

VARIACIÓN ESTOMÁTICA EN FOLIOLOS DE NOGAL PECANERO

(*Carya illinoensis* (WANGENH.) K. KOCH) EN BASE AL MÉTODO Y

EFICIENCIA DE RIEGO

Jorge Armando Chávez-Simental, Guillermo González-Cervantes, Jesús Guadalupe Arreola-Ávila, Ixchel Abby Ortiz-Sánchez y Héctor Manuel Loera-Gallegos

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue conocer los mecanismos fisiológicos en el proceso de adaptación que el árbol realiza al manejar el cultivo con diferentes tecnologías de riego. Se recolectaron muestras foliares de nogal pecanero en un huerto donde el riego es aplicado mediante cuatro métodos: gravedad, aspersión, microaspersión y goteo. Se seleccionó una rama por árbol bajo los diferentes sistemas y se dividió en tres partes: basal, media y apical; después se recolectaron tres hojas compuestas, para recolectar tres foliolos de iguales partes. Se utilizó la técnica de análisis de imagen para caracterizar y cuantificar los estomas y área foliar a partir de imágenes digitalizadas. Los árboles irrigados por aspersión presentaron

mayor área foliar en las hojas compuestas de la parte apical de la rama y en los foliolos de la parte apical de la hoja compuesta. Con los cuatro métodos de riego predominaron los estomas de tamaño mediano (0,0025-0,0050mm²). Hubo cambios en la ubicación de los estomas, con tendencia de la parte apical hacia la parte basal de la rama a medida que el volumen de suelo mojado disminuye. La investigación mostró los mecanismos de adaptación del cultivo en respuesta a la variación del volumen aplicado a través de diferentes métodos de riego, al modificar la densidad, ubicación y tamaño de los estomas, permitiendo estabilizar la tasa fotosintética y de transpiración que el árbol requiere para su supervivencia y reproducción.

Introducción

En México, la región productora de nuez se ubica en el norte, en los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango, Nuevo León e Hidalgo, los cuales representan el 98% de la producción nacional. En los últimos tres lustros, el área de nogal en producción creció de 49000 a 106000ha en el país y sólo en la Comarca Lagunera, Coahuila, México, de 5000 a

casi 9000ha, por lo que su producción y derrama económica también es mayor (Orona *et al.*, 2006; SAGARPA-SIAP, 2015).

En la Comarca Lagunera el agua es un recurso escaso que limita la actividad económica. Desde hace varios años el uso del recurso es no sustentable, pues la extracción de agua es mayor al volumen de recarga, lo que genera una sobreexplotación de los mantos acuíferos por más de 480hm³ (CNA,

2002). Ante este problema, el gobierno busca la manera de hacer uso más eficiente del agua mediante la tecnificación de los sistemas de riego (García *et al.*, 2006). En la actualidad los sistemas de riego usados en la producción de nuez son: gravedad, aspersión, micro-aspersión y goteo, con eficiencias de aplicación de 60, 70, 80 y 95%. En la Comarca Lagunera 48% de la superficie de nogal se riega por gravedad y 52% por

sistemas presurizados (Chávez *et al.*, 2011).

La disponibilidad de agua en el suelo depende de sus propiedades físicas como estructura, textura y porosidad. El manejo de la lámina y la frecuencia de riego, junto con factores ambientales tales como temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad y dirección del viento influyen en la eficiencia de aplicación y distribución del agua (Garratt, 1992). Algunos

PALABRAS CLAVE / Análisis de Imagen / *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch / Estomas / Humedad del Suelo / Nogal Pecanero /

Recibido: 09/03/2015. Modificado: 01/08/2016. Aceptado: 23/08/2016.

Jorge Armando Chávez-Simental.

Ingeniero Agrónomo, Instituto Tecnológico Agropecuario (ITA) N° 1, México. M.C. en Irrigación, ITA N° 10, México. Doctor en Ciencias Agrarias, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), México. Profesor Investigador, Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), México. e-mail: jorge.chavez@ujed.mx

Guillermo González-Cervantes.

Ingeniero Agrónomo y M.C. en Física de Suelos, UAAAN,

México. Doctor en Ciencias de la Tierra y del Universo, Université d'Angers, Francia. Investigador, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México. Dirección: Centro Nacional e Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, INIFAP. Margen Derecha del Canal de Sacramento Gómez Palacio, Dgo. C.P. 35120. México. e-mail: gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx

Jesús Guadalupe Arreola-Ávila.

Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma Chapingo (UACH), México. M.C. en Fruticultura, Colegio de Posgraduados, México. Ph.D. en Agronomía, New Mexico State University, EEUU. Profesor Investigador, UACH, México. e-mail: arreolavila@gmail.com

Ixchel Abby Ortiz-Sánchez.

Ingeniero Agrónomo, ITA N° 10, México. M.C. en Suelos, ITA N° 10, México. Doctora en Ciencias Agrarias, UAAAN,

México. Profesor Investigador, Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana (Durango, México) e-mail: Ixchel_abby@hotmail.com

Héctor Manuel Loera-Gallegos.

