

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA DE UNA HUERTA DE NOGAL PECANERO Y  
RELACIÓN CON LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

TESIS

Que presenta: ADONIRAM ESCALANTE PÉREZ

Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México.

Noviembre 2022

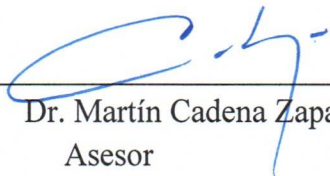
EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA DE UNA HUERTA DE NOGAL PECANERO Y  
RELACIÓN CON LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

TESIS

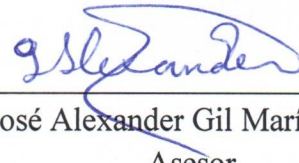
Elaborado por ADONIRAM ESCALANTE PÉREZ como requisito parcial para obtener  
el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE  
PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del comité de asesoría:



Dr. Alejandro Zermeno González  
Asesor principal



Dr. Martín Cadena Zapata  
Asesor



Dr. José Alexander Gil Marín  
Asesor



Dr. Homero Ramírez Rodríguez  
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

## **Agradecimientos**

A **Dios** por haberme permitido terminar esta etapa de gran experiencia.

Al **Dr. Alejandro Zermeño González**, por su paciencia y esfuerzo, dedicando su tiempo y conocimiento para lograr los objetivos de esta investigación.

A mis **asesores** por su colaboración durante todo el proyecto.

A **mis padres y hermanos** por el constante apoyo moral y espiritual para lograr esta meta.

A mi esposa **Saira Lesly Pérez Cruz** por su gran apoyo moral para concluir este grado.

A mi Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (**UAAAN**) por aceptarme para formar parte de esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías (**CONACYT**) por el apoyo económico brindado para el desarrollo y conclusión a este trabajo de investigación.

A todos los que directa e indirectamente contribuyeron para que esta investigación se realizara.

## **Dedicatoria**

*Con mucho cariño y amor especial  
a mi esposa Saira e hija Leslie regalo precioso de Dios,  
con su compañerismo y amor hemos crecido juntos.*

## ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos .....	iii
Dedicatoria.....	iv
ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE CUADROS .....	vii
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT .....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
Origen y características botánicas del nogal pecanero .....	3
Superficie establecida a nivel mundial y rendimientos promedio.....	4
Superficie establecida en México, rendimiento promedio y principales estados productores .	4
Importancia económica y social del nogal pecanero en México .....	4
Variedades de nogal pecanero y sus características .....	5
Requerimientos nutricionales del nogal pecanero .....	7
Requerimientos de agua del nogal pecanero .....	8
Estudios previos sobre la tasa diaria de ET de las huertas de nogal durante su ciclo de crecimiento .....	8
Estudios previos sobre mediciones de covarianza eddy para obtener la tasa de ET de huerta de nogal pecanero.....	9
Estudios previos sobre la programación de los riegos en las huertas de nogal pecanero .....	10
MATERIALES Y MÉTODOS .....	11
Ubicación del sitio de estudio .....	11
Instrumentación y mediciones realizadas .....	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
Volumen de agua aplicado y lamina de evapotranspiración correspondiente.....	16

Balance de energía.....	16
Flujos de energía diurnos.....	17
Tasa diaria de evapotranspiración medida y de referencia de la huerta.....	21
Determinación de los coeficientes mensuales de ajuste por desarrollo del cultivo.....	23
Tasa diaria de evapotranspiración medida y estimada a partir de la evapotranspiración de referencia.....	24
CONCLUSIONES.....	27
BIBLIOGRAFÍA.....	28

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>CUADRO 1.</b> Principales características de las variedades de nogal. Elaboración propia, datos extraídos de: <a href="https://cgru.usda.gov/carya/pecans/pecalph.htm">https://cgru.usda.gov/carya/pecans/pecalph.htm</a> .....	7
<b>CUADRO 2.</b> Evapotranspiración mensual medida con el sistema de covarianza Eddy (ETact) y la de referencia estimada con el método FAO Penman-Monteith (ETref), coeficiente mensual de cultivo (Kc) y la lámina equivalente de agua mensual aplicada por riegos a la huerta (Lequ). ....	24

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> Producción nacional de nuez con cáscara. Extraído de: <a href="http://comenuetz.com/assets/gcma_engalec_mx_mercado_nuez_pecana.pdf">http://comenuetz.com/assets/gcma_engalec_mx_mercado_nuez_pecana.pdf</a> .....	4
<b>FIGURA 2.</b> Exportación de nuez con y sin cáscara. Extraído: <a href="http://comenuetz.com/assets/gcma_engalec_mx_mercado_nuez_pecana.pdf">http://comenuetz.com/assets/gcma_engalec_mx_mercado_nuez_pecana.pdf</a> .....	5
<b>FIGURA 3.</b> Relación entre la suma de los flujos por turbulencia ( $H+LE$ ) y la energía disponible ( $Rn-G$ ), sobre una huerta de nogal pecanero de siete años de edad del Norte de México. ....	17
<b>FIGURA 4.</b> Distribución diurna de los flujos por radiación neta ( $Rn$ ), calor en la superficie del suelo ( $G$ ), calor sensible ( $H$ ) y calor latente ( $LE$ ), en una huera de nogal pecanero (siete años de edad) del norte de México, en diferentes días del ciclo de crecimiento de los árboles. ....	20
<b>FIGURA 5.</b> Tasa diaria de evapotranspiración actual ( $ET_{act}$ ), obtenida con el sistema de covarianza eddy, y la de referencia ( $ET_{ref}$ ) (FAO Penman-Monteith), en los meses (abril-septiembre) de crecimiento de los árboles de una huerta de nogal pecanero de siete años de edad, del norte de México. ....	22
<b>FIGURA 6.</b> Tasa de evapotranspiración diaria medida con el sistema de covarianza eddy ( $ET_{act}$ ), la de referencia ( $ET_{ref}$ ) y la estimada a partir de la evapotranspiración de referencia y los coeficientes mensuales de cultivo ( $ET_{est}$ ), a través de los meses de crecimiento de los árboles de una huerta de nogal pecanero joven (7 años) del norte de México. ....	26



RESUMEN

EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA DE UNA HUERTA DE NOGAL PECANERO Y  
RELACIÓN CON LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

POR

ADONIRAM ESCALANTE PÉREZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZÁLEZ -ASESOR-

SALTILLO, COAHUILA

NOVIEMBRE 2022

México y los Estados Unidos son los países de mayor producción de nogal pecanero. Por el gran desarrollo foliar y diámetro de copa de los árboles, las huertas de nogal pecanero requieren grandes cantidades de agua para lograr altos rendimientos y calidad de la nuez. Las áreas de producción del nogal pecanero se ubican en las zonas semi áridas, donde el agua es el recurso más limitante para la agricultura. Por lo que, el objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia del uso del agua de una huerta de nogal pecanero, con base a la comparación de la programación de los riegos con los datos de la tasa diaria de evapotranspiración. Se usó un sistema eddy covarianza para determinar la tasa diaria de ET actual durante los meses de crecimiento de los árboles, también se obtuvo la tasa diaria de ET de referencia (FAO-Penman-Monteith) y los coeficientes mensuales de cultivo (Kc). El estudio se realizó en una huerta de nogal con árboles jóvenes (7 años de edad), por lo que, la tasa diaria de ET acumulada fue muy pequeña (no mayor de 2 mm/d), mientras que, la ET de referencia fue hasta 6 mm/d. El coeficiente de cultivo (Kc) promedio mensual fue 0.316. Se observó que al comparar la tasa mensual de ET actual de la huerta media o estimada con la ET de referencia, contra la lámina equivalente de agua de riego mensual aplicada es posible identificar eventos de déficit o exceso de agua aplicada a la huerta.

**Palabras clave:** *Carya illinoensis*, coeficientes de cultivo, covarianza eddy, evapotranspiración, eficiencia del uso del agua.

ABSTRACT

WATER USE EFFICIENCY OF A PECAN NUT ORCHARD AND RELATION  
WITH THE EVAPOTRANSPIRATION RATE

BY:

ADONIRAM ESCALANTE PÉREZ  
MASTER OF SCIENCE PRODUCT SYSTEM ENGINEERING

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DR. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZALEZ -ADVISOR

SALTILLO, COAHUILA

NOVEMBER 2022

Mexico and the United States are the countries with the highest production of pecan nuts (*Carya illinoensis*). Due to the sizeable foliar development and crown diameter of the trees, pecan orchards require large amounts of water to achieve high yields and nut quality. Pecan nut production areas are in semi-arid zones, where water is the most limiting resource for agriculture. Therefore, the objective of this study was to evaluate the water use efficiency of a pecan tree orchard based on the comparison of irrigation scheduling with the data of the daily rate of evapotranspiration (ET). An eddy covariance system was used to determine the current daily ET rate during the growing months of the trees. The reference daily ET rate (FAO-Penman-Monteith) and the monthly crop coefficients (Kc) were also obtained. As the study was carried out in a nut orchard of young trees (7 years old), the daily rate of actual ET was minimal (not greater than 2 mm/d), while the reference ET was up to 6mm/d. The monthly average crop coefficient (Kc) was 0.316. It was observed that when comparing the monthly rate of ET obtained with direct measurements or estimated from the reference ET and the crop coefficients against the monthly equivalent irrigation depth, events of deficit or excess water applied to the orchard could be identified.

**Key words:** *Carya illinoensis*, crop coefficient, eddy covariance, water use efficiency, evapotranspiration

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial Estados Unidos con 45% y México con 39% son los países de mayor producción de nogal pecanero (INC, 2021), en México durante el año 2021 se cultivaron 146,239 ha donde, Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango y Nuevo León participaron con 60.9, 14.9, 13.34, 5.2 y 2.9 % de la producción total respectivamente (SIAP, 2021). Los estados mencionados se ubican en las zonas semi áridas y áridas del país, donde el agua es el recurso más limitante para la agricultura. La escasa disponibilidad de agua en estas regiones puede generar problemas por los derechos del agua entre los usuarios urbanos, industriales y agrícolas (Bitelli, 2010). Por lo que, es muy importante mejorar la eficiencia del uso del agua, ya que la agricultura es el sector de la sociedad de mayor consumo.

