

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



INTERCAMBIO NETO DE BIÓXIDO DE CARBONO DE UNA HUERTA DE
NOGAL PECANERO JOVEN DURANTE EL CICLO DE CRECIMIENTO

TESIS

Que presenta: ELEAZAR AMINADAF JIMÉNEZ ALCALÁ

Como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

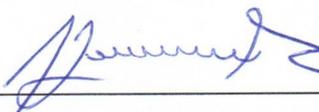
Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre 2022

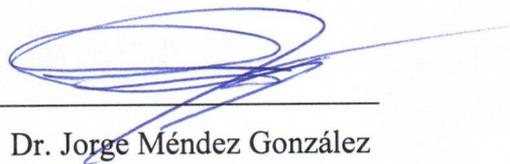
INTERCAMBIO NETO DE BIÓXIDO DE CARBONO DE UNA HUERTA DE
NOGAL PECANERO JOVEN DURANTE EL CICLO DE CRECIMIENTO

Tesis

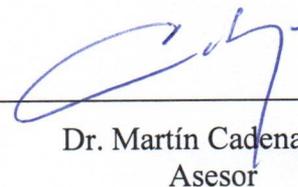
Elaborado por ELEAZAR AMINADAF JIMÉNEZ ALCALÁ como requisito parcial
para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS
DE PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría:



Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor Principal



Dr. Jorge Méndez González
Asesor



Dr. Martín Cadena Zapata
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre 2022

Agradecimientos

A **Dios** por haberme permitido alcanzar este objetivo y concluir un ciclo muy importante en mi vida.

Al **Dr. Alejandro Zermeño González**, por su gran apoyo durante la duración del programa de maestría y durante el desarrollo del proyecto de investigación.

A mis asesores **Dr. Jorge Méndez González** y **Dr. Martín Cadena Zapata**, por su valiosa aportación en el proyecto de investigación.

A mi esposa **Yanet Martínez Torres** por su amor incondicional y gran apoyo, siempre.

A mi Alma Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (**UAAAN**) por permitirme tener mi formación profesional en su campus.

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

Al **MC. Aarón Isaín Melendres Álvarez** por su valioso apoyo en la instalación y monitoreo del sistema Eddy Covariance.

Al **MC. Adoniram Escalante Pérez** por su gran apoyo durante el proceso de investigación.

Al **MC. José Ángel Marroquín Morales** por su apreciable apoyo en la fase de campo.

A todos los contribuyeron de alguna forma para que esta investigación se realizara satisfactoriamente.

Dedicatoria

*A la memoria de mi padre, Fidel Jiménez Reyna,
que un día abrió sus brazos y me permitió emprender el vuelo
con la esperanza de un mejor porvenir para mí
a pesar del vacío que dejó en su vida y en mi cálido y dulce hogar.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	iii
Dedicatoria	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Descripción botánica y taxonómica del nogal pecanero	3
Importancia económica y social del nogal pecanero.....	4
Superficie de nogal pecanero en México y en el mundo.....	4
Estudios previos sobre la cantidad de biomasa y de carbón.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Características del área de estudio.....	6
Mediciones realizadas y sensores utilizados	6
Relación entre el intercambio neto de bióxido de carbono y la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel de los árboles.....	7
Rendimiento y eficiencia cuántica de los árboles de la huerta.....	8
Análisis estadístico	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
Intercambio Neto de Bióxido de Carbono y Radiación Solar Absorbida	9
Relación entre el intercambio neto de bióxido de carbono y la radiación fotosintéticamente activa absorbida	12
Rendimiento y eficiencia cuántica de los árboles de la huerta.....	14
Balance mensual del intercambio neto de bióxido de carbono durante el ciclo de crecimiento de los árboles	15
CONCLUSIONES	18
REFERENCIAS.....	19

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros de la función hiperbólica rectangular y coeficiente de determinación (r^2) en los meses de desarrollo de una huerta de nogal pecanero de siete años de edad, del norte de México.....	14
Cuadro 2. Valores promedio diario mensual del rendimiento y la eficiencia cuántica de una huerta de nogal pecanero de 7 años de edad del Norte de México.	15
Cuadro 3. Valores integrados diurnos, nocturnos y la asimilación neta de bióxido de carbono (NEE), de una huerta de nogal pecanero (7 años de edad), durante los meses de crecimiento, General Cepeda, Coahuila, México.....	17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tasa de intercambio neto de bióxido de carbono (promedio de 30 min) (NEE) “línea azul sólida”, y de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel de los árboles (PAR) “línea roja discontinua”, de una huerta de nogal pecanero de 7 años de edad en diferentes tiempos de su ciclo de crecimiento..... 11

Figura 2. Relación entre el intercambio neto de bióxido de carbono (NEE) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR) por el dosel de los árboles de una huerta de nogal pecanero de siete años del norte de México. Los puntos representan los datos observados y la línea corresponde a los datos estimados de NEE con una función hiperbólica rectangular..... 13

Resumen

INTERCAMBIO NETO DE BIÓXIDO DE CARBONO DE UNA HUERTA DE
NOGAL PECANERO JOVEN DURANTE EL CICLO DE CRECIMIENTO

POR

ELEAZAR AMINADAF JIMÉNEZ ALCALÁ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZÁLEZ -ASESOR-

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2022

Los árboles de nogal pecanero (*Carya illinoensis* K.) por su condición de especies leñosas y longevas, además de la aportación de nuez para su consumo, también pueden tener una participación importante en la asimilación de CO₂ y secuestro del carbono atmosférico. El objetivo de este estudio fue determinar el intercambio neto de bióxido de carbono de una huerta joven de nogal pecanero del norte de México y su relación con el ciclo de crecimiento de los árboles. El estudio se realizó de marzo a noviembre de 2017, en una huerta de Nogal pecanero de siete años de edad con árboles de las variedades Western Schley y Wichita. La huerta se regó con goteo con la cinta enterrada. El intercambio neto de CO₂ entre el dosel de los árboles de la huerta y la atmósfera (NEE) se determinó con mediciones Eddy Covarianza, utilizando un anemómetro sónico tridimensional y un analizador infrarrojo de CO₂ de sendero abierto. La tasa máxima de intercambio neto de bióxido de carbono diurno correspondió con la tasa de mayor absorción de radiación fotosintéticamente activa por el dosel de los árboles, y se observó entre las 11:00 y las 14:00 h del día a través de los meses de crecimiento de los árboles. El coeficiente b1 de la ecuación hiperbólica rectangular mostro que, de abril a julio se tiene la tasa mayor de intercambio neto de CO₂. De igual forma, para los mismos meses se tiene el mayor rendimiento cuántico ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol fotones}$) de los árboles. La máxima asimilación neta (diferencia entre el NEE diurno y nocturno) se tuvo en mayo ($-4\ 571.20\ \text{mmol m}^{-2}$). A pesar de la poca edad de los árboles, la huerta tiene una capacidad de retención de 0.962 t C ha⁻¹ por ciclo de crecimiento, por lo que también tiene una participación importante en la asimilación y retención del carbono atmosférico. Su capacidad de retención aumentara con el crecimiento de los árboles.

Palabras clave: *Carya illinoensis*, covarianza eddy, intercambio neto de CO₂, nogal pecanero

Abstract

CARBON DIOXIDE NET ASSIMILATION EXCHANGE OF A YOUNG PECAN
NUT ORCHARD DURING THE GROWING CYCLE

BY:

ELEAZAR AMINADAF JIMÉNEZ ALCALÁ

MASTER OF SCIENCE PRODUCT SYSTEM ENGINEERING

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZALEZ -ADVISOR

SALTILLO, COAHUILA

DECEMBER 2022

Pecan nut trees (*Carya illinoensis* K.), due to their condition as woody and long-lived species, in addition to the contribution of nuts for consumption, can also have an essential role in assimilating CO₂ and sequestration of atmospheric carbon. The objective of this study was to determine the CO₂ net ecosystem exchange of an orchard of young pecan nut trees in northern Mexico and its relationship with the growth cycle of the trees. The study was carried out from March to November 2017 in a seven-year-old pecan nut tree orchard with trees of the Western Schley and Wichita varieties. The orchard is drip irrigated with the buried tape. The net CO₂ exchange between the canopy of the orchard trees and the atmosphere (NEE) was determined with Eddy Covariance measurements using a three-dimensional sonic anemometer and an open-path infrared CO₂ analyzer. The maximum rate of the diurnal net CO₂ ecosystem exchange corresponded to the tree canopy's highest absorption of photosynthetically active radiation. It was observed between 11:00 and 14:00 h of the day throughout the months of the tree's growth. The b1 coefficient of the rectangular hyperbolic equation showed that the highest rate of net exchange of CO₂ occurs from April to July. Similarly, for the same months, the trees' highest quantum yield (μmol CO₂/mmol photons) is reached. The maximum CO₂ net assimilation (difference between daytime and nighttime NEE) was in May (-4 571.20 mmol m⁻²). Despite the young age of the trees, the orchard has a sequestration capacity of 0.962 t C ha⁻¹ per growth of cycle; therefore, it also plays an essential role in the sequestration of atmospheric carbon, which will increase with the growth of the trees.

