⁶

OPTIMIZACIÓN DE AGUA DE RIEGO EN ALFALFA (*Medicago sativa* L.) UTILIZANDO SENSORES DE HUMEDAD EN EL SUELO

ABSTRACT

The goal of this study was evaluation of three soil moisture levels measured with electronic sensors in alfalfa crops (T1 = 5-15 cbar, T2 = 50-75 cbar and T3 90-110 cbar), previously calibrated for the study area. Variables such as dry matter yield (DM) and irrigation water productivity (PA) were valued. The values obtained were 6.65 6.35 at 5.27 t ha⁻¹ for DM and 2.67 4.02 at 3.87 kg m⁻³ for PA as a function of crop Evapotranspiration (ET_c) With values of 248.64, 157.96 and 136.30 mm for T1, T2 and T3 respectively. These results allow us to conclude that keeping the soil moisture tension at 50-75 cbar, i.e. 21% ± 2.3% of soil humidity, the highest water productivity in the crop can be reached.

¹ Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Unidad Académica de ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas", Av. Ramón López Velarde N° 801, Col. Centro, C.P. 98000, Zacatecas, Zac., México. gustavo.esga@hotmail.com

² INIFAP, Campo Experimental Zacatecas, Kilometro 24.5, Carretera Zacatecas-Fresnillo, C. P. 98500, Calera de V. R., Zacatecas, Zac., México. servin.miguel@inifap.gob.mx

³ Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Unidad Académica de ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas", Av. Ramón López Velarde N° 801, Col. Centro, C.P. 98000, Zacatecas, Zac., México. colvera@uaz.edu.mx

⁴ Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Unidad Académica de ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas", Av. Ramón López Velarde N° 801, Col. Centro, C.P. 98000, Zacatecas, Zac., México. ismaelrv@yahoo.com

⁵ INIFAP, Campo Experimental Zacatecas, Kilometro 24.5, Carretera Zacatecas-Fresnillo, C. P. 98500, Calera de V. R., Zacatecas, Zac., México. martin_garcia9107@yahoo.com.mx

⁶ Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas", Av. Ramón López Velarde N° 801, Col. Centro, C.P. 98000, Zacatecas, Zac., México. miryz.moreno@gmail.com

Palabras clave: Evapotranspiración del cultivo, productividad de agua, funciones de respuesta.

1.- INTRODUCCIÓN

La alfalfa (*Medicago sativa L.*) es una leguminosa que se siembra en las zonas áridas y semiáridas del norte del país, es utilizada para la alimentación de rumiantes en la industria de carne y leche. En Zacatecas la alfalfa se posiciona como una de las cadenas agrícolas de mayor importancia económica del estado (Sánchez, Zegbe, Rumayor y Moctezuma, 2013), en los últimos años se mantuvieron en producción un promedio de 12,144.5 hectáreas y se obtuvo una producción aproximada de 23 mil 880.51 toneladas por año, (SIACOM, 2010-2015). Por ser un cultivo perenne su producción se lleva a cabo bajo condiciones de riego (Godoy, Torres, Reyes y Valdez, 1998). (Moreno, García y Faz, 2000, pp. 63-78) mencionan que el cultivo demanda 15, 000 m³ ha⁻¹ de agua de riego. Lo que representa una fuerte presión en los recursos hídricos que cada vez son más escasos y costosos (Castro, Aguilar, Quevedo, Kleisinger, Tijerina y Mejía, 2008) por ejemplo Zacatecas presenta abatimiento de los acuíferos a una tasa de 1.18 m por año provocando un desequilibrio en la recarga. A pesar que esta leguminosa fija nitrógeno al suelo y produce un forraje de excelente calidad muestra eficiencias en el uso de agua muy bajas comparadas con otras especies forrajeras (Hirth, Haines, Ridley y Wilson, 2001). Steduto, Hsiao, Fereres y Raes, (2012), en su estudio FAO riego y drenaje hacen referencia a Grimes, Wiley y Sheesley (1992) quienes han reportado valores de productividad con valores de 1.0 – 2.6 kg m⁻³ (kilogramos de materia seca por metro cubico de agua de riego aplicada) y a Brown, Moot y Pollock (2005) quienes reportaron valores de hasta 2.9 kg m⁻³. El potencial productivo de la alfalfa está en función de la interacción de factores climáticos como, genéticos y manejo según Lara y Jurado (2014), la cantidad de veces que la alfalfa se puede cosechar durante un año depende de las condiciones climáticas y el manejo (Teixeira, de Sosa, Valadares, Soares, Jorge y dos Santos, 2007), por ser un cultivo de alto requerimiento hídrico, los altos costos de extracción y la disponibilidad del agua de riego son factores limitantes para su producción en el estado Servín (2015). Por tal razón, se requiere de una aplicación del agua en el momento oportuno y la cantidad necesaria para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo y lograr un rendimiento óptimo como se menciona en Inzunza, Villa, Catalán y Mendoza (2006). Uno de los enfoques clásicos para llevar a cabo la optimización del agua consiste en analizar la respuesta del cultivo a diferentes grados de déficit hídrico; también, obtener las relaciones funcionales que permiten maximizar el rendimiento por unidad de agua utilizada, así como estimar la producción del cultivo