Licenciado en Ciencias Forestales, M.C. en Conservación y Manejo de Recursos Naturales y Medio Ambiente y Doctor en Ciencias en Manejo de Zonas Áridas y Semiáridas, UJED, México. e-mail: hm.gallegos@ujed.mx

STOMATAL VARIATION IN PECAN NUT (*Carya illinoensis* (WANGENH.) K. KOCH) LEAFLETS BASED ON IRRIGATION METHOD AND EFFICIENCY

Jorge Armando Chávez-Simental, Guillermo González-Cervantes, Jesús Guadalupe Arreola-Ávila, Ixchel Abby Ortiz-Sánchez and Héctor Manuel Loera-Gallegos

SUMMARY

This study aimed to determine the physiological mechanisms in the tree adaptation process when different technologies are employed in order to irrigate the crop. Pecan nut leaf samples were collected in an orchard where irrigation is applied by means of four systems: surface, sprinkler, micro sprinkler and drip irrigation. Under the different irrigation methods a branch was selected and divided into three parts: basal, middle and apical; then, three compound leaves were collected in order to collect three leaflets from the same branch segments. Image analysis was used to characterize and quantify the stomata and leaf area from scanned images. Trees irrigated with the sprin-

kler system showed a higher leaf area in composite apical leaves and in the leaflets of the apical part of the compound leaf. In the trees under all four irrigation systems predominated medium size stomata (0.0025-0.0050mm²). Changes in the stomata location were observed, with a trend from the apical to the basal part of the branch as the wet soil volume decreased. The study revealed the crop adaptation mechanisms in response to the volume variation applied through different irrigation methods by modifying the density, location and size of stomata, allowing to stabilize the photosynthetic rate and transpiration demand needed for survival and reproduction of the tree.

VARIAÇÃO ESTOMÁTICA DE FOLHETOS DE NOZ PECAN (*CARYA ILLINOENSIS* (WANGENH.) K. KOCH) COM BASE NO MÉTODO E EFICIÊNCIA DA IRRIGAÇÃO

Jorge Armando Chávez-Simental, Guillermo González-Cervantes, Jesús Guadalupe Arreola-Ávila, Ixchel Abby Ortiz-Sánchez e Héctor Manuel Loera-Gallegos

RESUMO

O objetivo deste estudo foi determinar os mecanismos fisiológicos no processo de adaptação da árvore faz para gerenciar a cultura com diferentes tecnologias de irrigação. Amostras de folhas de noqueira foram coletadas em um pomar onde a irrigação é aplicada por quatro sistemas: superfície, aspersão, micro aspersão e gotejamento. Um galho de árvore sob diferentes sistemas foram selecionados e divididos em três partes: basal, médio e apical; em seguida, três folhas compostas foram recolhidas, para recolher três folhetos sob os critérios acima. A técnica de análise de imagens foi utilizada para caracterizar a área de estômatos e folha com base em imagens digitalizadas. Árvores irrigados com sistema de aspersão apre-

sentaram maior área foliar em folhas apicais compostas do ramo e os folhetos da parte apical da folha. Nas árvores de quatro sistemas de irrigação predominaram estômatos tamanho médio (0,0025-0,0050mm²). Fomos observou que houve alterações na localização estômatos com tendência a partir do apical a parte basal do ramo como o volume de solo molhado diminui. O inquérito revelou os mecanismos de adaptação de culturas em resposta à variação do volume aplicado através de diferentes sistemas de irrigação, modificando a densidade, localização e tamanho dos estômatos, permitindo estabilizar a taxa fotossintética e da procura transpiração para a sobrevivência e reprodução de árvore.

de los procesos fisiológicos, como lo son la fotosíntesis y la transpiración, promueven la necesidad hídrica a través del flujo de gases (CO₂ y O₂) entre la planta y la atmósfera (Taiz y Zeiger, 2006). Estos procesos se llevan a cabo en los cloroplastos a través de los estomas en los folíolos. Los cloroplastos tienen la función de transformar la energía lumínica en energía química (Mexal *et al.*, 2003). Por otra parte, los estomas se conforman por un par de células guarda rodeadas por células adjuntas y el espacio generado entre éstas se denomina 'ostiole'.

El ostiole regula el cierre y la apertura del estoma, variando su tamaño total (Swarthout, 2008). A su vez, factores exter-

nos que involucran el intercambio de gases y factores edáficos que incluyen la tensión del agua retenida por los minerales del suelo, también regulan el ostiole y, al mismo tiempo, el tamaño y la densidad de los estomas (Ball *et al.*, 1987). En caso de déficit hídrico en el suelo y altas temperaturas en el ambiente, el ostiole da la señal de cerrar el estoma, cortando el flujo de agua entre la planta y la atmósfera, lo que impide el intercambio de gases y reduce el rendimiento fotosintético (Daily *et al.*, 1997; Lallana y Lallana, 2003). El déficit hídrico y la salinidad ocasionan descensos en la cantidad de estomas por unidad de superficie de algunas especies vegetales (Salas *et al.*, 2001).