Key words: *Carya illinoensis*, Eddy Covariance, net CO₂ ecosystem exchange, pecan nut

INTRODUCCIÓN

El bióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero que se genera por la quema de combustibles fósiles, que induce el calentamiento global y consecuente cambio climático (Gizer *et al.*, 2022; Rehman *et al.*, 2022). Este gas, también es absorbido (en el proceso de fotosíntesis) por los ecosistemas vegetales en su proceso de crecimiento (Pimienta, 2007). El estudio de la dinámica del flujo de CO₂ entre los ecosistemas vegetales y la atmosfera es importante por su relación con el calentamiento global. La participación de la vegetación en el ciclo global del carbono es fundamental por la captura del bióxido de carbono atmosférico en la biomasa de las plantas (Eftekhari 2022; IPCC, 2018; Sahoo 2022).

Estudios previos sobre la tasa de asimilación de CO₂ y secuestro de carbono atmosférico se han realizado en gran variedad de ecosistemas vegetales naturales. Sin embargo, se tiene poca información sobre la participación de los sistemas agrícolas en este aspecto (Rojas-García *et al.*, 2015; Sharman *et al.*, 2021).

Por su condición de especies vegetales leñosas y longevas, los árboles de nogal pecanero (*Carya illinoensis* K.) además de su aprovechamiento en la producción de nuez pueden tener una participación importante en la asimilación de CO₂ y secuestro del carbono atmosférico. La acumulación media de biomasa en una huerta madura de nogal pecanero puede ser de hasta 22 t ha⁻¹ (Wang *et al.*, 2007; Dold *et al.*, 2019).

En México el cultivo de nogal pecanero inicio en el estado de Chihuahua hace 400 años, y el establecimiento de las huertas con fines comerciales datan de 1946, actualmente, se tienen árboles de hasta 71 años de edad (Ojeda-Barrios *et al.*, 2009; Concilco-Alberto *et al.*, 2022).

La mayoría de los estudios realizados recientemente en nogal, se han orientado principalmente al manejo agronómico del cultivo como: podas, control fitosanitario, fertilización, y fundamentalmente para incrementar la eficiencia del uso del agua (Samani *et al.*, 2011; Zermeño-González *et al.*, 2014), ya que el agua es el recurso más importante en la agricultura de riego en las zonas áridas, lugar de distribución natural del nogal pecanero. Por ejemplo, Andales *et al.* (2006) realizaron un estudio para el manejo eficaz de las podas mediante un modelo de simulación del crecimiento.

Bock *et al.* (2012) evaluaron la acción de un fungicida para controlar la sarna de la nuez. Ojeda-Barrios *et al.* (2014) realizaron fertilización foliar con Zinc para mejorar rendimiento en una huerta de nogal pecanero de 8 años de edad. Samani *et al.* (2011) y Zermeño-Gonzalez *et al.* (2014) usaron el método de la Covarianza Eddy para realizar mediciones de flujos de vapor de agua y bióxido de carbono entre el dosel de una huerta de nogal pecanero y la atmósfera.

México, es el principal país exportador de nuez con cáscara a Estados Unidos (Retes *et al.*, 2021) por lo que su superficie se ha incrementado notablemente en los últimos años. En 2021 se reportó una superficie de 146,239.11 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).

El incremento global del establecimiento de huertas de nogal pecanero puede tener una contribución importante en la asimilación de CO₂ y almacenamiento de carbono atmosférico. Bajo la hipótesis de que las huertas jóvenes de nogal pecanero pueden participar en el secuestro de carbono atmosférico, el objetivo de este estudio fue determinar el intercambio neto de bióxido de carbono de una huerta joven de nogal pecanero del Norte de México y su relación con el ciclo de crecimiento de los árboles.

REVISIÓN DE LITERATURA

Descripción botánica y taxonómica del nogal pecanero

El nogal pecanero (*Carya illinoensis*) es un árbol que puede alcanzar 30 m de altura y puede vivir más de cien años. Presenta hojas compuestas dispuestas en forma alternada, imparipinadas, con 11 a 17 foliolos de forma oblonga – lanceolada glabros y con borde aserrado. La floración es diclino-monoica con dicogamia, esto es, que las flores masculinas y femeninas de una misma variedad y dispuestas sobre un mismo pie, no maduran al mismo tiempo. La inflorescencia masculina tiene tres amentos péndulos unidos por un pedúnculo, los cuales se disponen sobre el tercio apical de ramas del último año y cuenta con flores individuales que van de 72 a 139. Cada flor individual contiene de 3 a 7 estambres con anteras oblongas, presentando cuatro sacos polínicos de dehiscencia longitudinal. Las flores femeninas están dispuestas en una inflorescencia que forma un racimo sobre las ramas nuevas. Presentan un estigma bifido sobre un disco estigmático rodeado con tres bractéolas y una bráctea fusionada en la base formando el ruzno. El fruto es una drupa seca de forma oblonga y elipsoidea de 3 a 5 cm de largo, formada por un embrión, un endocarpio liso y delgado y un epicarpio y mesocarpio carnosos que al madurar forma cuatro valvas longitudinales (ruzno) (Frusso, 2007)

Clasificación taxonómica del nogal pecanero (*Carya illinoensis*):

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Fagales

Familia: Juglandaceae

Género: *Carya*

Especie: *C. Illinoensis*

Importancia económica y social del nogal pecanero

La producción de nogal requiere una gran cantidad de mano de obra desde su producción en campo hasta su industrialización. Por lo que es de gran importancia social y económica y constituye un patrimonio muy importante para la región productora y para el país; no solo por el alto valor de su producción, si no, porque su producción genera una importante fuente de empleo durante todo el ciclo productivo (De la Cruz-Ramos *et al.*, 2016).

El cultivo de nogal pecanero se considera una actividad altamente rentable, viable y de bajo riesgo (López *et al.*, 2011). Por lo que, la producción de nuez representa una buena oportunidad para inversionistas en agronegocios y constituye un cultivo de alto valor económico para los estados del norte de México.

En un análisis de la rentabilidad del cultivo de nogal pecanero realizado en 2014 en la Costa de Hermosillo, México, se obtuvo que el costo de producción por hectárea fue de \$53,021, ocupando un capital de trabajo de \$48,349. Con el análisis de la información obtenida, se observó una Relación Beneficio-Costo de 1.34. El punto de equilibrio fue de 1.48 ton/ha⁻¹ la producción necesaria para cubrir los costos directos y financieros. Considerando que el precio de venta del producto final en 2010 fue de \$38,000 y un rendimiento promedio de 2 ton ha⁻¹, se estima un ingreso total de 76,000 y una ganancia de \$22,979 ha⁻¹ (Retes *et al.*, 2014).

En el municipio de Delicias Chihuahua se evaluó la rentabilidad del cultivo de nogal pecanero analizando las probabilidades de riesgo y las variables de productividad neta y retorno del capital. La utilidad neta fue de \$277,000 y el retorno nominal del capital fue de 111.7%, lo que indica que el nogal presenta una rentabilidad alta cultivándose en condiciones de mediana tecnología (López *et al.*, 2011).

Superficie de nogal pecanero en México y en el mundo

La superficie establecida de nogal pecanero se ha incrementado notablemente en los últimos años; en 2015, se reportó una superficie de 110,869.11 ha⁻¹ sembradas bajo modalidad de riego, la superficie sembrada aumentó 296 % respecto a la década de 1980 (SAGARPA – SIAP, 2015). Para el 2021, la superficie establecida de nogal pecanero

aumentó a 146,239.11 ha (SAGARPA - SIAP, 2021). Los principales estados productores de nuez en México son Chihuahua, Sonora y Coahuila que, en 2016, aportaron el 95 % de la producción nacional (SAGARPA, 2017).

La superficie sembrada con nogal pecanero en los principales estados productores (Chihuahua, Coahuila y Sonora) es de 87,740.34, 21,859.64 y 19,536.33 ha, respectivamente. Para otras entidades se reporta una superficie en menor escala, Durango con 7,632.24 y Nuevo León con 4,251.25 ha (SAGARPA - SIAP, 2021).