cuando este recurso es restringido (Reck y Overman, 1996), (Llewelyn y Featherstone, 1997) y (Reca, Roldan, Alcaide, López y Camacho, 2001). Actualmente no se conocen con precisión dichos requerimientos y el manejo de riego se realiza de manera empírica, lo que implica que en ocasiones se proporcionen volúmenes excesivos, o laminas deficientes, propiciando bajo rendimiento de materia seca (Sammis, 1981) y (Abdul, Sammis y Lugg, 1982) esto genera la necesidad de evaluar sistemas más eficientes en el uso de agua Méndez (2016), además lo que es aún más complejo hacer ajustes mediante optimización de riego a nivel parcelario para tener el mínimo gasto de agua con la mayor producción posible, el objetivo de este trabajo fue generar un modelo que relacione el rendimiento de materia seca de alfalfa en función de la lámina aplicada con manejo de riego mediante sensores de humedad y de esa manera determinar el rendimiento potencia y óptimo e incrementar la productividad del agua de riego en Zacatecas. Para cumplir dicho objetivo se estableció una parcela experimental de alfalfa donde se evaluaron tres niveles de humedad donde la programación de riego se realizó con sensores de humedad Watermark® de igual manera se tomaron variables físicas y rendimiento de materia seca posteriormente se realizó un análisis de varianza y la función de respuesta del cultivo se obtuvo mediante análisis de regresión, al relacionar los datos observados de MS (t ha⁻¹) y PA (kg m⁻³) como variables dependientes y ET_c (mm) como variable independiente, en SAS con el procedimiento Stepwise. Para obtener la lámina de riego que maximiza el rendimiento de forraje seco de alfalfa (ET_{c-max}) y la lámina de riego que presenta el valor más alto de productividad de agua y rendimiento óptimo (ET_{c-opt}), se realizó un análisis de optimización (Steel, Torrie y Dickey 1997). De acuerdo con los resultados obtenidos se observó diferencia significativa para MS y PA donde sobre salió T1 y T2 para cada variable respectivamente y al relacionar dichas variables con ET_c se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.49 y 0.78 para cada una de las variables. y se permite deducir que la alfalfa maximiza biológicamente su producción de forraje a 7.34 t ha⁻¹ (MS_{max}), cuando consume ET_{c-max} = 207.518 mm y el valor máximo de productividad del agua de 4.045 kg m⁻³, se obtiene cuando consume ET_{c-opt} = 165.94 mm presentando un rendimiento óptimo de 6.643 t ha⁻¹ (MS_{opt}).