Según González (2001) los estudios de caracterización morfológica se basan en caracteres cualitativos o cuantitativos, y dentro de estos últimos se encuentran los que consisten en medidas, llamados morfo-métricos. El análisis morfo-métrico de imágenes digitalizadas es una metodología aplicada en especies frutícolas para la definición y la caracterización de cultivares tales como el chirimoyo (*Annona cherimola* Mill.), olivo (*Olea europaea* L.) y carambolo (*Averrhoa carambola* L.) (Potes, 1987; Andrés *et al.*, 2004; Aparecida y Geraldo, 2007).

El objetivo de este trabajo fue conocer la variación morfológica de los estomas en folíolos de nogal pecanero,

según los diversos sistemas de riego empleados en la producción de nuez.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en el huerto de nogal pecanero (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) del campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna (UAAAN-UL) en el municipio de Torreón, Coahuila, México. Este municipio pertenece a la Comarca Lagunera, entre 102°22' y 104°47'O y entre 24°22' y 26°23'N, con una altitud de 1139msnm.

El huerto cuenta con un módulo de riego basado en los cuatro sistemas de riego que se emplean en la producción de

nuez (gravedad, aspersión, micro-aspersión y goteo). El módulo de riego por gravedad está conformado por 11 hileras de cinco árboles cada una, para un total de 55 árboles. El riego presurizado cuenta con 12 hileras de ocho árboles cada una con un total de 96 árboles. La superficie de cada sistema de riego presurizado es de 0,16ha, conformada por cuatro hileras de cuatro árboles para cada sistema. Se seleccionaron árboles sanos variedad Western donde la edad supera los 20 años en el sistema de riego por gravedad y 16 años en los sistemas de riego presurizado.

Muestreo de humedad en el suelo

Se determinó la curva de retención de humedad del suelo mediante el método del plato y membrana de presión AS-06 descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002) para la determinación de los parámetros capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Del mismo modo se determinó el contenido de humedad del suelo mediante el método gravimétrico AS-05 descrito en la misma Norma. Las muestras de suelo fueron tomadas con la barrena a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90cm) y se llevaron al Laboratorio de Riego y Drenaje de la UAAAN-UL en recipientes de aluminio; se tomó el peso húmedo de la muestra y después se dejó en la estufa a 105°C durante 24h para el proceso de secado. El contenido de humedad gravimétrica se obtuvo utilizando la Ec. 1, donde PSH: peso del suelo húmedo y PSS: peso de suelo seco.

El contenido de humedad volumétrica se obtuvo utilizando la Ec. 2, donde se agrega la densidad aparente (D_a) deter-

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{(\text{PSH} - \text{PSS})}{\text{PSS}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Contenido de humedad (cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) = \frac{(\text{PSH} - \text{PSS})}{\text{PSS}} \times 100 \times D_a \quad (2)$$

minada por diferencia de peso en volumen conocido.

Muestreo foliar

Las hojas del nogal pecanero son de tipo peciolada o compuesta, integradas por 5 a 19 foliolos dispuestos en forma opuesta y generalmente con un foliolo en la parte apical, por lo que normalmente contiene su número es impar; son de forma ovalada, lanceoladas y finamente dentadas (Mendoza, 1969; Camargo, 2001). De cada árbol en estudio se seleccionó una rama de la parte basal de la copa; después se seleccionaron tres hojas compuestas, de la parte basal, media y apical de la rama. Por último, se colectaron tres foliolos bajo el mismo criterio anterior: parte basal, media y apical. Los foliolos se depositaron en un recipiente seco para su traslado inmediato al laboratorio de análisis de imagen. El muestreo de foliolos se llevó a cabo en el mes de julio, entre las 11:00 y 17:00. Se seleccionó esa fecha por ser la etapa fenológica más crítica en condiciones ambientales que demanda gran cantidad de agua (estado acuoso y llenado de almendra) (Godoy y López, 2000).

Análisis de imágenes

La obtención y tratamiento de las imágenes sobre la superficie de los foliolos se realizó con ayuda de una cámara digital marca Olympus con sensor óptico CCD de 4,1 megapíxeles. Se colocó papel milimétrico sobre la base de digitalización bajo la lente del microscopio para usarlo como guía de medición y tomarla de referencia para la calibración del software. Todas las imágenes se capturaron a la misma distancia para obtener un igual número de píxeles y área del papel milimétrico con el objetivo de utilizar la misma cali-

bración. El área de captura fue de 5mm² en la parte abaxial de los foliolos, derivada de una matriz rectangular de 2,5×2mm donde la resolución espacial fue de 1,1µm por píxel; se empleó luz visible artificial sobre los foliolos para la descripción de los estomas. El tratamiento de imagen se realizó con el analizador Image Pro Plus® versión 4.5 (Media Cibernética Maryland, EEUU) bajo microcomputadora personal en base a las imágenes tomadas (González *et al.*, 2005).