La producción mundial de nueces de nogal ha ido en aumento en los últimos años, alcanzando casi 4 millones de toneladas en el 2014. Respecto a la aportación individual de cada país a la producción mundial, China explica el 42%, Irán y Estados Unidos 14% cada uno, mientras que Turquía y Ucrania aportan 6 y 3% respectivamente; el porcentaje restante es explicado con aportes individuales por debajo del 1% donde destaca México seguido por Rumania, Chile India y Francia (Errecart, 2015).

Estudios previos sobre la cantidad de biomasa y de carbón retenido en los arboles de nogal pecanero

En un estudio realizado en una huerta de nogal pecanero (*Carya illinoensis*) en Allende Coahuila, se evaluó 34 árboles de 9.17m de altura y 0.18m de diámetro, con una densidad poblacional de 88 árboles ha⁻¹. El estudio se realizó midiendo variables dasométricas de los árboles y utilizando ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono. Los valores obtenidos son de 8.57 t C ha y 31.45 t CO₂ ha, considerando la biomasa y carbón de la parte aérea, el fuste y el sistema radicular (Constante *et al.*, 2019)

En otro estudio realizado en dos huertas de nogal pecanero (*Carya illinoensis*), ubicadas en el estado de Coahuila, una en el municipio de Matamoros y la otra en el municipio de Zaragoza, se estimó una retención promedio diaria de CO₂ de 389.19 mmol m⁻² y 281.92 mmol m⁻², respectivamente. La huerta de Matamoros está formada por árboles de 50 años de edad y una altura promedio de 14m, los árboles tienen una separación de 15m y su distribución es en tresbolillo. La huerta de Zaragoza tiene 28 años de edad y una altura promedio de 12 m. Los árboles están distribuidos en marco real y tienen una separación de 15 m (Zermeño *et al.*, 2014)

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del área de estudio

El estudio se realizó de marzo a noviembre de 2017, en una huerta de Nogal pecanero (*Carya illinoensis* K.) de siete años de edad, ubicada en el Municipio General Cepeda, Coahuila, México (25° 28' 22.46" N, 101° 26' 40.06" O, a 1304 msnm, con temperatura promedio de 14 a 18 °C). Los nogales están plantados en marco real, alineados en la dirección norte-sur con espaciamiento de 8 m entre árboles y 12 m entre hileras, cubriendo una superficie de 11.6 ha. Las variedades plantadas son Western Schley y Wichita. La huerta se riega con goteo (cintas enterradas a 20 cm de profundidad), las mangueras están a una distancia de un metro de cada lado del tronco de los árboles, 16 emisores por árbol (8 de cada lado) espaciados 60 cm, gasto de 1.68 LPH, se aplican dos riegos de 12 horas cada seis días.

Mediciones realizadas y sensores utilizados

El flujo de CO₂ entre el dosel de la huerta y la atmosfera se obtuvo con mediciones de covarianza Eddy, usando la siguiente ecuación:

$$FCO_2 = \overline{w' * p_{CO_2}'} \quad (1)$$

Donde: w es la velocidad vertical del viento y p_{CO_2} es la densidad de bióxido de carbono. Las variables con símbolo de prima significan desviaciones respecto a la media y la barra horizontal es la covarianza entre las variables para un determinado segmento de tiempo (30 min). La velocidad vertical del viento (w) se determinó con un anemómetro sónico tridimensional (CSI-CSAT3, Campbell, Scientific, Inc., Logan, Utah, EE.UU.). La densidad del bióxido de carbono en el aire se midió con un analizador infrarrojo de sendero abierto (Open Path CO₂/H₂O analyzer, LI-7500. LI-COR, Lincon, Nebraska, EE.UU.). Ambos sensores se colocaron al centro del extremo sur de la huerta a dos metros por encima de la copa de los árboles y se conectaron a un datalogger CR1000 (Campbell, Cientific, Inc., Logan, Utah, EE.UU.) para el registro de datos.

El anemómetro se orientó 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 125 m en la dirección Este-Oeste antes del contacto con los sensores. La frecuencia de operación de los sensores fue 10 Hz y las covarianzas se generaron a intervalos de 30 min. El intercambio neto de bióxido de carbono ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) entre el dosel de los

árboles de la huerta y la atmósfera (NEE), se obtuvo con la siguiente relación (Martens *et al.*, 2004).

$$NEE = FCO_2 + \frac{\Delta\rho CO_2}{\Delta t} \Delta z \quad (2)$$

Donde: FCO_2 es el flujo de bióxido de carbono medido con el método de la Covarianza Eddy (Ecuación 1) (negativo hacia la superficie vegetal), $\Delta\rho CO_2$ es el cambio en la densidad de CO_2 en un determinado segmento de tiempo Δt (30 min), y Δz es la altura sobre la superficie del suelo a la que se realizan las mediciones de flujo (6 m). El balance diario del intercambio neto de bióxido de carbono a través de las etapas de crecimiento de los árboles se obtuvo por la diferencia entre los valores integrados diurnos (asimilación) y nocturnos (liberación).

La tasa de radiación fotosintéticamente activa (PAR) absorbida por el dosel de los árboles se obtuvo colocando dos sensores cuánticos (modelo SQ-512, Apogge Inst., Logan, Utah, USA) a dos metros sobre la copa de los árboles, uno orientado hacia el punto medio del dosel de un árbol (PAR reflejada) y el otro hacia el zénit (PAR incidente). La PAR absorbida por el dosel de los árboles fue la diferencia entre la PAR incidente y la PAR reflejada. Las mediciones se realizaron a una frecuencia de un Hz (con los sensores conectados a otro datalogger CR1000) y se obtuvieron promedios de 30 min.

Relación entre el intercambio neto de bióxido de carbono y la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel de los árboles

Para evaluar la relación entre el intercambio neto de bióxido de carbono (NEE) y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) absorbida por el dosel de los árboles, se utilizó una función hiperbólica rectangular (Stoy *et al.*, 2006; Moffat *et al.*, 2007), utilizando la siguiente ecuación.

$$NEE = \frac{b1*PAR}{b2+PAR} + b3 \quad (3)$$

Donde: $b1$ representa la capacidad fotosintética máxima del ecosistema ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $b2$ corresponde al valor de la PAR para el valor medio de la tasa de fotosíntesis ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y $b3$ simboliza la tasa de respiración diurna del ecosistema ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Estos parámetros se obtienen con procedimientos de regresión no lineal. (Evaluación de funciones con el método Jacobiano).

Rendimiento y eficiencia cuántica de los árboles de la huerta

El rendimiento y la eficiencia cuántica de los árboles de la huerta a través de los meses de crecimiento se obtuvieron con las siguientes relaciones:

$$Rend_{cuant} = \frac{tasa_{NEE}}{tasa_{PAR}} \quad (4)$$

Donde: $Rend_{cuant}$ es el rendimiento cuántico en μmol de CO_2 fijado por μmol de fotones absorbidos; $tasa_{NEE}$ es la tasa neta de fijación de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y $tasa_{PAR}$ es la tasa de radiación fotosintéticamente activa absorbida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

$$Ef_{cuant} = \frac{Energ_{NEE}}{Energ_{PAR}} \quad (5)$$

Donde: Ef_{cuant} es la eficiencia cuántica del ecosistema vegetal, $Energ_{NEE}$ es la energía consumida por la fijación del CO_2 (MJ) y $Energ_{PAR}$ es la energía contenida en la PAR absorbida (MJ).