2. METODOLOGÍA

El trabajo se llevó a cabo en terrenos del Campo Experimental Zacatecas (CEZAC), ubicado a 22° 54' LN y 102° 39' LO y una altitud media de 2,197 msnm. La temperatura media anual es de 14.6 °C, con acumulación promedio de frío de noviembre a febrero de ~ 600 unidades frío (UF). La precipitación media anual es de 416 mm, de los cuales el 75 % ocurre durante el verano (junio a septiembre) y el resto durante el invierno. La

evaporación media anual es de 1,609 mm (Medina y Ruíz, (2004, p. 40). La precipitación (Pp) del corte a corte del cultivo fue nula dado que no hubo lluvia en este periodo para evapotranspiración potencial (ET_0) durante la misma etapa 42 días fue 300.5 mm; en cuanto al promedio de las temperaturas para la estación de crecimiento fue de 29.6 y 2.3 °C para la T_{max} y T_{min} respectivamente. Para caracterizar el suelo del lote experimental, se hizo un muestreo a dos profundidades (0-30 y 30-60 cm) y se obtuvieron los siguientes resultados: Textura franco arcilloso con un pH de 7.9, contenido de materia orgánica de 2.0%, densidad aparente (D_a) de 1.42 g cm⁻³, capacidad de campo (CC) y punto de marchites permanente (PMP) de 30.62 y 15.04% respectivamente, para 0-30 cm y 34.63 y 15.02% para 30-60 cm. de profundidad de suelo.

La alfalfa se sembró el 26 de noviembre del 2015 con la variedad CUF 101 con una densidad de siembra de 60 kg ha⁻¹ usando sembradora tipo brillion, estableciendo parcelas de validación, para el presente año los tratamientos establecidos son tres niveles de tensión en el suelo medidos mediante el uso de sensores de humedad marca Watermark® previamente calibrados para la zona de estudio, colocados a 30 y 60 cm de profundidad por triplicado en cada parcela y un total de seis sensores por parcela experimental. T1 = de 5-15, T2=50-75 y T3=90-110 Cbar de lectura del sensor. El riego se aplica cuando el sensor colocado a 30 cm. llega a su límite máximo y se recupera la humedad hasta su límite más bajo para cada tratamiento. El agua se aplica con un sistema de riego sub-superficial con cintilla auto-compensada calibre 8 mil enterrada a 20 cm de profundidad del suelo a 40 cm de separación entre líneas regantes y emisores con un espaciamiento de 20 cm y un gasto de 1 lph, por ser un cultivo perene para el presente año se realizó un corte de estandarización realizado el 20/04/2017, posteriormente se condujo el experimento hasta el siguiente corte llevado a cabo el día 01/06/17 (42 días después). El experimento consistió en realizar un muestreo gravimétrico para determinar la humedad residual y llevar cada uno de los tratamientos a 100%, 80% y 40% de humedad aprovechable (Palacios 2002, p. 214) para T,1 T2 y T3 respectivamente, posteriormente se realizó el riego de acuerdo a la lectura de los sensores y se corroboraron los volúmenes aplicados en cada riego mediante un medidor volumétrico instalado en el cabeza de descarga del sistema de riego, el corte se realizó manualmente con tres sub-muestras aleatorias dentro de cada tratamiento con ayuda de un cuadro de 1 x 1 m. Las variables evaluadas son: altura de la planta (AL), Porcentaje de cobertura (COB), área foliar (AF), para calcular índice de área foliar (IAF) porcentaje de tallos (PT), porcentaje de hojas (PH) para calcular la relación hoja-tallo (H/T), forraje verde (FV) del cual se tomó una submuestra de 300 gr por c/u y fue llevada a una estufa de secado donde se dejó a 65°C durante 48 horas para calcular el porcentaje de materia seca y estimar el rendimiento de materia seca por ha (MS) y productividad

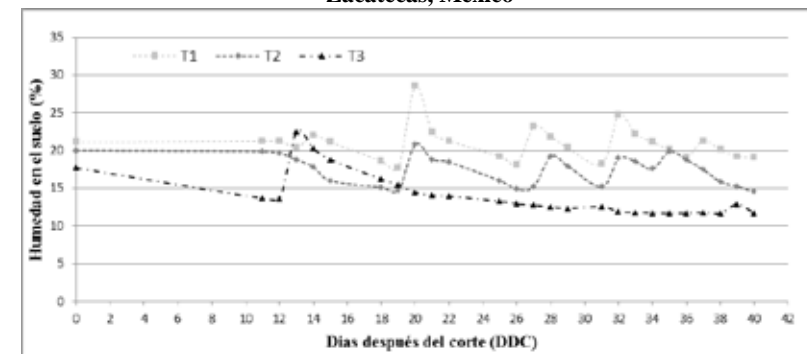
del agua (PA), es la relación de MS y la sumatoria de lámina de riego más precipitación efectiva es decir Evapotranspiración del cultivo (ET_c) para cada tratamiento.