Debido al gran desarrollo foliar de los árboles, las huertas de nogal pecanero demandan grandes volúmenes de agua. Estudios realizados en las costas de Hermosillo, Sonora, México y Arizona, USA (Brown, 2010) reportaron tasas de evapotranspiración de las huertas de hasta 1 234 mm anuales. Otros estudios, muestran que la tasa diaria de evapotranspiración de las huertas del Norte de México puede ser de hasta 6 mm (Zermeño *et al*, 2010).

Los requerimientos diarios de agua de los árboles de nogal, varían con la edad y la etapa de crecimiento. Un árbol adulto con copa de 12 m de diámetro, en la época de dormancia requiere 50 L/d, en la fase de brotación 600 L/d, al inicio del crecimiento del fruto 1000 L/d y para el llenado del mismo 1200 L/d (Valdez, 2001; Worthington *et al.*, 1990; Hernández, 2003).

Los sistemas de riego que se utilizan en las huertas de nogal del Norte de México pueden ser de gravedad, aspersión y goteo. De estos, los sistemas de riego por goteo pueden ser más eficientes y usar menos agua, ya que se pueden reducir las pérdidas por la evaporación de la superficie por una menor área de humedecimiento (Rodríguez *et al*, 2011; Zermeño *et al*, 2010). El riego por goteo con cinta enterrada puede ser el de mayor eficiencia, ya que la mayor parte del volumen de riego aplicado se consume por la transpiración de las hojas de los árboles y solo un pequeño volumen se puede evaporar desde la superficie del suelo.

Generalmente, los productores aplican los riegos a una determinada frecuencia, aplicando el mismo volumen de agua y no se considera la tasa diaria de evapotranspiración

de los árboles de las huertas. Esto puede resultar en una programación de riego con déficit o exceso, ya que, el consumo de agua de las huertas de nogal depende de la etapa de crecimiento, las variaciones diarias de las condiciones del clima y el contenido de agua en el suelo.

Dado que la producción de nogal se realiza en las zonas semiáridas, donde el agua es el recurso más limitante para la agricultura, es indispensable mejorar el uso del agua. Para esto, es necesario aplicar el agua en el momento oportuno y la cantidad requerida. Bajo la hipótesis de que la eficiencia del uso del agua se puede mejorar, si se conoce la tasa diaria de evapotranspiración de la huerta, el objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia del uso del agua de una huerta de nogal pecanero, a partir de mediciones de la tasa diaria de evapotranspiración con un sistema de covarianza eddy y con la evapotranspiración de referencia de la localidad.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Origen y características botánicas del nogal pecanero

El nogal pecanero es originario del sureste de los Estados Unidos y del norte de México (Gray, 1973). La evidencia arqueológica más antigua de su recolección por humanos para su subsistencia data de los 8000 años antes de cristo (AC) durante el periodo arcaico de América, en el asentamiento Modok Rock, actual estado de Illinois USA, correspondiente al límite más al Norte de su distribución geográfica. La evidencia arqueológica más occidental data de hace 8000 años, recuperada en la cueva de Baker en el condado de Val Verde, en el estado de Texas, USA. En el estado de Alabama USA, se ha encontrado su límite oriental, relacionado con la cultura misisipiana del medio oeste de los años 1050-1250 AC. Hacia el sur la especie se distribuye en la actualidad hacia el estado de Oaxaca en México, aunque su límite histórico de distribución geográfica hacia el sur no está sustentado por evidencias arqueológicas si lo está por la variación genética en plástidos, la cual sugiere que no son el producto de una introducción reciente en la zona (Grauke *et al.*, 2011).

El nogal pecanero (*Carya Illinoensis*) K. Koch, miembro de la familia Juglandaceae, es una especie perenne, una planta angiosperma dicotiledónea leñosa de hábito arbóreo de 30 a 45 metros de alto y 2 metros de diámetro, caducifolio con hojas compuestas sésiles imparipinnadas, con foliolos opuestos de 5 a 10 cm de largo. Es una fanerógama diclinomonoica con flores unisexuales, de amentos erectos de estambres las masculinas y péndulos de estigmas las femeninas, con dicogamia y polinización anemófila. Su fruto es drupáceo, monospermo dehiscente con endocarpio endurecido (Burns *et al.*, 1990; Wagner *et al.*; Hazel, 2005).

Su fruto es una drupa llamada trima de color marrón, con longitudes entre 3.75 a 5 cm y de 2 a 3 cm de ancho. Su cáscara mide entre 3 y 4 mm de espesor, en estado joven es de color verde, en su madurez cambia a marrón y se divide en 4 secciones. En su interior contiene la semilla con un embrión grande con dos cotiledones que están separados por una delgada lámina que se extiende desde la cara interior del endocarpio.

### Superficie establecida a nivel mundial y rendimientos promedio

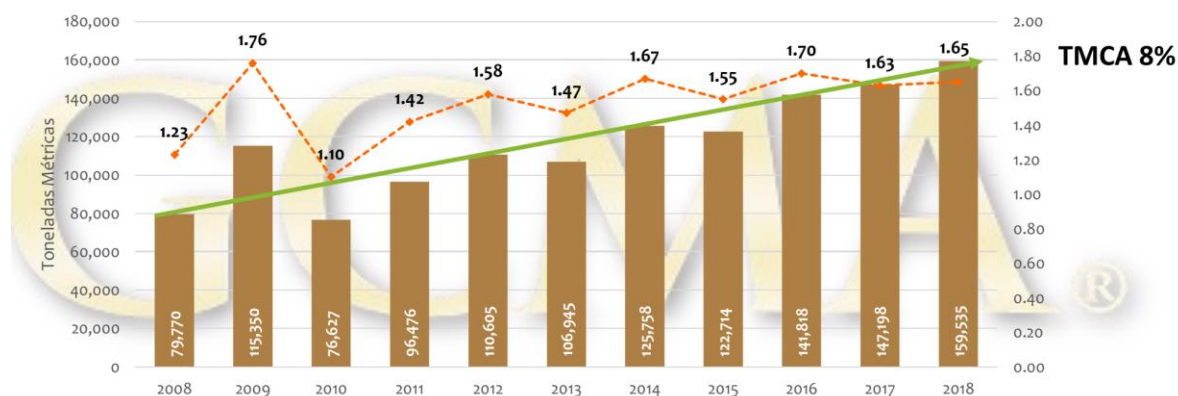
En el año 2020 en el mundo se cosecharon 3 323 974 toneladas de nuez, en 1 021 391 hectáreas, con un rendimiento promedio de 3.2 ton/ha. A nivel mundial los principales países con mayor producción son China, Estados Unidos, Turquía, México e Irán con 27.8, 15.0, 13.8, 10.6 y 5.8% respectivamente (FAO, 2022).

### Superficie establecida en México, rendimiento promedio y principales estados productores

En México en el 2021 se cultivaron 146 239 ha, donde Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango y Nuevo León son los principales estados productores con 60.9, 14.9, 13.3, 5.2 y 2.9% respectivamente. Se cosecharon 135 946.76 toneladas de nuez, con un rendimiento promedio de 1.99 ton/ha (SIAP, 2021).

### Importancia económica y social del nogal pecanero en México

En el año 2018 la producción en México fue de 159 535.19 toneladas (Figura 1), 110% más del valor registrado en el 2008, indicando una tasa media de crecimiento anual del 8%, consecuencia de una mayor superficie cosechada (SIAP, 2021; GCMA, 2020).



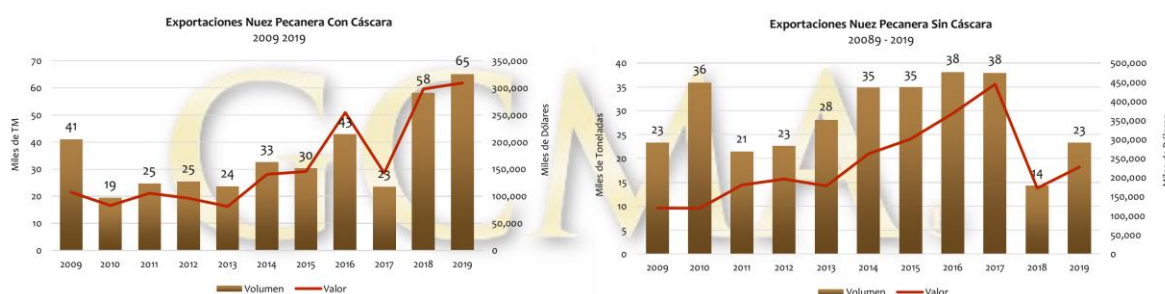
**FIGURA 1.** Producción nacional de nuez con cáscara. Extraído de: [http://comenuz.com/assets/gcma\\_engalec\\_mx\\_mercado\\_nuez\\_pecana.pdf](http://comenuz.com/assets/gcma_engalec_mx_mercado_nuez_pecana.pdf)

En el 2020, México se convirtió en el segundo exportador de nuez pecanera sin cáscara, con una participación del 14.9% en el mercado mundial, el promedio de las exportaciones



fue de 16 mil toneladas, con una tasa de crecimiento anual de 11.9% en el periodo 2016-2020 (SADER, 2022).

En 2019 las exportaciones de nuez con cáscara fueron de 65 mil toneladas, partiendo de 41 mil toneladas en 2009 (Figura 2), con un promedio de 35 mil toneladas por año, hubo una tasa media de crecimiento anual del 5%, donde USA y China fueron los principales destinos con 69 y 19% respectivamente. En este mismo periodo las exportaciones de nuez pecanera sin cáscara fueron 28 millones de toneladas en promedio anualmente, con una tasa media de crecimiento anual de 4%, donde Estados Unidos es el principal destino con el 99% (GCMA, 2020).



**FIGURA 2.** Exportación de nuez con y sin cáscara. Extraído: [http://comenuez.com/assets/gcma\\_engalec\\_mx\\_mercado\\_nuez\\_pecana.pdf](http://comenuez.com/assets/gcma_engalec_mx_mercado_nuez_pecana.pdf)

Los volúmenes de exportación han tenido una tendencia mayor a los de importación, teniendo una balanza comercial internacional mexicana de nuez pecanera positiva en el 2015 de \$334 millones de dólares. A partir del año 2003 se muestra una balanza comercial de exportación mayor en dos veces el valor al de las importaciones y desde 2009 tres veces mayor, debido a una mayor exportación de nueces sin cáscara (Secretaría-Economía, 2015).