Área de foliolo y características de los estomas

El área de los foliolos fue determinada con base en imágenes capturadas donde se observa el foliolo completo. La caracterización y cuantificación de estomas se realizó a partir de un parámetro morfológico: el tamaño de poros expresado por el área de su sección sobre la imagen descrita por la Ec. 3 (Coster y Charmant, 1985), agrupa tres tamaños: pequeños, medianos y grandes.

$$\frac{(\text{Perímetro})^2}{4\pi} \times \text{Área} \quad (3)$$

La densidad estomática se determinó a partir del conteo de los estomas sobre el área de captura (5mm²) en tres foliolos por sistema de riego. Las variables cuantitativas de área de foliolo, tamaño y densidad de los estomas, se procesaron en el paquete estadístico SAS ver 9.0 usando la comparación de

medias de la prueba de *low significant difference* LSD ($P \leq 0,05$) en cada variable de estudio.

Morfometría estomática

En esta variable se realizaron dos tipos de análisis basado en las imágenes digitales: primero se correlacionó la variación estomática en base a su densidad y al método de riego; el segundo análisis fue en base a la densidad estomática en función al tamaño y posición de la hoja en la rama, correlacionando con los sistemas de riego, el volumen humectado y su eficiencia de aplicación. La Figura 1 muestra la composición anatómica del estoma de un foliolo del nogal.

Diseño de tratamientos

El diseño estadístico usado para el análisis de los datos fue un diseño de bloques al azar con arreglo factorial y tres repeticiones (4×3×3); el factor A consistió en los métodos de riego (A1 gravedad, A2 aspersión, A3 micro-aspersión y A4 goteo); el factor B consistió en la ubicación de la hoja compuesta en la rama (B1 basal, B2 media y B3 apical); el factor C en la ubicación del foliolo en la hoja compuesta (C1 basal, C2 media y C3 apical).

Resultados y Discusión

En la Figura 2 se presenta el contenido de humedad volumétrica del suelo (cm³ de agua/cm³ de suelo) a lo largo del ciclo fenológico productivo del

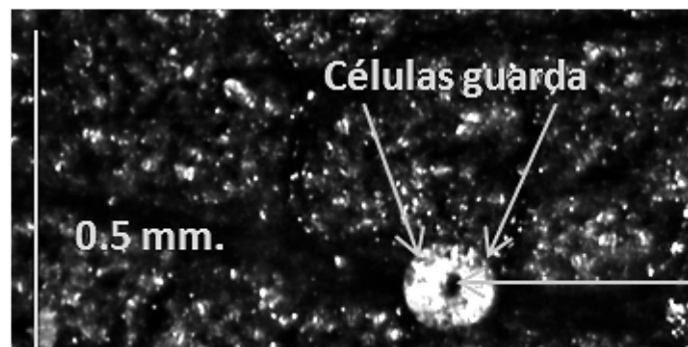


Figura 1. Digitalización de foliolos y descripción de los estomas para su análisis morfológico.

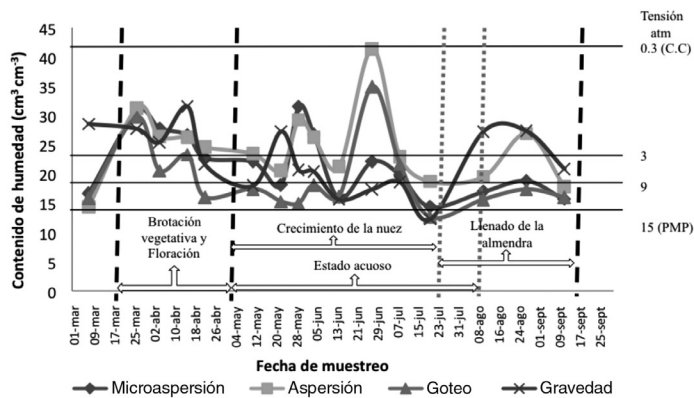


Figura 2. Abatimiento de humedad en el suelo a 60 m de profundidad en el huerto de nogal pecanero.

nogal (marzo-septiembre), a una profundidad de 60cm, ya que es ahí donde se concentra el 80% de raíces y se tiene la mayor actividad de absorción de agua y solutos. El mes de marzo corresponde a la etapa de pre-brotación vegetativa y floración, el contenido de humedad en el suelo osciló entre 14 y 17cm³·cm⁻³ en los sistemas presurizados, no así en el sistema por gravedad que registró una humedad de 2cm³·cm⁻³. En la etapa de brotación vegetativa y floración, el contenido de humedad en el suelo osciló entre 1 y 9atm. De acuerdo con lo expuesto por Godoy y López (2000), al entrar a la etapa de crecimiento de la nuez (mayo-julio), el cultivo se encuentra en la etapa de máxima demanda hídrica, por lo que el consumo de agua aumentó al igual que la frecuencia de riego en los cuatro sistemas. Sin embargo, se presentaron descensos en el contenido de humedad del suelo cerca del PMP (15atm) en algunos casos, excepto en los árboles irrigados bajo el sistema de aspersión los cuales se mantuvieron entre 0,3 y 9atm. En la etapa de llenado de almendra, entre julio y septiembre, los árboles irrigados bajo los sistemas de goteo y micro-aspersión mostraron un comportamiento similar (Figura 2).

