

ESTIMACIÓN DEL INTERCAMBIO NETO DE CO₂ EN UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR DURANTE EL CICLO DE PLANTILLA

NET ECOSYSTEM CO₂ EXCHANGE OF A SUGAR CROP ON THE PLANT GROWING CYCLE

Alejandro **Zermeno-González**¹, Sandino **Villatoro-Moreno**¹, J. Jesús **Cortés-Bracho**¹, Martín **Cadena-Zapata**², Ernesto A. **Catalán-Valencia**³, M. Ángel **García-Delgado**⁴, Juan P. **Munguía-López**⁵

¹Departamento de Riego y Drenaje (azermeno@uaaan.mx). ²Departamento de Maquinaria Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. ³Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Canal Sacramento Km 6.5, Gómez Palacio, Durango, México. ⁴Unidad Académica Multidisciplinaria Mante, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Tamaulipas, México. ⁵Departamento de Agroplásticos, CIQA, Saltillo, Coahuila, México.

RESUMEN

El cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) aporta aproximadamente dos terceras partes de la producción mundial de azúcar. Es una planta de metabolismo tipo C4 con capacidad alta de asimilación de CO₂. La asimilación de CO₂ por el dosel de un cultivo se puede determinar midiendo el intercambio neto de CO₂ entre el ecosistema (vegetación y suelo) y la atmósfera (NEE). En este estudio se realizaron mediciones de NEE de un cultivo de caña de azúcar y se compararon contra los valores reportados para otras especies vegetales. Se analizó también la relación del NEE con la tasa de evapotranspiración (ET) y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) absorbida por el dosel. La tasa instantánea de NEE del cultivo fue $-28.23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (el signo negativo indica que el flujo neto de CO₂ es de la atmósfera hacia el dosel del cultivo) y fue aproximadamente igual o mayor a la reportada para varias especies de pastos y bosques. La retención promedio diaria de CO₂ corresponde a la diferencia entre el NEE integrado durante el día y la noche, y fue $44.94 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Éste también fue igual o mayor a los valores reportados para otras especies y cultivos. Hubo una relación parabólica entre el NEE y la tasa de ET donde la tasa máxima de NEE fue $25.92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a una ET de $5.477 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. La relación entre NEE y PAR absorbida fue similar: la máxima tasa de NEE fue $23.08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, con una PAR absorbida de $1127.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Palabras clave: balance de carbono, balance de energía, *Saccharum officinarum* L., covarianza eddy.

ABSTRACT

The sugarcane crop (*Saccharum officinarum* L.) contributes about two thirds of world sugar production. It is a C4 metabolism plant with high capacity for CO₂ assimilation. The CO₂ assimilation by the canopy of a crop can be determined by measuring the net exchange of CO₂ between the ecosystem (vegetation and soil) and the atmosphere (NEE). In this study, we did NEE measurements of a sugarcane crop and compared them with the values reported for other plant species. We also analyzed the relationship of NEE with the rate of evapotranspiration (ET) and the photosynthetically active radiation (PAR) absorbed by the canopy. The crop instantaneous NEE rate was $-28.23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (the negative sign indicates that the net flux of CO₂ is from the atmosphere into the crop canopy) and was approximately equal to or greater than that reported for several species of grasses and forests. The daily average CO₂ retention is the difference between the NEE integrated during the day and night, which was $44.94 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. This was also equal to or greater than the values reported for other species and crops. There was a parabolic relationship between NEE and the ET rate where the maximum NEE rate was $25.92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ at an ET of $5.477 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The relationship between NEE and absorbed PAR was similar: the maximum NEE rate was $23.08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, with an absorbed PAR of $1127.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Keywords: carbon balance, energy balance, *Saccharum officinarum* L., eddy covariance.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: septiembre, 2011. Aprobado: julio, 2012.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 46: 579-591. 2012.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), planta con metabolismo C₄, es ampliamente cultivada para la producción de azúcar y puede ser uno de los principales cultivos para obtener biocombustibles (Lourenco *et al.*, 2007). Su cultivo en México tiene un gran impacto social, económico y ecológico debido al proceso de quema para su cosecha. De este cultivo dependen 450 mil empleos directos, beneficia a 2.2 millones de personas y ocupa una superficie de 727 mil ha (PRONAC, 2007).

Los ecosistemas vegetales tienen la capacidad de asimilar el carbono mediante la fotosíntesis e incorporarlo a su estructura por lo cual son importantes reservas de carbono (Benjamín-Ordóñez y Masera, 2001). La fijación de CO₂ atmosférico por los ecosistemas vegetales es un componente muy importante en el balance global del carbono en el planeta (Schimel, 1995). Esta retención de CO₂ se puede evaluar midiendo el intercambio neto de CO₂ entre el sistema suelo-vegetal y la atmósfera (NEE, sus siglas en inglés), definido como el flujo neto por fotosíntesis y respiración de CO₂ entre la superficie vegetal y la atmósfera, sin considerar el CO₂ almacenado o liberado en la capa de aire bajo las mediciones de CO₂ (Martens *et al.*, 2004).

El enfoque de NEE se utiliza para evaluar el potencial de asimilación de CO₂ de diferentes especies vegetales y su relación con cambios en las condiciones del clima. Por ejemplo, un agroecosistema de una plantación de eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.) mostró la tasa más alta de retención de carbono (valores mayores de NEE) respecto a un ecosistema formado por árboles de roble (*Quercus ilex* L. Subsp. *rotundifolia* y *Quercus suber* L.) con un sotobosque de pastos C₃ y plantas leguminosas, y otro ecosistema con pastizal compuesto por pastos C₃ y leguminosas con varias especies C₄ invasivas (Pereira, *et al.*, 2007). Dunn *et al.* (2007) midieron NEE para evaluar el efecto de la variabilidad interanual a largo plazo del intercambio de carbono de un bosque boreal de abetos negros (*Picea mariana* M.) y mostraron que, en función de las condiciones climáticas, el ecosistema vegetal puede funcionar como fuente o depósito de carbono. Además, Hartings *et al.* (2005) evaluaron las variaciones diurnas, estacionales y anuales del NEE de arbustos y matorrales de un desierto Sarcocaula. Estos estudios muestran que el enfoque

INTRODUCTION

Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), a C₄ carbon metabolism plant, is widely cultivated for the production of sugar and can be one of the main crops for biofuels (Lourenco *et al.*, 2007). Its cultivation in Mexico has a great social, economic and ecological impact due to the burning process for harvest. This crop gives way to the creation of 450 000 direct jobs, benefiting 2.2 million people and covers an area of 727 000 ha (PRONAC, 2007).