$Energ_{NEE}$ se obtuvo con la siguiente relación:

$$Energ_{NEE} = (E_{mol}) * (tasa_{NEE}) \quad (6)$$

Donde: E_{mol} es la energía requerida por cada μmol de CO_2 fijada ($0.469 * 10^{-6}$ MJ μmol^{-1})

Similarmente, $Energ_{PAR}$ se determinó con la siguiente relación:

$$Energ_{PAR} = (E_{photon}) * (tasa_{PAR}) \quad (7)$$

Donde: E_{photon} energía proporcionada por μmol de fotones correspondiente al promedio de la banda de longitud de onda de la PAR ($0.2178 * 10^{-6}$ MJ μmol^{-1})

Análisis estadístico

Las diferencias en el rendimiento y la eficiencia cuántica en los meses de crecimiento de los árboles se evaluaron con un diseño completamente al azar donde cada mes se consideró como un tratamiento (siete meses) y las repeticiones fueron el número de días con información de cada mes. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Intercambio Neto de Bióxido de Carbono y Radiación Solar Absorbida

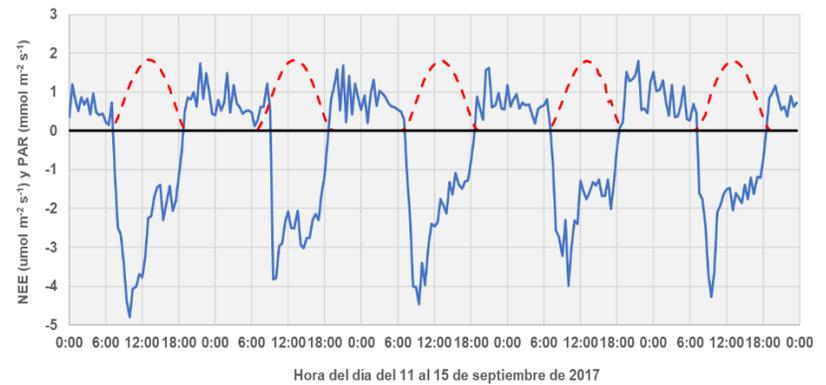
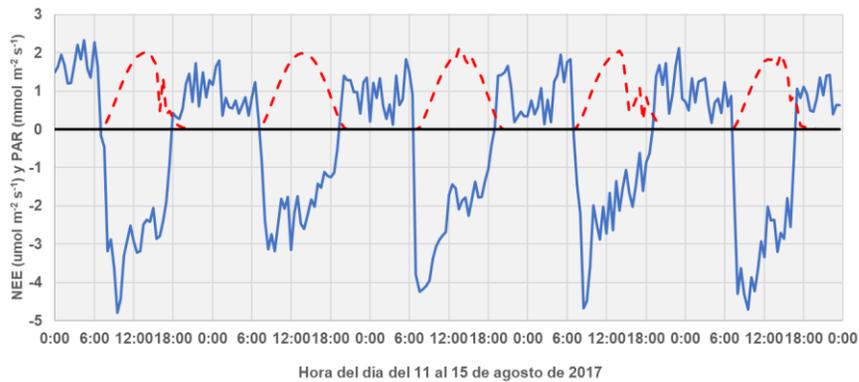
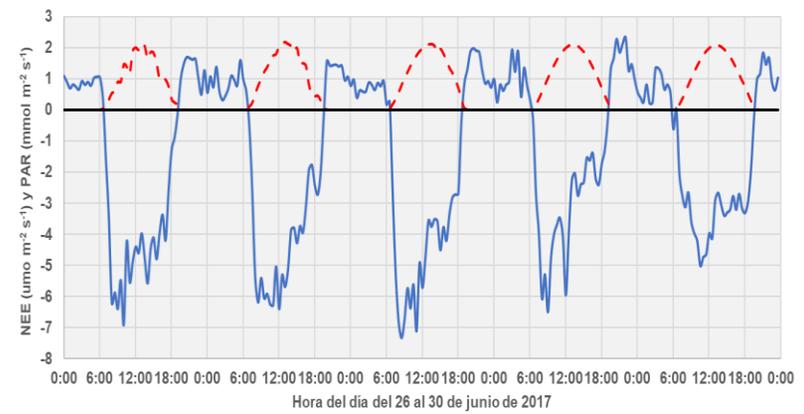
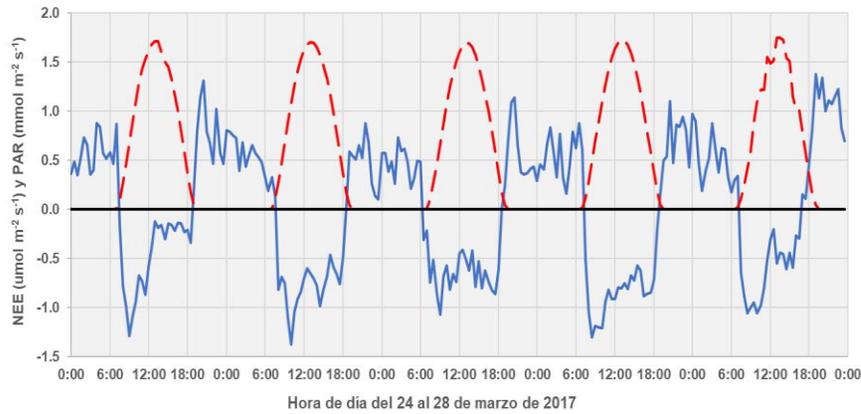
Al inicio de la etapa vegetativa (marzo), la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono (NEE) (promedios de 30 min) de la huerta fue muy pequeña con relación a la observada en los meses posteriores (Figura 1), esto debido a que las hojas de los árboles apenas iniciaban su desarrollo. Durante esta etapa, la tasa de asimilación de bióxido de carbono (valores con símbolo negativo de NEE de la Figura 1) fue en promedio menor de $-1.25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; aproximadamente de la misma magnitud fue la máxima tasa de liberación de CO_2 (valores positivos de la misma figura) (respiración nocturna). Lo que representó un equilibrio aproximado entre la tasa asimilación y de liberación de CO_2 . La tasa máxima de asimilación diurna correspondió con la de mayor tasa de absorción de radiación fotosintéticamente activa por el dosel de los árboles, y se observó entre las 11:00 y las 14:00 h del día a través de los meses de crecimiento de los árboles (Figura 1). Debido al poco desarrollo del dosel de los árboles durante marzo, la tasa de radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR) fue menor ($1700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) que la observada en los meses posteriores (Figura 1).

En junio, cuando los árboles ya tenían el desarrollo foliar completo y máxima actividad fotosintética, la máxima tasa de asimilación diurna fue de hasta $-7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que la de liberación fue solo de $-2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 1). La tasa mayor de asimilación que de liberación, se relaciona con la formación de compuestos de carbono que se pueden destinar para el crecimiento de la madera y para el desarrollo de frutos. Al respecto, Wang *et al.* (2007) y Negi *et al.* (2003) mencionan que del CO_2 asimilado, el 46.4 % se destina para el crecimiento y formación de madera y frutos. En esta etapa la tasa de PAR absorbida fue hasta de $2100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

En agosto, la tasa de asimilación diurna máxima decreció a valores ligeramente menores ($-5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), mientras que la máxima tasa de liberación nocturna fue de hasta $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con una tasa de máxima PAR absorbida de hasta $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 1). Durante septiembre, la tasa de máxima asimilación también fue de $-5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pero la de máxima liberación fue menor de $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y la tasa de máxima PAR absorbida fue ligeramente menor de $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 1). Patrones similares se han observado en otros cultivos, por ejemplo, en una huerta de Kiwi (*Actinidia deliciosa*)

la asimilación de CO₂ alcanzó valores máximos durante mayo y junio de hasta -14 μmol m⁻² s⁻¹, y decreció durante julio y agosto a -12 y -10 μmol m⁻² s⁻¹ respectivamente (Rossi *et al.*, 2007). En una huerta madura de árboles de aguacate (*Persea americana* Miller), la tasa máxima de asimilación neta se observó en abril (-18,3 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) y decreció a un valor constante (-10 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) en octubre (Nafees *et al.*, 2019).

Los valores de intercambio neto de CO₂ observados en este estudio son pequeños, ya que la huerta estaba formada por árboles jóvenes (siete años de edad) que tenían un diámetro de copa promedio de 4.78 m equiválete a un área de solo 15.75 m². Esta superficie de copa solo cubrió el 16.4% de la superficie de suelo en un marco de plantación de 12 m entre líneas por 8 m entre árboles. Para nogales de mayor edad (35 años) con completa cobertura de suelo la tasa de asimilación de CO₂ puede ser de hasta -17 μmol m⁻² s⁻¹ (Zermeño-Gonzalez *et al.*, 2014). El intercambio neto de CO₂ de tres genotipos de nogal (A1, A3 y A9) bajo condicione de crecimiento en maceta fue 26.3, 25.6 y 27.5 μmol m⁻² s⁻¹ respectivamente (Momayyezi *et al.*, 2022). En arboles de nogal pecanero de los cultivares Pawnee y Stuart de 25 años, la tasa de intercambio neto de CO₂ fue -11 y -9 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ respectivamente, para una tasa de asimilación de PAR igual o mayor de 700 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹. (Lombardini *et al.*, 2009). Para la variedad Franquette (arboles de 12 años) el intercambio neto de CO₂ fue de hasta -16.9 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ (Christopoulos *et al.*, 2021).