Se realizó un análisis de varianza y comparación de medias de los tratamientos usando el estadístico Tukey al 5% de probabilidad. La función de respuesta del cultivo a los diferentes niveles de humedad, se obtuvo mediante análisis de regresión, al relacionar los datos observados de MS (t ha⁻¹) y PA (kg m⁻³) como variables dependientes y ET_c (mm) como variable independiente y se realizó mediante una regresión en SAS con el procedimiento Stepwise, seleccionando el modelo que presento mejor ajuste. (SAS, 2003). Para obtener la lámina de riego que maximiza el rendimiento de forraje seco de alfalfa (ET_{c-max}) y la lámina de riego que presenta el valor más alto de productividad de agua y rendimiento óptimo (ET_{c-opt}), se realizó un análisis de optimización con la teoría de máximos y mínimos del cálculo diferencial e integral (Steel, Torrie y Dickey 1997).

3. RESULTADOS

En el gráfico 1 se muestra el comportamiento de humedad, durante el corte de estandarización el corte analizado en el perfil del suelo a 30 cm de profundidad, estimado de acuerdo con el modelo $\%H = 39.269Ls^{-0.229}$ resultado de la calibración de los sensores utilizados. El cual presenta un $R^2 = 0.90$ donde: %H porcentaje de humedad en el suelo y Ls: Lectura de sensor tomada diariamente a las 8:30 horas en Cbar. Donde se observa que humedad en el suelo para T1 (5-15 Cbar) es superior al resto de los tratamientos, pero inferiores a los resultados de CC obtenidos del análisis de laboratorio y para T3 (90-110 Cbar) que es el tratamiento de menor humedad presenta valores inferiores a PMP. Por lo que se atribuye la sensibilidad y precisión de los sensores utilizados.

Gráfico 1. Tendencia generalizada de la humedad del suelo en tres parcelas experimentales de alfalfa, Zacatecas, México



Fuente: Datos obtenidos del levantamiento de información.

En resultados (Tabla 1) se observa diferencias estadísticas ($P>0.05$) donde T1 sobre salió en la mayoría de las variables evaluadas excepto para H/T que presentó los valores más bajos, donde, T3 presento lo valores más altos, donde ALT, COB, FV e IAF son variables que describen rendimiento los cuales son superiores a los reportados por Méndez (2016) para alfalfa producida en Zacatecas, la variable H/T representa calidad ya que la hoja es el componente que presenta mayor valor nutritivo (Romero, Aronna y Cuatrín, 2002). El mismo autor reporta valores promedios de 4 variedades evaluadas en el ciclo de primavera de 0.84, muy similares a los resultados de este estudio.

Tabla 1. Análisis estadístico de las variables de muestreo en el cultivo de alfalfa bajo la productividad de agua aplicada en nueve condiciones de humedad en Zacatecas México 2017

TRAT	ALT (cm)	COB (%)	FV (t ha ⁻¹)	H/T	IAF
1	89.33±2.33a	0.93±0.02a	39.33±3.06a	0.78±0.01c	11.81±0.57a
2	81.44±4.95ab	0.95±0.03a	31.67±2.52b	0.82±0.02b	9.89±1.2ab
3	72.33±4.1b	0.82±0.04b	24.33±4.04c	0.92±0.01a	7.68±1b
CV*	4.391631	3.076527	7.114332	0.521920	8.829372
MSE**	3.5588	0.027689	2.26077	0.238048	0.864886
F-valor	9.4100	11.7200	18.6400	109.02	9.40
Pr>F	0.0259	0.01760	0.00750	0.0002	11.81±0.57a

ALT- altura del cultivo; COB- cobertura del cultivo; FV- forraje verde; H/T- relación hoja-tallo y IAF- índice de área foliar. *Coeficiente de variación ** Error cuadrático medio. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente según Tukey al 5%.