Plant ecosystems have the capacity to assimilate carbon through photosynthesis and incorporate it into their structure, so they are important carbon reserves (Benjamín-Ordóñez and Masera, 2001). The fixation of atmospheric CO₂ by plant ecosystems is a significant component in the global carbon balance on the planet (Schimel, 1995).

This CO₂ retention from a plant ecosystem can be obtained from measurements of net ecosystem CO₂ exchange between the soil-vegetation system and the atmosphere (NEE), defined as the net flow by photosynthesis and respiration of CO₂ between the plant surface and atmosphere, regardless of the CO₂ stored or released in the air layer under the CO₂ measurements (Martens *et al.*, 2004).

The NEE approach is used to evaluate the potential of CO₂ assimilation in different plant species and their relationship with changes in weather conditions. For example, an agroecosystem of a eucalyptus (*Eucalyptus globulus* L.) plantation showed the highest rate of carbon retention (higher values of NEE) than those observed in an ecosystem made up of oak trees (*Quercus ilex* L. Subsp. *rotundifolia* and *Quercus suber* L.) with an undergrowth of a variety of C₃ grasses and legumes, and another grassland ecosystem composed of various C₃ grasses and legumes with several C₄ invasive species (Pereira *et al.*, 2007). Dunn *et al.* (2007) measured NEE to evaluate the effect of long-term interannual variability of carbon exchange in a boreal forest of black spruce (*Picea mariana* M.), and showed that depending on weather conditions, the plant ecosystem can function as a carbon source or deposit. Furthermore, Hartings *et al.* (2005) evaluated the diurnal, seasonal and annual variations of NEE in shrubs and bushes of a Sarcocaula desert. These studies show that the NEE approach is appropriate to assess the uptake and sequestration of CO₂ from large plant ecosystems

del NEE es apropiado para evaluar la asimilación y el secuestro de CO₂ de grandes ecosistemas vegetales porque se basa en el método de la covarianza eddy, que permite realizar mediciones continuas de flujos de masa y energía entre el dosel y la atmósfera, sin perturbar las condiciones de la vegetación y el suelo del sitio de muestreo (Baldocchi, 2003).

Los estudios en el cultivo de caña de azúcar se han enfocado principalmente a establecer relaciones hídricas con base en mediciones foliares *in situ* de fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática, y su relación con el contenido de agua en el suelo (Glaz *et al.*, 2004; Sakuratani *et al.*, 2004), y en la respuesta del cultivo al déficit de agua (Inman-Bamber y Smith, 2005). Por su cobertura total de la superficie del suelo y el metabolismo carbonado, la caña de azúcar puede representar una reserva importante de CO₂ atmosférico, aunque dicha retención de CO₂ es muy transitoria porque se cosecha anualmente y por la quema para su cosecha. EL NEE del cultivo de caña de azúcar podría ser igual o mayor que el observado en bosques de diferentes especies, pastizales y otros cultivos, pero a la fecha no hay mediciones de esta tasa de NEE. Por tanto, el objetivo de este estudio fue determinar el NEE del cultivo de caña de azúcar, su relación con otras especies vegetales y con la tasa de evapotranspiración y absorción de radiación fotosintéticamente activa, usando el método de la covarianza eddy.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el rancho Santa Anita, municipio de Xicoténcatl, Tamaulipas, México, (22° 56' N, 99° 00' O, a 67 msnm, con precipitación y temperatura media anual de 700 mm y 24 °C). La siembra de la caña de azúcar se realizó del 2 al 4 de octubre de 2007 con el cultivar CP 722086 en un suelo franco arcilloso. Durante el ciclo de crecimiento del cultivo se aplicaron 10 riegos de una lámina de agua de 15 cm cada uno. La fertilización fue 500 kg ha⁻¹ de 22-11-55 (NPK) al momento de la siembra, y 500 kg ha⁻¹ de 20.5-00-00 (sulfato de amonio) 60 d después de siembra. Dentro de la plantación el experimento se estableció en una sección de 200 m (dirección este-oeste) por 400 m (dirección norte-sur).

Las mediciones del flujo de calor sensible (H), calor latente (LE) y CO₂ (FCO₂) entre el dosel del cultivo y la atmósfera se realizaron del 3 de octubre al 10 de noviembre de 2008, con el cultivo en ciclo plantilla de 12 meses de edad. Los flujos se determinaron con el método de la covarianza eddy (Ham y Heilman, 2003), de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

because it is based on the eddy covariance method, which allows continuous measurements of mass and energy flows between the canopy and atmosphere, without disturbing the vegetation and soil conditions of the sampling site (Baldocchi, 2003).

Studies on the cultivation of sugarcane have focused primarily on establishing water relationships based on *in situ* measurements of leaf photosynthesis, transpiration and stomatal conductance, and their relationship with the soil water content (Glaz *et al.* 2004; Sakuratani *et al.*, 2004), and crop response to water deficit (Inman-Bamber and Smith, 2005). Due to its total coverage of the soil surface and carbonate metabolism, sugarcane may represent an important reservoir of atmospheric CO₂, although its retention is highly transitory because sugarcane is harvested annually and burning applied for harvest. The NEE of the sugarcane crop could be equal to or greater than that observed in forests of different species, pastures and other crops, but to date there are no measurements of the NEE rate of this plant ecosystem. Therefore, the aim of this study was to determine the sugarcane crop NEE, its relationship with other plant species and with the rate of evapotranspiration and absorption of photosynthetically active radiation, using the eddy covariance method.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted at the Santa Anita ranch, municipality of Xicoténcatl, Tamaulipas, Mexico (22° 56' N, 99° 00' W, 67 masl, with average annual precipitation and temperature of 700 mm and 24° C). The planting of the sugarcane crop was carried out from 2 to 4 October 2007 with the CP 722,086 cultivar in a clay loam soil. During the crop growth cycle 10 irrigations were applied of a water depth of 15 cm each. Fertilization was 500 kg ha⁻¹ of 22-11-55 (NPK) at planting and 500 kg ha⁻¹ of 20.5-00-00 (ammonium sulfate) 60 d after planting. Within the plantation, the experiment was conducted in a section of 200 m (east-west direction) by 400 m (north-south direction).