### Variedades de nogal pecanero y sus características

Los nogales son miembros de la familia *Junglandaceae*, pertenecientes al género *Carya*, las autoridades aún no están de acuerdo sobre el número de especies reconocidas de este género. En Estados Unidos y México se producen dos tipos de nuez pecanera, nativas o criollas y mejoradas, con el objetivo de desarrollar hortícolas de nuez pecana se plantaron

huertos con semillas seleccionadas, los cultivares como: Stuart, Schley, Success, Delmas, Alley y Pabst surgieron de huertos semilleros en Jackson Co., Mississippi. Las variedades Western, San Saba Improved, Sovereign (Texas Prolific), Onliwon y Squirrels Delight se originaron en un huerto de 1000 árboles cultivados a partir de semillas San Sebas de una selección nativa hecha por EE Risien de San Saba Co., Texas. En el huerto de James en Mound, Louisiana se produjo Carman, James y Money Maker a partir de semillas seleccionadas (ARS-USDA, 2022).

Las variedades del nogal pecanero varían por diferentes aspectos: número de nueces por kilogramo, porcentaje de almendra, susceptibilidad a plagas y enfermedades, tiempo de producción, estructuras de copas, etcétera, como se muestra en el Cuadro 1.

**CUADRO 1.** Principales características de las variedades de nogal. Elaboración propia, datos extraídos de: <https://cgru.usda.gov/carya/pecans/pecalph.htm>

**Requerimientos nutricionales del nogal pecanero**

Cultivar	Nueces/ Lb	% de almendra	Cultivar	Nueces/ Lb	% de almendra	Cultivar	Nueces/ Lb	% de almendra
Aggie	69	63	GraBohls	42	59	Nugget	86	57
Alley	79	52	GraCross	42	59	Oconee	48	56
Apache	45	59	GraKing	35	53	Odom	43	56
Barton	48	57	GraPark Giant	38	60	Onliwon	64	60
Best's Early	203	39	GraTex	45	64	Osage	81	55
Brake	55	60	GraZona	40	55	Owens	55	60
Brooks	87	52	Greenriver	70	49	Pabst	59	47
Burkett	43	55	Halbert	60	60	Patrick	115	69
Busseron	62	47	Halsly	45	56	Pawnee	44	58
Caddo	60	56	Harper	53	61	Peruke	81	59
Candy	66	48	Harris Super	50	53	Podsednik	22	53
Canton	76	50	Hastings	68	48	Posey	63	54
Caper Fear	45	54	Hodge	69	59	Price-Fleming	44	55
Carlson #3	110.8	50	Hopi	46	62	Prilop of lavaca	78	57
Carmichael	74	60	Houma	55	51	PSV-37	56	55
Centennial	70	45	Humble	45	55	Rincon	45	52
Cherokee	48	55	Iago	41	60	San Saba	103	64
Cherryle	43	55	Ideal	67	59	San Saba Improved	61	59
Chetopa (KS112)	59	54	Imperial	32	56	Schley	54	52
Cheyenne	48	58	Indiana	75	47	Seminole	60	53
Chickasaw	55	54	Jackson	52	56	Shawnee	48	58
Chief	54	45	James	70	53	Shepherd	65	53
Choctaw	37	58	Jenkins	55	53	Shoshoni	41	53
Clark	64	56	John Garner	52	61	Sioux	60	60
Colby	66	44	Johnson	84	47	Slybert	60	59
Comanche	37	56	Jubilee	45	53	Starking Hardy Giant	78	58
Cowley	60	52	Kansa	77	54	Steuck	72	49
Coy	88	57	Keilers	42	60	Stuart	51	49
Creek	54	49	Kernodle	57	55	Squirrel's Delight	47	55
Curtis	89	57	Kibler	102	48	Succes	48	50
Davis	53	46	Kiowa	38	58	Sullivan	65	55
Delmas	50	48	Lakota	59	62	Summer	39	61
Desirable	38	54	Lipan	44	55	Surprize	31	51
Dependable	50	51	Mahan	32	58	Teche	65	45
Devore	143	43	Mahan-Stuart	30	52	Texas	54	54
Dooley	80	47	Major	78	49	Texas Prolific	51	51
Edisto	91	49	Mandan	46	63	Texhan	51	56
Elliott	67	53	Maramec	44	59	Tiny Tim	342	42
El Mart	41	60	Martzahn	116	46	UE 2-8	64	57.8
Evers	104	54	McLeon	55	55	Van Deman	67	44
Farley	60	53	Melrose	53	57	VC1-68	48	48
fisher	74	48	Mobile	53	43	Waco	53	56
Forket	49	62	Mohawk	32	59	Western	57	58
Frostcher	57	49	Moore	67	49	Wichita	43	62
Giles	74	53	Money maker	62	50	Willmann	48	58
Gloria Grande	44	48	Mount	75	52	Witte	82	52
Gormely	103	46	Nacono	44	56	Woodard	60	54
Govett	55	57	Navaho	62	61	Woodroof	48	45

El nogal pecanero requiere de los 17 elementos esenciales para su crecimiento, factor muy importante que influirá en su producción cada año. El nitrógeno y el zinc son los nutrientes a los que presenta mayor respuesta en calidad y crecimiento. En los suelos del norte de México se tiene un pH mayor a 7 mostrando una deficiencia de zinc, Fe, Cu, Mn y Mo en las huertas de nogal pecanero independientemente de las variedades cultivadas, además, generalmente presenta deficiencias de nitrógeno, potasio magnesio y ocasionalmente manganeso (Medina *et al.*, 1992; O´Barr, 1977).

### **Requerimientos de agua del nogal pecanero**

A nivel mundial la agricultura es el mayor usuario del agua con 70% de las extracciones. En el caso de la producción de nuez de cáscara representa el 2% del agua que es utilizada en riego, en México por cada tonelada de nuez que se produce se utiliza 2 811 m<sup>3</sup> de agua (Hoekstra *et al.*, 2004; Wilchens, 2001).

Los requerimientos de riegos en los cultivos varían en función del clima, manejo, fase de crecimiento, variedad y marco de plantación. La demanda más alta del nogal ocurre cuando tiene el mayor follaje, puede alcanzar anualmente entre los 6652 y 1140 m<sup>3</sup>/h. El requerimiento de agua en el nogal adulto es muy variable, con rangos desde 1170 y 1310 mm al año (Liu *et al.*, 2013, Ferreira *et al.*, 2001). Reportes realizados para el área de Arizona USA y Hermosillo México, estimó un requerimiento anual que fluctúa entre los rangos de 1 234 mm en Bonita, Arizona y 2 091 mm cerca de Hermosillo, Sonora (Brown, 2010).

### **Estudios previos sobre la tasa diaria de ET de las huertas de nogal durante su ciclo de crecimiento**

La tasa de evapotranspiración es el resultado simultáneo de la evaporación de la superficie del suelo y la transpiración por las estomas de las hojas, los principales factores que la determinan son: la radiación, temperatura del aire, déficit de presión de vapor y velocidad del viento (Allen *et al.*, 2006; Escrig *et al.*, 2012).

Rodriguez *et al.*, 2011, encontraron una tasa diaria de ET de 3.6 mm en una superficie de 60 ha (600 x 1000m) plantada con nogal pecanero de 7 años, con un sistema de plantación

de 12 m entre líneas, 6 m entre plantas, con un sistema de riego de microaspersores colocados entre dos árboles, gasto medio de  $90 \text{ Lh}^{-1}$ , humedeciendo diámetros de 7.5 m. En una plantación de nogal pecanero cultivar Western de 18 años, con un sistema de plantación en marco real 10 x 10 m, en las instalaciones del Campo Experimental, La Laguna, ubicado en Matamoros, Coahuila, México, con 4 tratamientos de riego, 3 con goteo superficial y uno con inundación, la tasa de ET fue de 382, 374 y  $480.2 \text{ mm/h}^{-1}$ , durante los años, 2001, 2002 y 2003 respectivamente (Ávila *et al.* 2005).

### **Estudios previos sobre mediciones de covarianza eddy para obtener la tasa de ET de huerta de nogal pecanero**

El sistema de covarianza Eddy permite evaluar directamente el flujo de calor latente y sensible, a partir de la variación de la velocidad vertical del viento y de la densidad de vapor de agua y de temperatura (Monteith *et al.*, 2007). Mediante este método Zermeño *et al.*, (2014), realizaron un estudio en dos huertas de nogal pecanero en el estado de Coahuila, México. Una de las huertas formada por árboles de 50 años de los cultivares Wichita y Western Schley de altura promedio 50 m, una separación tresbolillo de 15 m, regada con un sistema por goteo superficial con una lámina promedio diaria de 5 mm, ubicada en la propiedad Tierra Blanca, ejido Mieleras, municipio de Matamoros, con una elevación de 1200 m. Otra huerta con árboles de los cultivares Wichita, Western Schley y Pawnee, de 28 años, 12 m de altura, una distribución marco real de 15 m entre árboles, sistema de riego de aspersión, aplicando una lámina de 55 mm en intervalos de 10 días, con una elevación de 360 m, ubicada en la propiedad Las Tres Marías, municipio de Zaragoza, Coahuila. Los resultados de este estudio fueron 5.6 y 5 mm ET diaria respectivamente.

En otro estudio realizado en la costa de Hermosillo, en una huerta de nogal pecanero de 10 años, con una superficie de 60 ha, con una plantación de 6 m entre plantas y 12 m entre líneas, un sistema de riego por goteo, la tasa diaria de evapotranspiración fue de 3.6 y 2.5 mm para los años 2009 y 2010 respectivamente (Cruz *et al.*, 2017).

### **Estudios previos sobre la programación de los riegos en las huertas de nogal pecanero**

El objetivo de programar el riego en los cultivos es determinar la cantidad de agua y fecha por aplicar, para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. Con la programación adecuada del riego se puede ahorrar agua, disminuir costos por ahorro de energía y mano de obra (INIFAP, 2007).

Un estudio realizado en el ejido Hormiguero, municipio de Matamoros la Laguna, Coahuila, con árboles de 22 años, variedad Western distribuidos en un marco real 14 x 14 m, mediante un modelo de programación de riego basado en tiempo térmico, se generó los requerimientos hídricos diarios y acumulados, permitiendo estimar el comportamiento fenológico del cultivo (Sifuentes *et al.*, 2015).