Fuente: Datos obtenidos del levantamiento de información.

En los resultados de la tabla 2 para la variable MS no hubo diferencia estadística ($P>0.05$) donde T1 sobre salió con 6.65 t ha⁻¹ y T3 con los valores más bajos con 5.27 t ha⁻¹, superiores reportados por Méndez (2016) y Sánchez et al (2015) que muestran valores máximos de 4.5 t ha⁻¹ con riego por goteo subsuperficial en Zacatecas. Mientras que para ET_c se tiene una mediana de 192.47 mm, valores similares a los reportados por Godoy, Torres, Reyes y Valdez (1998) y Sánchez, Servín, Gutiérrez y Serna (2107) En cuanto PA se observa una diferencia estadística ($P>0.05$) donde sobre sale T2 con 4.02 kg m⁻³ y el valor más bajo de 2.67 kg m⁻³ para T1 similar a la obtenido por Grimes, Wiley y Sheesley (1992) que va desde 1.0-2.6 kg m⁻³ y Brown, Moot y Pollock (2005) reportaron valores de hasta 2.9 kg m⁻³.

Tabla 2. Rendimiento de materia seca y productividad de agua para el cultivo de alfalfa en función de evapotranspiración del cultivo

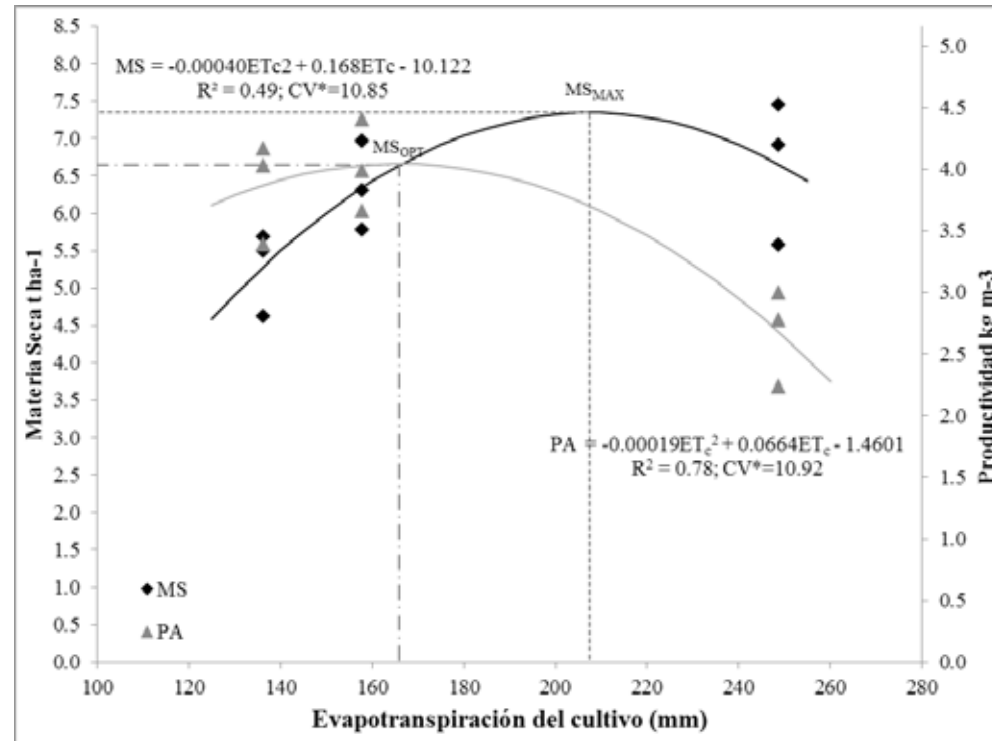
TRAT	ET _c (mm)	MS (t ha ⁻¹)	PA (Kg m ⁻³)
1	248.64	6.65±0.97a	2.67±0.39b
2	157.96	6.35±0.59a	4.02±0.38a
3	136.30	5.27±0.57a	3.87±0.42b
CV*	-	10.85654	10.91410
MSE**	-	0.661043	0.384419
F-valor	-	2.64	6.23
Pr>F	-	0.1848	0.0521

ET_c-evapotranspiración del cultivo; MS - rendimiento de materia seca; PA- productividad de agua de riego; *Coeficiente de variación ** Error cuadrático medio. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente según Tukey al 5%.