Measurements of sensitive heat flux (H), latent heat (LE) and CO₂ (FCO₂) between the crop canopy and the atmosphere were conducted from October 3 to November 10, 2008, when the crop was 12 months old of first plant. The surface fluxes were determined with the eddy covariance method (Ham and Heilman, 2003), according to the following equations:

$$H = \rho_a C_p \bar{w}' \bar{T}' - 0.51 T_a \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (1)$$

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

$$LE = \overline{Lw'\rho_{wv}'} \quad (2)$$

$$FCO_2 = \overline{w'\rho_{CO_2}'} \quad (3)$$

donde ρ_a y C_p son la densidad y capacidad calorífica del aire, L es el calor de vaporización del agua, y T_a la temperatura del aire. Los productos $w'CO_2'$, $w'\rho_{wv}'$ y $w'T_s'$ representan la covarianza entre la velocidad vertical del viento (w) y la densidad del bióxido de carbono (ρ_{CO_2}), densidad del vapor de agua (ρ_{wv}) y la temperatura sónica (T_s). La barra horizontal representa el valor medio del producto de las desviaciones en un segmento de tiempo (30 min).

La velocidad vertical del viento y la temperatura sónica se midieron con un anemómetro sónico tridimensional (CSI-CSAT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, EE.UU.); para ρ_{wv} y ρ_{CO_2} se usó un analizador infrarrojo de bióxido de carbono y vapor de agua de sendero abierto (open path CO_2/H_2O analyzer, LI-7500, LI-COR, Lincoln, Nebraska, EE. UU.). Ambos sensores se instalaron en una torre (5 m altura; 2 m sobre el dosel de la vegetación), al centro del área de estudio (Figura 1). El anemómetro sónico tridimensional se orientó hacia el norte, para lograr que el viento tuviera por lo menos 200 m de contacto con la superficie vegetal en la dirección norte sur y 100 m en la dirección este-oeste, y oeste-este, respecto a la posición del CSI-CSAT3, ya que los vientos dominantes provenían del norte durante el tiempo del estudio. La velocidad vertical del viento, temperatura sónica, densidad del vapor de agua y del bióxido de carbono se midieron a una frecuencia de 10 Hz, y las covarianzas se calcularon cada 30 min con un datalogger CR1000 (Campbell, Scientific, Inc., Logan, Utah, EE.UU.).

Para evaluar la precisión de las mediciones de los flujos descritos se obtuvo el balance de energía sobre la superficie vegetal (Kim y Verma, 1990) con esta ecuación:

$$Rn = H + LE + G \quad (4)$$

donde Rn es la radiación neta, H y LE definidos en (1) y (2), y G es el flujo de calor en la superficie del suelo. La Rn se midió con un radiómetro neto (LITE, Keep and Zonen Inc., Delft, Holanda) colocado en la torre sobre el dosel del cultivo, G se midió con dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, EE.UU.) colocados a 0.08 m de la superficie del suelo, uno al punto medio entre dos surcos y el otro a la distancia media entre dos cepas.

$$LE = \overline{Lw'\rho_{wv}'} \quad (2)$$

$$FCO_2 = \overline{w'\rho_{CO_2}'} \quad (3)$$

where ρ_a and C_p are the density and heat capacity of air, L is the heat of vaporization of water, and T_a air temperature. The products $w'CO_2'$, $w'\rho_{wv}'$ and $w'T_s'$ represent the covariance between the vertical wind velocity (w) and the density of carbon dioxide (ρ_{CO_2}), water vapor density (ρ_{wv}) and the sonic temperature (T_s). The horizontal bar represents the mean value of the deviations product in a segment of time (30 min).

The vertical wind speed and sonic temperature were measured with a three-dimensional sonic anemometer (CSI-CSAT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA); for ρ_{wv} and ρ_{CO_2} an infrared analyzer of carbon dioxide and open path water vapor was used (open path CO_2/H_2O analyzer, LI-7500, LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA). Both sensors were installed in a tower (5 m high, 2 m above the vegetation canopy) at the center of the study area (Figure 1). The three-dimensional sonic anemometer was oriented north to get a fetch of at least 200 m in the north-south direction and 100 m in the east-west and west-east directions with respect to the CSI-CSAT3 position, since the prevailing winds came from the north during the study period. Vertical wind speed, sonic temperature, and the density of water vapor and carbon dioxide were measured with a frequency of 10 Hz and covariance were calculated every 30 min with a datalogger CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA).

To assess the accuracy of the measurements of the fluxes described, the energy balance on the plant surface (Kim and Verma, 1990) was obtained with this equation:

$$Rn = H + LE + G \quad (4)$$

where Rn is the net radiation, H and LE were defined in (1) and (2) equations, and G is the heat flow in the soil surface. Rn was measured with a net radiometer (LITE, Keep and Zonen Inc., Delft, Holland) mounted on the tower above the crop canopy, G was measured with two heat transducers (model HFT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) placed at 0.08 m from the soil surface, one at the midpoint between two grooves and the other at the average distance between two strains.

Sensitive heat H and latent heat LE were corrected by effects of the density difference between up and down air masses (Webb *et al.*, 1980). Then H and LE were corrected to close the energy



Figura 1. Sensores del sistema de covarianza eddy sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar para medir el flujo de calor (H), vapor de agua (LE) y CO₂ (FCO₂) entre el dosel del cultivo y la atmósfera, Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

Figure 1. Sensors of the eddy covariance system over the canopy of a sugarcane crop, to measure the sensitive heat flux (H), water vapor (LE) and CO₂ (FCO₂) between the crop canopy and the atmosphere, Xicoténcatl, Tamaulipas, Mexico.

Calor sensible H y latente LE se corrigieron por efectos de diferencia de densidad entre las masas de aire ascendentes y descendentes (Webb *et al.*, 1980). Después, H y LE se corrigieron para cerrar el balance de energía, considerando que el método de la covarianza eddy proporciona una buena determinación de la relación Bowen (H/LE). El flujo de CO₂ se corrigió con el mismo factor (Ham y Heilman, 2003).