- 1 **Figura 1. Tasa de intercambio neto de bióxido de carbono (promedio de 30 min) (NEE) “línea azul sólida”, y de radiación**
- 2 **fotosintéticamente activa absorbida por el dosel de los árboles (PAR) “línea roja discontinua”, de una huerta de nogal pecanero**
- 3 **de 7 años de edad en diferentes tiempos de su ciclo de crecimiento.**

Relación entre el intercambio neto de bióxido de carbono y la radiación fotosintéticamente activa absorbida

La relación entre el intercambio neto de bióxido de carbono (NEE) y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) absorbida por el dosel de los árboles (promedio de 30 min), a través de los meses de crecimiento, se describió con una función hiperbólica rectangular (Figura 2). La gran dispersión de los datos se debe a que, además de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel, el NEE también depende de otros factores como: velocidad del viento, temperatura y humedad del aire y contenido de agua en el suelo. En marzo se observan los valores menores de NEE en función de la PAR absorbida, que se debió al poco desarrollo foliar que tenían los árboles en este mes. En mayo, cuando los árboles tienen mayor desarrollo foliar y hojas con mayor capacidad fotosintética, el NEE es mayor (Figura 2). En julio el NEE es ligeramente menor y en septiembre debido a una reducción en la PAR incidente y el inicio de la senescencia de las hojas, el NEE fue menor (Figura 2). Relación similar ha sido observada en otros ecosistemas vegetales. Por ejemplo, Ramírez y Pimienta (2003) observaron una tasa máxima de fotosíntesis de $-10.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en una huerta de ciruelo (*Spondias purpurea* L.) en días de mayor incidencia de PAR. En plantas de caucho (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) de 4 años el NEE alcanzó saturación hasta valores de $-25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en marzo cuando la PAR incidente fue mayor de $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en las plantas de mayor área foliar (Chayawat *et al.*, 2019)

Los coeficientes b_1 y b_3 de la ecuación hiperbólica rectangular son indicadores de la máxima capacidad fotosintética y de la tasa de respiración diurna de la huerta respectivamente ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$). En el Cuadro 1, se muestra que en marzo se tuvo la menor capacidad fotosintética de la huerta (valor menor de b_1), por poco desarrollo de hojas de los árboles. En abril se observó el valor mayor, que probablemente se debió a que los árboles ya tenían el desarrollo foliar completo, con días muy soleados (poca nubosidad) y temperaturas moderadas. De mayo a julio la máxima capacidad fotosintética de la huerta fue muy similar y decreció en agosto y septiembre.

La tasa de respiración diurna (parámetro b_3 de la ecuación hiperbólica rectangular) (Cuadro 1) fue menor y aproximadamente igual durante los meses de marzo, abril y mayo. La tasa máxima de respiración diurna se observó en septiembre (Cuadro 1), esto probablemente se debió al inicio de la senescencia de las hojas. En esta etapa ya no se producen hojas nuevas y se reduce la capacidad fotosintética de las hojas. Estudios previos en ambientes controlados con plantas de Girasol (*Helianthus annuus*), Azucena (*Lilium candidum*), Maíz (*Zea mays*) y Alfalfa (*Medicago sativa*)

también han mostrado que la relación entre la tasa de fotosíntesis neta y la de PAR se describen con una hipérbola rectangular (Sun & Wang, 2018). La relación entre el NEE y la PAR en árboles jóvenes de caucho (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) se describió con una función hiperbólica rectangular, y el NEE fue de hasta $-4.94 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Chayawat *et al.*, 2019). Estudios realizados por Zhang *et al.* (2015) en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) observaron una relación directamente proporcional entre la tasa de PAR y la de NEE.

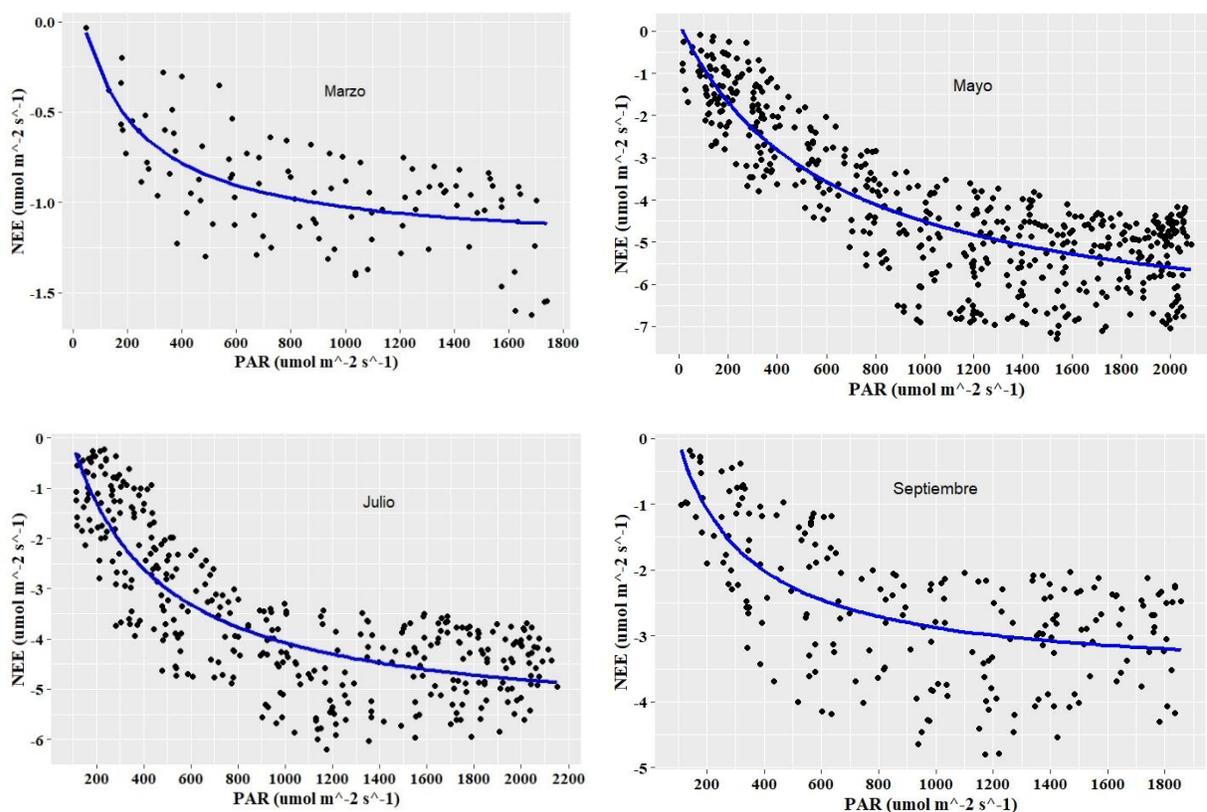


Figura 2. Relación entre el intercambio neto de bióxido de carbono (NEE) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR) por el dosel de los árboles de una huerta de nogal pecanero de siete años del norte de México. Los puntos representan los datos observados y la línea corresponde a los datos estimados de NEE con una función hiperbólica rectangular.

Cuadro 1. Parámetros de la función hiperbólica rectangular y coeficiente de determinación (r^2) en los meses de desarrollo de una huerta de nogal pecanero de siete años de edad, del norte de México.

Mes	b1 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	b2 ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	b3 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	r^2
Marzo	-1.504	188.748	0.238	0.425
Abril	-8.58	942.610	0.223	0.805
Mayo	-7.558	602.669	0.204	0.733
Junio	-7.258	246.215	1.306	0.512
Julio	-7.633	282.216	1.876	0.693
Agosto	-5.350	204.500	1.387	0.339
Septiembre	-5.963	153.847	2.295	0.426

Rendimiento y eficiencia cuántica de los árboles de la huerta

De los meses evaluados, el rendimiento cuántico expresado en $\mu\text{mol CO}_2$ fijados por mmol de fotones absorbidos, marzo fue el de menor rendimiento cuántico (1.328) (Cuadro 2), lo que se debió a que los árboles apenas iniciaban su desarrollo foliar y la actividad fotosintética fue pequeña. El rendimiento cuántico ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol fotones}$) mayor fue en mayo (4.870) y junio (4.421) debido a un desarrollo foliar mayor y mayor capacidad fotosintética de las hojas. La tasa de asimilación de CO_2 decreció en agosto y septiembre (Cuadro 1), que resultó en una reducción del rendimiento cuántico de los árboles de la huerta (Cuadro 2). Un patrón similar se observó en la eficiencia cuántica, que representa la relación de la energía usada para la fijación de bióxido de carbono, con relación a la energía contenida en la PAR absorbida. En marzo se observó la eficiencia cuántica menor (0.286 %) debido a menor área foliar de los árboles. La eficiencia cuántica mayor se observó en mayo (1.049 %) y junio (0.952) (Cuadro 2), que se debió a mayor área foliar y más capacidad fotosintética de las hojas. En agosto y septiembre las hojas empezaron a perder su capacidad fotosintética por el inicio del proceso de senescencia y su eficiencia cuántica decreció (Cuadro 2). Los valores de rendimiento cuántico son muy pequeños esto significa que solo una pequeña proporción de la radiación solar absorbida es usada en la asimilación de bióxido de carbono. El resto de la radiación que se absorbe solo causa efectos térmicos, que los árboles deben disipar a través de tasas altas de transpiración foliar. Los valores máximos de rendimiento cuántico observados en este estudio son menores a los reportados para un ecosistema forestal ($44 \mu\text{mol CO}_2$

mmol⁻¹ fotones) (Carrara *et al.*, 2004), y los de una plantación de árboles jóvenes de caucho (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) (42.8 µmol CO₂ mmol⁻¹ fotones) (Chayawat *et al.*, 2019); y similares a los observados en una plantación de vid (*Vitis vinifera* L.) 5.456 µmol/mmol en julio y 4.118 µmol/mmol en agosto (Zermeño-Gonzalez *et al.*, 2021).