El primer riego se aplicó el 23/022009 por el sistema de gravedad y en el sistema presurizado (aspersión, micro-aspersión y goteo) del 12 al 25/03/2009, por lo que en la etapa de brotación de hojas y

floración, el árbol efectuó sus funciones fisiológicas sin existir estrés hídrico. Esto se logró debido a que el contenido de humedad en el suelo se encontró entre las 0,3 y 3atm, lejos del límite inferior permisible de abatimiento (9atm.). El abatimiento de humedad en el suelo en esta etapa corresponde a la demanda de agua por el cultivo (consumo) para desarrollar la fotosíntesis y transpiración. La curva de abatimiento de humedad en el sistema de riego por goteo mostró un alto consumo aún y cuando se regó nuevamente del 6 al 14/04/2009. Desde el mes de abril en este sistema, la humedad del suelo no se logró recuperar durante todo el ciclo ya que la tensión a la que está sometido el árbol fue entre las 9 y 15atm, lo que rebasó el límite inferior permisible de abatimiento, a excepción de un evento extraordinario en la última semana de junio.

La segunda semana de junio se registró un fuerte consumo de agua en los cuatro sistemas, debido a que éste periodo corresponde a la etapa de crecimiento de la nuez y estado acuoso; únicamente los árboles bajo el sistema por aspersión se mantuvieron por encima del límite inferior permisible de abatimiento, de 9atm. Esta etapa es considerada como la más crítica, ya que el cultivo demanda mayor cantidad de agua para el crecimiento de la nuez; es por eso que se observa una diferencia en el consumo de

agua entre los sistemas de riego. En la etapa de llenado de almendra, los sistemas de riego por gravedad y aspersión se recuperaron y finalizaron el ciclo prácticamente sin estrés hídrico, no así los sistemas de micro-aspersión y goteo que estuvieron bajo estrés hídrico, lo que conlleva a un tamaño pequeño de la nuez cosechada.

Área foliar total de la rama

La Figura 3 presenta los valores obtenidos del área total del foliolo entre los sistemas de riego; los sistemas de micro-aspersión y aspersión resaltaron con un intervalo de variabilidad más amplio con respecto a su media aritmética; sin embargo, el análisis estadístico no detectó diferencia significativa en esta variable, lo que indica que el desarrollo y crecimiento de las hojas no es afectado por la forma de aplicación de agua.

Enseguida se realizó un análisis estadístico para comparar el área foliar en función a la posición de la hoja compuesta en la rama (basal, media y apical). En la Tabla I se presenta el análisis, el cual mostró diferencia significativa en cuanto a la ubicación de la hoja compuesta en la rama entre los diferentes sistemas de riego. El área foliar de los árboles bajo el sistema gravedad predominó en hojas ubicadas en la parte media de la rama, seguido por las hojas de la parte apical y basal; en contraste con los sistemas presurizados, los sistemas de aspersión y micro-aspersión presentaron hojas de mayor tamaño en la periferia del dosel del árbol, lo que originó mayor área foliar que en la parte media y basal de la rama; la concentración de

hojas de mayor tamaño en el sistema de riego por goteo se invierte con respecto a los sistemas presurizados anteriores, ya que se encontró que en la parte basal de la rama se ubicaron las hojas de mayor tamaño seguidas de las hojas en la parte media y en la parte apical de la rama con hojas de menor tamaño.

Sin embargo, aunque el sistema de riego por aspersión presentó las hojas de mayor tamaño en la parte apical, su ubicación induce la aparición de hojas parásitas en la parte media y basal de la rama, debido a que la radiación solar es obstruida en la periferia de la copa del árbol, lo que disminuye la eficiencia fotosintética de las hojas intermedias y basales. Por el contrario, los sistemas de gravedad y micro-aspersión presentaron un área foliar más equilibrada en las tres partes de la rama.

Densidad estomática

De acuerdo con la distribución de los estomas en la hoja de nogal pecanero, ésta se clasifica como hipoestomática.

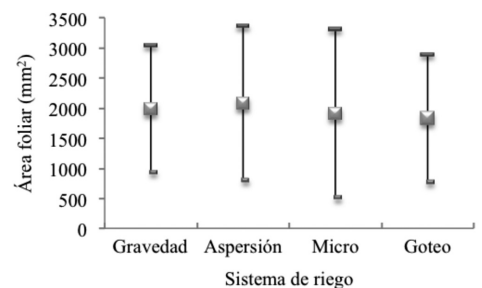


Figura 3. Área total del foliolo en base al método de riego (media ±DE).