El intercambio neto de CO₂ del ecosistema (NEE) se obtuvo con la siguiente ecuación (Martens *et al.*, 2004):

$$NEE = FCO_2 + \frac{\Delta\rho CO_2}{\Delta t} * \Delta z \quad (5)$$

donde FCO₂ es el flujo de CO₂ medido con el método de la covarianza de eddy (negativo hacia la superficie vegetal), $\Delta\rho CO_2$ es el cambio en la densidad del CO₂ medido a la misma altura a la que se midió el flujo en el intervalo de tiempo considerado ($\Delta t = 30$ min), y Δz es la altura a la que se realizan las mediciones (5 m). La retención neta de CO₂ por el ecosistema se calculó con la diferencia entre la integración de los valores negativos (durante el día) y positivos (durante la noche) de NEE.

La radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_{abs}) por el dosel se obtuvo con la diferencia entre la radiación PAR

balance, considering that the eddy covariance method provides a good determination of the Bowen ratio (H/LE). The CO₂ flux was corrected with the same factor (Ham and Heilman, 2003).

The net ecosystem CO₂ exchange (NEE) was obtained with the following equation (Martens *et al.*, 2004):

$$NEE = FCO_2 + \frac{\Delta\rho CO_2}{\Delta t} * \Delta z \quad (5)$$

where FCO₂ is the CO₂ flux measured by the eddy covariance method (negative to the plant surface), $\Delta\rho CO_2$ is the change in the density of CO₂ measured at the same height at which the flow was measured in the range of time considered ($\Delta t = 30$ min), and Δz is the height at which measurements are made (5 m). The net retention of CO₂ by the ecosystem was calculated from the difference between the integration of NEE negative values (at daytime) and positive ones (during nighttime).

The photosynthetically active radiation (PAR_{abs}) absorbed by the canopy was obtained with the difference between incident and reflected PAR radiation measured with two quantum sensors (Apogee Instruments, Logan, Utah, USA) placed at 2 m above the canopy crop, one oriented toward the zenith and the other to the plant surface. These sensors were connected to the CR1000

incidente y reflejada medida con dos sensores quantum (Apogee Instruments, Logan, Utah, EE.UU.) colocados a 2 m sobre el dosel del cultivo, uno orientado a hacia el cenit y el otro hacia la superficie vegetal. Estos sensores se conectaron al datalogger CR1000 para realizar mediciones a una frecuencia de 1 s y promedios de 30 min.

Los valores del NEE totales diurnos y nocturnos se obtuvieron integrando numéricamente los valores instantáneos negativos de NEE (promedios de 30 min) en el día y los positivos en la noche.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar la precisión de las mediciones de H, LE y CO_2 , se obtuvo el balance de energía (Ecuación 4) sobre la superficie vegetal. El análisis de datos mostró que la suma $\text{H}+\text{LE}$ fue en promedio 15.5 % menor que la energía disponible ($\text{Rn}-\text{G}$) sobre la superficie vegetal (Figura 2). Estudios realizados por Wilson *et al.* (2002) en 22 sitios de la red de FLUXNET (red de sitios de mediciones de flujos superficiales donde se usa la covarianza eddy) en EE.UU. sobre diferentes tipos de vegetación y condiciones climáticas, indicaron que la suma de los flujos por turbulencia ($\text{H}+\text{LE}$) fue en promedio 20 % menor que $\text{Rn}-\text{G}$. En el mismo contexto, una revisión de 20 años de investigaciones (Foken, 2008) relacionadas con el problema del cierre del balance de energía sobre las superficies

datalogger to make measurements with a frequency of 1 s and 30 min averages.

The total day and night values of NEE were obtained by integrating numerically the instantaneous negative NEE values (mean of 30 min) on the day and positive ones at night.

RESULTS AND DISCUSSION

To assess the accuracy of measurements of H, LE and CO_2 , we applied the energy balance (Equation 4) on the plant surface. The data analysis showed that $\text{H}+\text{LE}$ was on average 15.5 % less than the available energy ($\text{Rn}-\text{G}$) on the plant surface (Figure 2). Studies by Wilson *et al.* (2002) in 22 sites in the FLUXNET network (network of sites of surface flow measurements using the eddy covariance) in the USA. on different types of vegetation and weather conditions indicated that the amount of turbulence flows fluxes ($\text{H}+\text{LE}$) was on average 20 % lower than $\text{Rn}-\text{G}$. In the same context, a review of 20 years of research (Foken, 2008) regarding the problem of energy balance closure on plant surfaces, showed that the sum of the turbulence fluxes is approximately 20 % lower than the available energy. According to these studies, the energy balance results obtained in this research are within the acceptable range of variation when surface fluxes are measured by the eddy covariance method. To close the energy balance, Ham

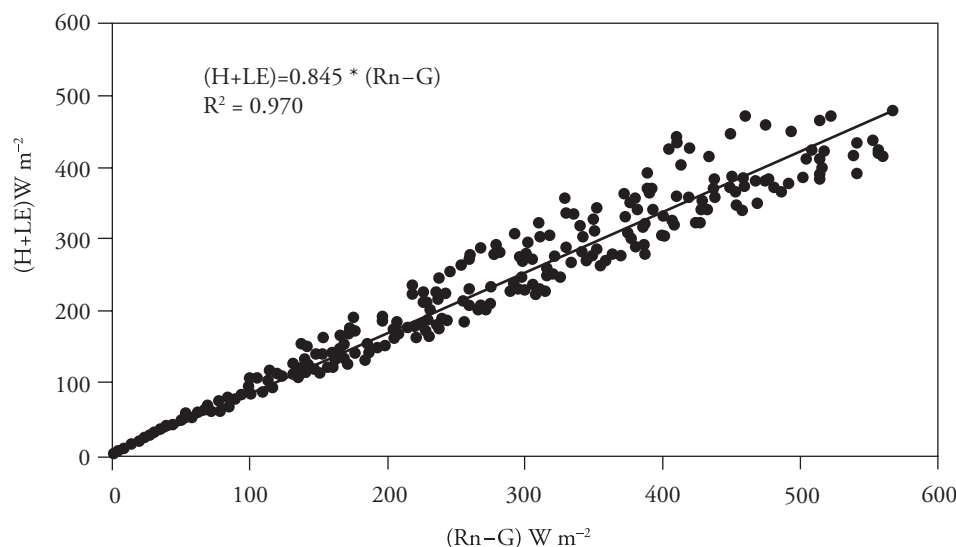


Figura 2. Relación entre la energía disponible ($\text{Rn}-\text{G}$) y la suma de los flujos por turbulencia ($\text{H}+\text{LE}$), promediados cada 30 min, sobre el dosel del cultivo de caña de azúcar, Xicotécatl, Tamaulipas, México.