González-Cervantes *et al.* (2012) realizaron un estudio en las subregiones cuenca baja y media del Río Nazas, localizada en la región hidrológica 36 (RH-36), al norte de México comparando los métodos: Penman-Monteith FAO, Hargreaves y Samani, Doorenbos y Pruitt para determinar la evapotranspiración y su uso para el riego oportuno, donde el método Penman-Monteith FAO presento los mejores resultados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del sitio de estudio

El estudio se realizó en una huerta de nogal pecanero (*Carya illinoensis*) en la propiedad “Los Gachupines”, ubicada en el municipio de General Cepeda (25° 47' N, 101° 45' O, con una altitud de 1304 msnm), durante el ciclo de producción de marzo a octubre de 2017. El clima del lugar es seco templado, la temperatura media anual es de 18 a 20 °C y la precipitación media anual de 300 a 400 mm, con vientos predominantes del suroeste con velocidades de 8 a 15 km/h (CONAGUA, 2020).

El trabajo se desarrolló en una superficie de 7.2 ha, con nogales de 7 años de edad del cultivar Western y el Wichita como polinizador (1 hilera de Wichita por 8 hileras de Western). Los árboles están alineados en la dirección norte-sur, a 8 m entre árboles y 12 m entre hileras (104 árboles ha<sup>-1</sup>). Los árboles tenían una altura promedio de 4 m y un diámetro promedio de copa de 4.78 m.

La huerta se riega con un sistema de goteo, con cintas enterradas a 0.20 m de profundidad a una distancia de un metro de cada lado del tronco de los árboles, con 16 emisores por árbol (8 de cada lado) de un espaciamiento de 60 cm y gasto de 1.68 LPH, se aplican dos riegos de 12 horas cada seis días.

### Instrumentación y mediciones realizadas

Se utilizó el método de la covarianza eddy para medir el flujo de calor sensible (H) y latente (LE) entre el dosel de los árboles de la huerta y la atmosfera, con las siguientes relaciones (Ham y Heilman, 2003):

$$H = \rho_a C_p (\overline{w'Ts'}) - 0.51 Ta \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (1)$$

$$LE = L (\overline{w'\rho_w v'}) \quad (2)$$

Donde  $\rho_a$ ,  $C_p$  y  $Ta$  son densidad, capacidad calorífica y temperatura del aire, respectivamente;  $w$  es la velocidad vertical del viento,  $Ts$  temperatura sónica,  $L$  es calor de vaporización del agua y  $\rho_{wv}$  es la densidad de vapor de agua en el aire. La barra horizontal sobre dos variables representa la covarianza entre las mismas en un determinado intervalo de tiempo (30 min), las variables con símbolo de prima son desviaciones respecto a la media.

Para obtener la temperatura sónica ( $T_s$ ) y la velocidad vertical del viento ( $w$ ), se utilizó un anemómetro sónico tridimensional (CSI-CSAT3, Campbell, Scientific, Inc., Logan, Utah, EE. UU), y para la densidad de vapor de agua en el aire ( $\rho_{wv}$ ) un analizador de bióxido de carbono y vapor de agua de sendero abierto (Open Path CO2/H2O analyzer, LI-7500. LI-COR, Lincoln, Nebraska, EE.UU.), la temperatura del aire ( $T_a$ ) con un sensor de temperatura y humedad relativa (HC2S3 Temperature and Relative humidity probe, Campbell, Scientific, Inc., Logan, Utah, EE. UU). Todos los sensores se conectaron a un datalogger CR1000 (Campbell, Scientific, Inc., Logan, Utah, EE.UU), para realizar mediciones a una frecuencia de 10 Hz y generar las covarianzas correspondientes a promedios de 30 min.

El anemómetro sónico tri dimensional y el analizador de bióxido de carbono y vapor de agua de sendero abierto se montaron en una torre de 6 m de altura sobre la superficie del suelo (2 m sobre el dosel de los árboles), al centro del extremo sur de la superficie de estudio y orientados hacia el norte, para que el viento tuviera por lo menos 300 m de contacto con la superficie vegetal en la dirección norte-sur y 240 m en la dirección este-oeste, antes del contacto con los sensores. Se uso el software Eddy Pro versión 6.2.1 para las correcciones de los flujos y calculo correspondiente de las covarianzas para el flujo de calor sensible y latente.

La tasa diaria de evapotranspiración (8:00 a 19:00 h) a través de los meses de crecimiento de los árboles de la huerta se obtuvo integrando para dicho tiempo el flujo de calor latente (promedios de 30 min) y dividiéndolo por el calor de vaporización del agua.

Para evaluar la precisión de los flujos se determinó el balance de energía sobre la superficie vegetal (Zermeño *et al.*, 2010; **Fulton *et al*, 2017**) con la siguiente relación:

$$R_n - G = H + LE \quad (3)$$

Donde:  $R_n$  es la radiación neta y  $G$  es el flujo de calor en la superficie del suelo.  $R_n$  se midió con dos radiómetros netos (LITE, Keep and Zonen, Inc., Delft, Holanda) uno colocado a 2 m sobre el dosel de los árboles y el otro sobre la superficie del suelo en el pasillo entre los árboles. La  $R_n$  promedio de la superficie se obtuvo con la media ponderada, donde el factor de ponderación fue la relación de superficie del área de la copa de los árboles y el área de suelo de acuerdo con el marco de plantación de la huerta.



El flujo de calor en la superficie del suelo se obtuvo con la media ponderada por superficie entre el flujo en la superficie bajo la copa de los árboles y de la superficie del suelo desnudo. En cada superficie el flujo de calor se obtuvo sumando al flujo de calor medido a 8 cm bajo la superficie (con un transductor de flujo de calor, modelo HFT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, EE.UU), los cambios en la energía de la capa de suelo sobre cada transductor debido a las variaciones de la temperatura del suelo a 2 y 6 cm de profundidad, que se midieron con termopares de chromel-constantan. Estos sensores se conectaron a otro datalogger CR1000 para realizar mediciones a frecuencia de 1 Hz y obtener promedios de 30 min.

Se utilizó el método FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006; Zermeño *et al.*, 2017) para determinar la tasa diaria de evapotranspiración de referencia del sitio donde se realizó el estudio, usando la siguiente ecuación:

$$LE_{ref} = \frac{S*(Rn-G) + \rho_a * Cp * \frac{(\Delta e)}{r_a} * (f)}{S + \gamma * (1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (4)$$

Donde:  $LE_{ref}$  es el calor latente de referencia ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ),  $S$  es la pendiente de la función que describe la relación entre la presión de vapor a saturación y la temperatura ( $kPa K^{-1}$ ),  $Rn$  corresponde a la radiación neta sobre la superficie ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ),  $G$  es el flujo de calor en la superficie ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ) que corresponde al 10% de la radiación neta,  $\rho_a$  es la densidad del aire ( $kg m^{-3}$ ),  $Cp$  representa la capacidad calorífica del aire ( $MJ kg^{-1} K^{-1}$ ),  $\Delta e$  es el déficit de presión de vapor del aire ( $kPa$ ),  $\gamma$  es la constante psicrométrica del lugar ( $kPa K^{-1}$ ),  $r_a$  es la resistencia aerodinámica del aire al flujo de vapor de agua ( $s/m$ ) y  $r_s$  es la resistencia del dosel al flujo de vapor ( $s/m$ ). El factor  $f$  ( $8.64e-4$ ) es para la transformación de unidades de la  $r_a$  de  $s/m$  a  $s/d$ .

Para la superficie de referencia que corresponde a una extensa área de una vegetación uniforme de 12 cm de altura que cubre totalmente la superficie y sin déficit de humedad en el suelo, la resistencia aerodinámica se obtiene con la siguiente relación:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (5)$$

Donde  $u_2$  es la velocidad del viento (m/s) que se mide a 2 m sobre la superficie. Para la misma vegetación, la resistencia del dosel corresponde a un valor de 70 s/m. En la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith, la velocidad del viento se midió con el anemómetro sónico tridimensional (3-D sonic anemometer, Campbell Sci., Logan, Utah, USA), la radiación solar total incidente con un piranómetro de silicón (modelo SP-510, Apogge Inst., Logan, Utah, USA). El déficit de presión de vapor del aire se obtuvo a partir de la temperatura y humedad relativa del aire que se midieron con una sonda de temperatura y humedad (HC2S3 sonda de temperatura y humedad relativa, Campbell, Sci., Logan, Utah). Las mediciones se realizaron a una frecuencia de 1 s, y se generaron promedios de 30 min.

Para determinar la velocidad del viento a 2 m de altura, a partir de la velocidad que se mide a una elevación diferente se usa la siguiente ecuación:

$$u_2 = \frac{4.87}{\log(67.8 * z - 5.42)} * u_z \quad (6)$$

Donde  $u_z$  es la velocidad del viento que se mide a la altura  $z$

En el método FAO Penman Monteith, la radiación neta se obtiene a partir de mediciones de la radiación solar incidente, latitud, longitud y altitud del lugar y el día del año, con lo que se realiza un balance de radiación neta de onda corta y onda larga. La radiación neta resultantes tiene unidades de  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , y corresponden a las mismas unidades del flujo de calor latente de referencia ( $LE_{\text{ref}}$ ); por lo que, la tasa diaria de evapotranspiración de referencia ( $ET_{\text{ref}}$ ) se obtiene con la relación:

$$ET_{\text{ref}} = \frac{LE_{\text{ref}}}{L} \quad (7)$$

Donde,  $L$  es el calor de vaporización del agua. Para obtener los valores diarios de la tasa de evapotranspiración de referencia a través de los meses de crecimiento de los árboles se desarrolló un script en Rstudio versión 3.