TABLA I
ÁREA DE FOLIOLOS (mm²)
EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN
DE LA HOJA COMPUESTA EN LA
RAMA Y AL MÉTODO DE RIEGO

Método de riego	Posición de la hoja compuesta en la rama		
	Basal	Medio	Apical
Gravedad	1806 a	2202 a	1939 b
Aspersión	1328 a	1769 a	3127 a
Micro-aspersión	1803 a	1767 a	2141 b
Goteo	1985 a	1840 a	1647 b

Medias con diferente letra en la misma columna muestran diferencia estadística (LSD, p≤0,05).

El análisis estadístico encontró diferencia significativa entre tratamientos, donde los sistemas de riego por gravedad y goteo son estadísticamente iguales los cuales presentaron mayor cantidad de estomas por unidad de superficie; los sistemas de aspersión y micro-aspersión presentaron menor densidad estomática, siendo estadísticamente iguales entre ellos (Tabla II).

En la Tabla II se observa diferencia estadística entre las hojas de la parte basal y la parte media de la rama, destacando por la cantidad de estomas los sistemas de riego por gravedad y goteo con igualdad estadística entre ellos. En la parte apical

de la rama no se presentó diferencia estadística, lo que indica que en esta ubicación la forma de aplicación del agua no afectó la densidad estomática del nogal entre los diferentes sistemas de riego empleados.

El análisis de estomas en folíolos con respecto a la ubicación en la hoja compuesta (Tabla III), presentó diferencia estadística solo en la parte media del peciolo, donde sobresalieron los sistemas de gravedad y goteo. En la parte basal y apical no se mostró diferencia significativa debido a que el rango de variabilidad es compacto, sin embargo se observó un aumento en la densidad estomática de los folíolos de

nogal bajo el sistema de riego por goteo. Lo anterior puede ser explicado en base a lo establecido por Perés-Martínez *et al.* (2004), quienes argumentan que una mayor conductancia estomática y tasa de transpiración podría ser un mecanismo que ayude a aumentar la eficiencia de uso del agua; por el contrario, una disminución de la densidad estomática incrementa la resistencia estomática y evita el exceso de transpiración (Rubino *et al.*, 1989; Takur, 1990).

Tamaño de los estomas

Los estomas de tamaño pequeño fueron aquellos con un

área <0,0025mm²; el área de los estomas de tamaño mediano osciló entre 0,0025 y 0,0050mm² y los estomas grandes presentaron un área >0,0050mm².

La Tabla IV presenta la caracterización estomática de las hojas en función a la posición en la rama comparando los diferentes sistemas de riego. En general, el comportamiento en la cantidad de estomas en cuanto a su tamaño fue el mismo en los cuatro sistemas de riego. Se observó una alta concentración de estomas de tamaño mediano, seguido por los de tamaño grande, y la menor presencia se presentó en los estomas de tamaño pequeño. El análisis estadístico detectó diferencia significativa entre los tamaños de los estomas. Sin embargo, la distribución de los estomas de acuerdo a su tamaño fue variable al cambiar de menor a mayor la eficiencia de aplicación de cada sistema de riego. En los árboles irrigados bajo el sistema tradicional (gravedad), los estomas se concentraron en hojas de la parte apical y parte media de la rama, al igual que en los árboles irrigados por aspersión; los árboles del sistema de micro-aspersión mostraron una distribución más uniforme al no encontrar diferencia estadística entre la posición de la hoja en la rama, sin embargo se observó una mayor concentración de estomas en hojas de la parte media de la rama. En los árboles irrigados bajo el sistema por goteo, los estomas se concentraron en hojas de la parte basal de la rama sin encontrar diferencia significativa entre las posiciones. Lo anterior indica que el árbol trata de conservar y aprovechar de manera eficiente el contenido de humedad con el que cuenta para sobrevivir y reproducirse, ya que el indicador evidente en los árboles del sistema de riego por goteo es el tamaño y distribución de las hojas; las hojas de la parte apical se encargan de proteger las hojas de la parte media y basal de la rama para que éstas puedan desarrollar las actividades fisiológicas como transpiración y fotosíntesis.

TABLA II
NÚMERO DE ESTOMAS EN 1mm²
EN TRES POSICIONES DE LA HOJA
COMPUESTA EN LA RAMA

Sistema de riego	Posición de la hoja en la rama		
	Basal	Medio	Apical
Gravedad	8,8 ab	10,7 a	11,9 a
Aspersión	8,2 b	7,3 b	9,5 a
Micro-aspersión	8,5 b	9,1 ab	8,7 a
Goteo	11,0 c	9,7 a	10,7 a

Medias con diferente letra en la misma columna muestran diferencia estadística (LSD, p<0,05).