Figure 2. Ratio of available energy ($\text{Rn}-\text{G}$) and the sum of the fluxes by turbulence ($\text{H}+\text{LE}$), averaged every 30 min, over the canopy of a sugarcane crop, Xicotécatl, Tamaulipas, Mexico.

vegetales, mostró que la suma de los flujos por turbulencia es aproximadamente 20 % menor que la energía disponible. De acuerdo con dichos estudios, los resultados del balance de energía obtenidos en la presente investigación están dentro del rango de variaciones aceptables cuando se miden flujos superficiales con el método de la covarianza eddy. Para cerrar el balance de energía Ham y Heilman (2003) consideran que Rn-G es correcta y los flujos por turbulencia son subestimados y, por tanto, se deben corregir considerando que la relación Bowen (H/LE) es bien determinada al usar el método de la covarianza eddy. Al realizar esta corrección se cierra el balance de energía y $(H+LE) = (Rn-G)$ para cada segmento de 30 min (Figura 3).

Tasa instantánea y acumulada de NEE

El valor promedio de los valores máximos de NEE diurno por el agroecosistema entre el 9 y 29 de octubre de 2008 fue $-28.23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mientras que la media de los valores máximos de la tasa instantánea de liberación (respiración nocturna) fue $6.39 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 4). La media de los máximos valores instantáneos de NEE diurnos de la caña de azúcar en este estudio fue mayor a los reportados por Scanlon y Albertson (2004) para un bosque tropical de *Brachystegia spiciformis* B., en la

and Heilman (2003) consider that Rn-G is correct and turbulence fluxes are underestimated, and therefore should be corrected considering that the Bowen ratio (H/LE) is well determined using the method of eddy covariance. In performing this correction, the energy balance was closed, and $(H+LE) = (Rn-G)$ for each segment of 30 min (Figure 3).

NEE instantaneous and accumulated rate

The average value of NEE during daytime between October 9 and 29, 2008 was $-28.23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, while the average of the maximum values of the instantaneous release rate (dark respiration) was $6.39 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figure 4). The mean of the maximum instantaneous values of daytime NEE of the sugar cane was higher than those reported by Scanlon and Albertson (2004) for a tropical forest of *Brachystegia spiciformis* B., in the period of greatest growth ($-20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). It was also bigger than that of a grassland of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and white clover (*Trifolium repens* L.) ($-17.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Nieveen *et al.*, 2005), and of a rain forest where the dominant species were mimosoideae legumes (*Neptunia plena* L.) and Gavilán (*Pentaclethra macroloba* W.) ($-18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Loescher *et al.*, 2003). In addition, the maximum instantaneous rate of NEE of the sugarcane crop

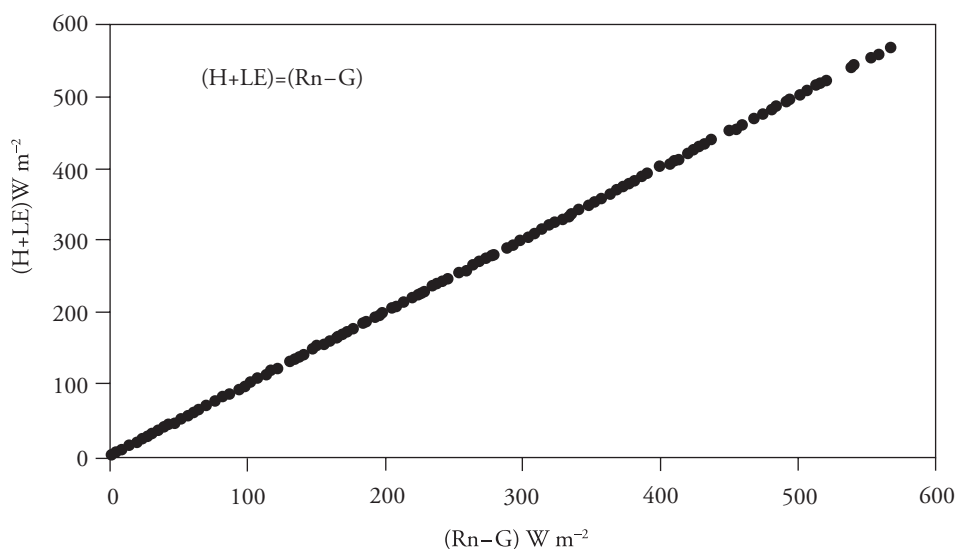


Figura 3. Relación entre la energía disponible (Rn-G) y la suma de los flujos por turbulencia (H+LE), promediados cada 30 min, después de cerrar el balance de energía sobre el dosel del cultivo de caña de azúcar, Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

Figure 3. Ratio between available energy (Rn-G) and the sum of the fluxes by turbulence (H+LE), averaged every 30 min, after closing the energy balance above a sugarcane crop canopy, Xicoténcatl, Tamaulipas, Mexico.