Fuente: Datos obtenidos del levantamiento de información.

Al relacionar la producción de forraje seco de alfalfa (MS) y productividad de agua de riego (PA) con la ET_c, se observó que entre ambas variables existió una relación de tipo polinomial con rendimientos crecientes y decrecientes, al igual que la productividad (Gráfico 2). También se agregaron las líneas de tendencia de los datos, donde se muestra el punto máximo de rendimiento y productividad, donde se intersectan ambas curvas se encuentra el punto óptimo donde utilizado para obtener la máxima productividad del agua sin poner en riesgo el rendimiento de materia seca.

Gráfico 2.-Relación de rendimiento de materia seca y productividad de agua del cultivo de alfalfa para forraje en función de la evapotranspiración de cultivo



Fuente: Datos obtenidos del levantamiento de información.

Con los modelos obtenidos de MS y PA (Gráfico 2) se realizó un análisis de optimización y se permite deducir que la alfalfa maximiza biológicamente su producción de forraje a 7.34 t ha^{-1} (MS_{max}), cuando consume $ET_{c-\text{max}} = 207.518 \text{ mm}$ y el valor máximo de productividad del agua de 4.045 kg m^{-3} , se obtiene cuando consume $ET_{c-\text{opt}} = 165.94 \text{ mm}$ presentando un rendimiento óptimo de 6.643 t ha^{-1} (MS_{opt}). A pesar de que no todos sus coeficientes de regresión fueron significativos ($P > 0.05$), los modelos obtenidos presentaron un ajuste aceptable.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los modelos obtenidos es posible incrementar la productividad de agua de riego y definir que con una evapotranspiración del cultivo media de 165.94 mm se

obtiene los valores más altos de productividad alcanzando un rendimiento de 6.6 t ha^{-1} manteniendo el porcentaje de humedad en el suelo a $21\% \pm 2.3\%$ o a una tensión de humedad en el suelo de $50\text{-}75 \text{ Cbar}$ de acuerdo con los sensores de humedad marca Watermark®.

Cabe mencionar que es importante realizar el estudio con más cortes y en diferentes estaciones climáticas para validar los modelos obtenidos. También, es necesario realizar análisis bromatológicos para determinar la calidad del forraje ya que se observaron valores más altos de H/T en el tratamiento menos irrigado por lo que se hace necesario obtener los kg de proteína cruda por metro cubico de agua utilizado.

5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó en su totalidad en las instalaciones del Campo Experimental Zacatecas, del Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria (INIFAP), de Calera de Víctor Rosales Zacatecas, bajo la dirección y asesoría del M.C. Miguel Servin Palestina. Forma parte del proyecto “Sistema para la toma de decisiones en el establecimiento de los cultivos en las unidades de producción agrícola, basado en disponibilidad y manejo de agua de riego” financiado por el INIFAP.

LITERATURA CITADA

- Abdul-Jabbar, A. S., Sammis, T. W. & Lugg, D. G. (1982). Effect of moisture level on the root pattern of alfalfa. *Irrigation Science*, 3(3): 197-207.
- Brown, H. E., Moot, D. J. & Pollock, K. M. (2005). Herbage production, persistence, nutritive characteristics and water use of perennial forages grown over 6 years on a Wakanui silt loam. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 48, 423-439.
- Castro, P. M., Aguilar, M. F., Quevedo, N. A., Kleisinger, S., Tijerina, C. L. y Mejia, S. E. (2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agríc. Téc. Méx.* 34(4):459-470.
- Godoy, A. C., Torres, E. C. A., Reyes, J. I. y Valdez, R. V. M. (1998). Sistemas de irrigación y eficiencia en el uso del agua. Informe técnico. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*, Matamoros, Coahuila.
- Grimes, D. W., Wiley, P. L. & Sheesley, W. R. (1992). Alfalfa Yield and Plant Water Relations with Variable Irrigation. *Crop Science* 32: 1381-1387.