Cuadro 2. Valores promedio diario mensual del rendimiento y la eficiencia cuántica de una huerta de nogal pecanero de siete años de edad del Norte de México.

Mes	Rendimiento (µmol CO ₂ /mmol fotones)	Eficiencia (%)
Marzo	1.328 ^d	0.286 ^d
Abril	4.231 ^b	0.911 ^b
Mayo	4.870 ^a	1.049 ^a
Junio	4.421 ^{ab}	0.952 ^{ab}
Julio	4.167 ^b	0.897 ^b
Agosto	2.946 ^c	0.634 ^c
Septiembre	3.317 ^c	0.714 ^c

Medias con letra diferente dentro de las columnas son diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$)

Balance mensual del intercambio neto de bióxido de carbono durante el ciclo de crecimiento de los árboles

Por las condiciones de la huerta correspondiente a árboles jóvenes (siete años de edad), la mayor parte de la superficie fue suelo desnudo o con poca vegetación nativa de la localidad, ya que el área de la copa de los árboles correspondió a solo el 16.4 % de la superficie total. En marzo, los árboles de la huerta apenas empezaban a desarrollar el área foliar, por lo que la mayor parte de la superficie fue suelo desnudo, de tal forma que la asimilación diurna diaria integrada de CO₂ para todo el mes resultó en un valor positivo (398.05 mmol m⁻²), lo que indico que, para condiciones diurnas, la liberación fue mayor que la asimilación para dicho mes (Cuadro 3). Para todos los meses del ciclo de crecimiento, el NEE nocturno diario integrado fue positivo, ya que durante la noche solo ocurre liberación de CO₂ por la respiración nocturna de la vegetación presente y la superficie del suelo (Cuadro 3). Para los meses posteriores a marzo, el NEE diurno fue negativo, lo que represento una tasa de asimilación de CO₂ mayor que de liberación. El mayor NEE integrado diurno se observó en mayo (-5 112.18 mmol m⁻²), mes en el que los árboles estaban en la etapa más activa de

crecimiento y desarrollo de frutos, y, los árboles destinan más fotosintatos al desarrollo del fruto y el crecimiento de la madera se reduce (López y Arreola, 2008).

En mayo también se observó la asimilación neta mayor ($-4\ 571.20\ \text{mmol m}^{-2}$), que fue la diferencia entre el NEE diurno y el nocturno. El mayor NEE nocturno se observó en julio ($1\ 646.06\ \text{mmol m}^{-2}$), que probablemente se debió a una temperatura nocturna más alta de las hojas de los árboles y del suelo, que incrementó la tasa de respiración del ecosistema suelo-vegetación (Lloyd y Taylor, 1994; Flanagan y Johnson, 2005; Xu *et al.* 2004). De marzo a septiembre, la asimilación neta total fue $-17\ 274.94\ \text{mmol m}^{-2}$. Asumiendo que el 46.4 % de la asimilación neta de CO₂ se destina al crecimiento y formación de madera (Wang *et al.*, 2007, Negi *et al.*, 2003), correspondería a $8\ 015.57\ \text{mmol m}^{-2}$, que equivale a $80\ 155.72\ \text{mol CO}_2\ \text{ha}^{-1}$ y corresponde a $0.962\ \text{t C ha}^{-1}$ retenidos en la madera de los árboles de la huerta durante el ciclo de crecimiento. Este valor es menor al observado por Wang *et al.* (2007) en árboles de nogal (Western Schley) de 12m de altura con cobertura total de la superficie del suelo ($10.24\ \text{t C ha}^{-1}\ \text{año}^{-1}$) en Las Cruces, N.M, USA. En arboles de nogal pecanero (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) de 11 años en una plantación de alta densidad la reserva de carbono de la huerta es $22.8\ \text{t C ha}^{-1}$ y la tasa de asimilación de carbono fue $1.67\ \text{t C ha}^{-1}\ \text{año}^{-1}$ (Yarad *et al.*, 2017).

Los valores de retención de CO₂ atmosférico obtenidos en este estudio son pequeños comparados con los reportados en otras huertas de nogal pecanero y otras especies de árboles leñosos. Esto se debe a que los árboles fueron de porte pequeño y solo cubrían el 16.4% de la superficie total, sin embargo, durante gran parte del ciclo de crecimiento la asimilación de bióxido de carbono es mayor que la liberación. Esto demuestra que las huertas de nogal pecanero jóvenes, además de su importancia económica y social, también ecológicamente pueden tener una participación importante en la retención del carbono atmosférico, para mitigar el calentamiento global.

Cuadro 3. Valores integrados diurnos, nocturnos y la asimilación neta de bióxido de carbono (NEE), de una huerta de nogal pecanero (7 años de edad), durante los meses de crecimiento, General Cepeda, Coahuila, México.

Mes	NEE diurno (mmol m ⁻²)	NEE nocturno (mmol m ⁻²)	Asimilación Neta (mmol m ⁻²)
Marzo	398.05	689.47	1 087.52
Abril	-5 112.18	1 094.65	-4 017.53
Mayo	-5 717.95	1 146.75	-4 571.20
Junio	-4 611.47	1 029.02	-3 582.45
Julio	-4 175.12	1 646.06	-2 529.06
Agosto	-3 591.24	1 529.83	-2 061.41
Septiembre	-2 969.64	1 368.83	-1 600.81

CONCLUSIONES

La tasa de asimilación y liberación de bióxido de carbono de la huerta depende del tiempo de su ciclo de producción. En marzo los árboles apenas inician su desarrollo foliar y la huerta actúa como una fuente de liberación de bióxido de carbono en condiciones diurnas y nocturnas. De abril a septiembre, la huerta actúa como un sumidero de bióxido de carbono atmosférico. El mayor rendimiento y eficiencia cuántica de la huerta se observa en mayo y corresponde con el mes de mayor asimilación neta de bióxido de carbono. A pesar de la poca edad de los árboles, la huerta tiene una capacidad de retención de $0.962 \text{ t C ha}^{-1}$ por ciclo de crecimiento, por lo que también tiene una participación importante en la asimilación y retención del carbono atmosférico. Su capacidad de retención aumentara con el crecimiento de los árboles.

REFERENCIAS

- Andales, A.; Wang, J.; Sammis, W.; Mexal, G.; Simmons, J.; Miller, R. and Gutschick, P. 2006. A model of pecan tree growth for the management of pruning and irrigation. *Agric. Water Manag.* 84: 77-88.
- Abreu, P., M. Souza, A. Almeida, E. Santos, J. Oliveira y A.L. Figueiredo. 2014. Photosynthetic responses of ornamental passion flower hybrids to varying light intensities. *Acta Physiol. Plant.* 36(8), 1993-2004. Doi: 10.1007/s11738-014-1574-0.
- Ábri, T.; Keser "u, Z.; Borovics, A.; Rédei, K.; Csajbók, J. Comparison of Juvenile, Drought Tolerant Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) Clones with Regard to Plant Physiology and Growth Characteristics in Eastern Hungary: Early Evaluation. *Forests* 2022, 13, 292. <https://doi.org/10.3390/f13020292>.
- Ávila-Lovera, E., Coronel, I., Jaimez, R., Urich, R., Pereyra, G., Araque, O., & Tezara, W. 2016. Ecophysiological Traits Of Adult Trees Of Criollo Cocoa Cultivars (*Theobroma Cacao* L.) From A Germplasm Bank In Venezuela. *Experimental Agriculture*, 52(1), 137-153. doi:10.1017/S0014479714000593
- Ben-Mimoun, M.; Longuenesse, J.J.; Génard, M. 1996. Pmax as related to leaf:fruit ratio and fruit assimilate demand in peach. *J. Hortic. Sci.* 71, 767–775.
- Bock, H.; Brenneman, B.; Hotchkiss, W.; Wood, W. 2012. Evaluation of a phosphite fungicide to control pecan scab in the southeastern USA. *Crop Prot.* 36: 58-64.
- Carrara A, Janssens IA, Curiel-Yuste J, Ceulemans R. 2004. Seasonal changes in photosynthesis, respiration and NEE of a mixed temperate forest. *Agric For Meteorol* 126, 15–31.
- Chayawat, C.; Satakhun, D.; Kasemsap, P. ; Sathornkich, J. ; Phattaralerphong, J. 2019. Environmental controls on net CO2 exchange over a young rubber plantation in northeastern Thailand. *ScienceAsia* 2019 Vol.45 No.1 pp.50-59 ref.39. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2019
- Christopoulos, M.V.; Kafkaletou, M.; Karantzi, A.D.; Tsantili, E. Girdling Effects on Fruit Maturity, Kernel Quality, and Nutritional Value of Walnuts (*Juglans regia* L.) alongside the Effects on Leaf Physiological Characteristics. *Agronomy* 2021, 11, 200. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020200>
- Concilco-Alberto, E., Valenzuela-Núñez, L.M., González-Torres, A., Briceño-Contreras, E.A., García-De la Peña, C., & Reyes-Carrillo, J.L. 2022. Azúcares totales solubles en *Carya illinoensis*, balance entre etapas fenológicas clave. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(1): e3084. DOI: 10.19136/era.a9n1.3084