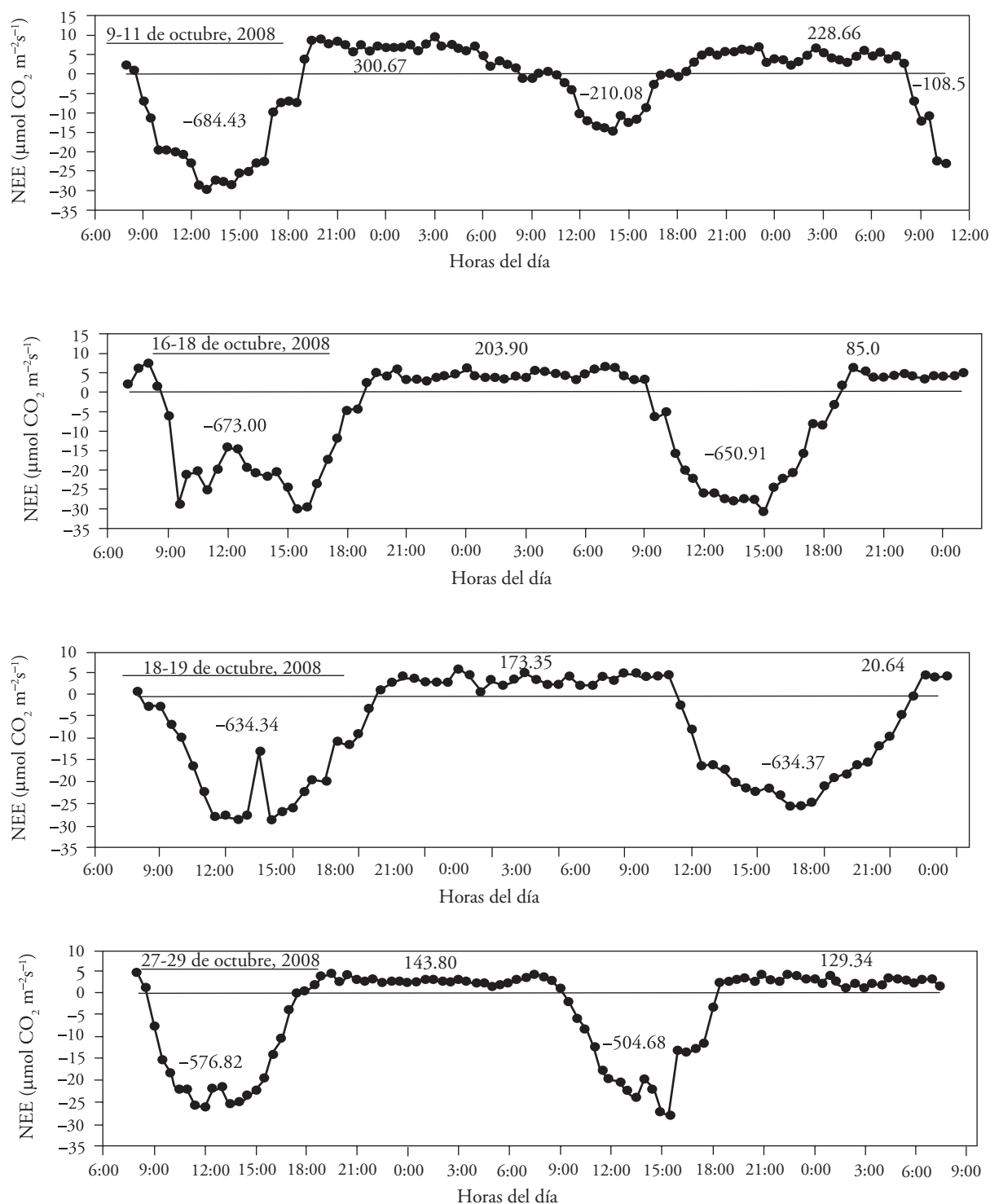


Figura 4. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y valores integrados diurnos y nocturnos (mmol m^{-2}) observados entre el 9 y el 29 de octubre de 2008, sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar (cultivar CP 722086) en pre madurez, Xicoténcatl, Tamaulipas, México. Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de bióxido de carbono por el agroecosistema.

Figure 4. Instantaneous rate of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) and the integrated daytime and nighttime values (mmol m^{-2}) observed between October 9 and 29, 2008 on the canopy of a sugarcane crop (cultivar CP 722086) in pre maturity, Xicoténcatl, Tamaulipas, Mexico. Negative values indicate uptake and positive release of carbon dioxide by the agroecosystem.

época de mayor crecimiento ($-20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). También fue mayor al de una pradera de ballico perenne (*Lolium perenne* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.) ($-17.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Nieveen *et al.*, 2005) y un bosque húmedo donde las especies dominantes fueron leguminosas mimosóideas (*Neptunia plena* L.) y Gavilán (*Pentaclethra macroloba* W.) ($-18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Loescher *et al.* 2003). Además, la tasa instantánea máxima de NEE de la caña de azúcar en este estudio fue mayor al observado por Jans *et al.* (2010) en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la etapa reproductiva ($-15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). La comparación de los resultados de este estudio con otras investigaciones muestra que la caña de azúcar tiene una alta capacidad de asimilación de CO₂.

El valor integrado diurno promedio (08:00 a 19:00 h aproximadamente) del 9 al 29 de octubre del 2008 del NEE fue $-571.08 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}$ (Figura 4), mientras que el NEE nocturno promedio integrado fue $196.62 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}$. La diferencia entre estos valores representó una captura promedio diaria de $374.46 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}$, que equivale a $164.76 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y correspondió a $44.94 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Este dato muestra el potencial de retención de C de la caña de azúcar porque fue mayor al de una plantación de eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.; $23.58 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) (Pereira *et al.*, 2007), al de un bosque tropical húmedo formado por especies leguminosas mimosóideas (*Neptunia plena* L.) y Gavilán (*Pentaclethra macroloba* W.) ($21.69 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$; Loescher *et al.*, 2003) y al de un cultivo de betabel (*Beta vulgaris* L.) ($19.45 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$; Moureaux *et al.*, 2006).

La retención de C de la caña de azúcar en este estudio fue mayor al máximo valor de retención observado en praderas de pastos C4 (*Schizachyrium scoparium* N.) de clima cálido ($84 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) (Suyker y Verma, 2001) y de clima mediterráneo (*Cynodon dactylon* L.) ($5.21 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$; Igreja-Aires *et al.*, 2008). Al comparar los datos de retención de C promedio diaria del cultivo de caña de azúcar con los de otras especies vegetales, se muestra la capacidad alta de retención de C de este cultivo. Sin embargo, es importante mencionar que la retención de CO₂ es muy transitoria por ser un cultivo cosechado anualmente para lo cual se queman las hojas y gran parte del CO₂ retenido se regresa a la atmósfera al final del ciclo. Por tanto, se importante sustituir la quema por la aplicación de herbicidas para la defoliación de las plantas o bien aplicar la cosecha en verde y dejar los

in the present study was higher than that observed by Jans *et al.* (2010) in maize (*Zea mays* L.) in the reproductive stage ($-15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). The comparison of the present study results with other researches shows that sugarcane has a high capacity of CO₂ assimilation.