Con los datos de evapotranspiración actual de la huerta ( $ET_{\text{act}}$ ) que se generaron con el método de la covarianza eddy y la evapotranspiración de referencia ( $ET_{\text{ref}}$ ), se obtuvieron los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) mensuales con la siguiente relación.

$$K_c = \frac{ET_{\text{act}}}{ET_{\text{ref}}} \quad (8)$$

Para evaluar la eficiencia del uso del agua en la huerta, se comparó la lámina mensual de evapotranspiración medida con el sistema de covarianza eddy ( $ET_{act}$ ), con la lámina de riego mensual equivalente, que corresponde al volumen de agua aplicado a los árboles de la huerta. También se obtuvo la tasa de evapotranspiración estimada ( $ET_{est}$ ), multiplicando el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) mensual por la tasa diaria de evapotranspiración de referencia ( $ET_{ref}$ ). La comparación estadística entre la  $ET_{act}$  y la  $ET_{est}$  se realizó con la prueba de Welch para poblaciones pareadas ( $\alpha \leq 0.05$ )

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Volumen de agua aplicado y lámina de evapotranspiración correspondiente

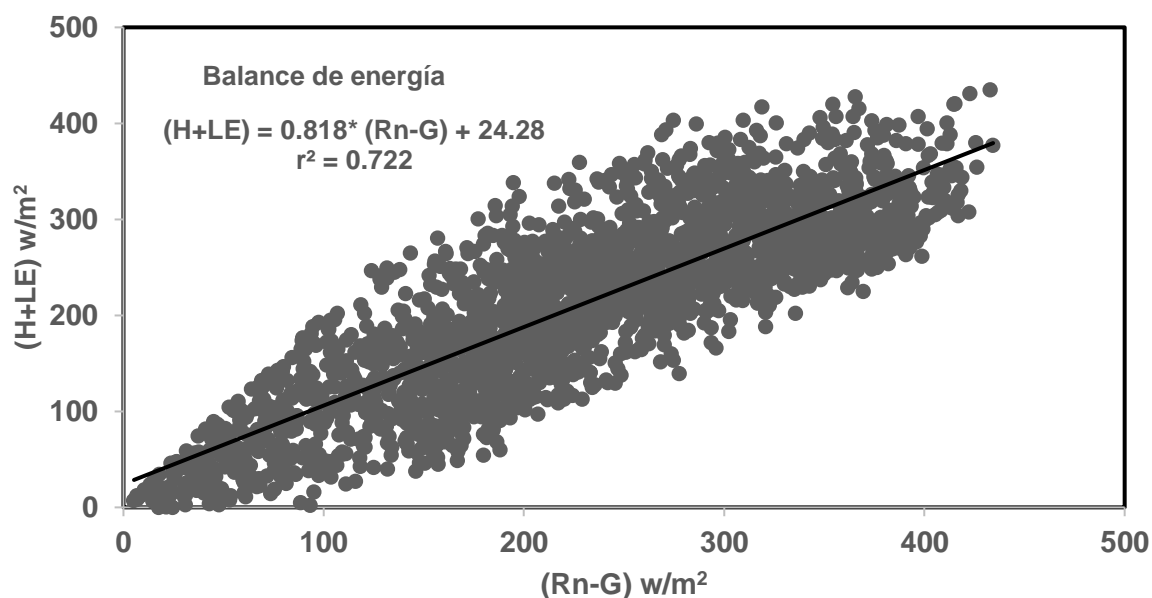
El volumen de agua aplicado por riego a los árboles fue el producto de 16 emisores por árbol, por el gasto del emisor (1.68 LPH) por doce horas de riego. Esto correspondió a 322.56 L por árbol. Se aplicaron dos riegos cada seis días, por lo que, el volumen de agua diario promedio disponible por árbol fue 107.52 L. Asumiendo que todo el volumen de agua aplicado es evapotranspirado por los árboles, y que la evaporación de los pasillos y espacio entre los árboles es despreciable (riego por goteo con cinta enterrada), la evapotranspiración promedio diaria de la huerta correspondería al volumen de agua aplicado a cada árbol (107.52 L), dividido por el área correspondiente al marco de plantación (12\*8), que corresponde a una tasa de evapotranspiración promedio diaria de la huerta de 1.12 mm.

En eventos sin lluvia, el sistema eddy debería medir esta tasa de evapotranspiración cuando toda el agua aplicada se evapotranspira. Si la tasa de evapotranspiración es mayor, implicaría que los árboles, además de consumir el agua de riego estarían extrayendo parte del agua almacenada en el suelo de estratos de mayor profundidad. Cuando la evapotranspiración es mucho menor, podría representar sobre riego para las mismas condiciones climáticas.

### Balance de energía

Para evaluar la precisión de las mediciones del flujo de calor latente (del que se obtiene la tasa de evapotranspiración), se obtuvo el balance de energía ( $R_n - G = H + LE$ ) sobre la superficie de la huerta, usando los valores integrados diario de las 8:00 a las 19:00 h de los flujos correspondientes durante los meses de crecimiento de los árboles (Figura 3). La suma del flujo de calor sensible y latente (flujos por turbulencia) fue en promedio 18.2% menor que la energía disponible ( $R_n - G$ ). Esta diferencia se debe a la naturaleza propia de las mediciones, ya que  $R_n$  y  $G$  son mediciones puntuales mientras que  $H$  y  $LE$  son resultado de mediciones de los flujos que provienen de una extensa superficie. Al respecto, estudios realizados por Twine *et al.* (2000) en pastos de diferentes localidades mostraron que la suma de los flujos por turbulencia es usualmente entre 10 % y 30% menor que la energía disponible. Varios estudios en diferentes tipos de vegetación y de clima de la red de flujos (FLUX NET) de USA, han mostrado que los flujos por turbulencia generalmente

son 20% menores que la energía disponible (Wilson *et al.*, 2002). El problema del cierre del balance de energía sobre diferentes superficies vegetales, muestra que la suma de los flujos por turbulencia es alrededor de 20% menor que la energía disponible (Foken, 2008). En una superficie de chile morrón, la suma de los flujos por turbulencia fue 19% menor que la energía disponible (López *et al.*, 2015).



**FIGURA 3.** Relación entre la suma de los flujos por turbulencia (H+LE) y la energía disponible (Rn-G), sobre una huerta de nogal pecanero de siete años de edad del Norte de México.

### Flujos de energía diurnos

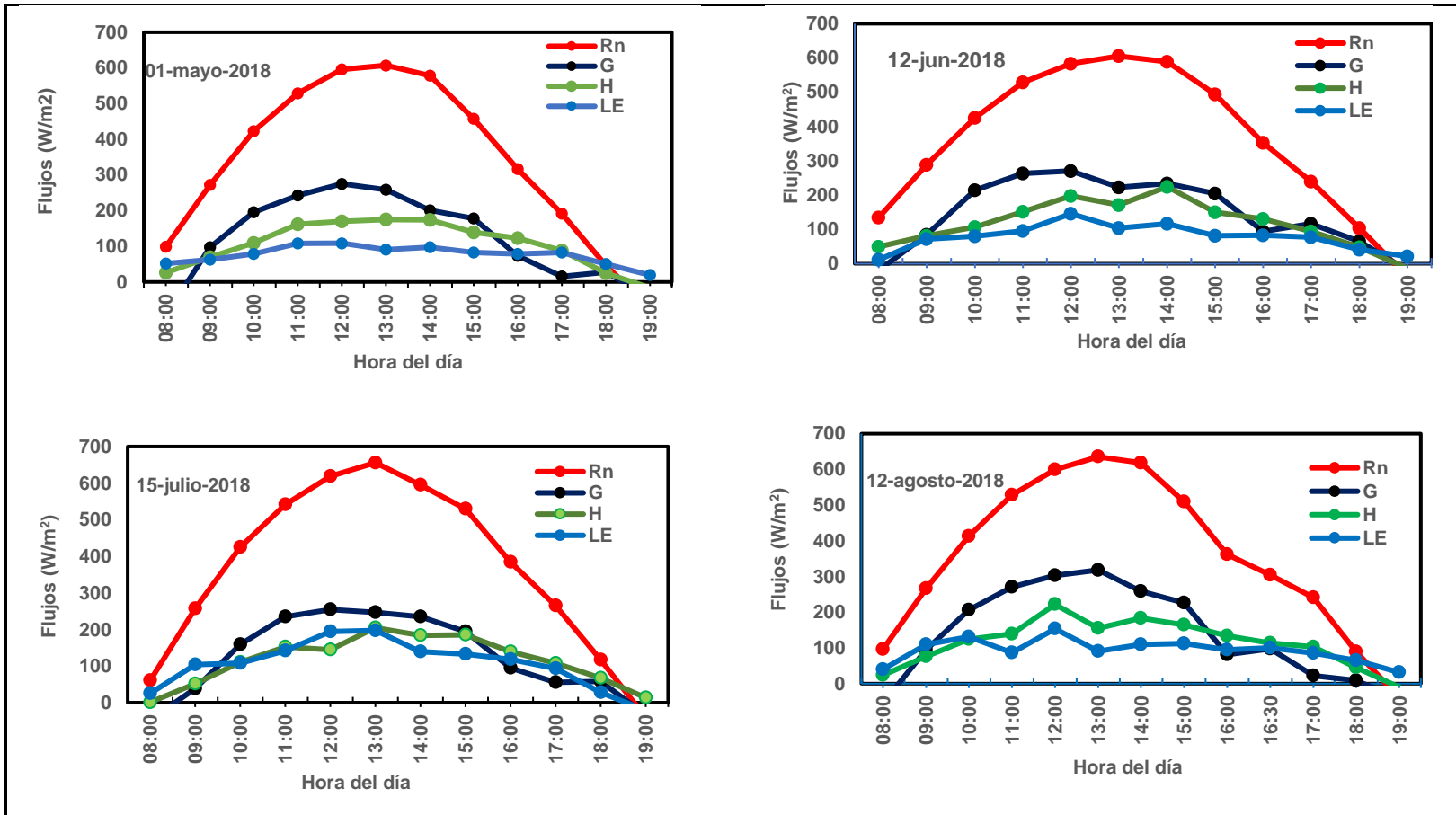
La radiación neta (Rn) sobre la huerta de nogal pecanero durante las horas del día (8:00 a 19:00h), en los meses de crecimiento de los árboles, se disipó principalmente en flujo de calor en la superficie del suelo (G), flujo de calor sensible (H) y en menor proporción en flujo de calor latente (LE) (Figura 4). La mayor disipación de Rn en G se debió a que la superficie mayor de la huerta fue de suelo sin vegetación, ya que la huerta estaba formada por árboles jóvenes (siete años de edad) con un diámetro promedio de copa de

4.78 m, que corresponde a un dosel de 15.75 m<sup>2</sup> de superficie. Para un marco de plantación de 8 m entre árboles y 12 m entre líneas, la copa de los árboles solo cubría el 16.4 % de dicha superficie (15.75/96). Por lo que, la radiación solar incidente se recibía en una superficie de suelo sin vegetación que cubría el 83.6% de la superficie total, y solo el 16.4 % correspondió al dosel de los árboles. Por tal motivo, la radiación neta se dispersó principalmente en flujo de calor en la superficie del suelo y en la menor proporción en flujo de calor latente (Figura 4).