Hirth, J. R., Haines, P. J., Ridley, A. M. & Wilson, K. (2001). Lucerne in crop rotation on the Riverine Plains. 2. Biomass and grain yields, water use efficiency, soil nitrogen, and profitability. *Aust J Agric Res*, 52 (2):279-293.

Inzunza, I. M. A., Villa, C. M., Catalán, V. E. A. y Mendoza, M. S. F. (2006). Modelo para estimar el rendimiento de maíz en función de la humedad del suelo. *Terra Latinoamericana*, 24(2): 179-185.

Lara, C. R., y Jurado, P. (2014). Paquete tecnológico para producir alfalfa en el estado de Chihuahua. Folleto Técnico. *Centro de Investigación Regional Norte Centro Sitio Experimental La Campana Aldama, Chihuahua*, (Núm. 52) ISBN: 978-607-37-0277-5.

Llewelyn, R. V., & Featherstone, A. M. (1997). A comparison of crop production functions using simulated data for irrigated corn in western Kansas. *Agric. Systems*, 54(4): 521-538.

Medina G., y Ruíz, J. A. (2004). Estadísticas Climatológicas Básicas del Estado de Zacatecas (Período 1961–2003). *SAGARPA-INIFAPCIRNOC-Campo Experimental Zacatecas*. Libro Técnico No. 3. p. 40.

Méndez, I. (2016). Productividad de alfalfa con tres regímenes de humedad en un sistema de riego sub-superficial. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Zacatecas, El Cordoval, Gral. Enrique Estrada, Zacatecas, México.

Moreno, L., García, D. y Faz, R. (2000). Producción y utilización de la alfalfa en zona norte de México. Libro técnico No. 2. *Campo Experimental La Laguna. CIRNOC. INIFAP*. pp. 63-78.

Palacios, V. E. (2002). ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar?: para lograr mejores cosechas. *Trillas*, México, DF, p. 214.

Reca, J., Roldán, J., Alcaide, M., López, R. & Camacho, E. (2001). Optimization model for water allocation in deficit irrigation systems. I. Description of the model. *Agric. Water Manage*, 48(2): 103-116.

Reck, W. R. & Overman, A. R. (1996). Estimation of corn Response to water and applied nitrogen. *J. Plant Nutr*, 19(1): 201-214.

Romero, L. A., Aronna, M. S. y Cuatrín, A. L. (2002). Producción Estatal de forraje y relación Hoja-Tallo de alfalfas multifoliadas. *Sitio Argentino de Producción Animal*, 25. Sammis, T. W. (1981). Yield of alfalfa and cotton as influenced by irrigation. *Agronomy Journal*, 73(2): 323-329.

Sánchez, B., Zegbe, J. A., Rumayor, R. A. F. y Moctezuma, G. (2013). Estructura económica competitiva del sector agropecuario de Zacatecas: un análisis por agrocadenas. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 17(33), 552-563.

Sánchez, R.A., Servín, M., Gutiérrez, H., Serna, A. (2017) Eficiencia en el uso del agua de variedades de alfalfa (Medicago sativa L.) con sistema de riego subsuperficial *Rev Mex Cienc Pecu*, 8(4):429-435 [en Prensa].

SAS, (2003) User Guide. Statistical Analysis System. *Inc. Cary, NC*. versión 9.3.

Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera SIAP (2010-2015), en la sección de Anuario Estadístico de la producción Agrícola. Recuperado de http://infosiap.siap.gob.mx/agricola_siap_gb/ientidad/index.jsp. Consulta en línea el 30/06/2017 y 03/07/2017.

Servin, M. (2015). Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Texcoco México.

Steduto, P., Hsiao, T., Fereres E. y Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. *FAO Roma, 2012, Estudio FAO: Riego y Drenaje 66*, ISSN 0254-5284.

Steel, R.G., Torrie, J.H. & Dickey M. (1997). Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. Third edition. New York, the McGraw-Hill Companies.

Teixeira, R. M., de Sosa, J. M., Valadares S. de C., Soares, A., Jorge, A. y dos Santos, D. (2007). Consumo, digestibilidad y rendimiento de novillos alimentados con cáscara de café en sustitución del silaje de maíz. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36 (4) 968-977.