The average value of the integrated NEE at daytime (08:00 to 19:00 h approximately) from October 9 to 29, 2008 was $-571.08 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}$ (Figure 4), while the average NEE integrated for nocturnal conditions was $196.62 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}$. The difference between these values represented an average daily capture of $374.46 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}$, equivalent to $164.76 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, and corresponded to $44.94 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. This result shows the potential of C retention of sugar cane because it was greater than that of a eucalyptus plantation (*Eucalyptus globulus* L.; $23.58 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) (Pereira *et al.*, 2007), of a rainforest formed by leguminous mimosoideae species (*Neptunia plena* L.) and Gavilán (*Pentaclethra macroloba* W.) ($21.69 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, Loescher *et al.*, 2003), and of a beet crop (*Beta vulgaris* L.) ($19.45 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$; Moureaux *et al.*, 2006).

Retention of C by the sugarcane in this study was greater than the maximum value of retention observed in C4-grass prairies (*Schizachyrium scoparium* N.), of warm weather ($84 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) (Suyker and Verma, 2001) and of Mediterranean climate (*Cynodon dactylon* L.) ($5.21 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$; Igreja-Aires *et al.* 2008). In comparing the sugarcane crop daily average C retention data with other plant species we found the high C retention capacity of this crop. However, it is worth noting that the retention of CO₂ is highly transient since it is a crop harvested annually, for which leaves are burned and much of the CO₂ retained returns to the atmosphere at the end of the cycle. Therefore, it is important to replace burning by the application of herbicides for plant defoliation, or implement green harvesting, leaving residues on the ground to enter the cycle of soil organic matter.

Relationship between NEE, rate of evapotranspiration and photosynthetically active radiation absorbed by the crop canopy

The relationship between NEE and ET was parabolic. At low values of ET the rate of increase of

residuos de cosecha en el terreno para que entren al ciclo de la materia orgánica del suelo.

Relación entre el NEE, tasa de evapotranspiración y radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel del cultivo

La relación entre NEE y ET fue parabólica (Figura 5). A valores bajos de ET la tasa de incremento de NEE es alta, mientras que a valores altos de ET (mayor de 5 mm), aumentos adicionales en la tasa de ET no incrementan la tasa de NEE. Esto probablemente se debió a que una mayor apertura de los estomas tuvo un efecto mayor en el flujo de vapor de agua del interior de las hojas hacia la atmósfera, que el flujo de CO₂ del aire hacia el interior de las hojas, debido a una mayor resistencia estomática al flujo del CO₂ que al flujo del vapor de agua (Jones, 1992; Nobel, 2009). Estos resultados son similares a los de un cultivo de vid (*Vitis vinifera* L.), donde la tasa de NEE aumentó a valores mayores de conductancia estomática (Medrano *et al.*, 2002). Similarmente, el NEE no aumentó a valores mayores de evapotranspiración en un bosque de árboles de ciprés (*Cupressus sempervirens* L.), porque debido a una apertura estomática alta la salida de vapor de agua del interior de las hojas hacia la atmósfera fue mucho mayor que la entrada de CO₂ del aire hacia el interior de las hojas (Dolman *et al.*, 2004). Con base en la información de la Figura 5, el máximo valor de NEE del dosel del cultivo de caña de azúcar fue 25.92 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y con una tasa de ET de 5.477 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

La relación entre el NEE y la PAR absorbida por el dosel fue parabólica (Figura 6) y a tasas bajas de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel del cultivo (PAR_{abs}), pequeños incrementos en PAR_{abs} resultan en incrementos altos en el NEE. Sin embargo a tasas altas de PAR_{abs} (> 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), incrementos adicionales en PAR_{abs} no aumentaron la tasa del NEE. Esto probablemente se debió a que para este nivel de PAR absorbida y para las condiciones climáticas prevalecientes y el estado de desarrollo del cultivo, se alcanzó la tasa máxima de NEE. Hubo relaciones parabólicas entre el NEE y la PAR para el ecosistema de un pastizal de *Stipa krylovii* R., *Carex duriuscula* M., *Artemisia frigida* W., *Cleistogenes squarrosa* K. y *Salsola collina* P. (Li *et al.*, 2005). Xu y Baldocchi (2004). señalan que la tasa de NEE

NEE is high, whereas at high values of ET (above 5 mm), additional increases in the rate of ET do not increase the rate of NEE. This was probably because an increased stomatal opening had a greater effect on the flow of water vapor from the interior of the leaves to the atmosphere than the flow of CO₂ from the atmosphere into the leaves, due to a higher stomatal resistance to the flow of CO₂ than to water vapor flux (Jones, 1992; Nobel, 2009). These results are similar to those of a grapevine crop (*Vitis vinifera* L.), where the NEE rate did not increase to higher values of stomatal conductance (Medrano *et al.*, 2002). Similarly, NEE did not increase to higher values of evapotranspiration in a forest of cypress trees (*Cupressus sempervirens* L.) because due to a high stomatal opening, the outflow of water vapor from inside the leaves to the atmosphere was much greater than the influx of CO₂ from the air to the interior of the leaves (Dolman *et al.*, 2004). Based on the information of Figure 5, the maximum value of the sugarcane crop canopy NEE was 25.92 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, with an ET rate of 5.477 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

The relationship between NEE and PAR absorbed by the canopy was parabolic, and at low rates of photosynthetically active radiation absorbed by the