TABLA III
DENSIDAD ESTOMÁTICA
EN TRES POSICIONES DEL
FOLIOLO EN LA HOJA

Sistema de riego	Posición del folíolo en la hoja		
	Basal	Medio	Apical
Gravedad	10,2 a	10,8 a	10,4 a
Aspersión	9,1 a	7,9 b	8,1 a
Micro-aspersión	9,2 a	8,3 b	8,8 a
Goteo	10,5 a	10 ab	10,9 a

Medias con diferente letra en la misma columna, muestran diferencia estadística (LSD, p<0,05).

TABLA IV
DENSIDAD ESTOMÁTICA POR CADA 15mm² DE SUPERFICIE FOLIAR
EN BASE AL TAMAÑO DEL ESTOMA, A LA POSICIÓN DE LA HOJA
EN LA RAMA Y AL MÉTODO DE RIEGO EMPLEADO

Sistema de riego	Volumen de suelo humectado	Eficiencia de aplicación	Tamaño del estoma (mm ²)	N° estomas según posición de la hoja en la rama			Media ⁽¹⁾
				Basal	Media	Apical	
Gravedad	10000 m ³	60%	<0,0025	13 ⁽¹⁾	10	13	12 c
			0,0025-0,0050	95	119	124	113 a
			> 0,0050	23	32	43	33 b
			Media ⁽²⁾	44 b	54 ab	60 a	158 ⁽³⁾
Aspersión	7000 m ³	70%	<0,0025	10	7	7	8 c
			0,0025-0,0050	84	78	95	86 a
			> 0,0050	29	25	39	31 b
			Media ⁽²⁾	41 ab	37 b	47 a	125
Micro-aspersión	5600 m ³	80%	<0,0025	11	6	7	8 c
			0,0025 y 0,0050	84	84	89	86 a
			> 0,0050	32	45	36	38 b
			Media ⁽²⁾	42 a	45 a	44 a	132
Goteo	3900 m ³	95%	<0,0025	28	13	17	19 c
			0,0025 y 0,0050	106	100	108	105 a
			> 0,0050	30	32	35	32 b
			Media ⁽²⁾	55 a	48 a	53 a	156

¹ Medias con diferente letra en la misma columna, muestran diferencia estadística (LSD, p<0,05).

² Medias con diferente letra en la misma fila, muestran diferencia estadística (LSD, p<0,05).

³ Densidad estomática total por método de riego en 15mm² de superficie foliar.

tesis de una manera más eficiente. En base a lo establecido por Strasburger *et al.* (1986) y Aasaman *et al.* (2001), el tamaño de los estomas es determinante en el proceso de aclimatación al estrés hídrico, al existir una relación inversa entre el tamaño del estoma y la resistencia a la sequía. La morfología de los estomas juega un papel importante en el control de la pérdida de agua, lo que permite a muchas especies vegetales adaptarse a condiciones ambientales muy diversas (Hetherington y Woodward, 2003). El tamaño de los estomas y su densidad muestran ser variables sensibles al cambio en las condiciones ambientales o de manejo agronómico relacionadas con la resistencia estomática, lo que evita el exceso de transpiración y permite una mejor adaptación de los árboles a condiciones de mayor demanda hídrica (Strasburger *et al.*, 1986; Aasaman *et al.*, 2001).

Conclusiones

Los resultados demuestran el conjunto de mecanismos morfológicos que realiza esta especie para su adaptación al medio que se induce mediante el manejo agronómico del riego. Las mediciones realizadas a los estomas mediante análisis de imagen permitieron establecer la clasificación estomática en base al tamaño y conocer su distribución y densidad. Se concluye que el nogal pecanero tiene la capacidad de modificar la densidad y tamaño de los estomas en los folíolos, así como el área y su distribución en la rama, cuando el manejo agronómico involucra diferentes volúmenes de agua de riego. Se asume entonces que estos cambios permiten estabilizar la tasa fotosintética y de transpiración que el árbol requiere para su supervivencia y

reproducción. La diferencia del volumen de suelo humectado entre el sistema por gravedad y goteo permite un ahorro del 69% en el agua que se aplica al cultivo.

Las características morfológicas y densidad de los estomas podría desempeñar un papel determinante en el proceso de adaptación de esta especie a los cambios en el manejo agronómico del cultivo, como lo es durante el periodo de cambio de tecnología de riego.

REFERENCIAS

Aasaman K, Sober A, Rahi M (2001) Leaf anatomical characteristic associated with shoot hydraulic conductance, stomatal conductance and stomatal sensitivity to changes of leaf water status in temperate deciduous trees. *Aust. J. Plant Physiol.* 28: 765-774.

Andrés AJ, Nieto ÁR, Barrientos PAF, Martínez DMT, González AF, Segura LSD, Cruz CJG, Gallegos VC (2004) Variación morfológica de la hoja del chirimoyo. *Rev. Chapingo Ser. Hort.* 10: 103-110.