- Constante, G. V.; Nava-Reyna, E. y Cabrera, R. A. 2019. El CO₂ fijado en los fustes del nogal pecanero. IV Congreso Internacional y XV Congreso Nacional sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas. Gómez Palacio, Durango, México.
- Covarrubias, R. A. 2007. Sobrevivir al estrés: cómo responden las plantas a la falta de agua. *Biotecnología* V14 CS3.indd 262. Disponible en: http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/libro_25_aniv/capitulo_22.pdf.
- DeJong, T.M. and Y.L. Grossman. 1995. Quantifying sink and source limitations on dry matter partitioning to fruit growth in peach trees. *Physiol. Plant.* 95:437-443.
- De la Cruz-Ramos, J. M.; Ávila-Rodríguez, V.; Nava-Camberos, U.; Torres-Delgado, M. G. y Márquez-Hernández, C. 2016. Identificación de crisopidos y sus parasitoides en el cultivo de nogal *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch en la Comarca Lagunera.
- Dold, C., Thomas, A.L., & Ashworth, A.J. 2019. Carbon sequestration and nitrogen uptake in a temperate silvopasture system. *Nutr Cycl Agroecosyst* 114, 85–98. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09987-y>
- Eddine, H. 2014. Influencia del riego y el estado de carga sobre algunos parámetros fisiológicos en olivo durante la fase de reposo invernal. 61 PP.
- Eftekhari, M.S. 2022. Impacts of Climate Change on Agriculture and Horticulture. In: Bandh, S.A. (eds) *Climate Change*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86290-9_8
- Errecart, B. V. 2015. III Simposio Internacional de Nogalicultura del Noroeste Argentino. El Contexto Internacional del Negocio de la Nuez de Nogal.
- Fernández M., G. E., Melgarejo, L. M., & Rodríguez C., N.A. 2014. Algunos aspectos de la fotosíntesis y potenciales hídricos de la granadilla (*Passiflora ligularis* Juss.) en estado reproductivo en el Huila, Colombia. *REVISTA COLOMBIANA DE CIENCIAS HORTÍCOLAS* - Vol. 8 - No. 2 - pp. 206-216, julio-diciembre. PP 206-216.
- Flanagan, B., & Johnson, G. 2005. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*. 130:237–253.
- Frusso, E. A. 2007. Características morfológicas y fenológicas del pecan, guía fenológica ampliada y resumida. Capítulo II. Producción de pecan en argentina. UBA, INTA. Buenos Aires Argentina. pp.1-3.
- García-Orellana, Y.; Ortuño, M.F.; Conejero, W.; Ruiz-Sánchez, M.C. Diurnal variations in water relations of deficit irrigated lemon trees during fruit growth period. *Span. J. Agric. Res.* 2013, 11, 137–145.

- Gizer, SG, Polat, O, Ram, MK, Sahiner, N. Recent developments in CO₂ capture, utilization, related materials, and challenges. *Int J Energy Res.* 2022; 46(12): 16241- 16263. doi:10.1002/er.8347
- Glimanove TG, Aires L, Barcza Z, Baron V, Belelli L, Beringer J, Billesbach D, Bonal D, et al 2010 Productivity, respiration, and light-response parameters of world grassland and agroecosystems derived from flux-tower measurements. *Rangeland Ecology & Management.* 63, 16–39.
- IPCC 2018. Global Warming of 1.5°C. Available at: <https://www.ipcc.ch/2018/10/08/summary-for-policymakers-of-ipcc-special-report-on-global-warming-of-1-5c-approved-by-governments/#:~:text=The%20report%20was%20prepared%20under,all%20three%20IPCC%20working%20groups.&text=As%20part%20of%20the%20decision,global%20greenhouse%20gas%20emission%20pathways>(Accessed April 1, 2021).
- Layne, D.R.; Flore, J.A. Physiological responses of *Prunus cerasus* to whole-plant source manipulation. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence, water relations and carbohydrate concentrations. *Physiol. Plant* 1993, 8, 44–51.
- Lei, H, M & Yang, D.W. 2010. Seasonal and interannual variations in carbon dioxide exchange over a cropland in the North China Plain. *Global Change Biol* 16, 2944-57.
- Lombardini, L., Restrepo-Diaz, H., & Volder, A.2009. Photosynthetic Light Response and Epidermal Characteristics of Sun and Shade Pecan Leaves. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 134(3):372–378.
- Lloyd, J. and Taylor, A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology.* 8:315-323.
- López, R. 2004. Comportamiento del intercambio gaseoso de *Coffea arabica* L. en tres altitudes de la zona cafetera central colombiana. *Cenicafé.* 55(3): 202-212.
- López, S.; y Arreola, A. 2008. Efecto del despunte en verde en la producción de rebrotes laterales en rebrotes de nogal pecanero (*Carya Illinoensis* k. Koch). *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales.* 7:57-64.
- López, D. J. C.; Arras, V. A. M.; Salas, G. J. M.; Aguilar, V. A.; Robles, H. L.; Villalobos, P. E. y Rodríguez, A. A. 2011. Rentabilidad del nogal pecanero bajo sistemas de producción de mediana tecnología en Delicias, Chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocios.* 29: 720-732.
- Martens, S.; Shay, J.; Mendlovitz, P.; Matross, M.; Saleska, R.; Wofsy, C.; Woodward, S.; Menton, C.; Crill, M.; De Moraes, L. and Lima, L. 2004. Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: nighttime CO₂ net ecosystem exchange derived from radon and Eddy Covariance methods. *Glob. Chang. Biol.* 10(5): 618-629.

- Medina-Torres, R.; Salazar-García, S.; Ortiz-Catón, M.; Valdivia-Bernal, R. 2011. Variación estacional de la fotosíntesis en varios cultivares de aguacate. *Biociencias*. 1(3): 36-45.
- Méndez-González, J.; Luckie-Navarrete, S.; Capó-Arteaga, M.; Nájera-Luna, J. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en Biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* lindl. Y *p. Pseudostrobus* lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*. 45:479-491.
- Moffat, A.; Papale, D.; Reichstein, M.; Hollinger, D.; Richardson, A.; Barr, A.; Beckstein, C.; Braswell, B.; Churkina, G.; Desai, A.; Falge, E.; Gove, J.; Heimann, M.; Hui, D.; Jarvis, A.; Kattge, J.; Noormets, A.; Stauch, V. 2007. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for Eddy Covariance net carbon fluxes. *J. Agric. For. Meteorol.* 147:209-232.
- Momayyezi, M., Rippner, D. A., Duong, F. V., Raja, P. V., Brown, P. J., Kluepfel, D.A., Earles, J. M., Forrestel, E. J., Gilbert, M.E., & McElrone, A. J. 2022. Structural and functional leaf diversity lead to variability in photosynthetic capacity across a range of *Juglans regia* genotypes. *Plant Cell Environ.* 45:2351–2365.
- Nafees, M., Jaskani, J. M., Sajjad A., Aslam, N. M., Ahmad, I., & Abbas, M. M. 2019. Tree modeling in horticultural crops: a review. *J. Glob. Innov. Agric. Soc. Sci.* 2019, 7(3):87-97.
- Negi, J.; Manhas, R.; Chauhan, P. 2003. Carbon allocation in different components of some tree species of India: A new approach for carbon estimation. *Current Science*. 85(11): 1528–1531.
- Nieto, A, Z. K .2016. Comportamiento Ecofisiológico De Café Variedad Castillo Bajo Tres Niveles De Sombrío En El Municipio De Tibacuy, Cundinamarca. Universidad De Ciencias Aplicadas Y Ambientales –U.D.C.A. Facultad De Ingeniería Maestría En Agroforestería Tropical Bogotá.
- Ojeda-Barrios, D.; Hernández-Rodríguez, O.; López-Ochoa, G.; Martínez-Téllez, J. 2009. Evolución de los sistemas de producción de nuez en México. *Tecnoc. Chih.* 3(3): 115-120.
- Ojeda-Barrios, D.; Perea-Portillo, E.; Hernández-Rodríguez, O. and Ávila-Quezada, G. 2014. Foliar Fertilization with Zinc in Pecan Trees. *Hort. Science* .49: 562–566.
- Ordóñez, B. y Masera, O. 2001. La captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1):3-12.
- Pacheco, E.; Aldrete, A.; Gómez G.; Fierros, G.; Cetina-Alcalá, V. y Vaquera H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una Plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Rev. Fitotec. Mex.* 30:251-254.
- Pimienta, De la T.; Domínguez, C.; Aguirre, C.; Hernández, J.; Jiménez, P. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1): 35-46.