En huertas de nogal pecanero con árboles de mayor edad, cuyo dosel cubre la mayor parte de la superficie del suelo, el mecanismo principal de disipación de la radiación neta es el flujo de calor latente. Por ejemplo, Teixeira y Bastiaanssen (2012) mencionan que, en huerta de nogal con árboles maduros, que tienen mayor cobertura del suelo e intercepción de la radiación solar, la mayor disipación de la energía es en flujo de calor latente y sensible y en menor proporción en flujo de calor en el suelo. En huerta de nogales con árboles de 50 años y altura de 14m la radiación neta se puede disipar hasta en 80% en flujo de calor latente (Silva *et al.*, 2007; Flores, 2009). En otras huertas de frutales maduros como el mango varios estudios señalan que la radiación neta se puede disipar hasta en 81% en flujo de calor latente, 14% en flujo de calor sensible y menos de 5% en flujo de calor en el suelo (Borges *et al.*, 2008; Teixeira *et al.*, 2008a, b). En huerta de frutales de menor cobertura como arboles jóvenes de Kiwi (*Actinidia deliciosa*) de 13 años de edad, la radiación neta se puede disipar hasta en 50 % durante junio, julio y agosto que son los meses de mayor temperatura (Rossi, *et al.*, 2007)

La máxima incidencia de radiación ocurre entre las 12:00 y las 14:00 h del día, que corresponde con el valor mayor del flujo de calor en la superficie del suelo (G), calor sensible (H) y latente (LE) (Figura 4). La tasa diaria de evapotranspiración (ET) se obtiene dividiendo el flujo de calor latente diurno integrado (8:00 a 19:00 h) por el calor de vaporización del agua. Para los días que se muestran en la Figura 4 (mayo 1, junio 12, julio 15 y agosto 12), la tasa de evapotranspiración (mm) fue 1.94, 1.85, 2.11 y 1.73 respectivamente. Para huertas de nogal de mayor edad y con más cobertura vegetal, la tasa diaria de ET es mucho mayor. Estudios realizados por Wang *et al.* (2005) en nogales de

más de 40 años observaron valores máximos de tasa de evapotranspiración de hasta 8 mm/día durante junio. Mientras que, Flores (2009) también en arboles adultos de nogales reporta valores promedios de 5.23 y 4.82 mm/día para los meses de junio y julio respectivamente. Estos valores son muy superiores a los encontrados en este estudio con nogales más jóvenes y de menor cobertura.

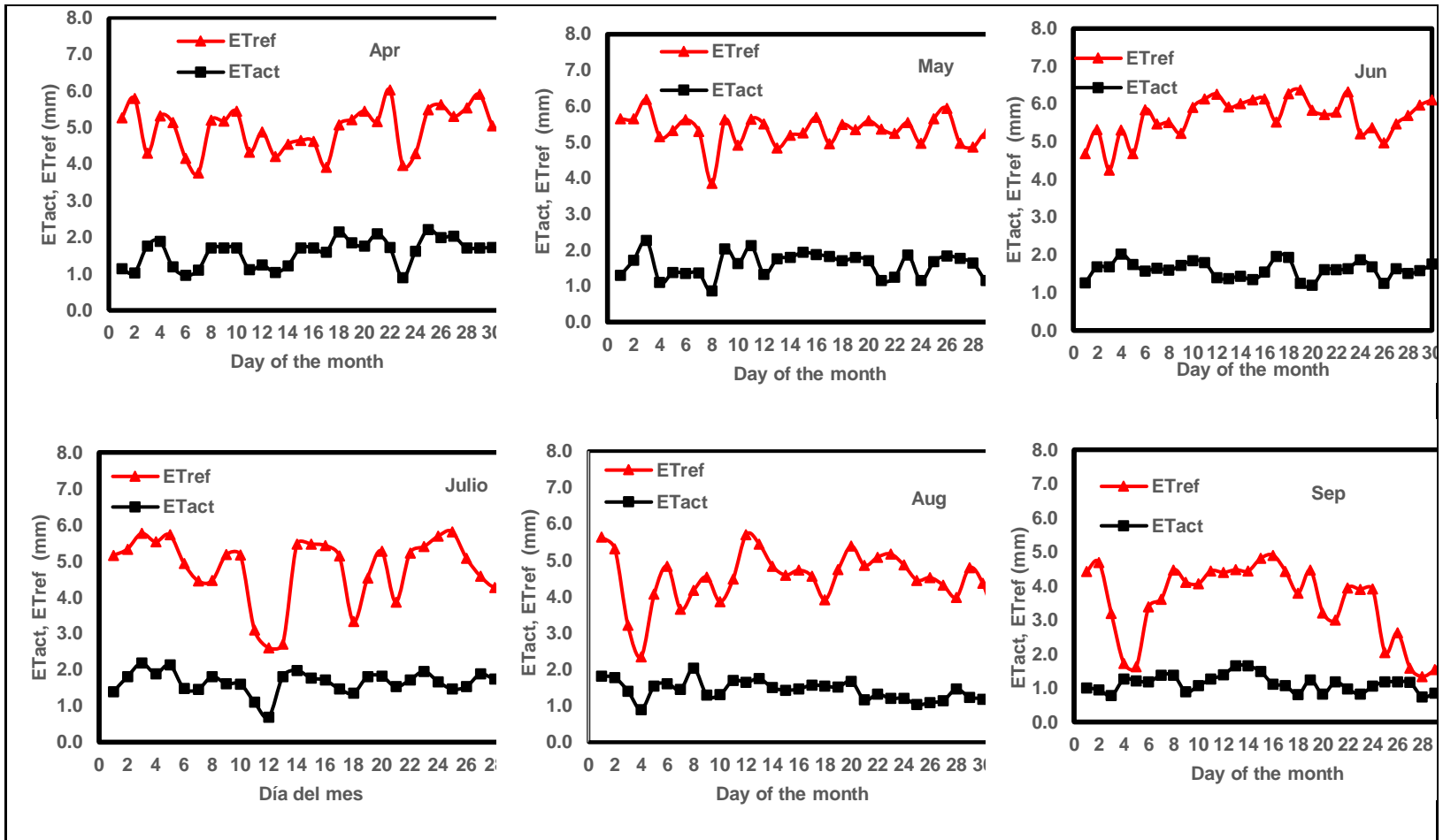


**FIGURA 4.** Distribución diurna de los flujos por radiación neta (Rn), calor en la superficie del suelo (G), calor sensible (H) y calor latente (LE), en una huerta de nogal pecanero (siete años de edad) del norte de México, en diferentes días del ciclo de crecimiento de los árboles.



### **Tasa diaria de evapotranspiración medida y de referencia de la huerta**

A través de los meses de crecimiento de los árboles, la tasa diaria de evapotranspiración media (ETact) con el sistema de covarianza eddy fue mucho menor que la evapotranspiración de referencia (ETref) que se obtuvo con el método FAO Penman-Monteith (Figura 5 y 6), Esta gran diferencia se debe a que la ETref, corresponde al consumo de agua de una superficie vegetal que cubre totalmente la superficie (pasto de 12 cm de altura) sin déficit de agua en el suelo. Mientras que, la ETact es principalmente la evapotranspiración del dosel de los árboles de la huerta que solo cubrían el 16.4% de la superficie total. Para los meses evaluados (Figura 5 y 6), la tasa promedio diaria de la ETref fue 4.79 mm, mientras que la ETact solo fue 1.5 mm, esto significa que la ETref es 3.193 veces mayor que la ETact. Esto significa, que el coeficiente de cultivo (Kc) para una huerta de nogal de estas características debe ser pequeño ( $1.5/4.79$ ). Para huertas de nogal pecanero, con árboles de mayor edad y de mayor diámetro de copa (mayor densidad del dosel) la ETact puede ser igual o mayor que la ETref. Al respecto, estudios realizados por González-Cervantes *et al.* (2012) en huertas de nogal de 30 años de edad mostraron que la ETact y la ETref fueron muy similares entre sí con promedios diarios de 5.6, 6.1, 5.7 y 4.7 mm para los meses de mayo a agosto respectivamente, donde el valor del coeficiente de cultivo (Kc) fue aproximadamente la unidad. Rodríguez *et al.* (2010) y Sammis *et al.* (2004) observaron que en huertas adultas de nogal pecanero la tasa diaria de ETact durante el verano puede ser de hasta 8 mm y que con frecuencia puede ser mayor que la tasa de ETref.



**FIGURA 5.** Tasa diaria de evapotranspiración actual (ETact), obtenida con el sistema de covarianza eddy, y la de referencia (ETref) (FAO Penman-Monteith), en los meses (abril-septiembre) de crecimiento de los árboles de una huerta de nogal pecanero de siete años de edad, del norte de México.

### **Determinación de los coeficientes mensuales de ajuste por desarrollo del cultivo**

La evapotranspiración total mensual de referencia determinada con el método FAO Penman-Monteith fue mucho mayor que la evapotranspiración mensual medida con el sistema de covarianza eddy durante los meses de crecimiento de los árboles (abril a septiembre) (Cuadro 2). Como se mencionó anteriormente, este resultado se debió a que el dosel de los árboles solo cubría el 16.4 % de la superficie total de la huerta, el resto de la superficie fue suelo desnudo o con escasa vegetación nativa y sin riego. La  $ET_{ref}$  total de abril a septiembre fue 3.19 veces mayor que la  $ET_{act}$ . El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), que es la relación entre la evapotranspiración actual y la de referencia fue mayor en julio (0.348), y menor en junio (0.248), el valor promedio fue 0.316 con un coeficiente de variación de 6.84 %. Dado que, el coeficiente de variación de los valores mensuales del  $K_c$  es pequeño, se podría utilizar el valor promedio de  $K_c$  para estimar la tasa de evapotranspiración actual en función de la tasa de evapotranspiración de referencia.

En huertas maduras de nogal pecanero en El Paso Texas, USA el coeficiente de ajuste por desarrollo fue 0.89 para el mes de agosto (Abudu *et al.*, 2016,). Estudios realizados por Miyamoto (1983) y Sammis *et al.* (2004) en esta misma localidad, observaron valores de  $K_c$  mayores que 1.0 en los meses de julio, agosto y septiembre.