Aparecida AR, Geraldo MAB (2007) Aspectos morfológicos de folhas na diferenciação de variedades de carambola. *Rev. Bras. Fruticult.* 29: 386-388.

Ball JT, Woodrow IE, Berry JA (1987) A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. En Biggins J (Ed.) *Progress in Photosynthesis Research*. Nijhoff. Dordrecht, Holanda. pp. 221-224.

Camargo LA (2001) *El Barrenador del Ruezno* (Cydia caryana) como Plaga Potencial del Nogal. Torreón, México. pp. 5-7.

Chávez, SJA, González CG, Palomo RM, Potisek TMC, González BJL (2011) Ubicación y clasificación de huertos productores de nuez pecanera en la cuenca del río Nazas. *Agrofaz* (ed. Esp. Dic.): 101-107.

CNA (2002) *Priorización de Acciones Detalladas 2002-2006*. Gerencia Regional VII, Cuencas Centrales del Norte. Comisión Nacional del Agua Torreón, Coahuila. México. 33 pp.

Coster M, Charmant JL (1985) *Précis d'Analyse d'Image*. Centre National de la Recherche Scientifique. París, Francia. 521 pp.

Daily GC, Alexander S, Ehrlich P, Goulder L, Lubchenco J, Matson PA, Mooney H, Postel S, Scheneider ST, Tilman D, Woodwell GM (1997) Ecosystem services: Benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Iss. Ecol.* 2. 16 pp.

DOF (2002) *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que Establece las Especiaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos, Estudio, Muestreo y Análisis*. 2ª ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. pp. 20-46.

García SJA, Guzmán SE, Fortis HM (2006) Demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia* 40: 269-276.

Garratt JR (1992) *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 336 pp.

Godoy AC, López MI (2000) Desarrollo de la almendra y germinación del fruto del nogal pecanero bajo cuatro calendarios de riego. *Terra* 18: 305-311.

González AF (2001) Caracterización morfológica: En González AF, Pita VJ (Eds.) *Conservación y Caracterización de Recursos Fitogenéticos*. Instituto Nacional de Educación Agrícola. Valladolid, España. pp. 199-217.

González CG, Villanueva DJ, Orona CI, Sánchez CI (2005) Efecto de la lámina de riego en el crecimiento radial de nogal pecanero (*Carya illinoensis* Koch) mediante análisis de imágenes. *Agrofaz* 5: 863-868.

Hetherington AM, Woodward FI (2003) The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature* 21: 901-908.

Lallana VH, Lallana MC (2003). Densidad estomática en hojas de *Eryngium horridum* y su relación con el estado de desarrollo de las hojas. *Rev. Inv. Fac. Cs. Agr.* 5. <http://rephip.unr.edu.ar/handle/2133/616?show=full>

Mendoza MV (1969) *La Nuez Pecanera*. Banco Agropecuario del Norte. México. pp. 63-69.

Mexal GJ, Herrera EA, Sammis TW, Zachritz (2003). Non commensurable values of the pecan industry. Cooperative Extension Service Guide H-654. College of Agriculture and Home Economics. New Mexico State University. Las Cruces, NM, EEUU. 4 pp.

Orona I, Espinoza J, González G, Murillo B, García JL, Santamaría J (2006) Aspectos técnicos y socioeconómicos de la producción de nuez (*Carya illinoensis*) en la Comarca Lagunera, México. *Agric. Téc. Méx.* 32: 2131-2143.

Perés-Martínez J, Arizaleta M, Sanabria ME, Brito L (2004) Características de los estomas, densidad e índice estomático y su variación en función a la injestación en *Annona muricata* L. y *A. montana* MADFAC. *Bioagro* 16: 213-218.

Potes MF (1987) Contribuição da morfologia externa das folhas de Olea europea L. para a caracterização das respectivas cultivares. *Agron. Lusit.* 42: 247-260.

Rubino P, Tarantino E, Rega F (1989) Relationship between soil water status and stomatal resistance of tomatoes. *Irrig. Drenag* 36: 95-98.

SAGARPA-SIAP (2015) *Página web*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. <http://siap.gob.mx>.

Salas JA, Sanabria ME, Pire R (2001) Variación en el índice y densidad estomática en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) sometidas a tratamientos salinos. *Bioagro* 13: 99-104.

Strasburger E, Noll F, Schenck H, Schimper A (1986) *Tratado de Botánica*. Marin. Barcelona, España. 1098 pp.

Swarthout D, Taub DR (2008) Stomata. En Cleveland CJ (Ed.) *Encyclopedia of Earth*. National Council for Science and the Environment. Washington, DC, EEUU.

Takur P (1990) Different physiological response of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars to drought. *Acta Physiol. Plant.* 12: 175-182.

Taiz L, Zeiger E (Eds.) (2006) *Plant Physiology*. 4ª ed. Sinauer. Sunderland, MA, EEUU. 764 pp.