- Ramírez-Hernández, B. C. & Pimienta-Barrios, E. 2003. Photosynthesis in Mexican plum [*Spondias purpurea* L. (Anacardiaceae)]. *Rev. Chapingo Serie Hortic.* 9: 271-277.
- Rehman, A. Ma, H., Ozturk, I., & Ahmad, M. I. 2022. Examining the carbon emissions and climate impacts on main agricultural crops production and land use: updated evidence from Pakistan. *Environ Sci Pollut Res* 29, 868–882. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15481-2>
- Retes, L. R., Nasaimea, P. A. R., Romero, M. S., Benogean, B. F. G. y Martín, R. M. 2014. Análisis de rentabilidad del cultivo de nogal pecanero en la costa de Hermosillo. *Revista Mexicana de Agronegocios.* 34: 872-882.
- Retes, R., Moreno, S., Ibarra, F. A., Martín, M. H. & Suárez, N. E. 2021. Cultivo de Nogal Pecanero en La Costa de Hermosillo Asociado a su Rentabilidad, Ciclo 2020. *Revista Mexicana de Agronegocios.* 48. 714 – 723.
- Rodrigues, P., Pedroso, V., Gouveia, J.P., Martins, S., Lopes, C., Alves, I. Influence of soil water content and atmospheric conditions on leaf water potential in cv. ‘Touriga Nacional’ deep-rooted vineyards. *Irrig. Sci.* 2012, 30, 407–417.
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendí, P.; Paz-Pellat, F. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Ann. For. Sci.* 72: 835–864.
- Rossi, F., Facini, O., Georgiadis, T. and Nardino, M. 2007. Seasonal CO₂ fluxes and energy balance in a kiwifruit orchard. *Italian J. Agrometeorol.* 1: 44-56.
- Sahoo, G., Swamy, S.L., Wani, A.M., Mishra, A. 2022. Agroforestry Systems for Carbon Sequestration and Food Security: Implications for Climate Change Mitigation. In: Shit, P.K., Adhikary, P.P., Bhunia, G.S., Sengupta, D. (eds) *Soil Health and Environmental Sustainability. Environmental Science and Engineering.* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09270-1_22
- SAGARPA-SIAP (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2015. Anuario estadístico de la producción agrícola. México, D. F.
- SAGARPA-SIAP (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2021. Anuario estadístico de la producción agrícola. México, D. F.
- Samani, Z.; Bawazir, S.; Skaggs, R.; Longworth, J.; Piñon, A.; Tran, V. 2011. A simple irrigation scheduling approach for pecans. *Agric. Water Manag.* 98: 661-664.

- Schaffer, B., L. Ramos and S.P. Lara. 1987. Effect of fruit removal on net gas exchange of avocado leaves. *Hort Science* 22:925-927.
- Schultz, E.D. 1986. Carbon dioxide and water vapour exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 37:247-274.
- Sharma S, Rana VS, Prasad H, Lakra Jand Sharma U. 2021 Appraisal of Carbon Capture, Storage, and Utilization Through Fruit Crops. *Front. Environ. Sci.* 9: 700768. doi: 10.3389/fenvs.2021.700768.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2021. Cierre de la producción agrícola por estado. Recuperado de [http:// www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/](http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/).
- Smillie, R.M. and S.E. Hetherington. 1983. Stress tolerance and stress-induced injury in crop plants measured by chlorophyll, fluorescence in vivo. *Plant Physiol.* 72:1043- 1050.
- Stoy, P. C.; Katul, M. G. G.; Siqueira, B. S.; Juang, J. Y.; Novick, K. A.; McCarthy, H. R.; Oishi, A. C.; Uebelherr, J. M.; Kim, H. S.; Oren, R. A. M. 2006: Separating the effects of climate and vegetation on evapotranspiration along a successional chronosequence in the southeastern US. *Global Change Biol.* (12): 2115-2135.
- Sun, D.B. and Wang, Q.S. 2018 Linear Relationships between Photosynthetic Rate and Photochemical Energy Expressed by PAR × Fv/Fm. *American Journal of Plant Sciences*, 9, 125-138. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.92011>
- Syvertsen, J.P. 1984. Light acclimation in citrus leaves II. CO₂ assimilation and light, water and nitrogen use efficiency. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109:812-817.
- Vera, J., Conejero, W., Conesa, M. R., & Ruiz-Sánchez, M. C. 2019. Irrigation Factor Approach Based on Soil Water Content: A Nectarine Orchard Case Study. *Water* 11, 589; doi:10.3390/w11030589.
- Wang, J.; Miller, D. R.; Sammis, T. W.; Gutschick, V. P.; Simmons, L. J.; Andales, A. A. 2007. Energy balance measurements and a simple model for estimating pecan water use efficiency. *Agric Water Manag.* 91: 92-101.
- Wilson-García, C. Y.; Zavaleta-Mancera, H. A.; López-Delgado, H. y Hernández-Garay, A. 2008. La citocinina BAP retrasa senescencia, aumenta antioxidantes, proteína y crecimiento en el pasto ovillo (*Dactylis glomerata* L.). *Agrociencia.* 42(7):799-806.
- Xu, L.; Baldocchi, D. D. and Tang, J. 2004. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biogeochemical Cycles.* 18.
- Yadav, R.P., Bisht J.K., & Bhatt, J.C. 2017. Biomass, carbon stock under different production systems in the mid hills of Indian Himalaya R. P. *Tropical Ecology* 58(1): 15–21.

- Yan, X.H., Yi, J.H., Duan, S.H., Zhou, B., Hu, W.H. and Liu, S. 2013. Photosynthesis Light Response Curves of Four Rice Varieties and Model Fitting. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 604-610.
- Ye, Z.P. and Yu, Q. 2008 Comparison of New and Several Classical Models of Photosynthesis in Response to Irradiance. *Journal of Plant Ecology*, 32, 1356-1361.
- Zapata, N.; Chalgaf, I.; Nerilli, E.; Latorre, B.; López, C.; Martínez-Cob, A.; Girona, J.; Playán, E. 2012. Software for on-farm irrigation scheduling of stone fruit orchards under water limitations. *Comput. Electron. Agric.* 88, 52–62.
- Zermeño-González, A.; Ríos-Estudillo, J. A.; Gil-Marín, J. A.; Cadena-Zapata, M. y Villarreal-Quintanilla, J. A. 2011. Dinámica del flujo de bióxido de carbono y de energía sobre un pastizal natural del norte de México. *Bioagro*. 23(1): 35-42.
- Zermeño, G. A.; Cruz S. C. I.; Munguía L. J. P.; Catalán V. E. A.; Campos M S. G.; y Cortés B. J. de J. 2014. Efecto del sistema de riego y clima en la eficiencia del uso de agua de nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*. 32: 23-33.
- Zermeño-González, A., Bravo-Escalante, A. P., Santos Gabriel Campos-Magaña, S. G., Ramírez-Rodríguez, H. & Méndez-González, J. 2021. Tasa de intercambio neto de bióxido de carbono de un viñedo durante el ciclo de crecimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. n.º 26 (julio). México, ME:179-89.
- Zhang L, Sun R, Xu Z, Qiao C, Jiang G. 2015. Diurnal and Seasonal Variations in Carbon Dioxide Exchange in Ecosystems in the Zhangye Oasis Area, Northwest China. *PLoS ONE* 10(3): e0120660. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120660>