Estudios de evapotranspiración de 279 huertas de nogal pecanero con sensores remotos en el Valle de Rio Grande Nuevo México, mostraron que el  $K_c$  máximo y promedio anual es 0.70 y 0.55 respectivamente (Samani, 2009). Estos resultados muestran que las huertas de pecanas no tienen un único coeficiente de cultivo y existe una variación significativa en los valores de  $K_c$  entre las huertas.

La lámina de agua equivalente mensual aplicada por los riegos (Cuadro 2) se obtuvo dividiendo el volumen de riego aplicado al total de árboles de una ha, por el área correspondiente a una ha. Nótese que, para todos los meses evaluados, la lámina de agua evapotranspirada ( $ET_{act}$ ) que se obtuvo con el sistema de covarianza eddy fue mayor que la lámina de riego equivalente (Cuadro 2). Esto indica que todo el volumen de agua aplicado se consumió por los árboles y que la diferencia corresponde al consumo de la reserva de agua del suelo de mayores profundidades. Este resultado también indica que el volumen de riego aplicado no fue suficiente para la demanda de agua de los árboles de la

huerta. Por el contrario, cuando la lámina de riego equivalente es mucho mayor que la evapotranspiración actual, sería un indicador de sobre irrigación de la huerta.

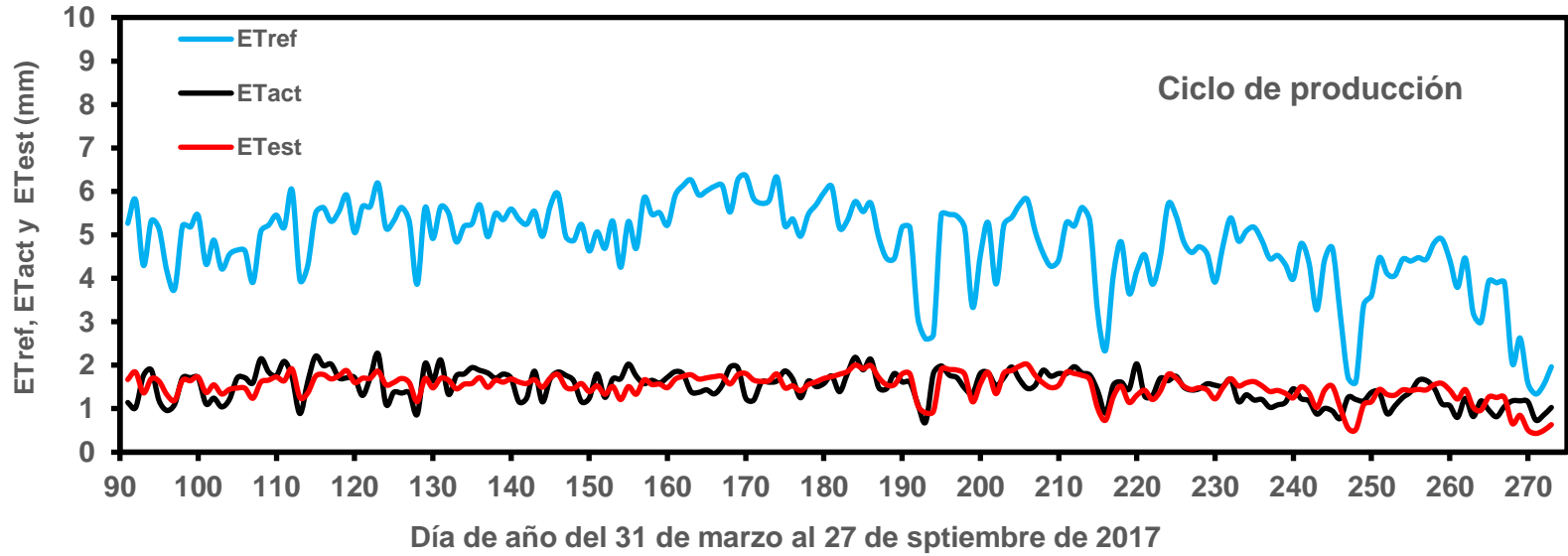
**CUADRO 2.** Evapotranspiración mensual medida con el sistema de covarianza Eddy (ETact) y la de referencia estimada con el método FAO Penman-Monteith (ETref), coeficiente mensual de cultivo (Kc) y la lámina equivalente de agua mensual aplicada por riegos a la huerta (Lequ).

Mes	ETact (mm)	ETref (mm)	Kc	Lequ (mm)
Abril	47.26	148.86	0.317	33.30
Mayo	49.47	164.29	0.301	34.41
Junio	48.17	169.41	0.284	33.30
Julio	52.03	149.61	0.348	34.41
Agosto	43.82	139.72	0.314	34.41
Septiembre	33.71	104.44	0.323	33.30

### **Tasa diaria de evapotranspiración medida y estimada a partir de la evapotranspiración de referencia**

La tasa diaria de evapotranspiración estimada a partir de la evapotranspiración de referencia ( $E_{Test} = E_{Tref} * K_c$ ) fue estadísticamente igual (Welch,  $\alpha \leq 0.05$ ) a la tasa de evapotranspiración diaria mediada con el sistema de covarianza eddy (ETact) (Figura 6). La importancia de este resultado se refleja en la posibilidad de programar la irrigación de los árboles de la huerta a partir de la evapotranspiración de referencia, ya que la información requerida para generar la ETref es más accesible y de menor costo que la requerida para obtener la ETact. Por ejemplo, supóngase que, en el mes de mayo, la ETref de los tres días previos fue 14 mm y el coeficiente de cultivo de dicho mes es 0.301, la tasa de ETest sería 4.24 mm y para una superficie de una ha corresponde a 42.4 m<sup>3</sup>. La densidad de árboles por ha es 104, por lo que, a cada árbol se le debe aplicar un riego de 407.69 L de agua para reponer el agua consumida por los árboles. De igual forma se podría calcular el volumen de agua por aplicar para cualquier fecha y cualquier segmento de tiempo, en función de la ETref, el Kc y el calendario de riegos por establecer.

La tasa anual de evapotranspiración de las huertas de nogal pecanero puede variar de 500 hasta 1 400 mm y depende de las condiciones de los árboles y las condiciones climáticas (Samani, 2011). En huertas maduras de nogal pecanero de 120 árboles por ha y 61.4 m<sup>2</sup> de diámetro de copa, Abudu *et al.* (2016) observaron valores de ET<sub>act</sub> de 1 054 mm a 1 167 mm para la temporada de crecimiento de marzo a octubre, mientras que, para el mismo periodo la ET<sub>ref</sub> fue de 1 528 mm a 1 635 mm, reportando que la tasa diaria de ET<sub>ac</sub> de los meses de mayor demanda es de hasta 8 mm. Si tomamos este valor, corresponde a un volumen de agua evapotranspirado de 80 000 L ha<sup>-1</sup>, que para 120 árboles por ha corresponde a 666.66 L por árbol. Este volumen es 48.38 % mayor al aplicado a los árboles de la huerta donde se realizó este estudio.



**FIGURA 6.** Tasa de evapotranspiración diaria medida con el sistema de covarianza eddy (ETact), la de referencia (ETref) y la estimada a partir de la evapotranspiración de referencia y los coeficientes mensuales de cultivo (ETest), a través de los meses de crecimiento de los árboles de una huerta de nogal pecanero joven (7 años) del norte de México.

## **CONCLUSIONES**

Los resultados de este estudio muestran que, comparando la tasa mensual de evapotranspiración (ET) que se puede obtener con mediciones directas o estimaciones a partir de la ET de referencia y los coeficientes de cultivo, contra la lámina de riego equivalente mensual, es posible identificar eventos de déficit o exceso de agua aplicada en los riegos a la huerta de nogal pecanero.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abudu, Shalamu & Sheng, Zhuping & Michelsen, Ari & Rodriguez, Olga & King, James. (2016). Evapotranspiration and Crop Coefficient for Pecan Trees in El Paso, Texas. December 2016. Conference: 2016 Irrigation Show & Education Conference At: Las Vegas, United States.
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. ET del Cultivo. Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos. Estudio FAO riego y drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia. 298 p.
- ARS-USDA. 2021. Plains Area. Southern Plains Agricultural Research Center. Crop Germplasm Research Unit. National Collection of Genetic Resources for Pecans and Hickories. (30-10-2022). From: <https://cgru.usda.gov/carya/species/ecobot.htm>.
- Avila, C. G., Juárez, I. R., & Estrada, C. A. T. (2005). Riego por goteo subsuperficial en nogal pecanero (*Carya illinoensis* K.) con diferentes números de laterales de riego. *Agricultura Técnica en México*, 31(2), 203-212.
- Borges, C. J. R., Azevedo, P. V., Silva, V. P. R., Campos, J. H. B. C., Moura, M. S. B. et al. (2008). Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 4, 393-399.
- Bittelli, M. 2010. Measuring Soil Water Potential for Water Management in Agriculture: A Review. *Sustainability*. 2. 10.3390/su2051226.
- Brow W. P. 2010. Pecan water use estimates for southern Arizona and Northern Mexico. XI simposio internacional de nogal pecanero. 54-61 pp.



CONAGUA. (2020). Comisión Nacional del Agua “Base de Datos Climatológica – Estación 5016 General Cepeda” extraído de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Diarios/5016.txt>.

Cruz B. F., Rodríguez J. C., Watts C., Bautista Olivas A. L. (2017). Balance hídrico mediante técnicas turbulentas y sensores de humedad en nogal (*Carya illinoensis*) en la costa de Hermosillo, Sonora. III congreso nacional de riego y drenaje COMEII 2017.

Escrig, J., Montón, E., Quereda, J. 2012. Climatología Aeronáutica del Aeropuerto de Castellón. Publicacions de la Universitat Jaume I, D. L. Castelló de la Plana. pp: 160-161.

FAO. (2022). Organización de las Naciones Unidas para Alimentación y la Agricultura. (20 de octubre 2022). FAOSTAT datos sobre la alimentación y la agricultura. Recuperado en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

Ferreira E., R., Sellés Van S, G. y Sellés M J. 2001. Riego deficitario controlado en nogales. Estrategias de riego para enfrentar situaciones de escasez de agua en frutales. Instituto de investigaciones Agropecuarias. Santiago de Chile. <https://doi.org/10.31428/10317/6806>.

Flores-Guerrero, J. A. 2009. *Distribucion Del Balance De Energia Y Consumo De Agua Del Cultivo Del Nogal Pecanero (Carya Illinoensis (Wangehn) K. Koch) En El Estado De Coahuila*. [Tesis de Maestria. Universidad Autonoma Auraria Antonio Narro]. <https://1library.co/document/qo3o2xjq-distribucion-balance-energia-consumo-pecanero-illinoensis-wangehn-coahuila.html>.

Foken, T. 2008. The energy balance closure problem: An overview. *Ecol. Applic.* 18: 1351-1367.

Fulton, A. E., Little, C. C., Snyder, R. L., Lampinen, B. D., & Buchner, R. P. (2017). Evaluation of crop coefficients and evapotranspiration in English walnut. In 2017 ASABE Annual International Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Gray, O. S. (1973). Consider pollen when planting. Pecan Q.

González-Cervantes, G., Chávez-Ramírez, E., González-Barrios, J. L., Dzul-López, A., Sánchez-Cohen, I., & Potisek-Talavera, M.C.(2012) Comparación De Métodos Para Determinar La Evapotranspiración Y Oportunidad De Riego En Nogal Pecanero. Terra Latinoamericana Volumen 30 Número 1, 2012.

Grauke, L.J., Mendoza-Herrera, M.A., Miller, A.J. et al. Geographic patterns of genetic variation in native pecans. *Tree Genetics & Genomes* 7, 917–932 (2011).

GCMA. (2020). Grupo Consultor de Mercados Agrícolas. México en el mercado de nuez Pecana. Consultado en [http://comenuetz.com/assets/gcma\\_engalec\\_mx\\_mercado\\_nuez\\_pecana.pdf](http://comenuetz.com/assets/gcma_engalec_mx_mercado_nuez_pecana.pdf)

Ham J.M. and J.L. Heilman. 2003. Experimental test of density and energy balance corrections on carbone diocide flux as measured using open Path eddy covariance. *Agron. J.* 95:1393-1403.

Hernandez, C. J. 2003. Estimación de los requerimientos hídricos de nogales en desarrollo y producción en Jiménez, Chihuahua. Informe de investigación México. CEDEL-INIFAP.

<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM05coahuila/municipios/05011a.html>

<https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2017/default.html#Tabulados>.

- Hoekstra A.Y., y Chapagain A.K. (2004). Water Footprints of Nations. UNESCO-IHE. Institute for Water Education. Value of Water. Research Report Series. Serie 16. Volume 1. Appendices. Netherlands.
- INC (2021). International Nut and Dried Fruit Council Foundation (INC). INC NUTS & DRIED FRUITS STATISTICAL YEARBOOK 2021/22.80 p.
- INIFAP. (2007). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Programa para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos. Folleto técnico 7.
- Liu Y. and Sheng Z. 2013. Soil Moisture Status in an Irrigated Pecan Field. Journal of Irrigation and drainage engineering.
- López Avendaño, J. E., Díaz Valdés, T., Watts Thorp, C., Rodríguez, J. C., Castellanos Villegas, A. E., Partida Ruvalcaba, L., & Velázquez Alcaraz, T. D. J. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra Latinoamericana*,33(3), 209-219.
- Medina M., M. del C. y Lagarda M., A. 1992. Efecto de la variedad y alternancia en el Índice de Desbalance Nutricional (IDN) del nogal pecanero. Revista: Información Técnica Económica Agraria (ITEA). Vol. 88V. (3): 167-181.
- Miyamoto S. (1983). Consumptive water use of irrigated pecan J. Amer. Soc. Hort. Sci. 108(5):676-681.
- Monteith, J., and M. Unsworth. 2007. Principles of Environmental Physics. Academic Press. Burlington, USA. 435 p.
- O' BARR R.D., 1977 Nutrient: Their impact. The Pecan Quarterly. Vol. 11. N° 4. 4- 10 pp.

- Rodriguez, J., Grageda, J., Watts, C.J., Garatuza-Payan, J., Castellanos, A., Rodriguez-Casas, J., Hernandez, J., & Olavarrieta, V. (2010). Water use by perennial crops in the lower Sonora watershed. *Journal of Arid Environments*, 74, 603-610. 10.1016/j.jaridenv.2009.11.008.
- Rodríguez, J. C., Watts, C., Garatuza-Payan, J., Lizárraga-Celaya, C., Grageda-Grageda, J., Ochoa-Meza, A., Moreno-Salazar, S. F., & Renteria-Martinez, M. E. (2011). Evapotranspiración Y Balance Hídrico En Nogal Pecanero (*Carya illinoensis* K. Koch) En La Costa De Hermosillo, México. XIV CONGRESO INTERNACIONAL EN CIENCIAS AGRÍCOLAS. OCTUBRE 2011.
- Rossi, F, Facini, O., Georgiadis, T., & Nardino, M. (2007). Seasonal CO<sub>2</sub> Fluxes and Energy Balance In A Kiwifruit Orchard. *Italian Journal of Agrometeorology* 44 - 56 (1).
- SADER. (2021). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (07 de octubre 2021). México segundo exportador mundial de nuez pecanera sin cáscara. Recuperado en <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-segundo-exportador-mundial-de-nuez-pecanera-sin-cascara?idiom=es>.
- Samani, Z., Bawazir, A. S., Bleiweiss, M., Skaggs, R., Longworth, J., Tran, V. D., & Pinon, A. (2009). Using remote sensing to evaluate the spatial variability of evapotranspiration and crop coefficient in the lower Rio Grande Valley, New Mexico. *Irrigation Science*, 28(1), 93-100.
- Samani, Z., Bawazir, S., Skaggs, R., Longworth, J., Piñon, A., & Tran, V. 2011. A simple irrigation scheduling approach for pecans. *Agricultural Water Management*, Volume 98, Issue 4, Pages 661-664. ISSN 0378-3774. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.11.002>.

Sammis, T. W., Mexal, J. G., & Millar, D. (2004). Evapotranspiration of food-irrigated pecans, *Agric. Water Management*, 69:179-190.

Secretaría-Economía. (2015). SIAVI, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet. Retrieved November 30, 2015, from <http://www.economia-snci.gob.mx/>

SIAP. (2021). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (10 de julio de 2021). Cierre de la producción agrícola por estado. Recuperado de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado>.

Sifuentes Ibarra, Ernesto, Samaniego Gaxiola, José Alfredo, Anaya Salgado, Antonio, Núñez Moreno, Jesús Humberto, Valdez Gascón, Benjamín, Gutiérrez Soto, Rosario Guadalupe, Ruelas Islas, Jesús del Rosario, & Macías Cervantes, Jaime. (2015). Programación del riego en nogal pecanero (*Carya illinoensis*), mediante un modelo integral basado en tiempo térmico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(8), 1893-1902. Recuperado en 04 de noviembre de 2022, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342015000801893&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000801893&lng=es&tlng=es).

Silva, V. P. R., Azevedo, P. V., & Silva, B. B. (2007). Surface energy fluxes and evapotranspiration of a mango orchard grown in a semiarid environment. *Agronomy Journal*, v. 99, p. 1391- 1396.

Teixeira, A. H. C. & Bastiaanssen, W. G. M. (2012). Five methods to interpret field measurements of energy fluxes over a micro-sprinkler-irrigated mango orchard. *Irrigation Science*, v. 30, p. 13-28.

Teixeira, A. H. C., Bastiaanssen, W. G. M., Ahmad, M. D., Moura, M. S. B.; Bos, M. G.(2008a). Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 362, n. 1, p. 110-127.

- Teixeira, A. H. C., Bastiaanssen, W. G. M., Moura, M. S. B., Soares, J. M., Ahmad, M. D. *et al.* (2008b). Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, northeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, p. 1524-1537.
- Twine, T. E., W. P. Kustas, J. M. Norman, D. R. Cook, P. R. Hourser, T. P. Meyers, J. H. Prueger, P. J. Starks, and M. L. Wesley. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agric. For. Meteorol.* 103: 279-300.
- Valdez, G. B. 2001. Irrigacon. En: El nogal pecanero en Sonora Mexico. Libro tecnico No. 3 CECH-INIFAP. P. 93-112.
- Wang, J., Sammis, T.W., Meier, C., Simmons, L.J., Miller, D.R., & Samani, Z.A. (2005). 7.13 A Modified Sebal Model for Spatially Estimating Pecan Consumptive Water Use For Las Cruces, New Mexico.
- Worthington, J. W & Stein, L. (1990). Water management. In: Texas profitability handbook. TAES- The TexasA&M University System. P-V9-21.
- Wichelns, D. (2001). The role of 'virtual water' in efforts to achieve food security and other national goals, with an example from Egypt. *Agricultural Water Management*, 49,131–151.
- Wilson, K., A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, A. Grelle, A. Ibrom., B. E. Law, A. Kowalski, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monson, W. Oechel, J. Tenhunen, S. Verma, and R. Valentini. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. For. Meteorol.* 113: 223-243.

Zermeño González, Alejandro, Cruz Santes, Claudia Ivette, Munguía López, Juan Plutarco, Catalán Valencia, Ernesto Alonso, Campos Magaña, Santos Gabriel, & Cortés Bracho, Javier de Jesús. (2014). Efecto del sistema de riego y clima en la eficiencia del uso de agua de nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 32(1), 23-33. Recuperado en 04 de noviembre de 2022, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792014000100023&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792014000100023&lng=es&tlng=es).

Zermeño-González, Alejandro & A. Flores-Guerrero, Jaime & Munguia-López, Juan P. & A. Gil-Marin, Jose & Rodriguez-Garcia, Raul & A. Catalan-Valencia, Ernesto & Jimenez, Luis & Zermeno-Gonzalez, Hector. (2010). Evapotranspiration and its relation to equilibrium evapotranspiration of a pecan nut orchard (*Carya illinoensis*) of northern México. *Agrociencia*. 44. 885-893.

Zermeño-González, Alejandro & Isain Melendres-Alvarez, A & Alberto Fuerte-Mosqueda, L & Munguia-López, Juan P. & Jimenez, Luis. (2017). Evapotranspiration rate of a vineyard and its relation to the reference of the FAO Penman-Monteith method. *Agrociencia*. 51. 1-12.