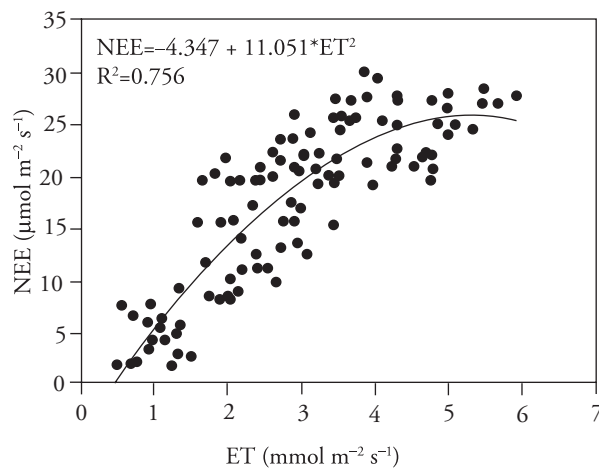


Figura 5. Relación entre la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la tasa de evapotranspiración (ET) observada en un cultivo de caña de azúcar en pre madurez, en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

Figure 5. Relationship between the net ecosystem CO₂ exchange rate (NEE) and the rate of evapotranspiration (ET) observed in a sugarcane crop in pre maturity in Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

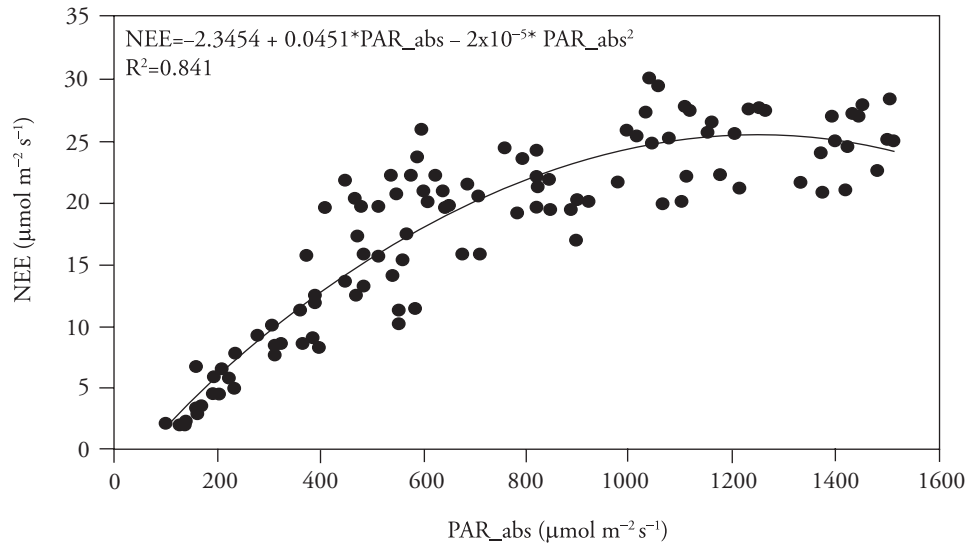


Figura 6. Relación entre la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la tasa de radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_{abs}), observada sobre un cultivo de caña de azúcar en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

Figure 6. Relationship between the rate of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) and the rate of photosynthetically active radiation absorbed (PAR_{abs}), observed on a sugarcane crop in Xicoténcatl, Tamaulipas, Mexico.

se estabiliza o tiende a decrecer a valores mayores de PAR de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en un pastizal anual mediterráneo de *Brachypodium distachyon* L., *Hypochaeris glabra* L. y *Trifolium dubirum* S. Además, la tasa de NEE de un pastizal de *Brachiaria brizantha* H. durante la estación seca del año mostró una tendencia decreciente a valores mayores de 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiación PAR. (Santos *et al.*, 2004). Con base en la información de la Figura 6, la máxima tasa de asimilación de CO₂ del dosel del cultivo de caña de azúcar fue 23.08 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a una tasa de PAR_{abs} de 1 127.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

CONCLUSIONES

Debido a que la tasa instantánea de intercambio neto de CO₂ (NEE) y la retención de C promedio diario del cultivo de caña de azúcar fue igual o mayor a la reportada para diferentes especies de bosques, pastizales y otros cultivos, se confirmó que la caña de azúcar tiene un alto potencial de asimilación de CO₂. Pero la retención de CO₂ es muy transitoria porque es un cultivo de ciclo de cosecha anual y la quema realizada para su cosecha.

crop canopy (PAR_{abs}), small increases in PAR_{abs} result in high increases in NEE. However, at high rates of PAR_{abs} (> 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), further increases in PAR_{abs} did not increase the rate of NEE. This was probably because at this level of PAR absorbed, and with the prevailing climatic conditions and crop development stage, the maximum rate of NEE was reached. There were also parabolic relationships between NEE and PAR for an ecosystem of grassland *Stipa krylovii* R., *Carex duriuscula* M., *Artemisia frígida* W., *Cleistogenes squarrosa* K. and *Salsola collina* P. (Li *et al.*, 2005). Xu and Baldocchi (2004) note that the NEE rate stabilizes or tends to decrease at higher values of PAR of 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in an annual Mediterranean grassland of *Brachypodium distachyon* L., *Hypochaeris glabra* L. and *Trifolium dubirum* S. Moreover, the NEE rate of grassland *Brachiaria brizantha* H. during the dry season showed a decreasing trend to higher values of 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of PAR radiation. (Santos *et al.*, 2004). Based on the information of Figure 6, the maximum rate of CO₂ assimilation of the sugarcane crop canopy was 23.08 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ at a PAR_{abs} rate of 1 127.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Hubo una relación parabólica directamente proporcional entre el NEE, la tasa de ET y la PAR absorbida por el dosel, donde los mayores aumentos en la tasa de NEE se observaron a tasas menores de ET y de PAR.

Es importante mencionar que estos resultados pueden variar por prácticas de manejo del cultivo, ciclo de crecimiento, etapa fenológica y condiciones climáticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. Jesús Govea Sáenz propietario del Rancho Santa Anita, municipio de Xicoténcatl, Tamaulipas, por su apoyo para realizar esta investigación y al CONACYT por el apoyo de beca a uno de los autores.

LITERATURA CITADA

- Baldocchi, D. D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biol.* 9: 479-492.
- Benjamín-Ordóñez, J. A., y O. Masera. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosque* 7(1):3-12.
- Dolman, A. J., T. C. Maximov, E. J. Moors, A. P. Maximov, J. A. Elbers, A. V. Kononov, M. J. Waterloo, and M. K. van der Molen. 2004. Net ecosystem exchange of carbon dioxide and water of far eastern Siberian Larch (*Larix cajanderii*) on permafrost. *Biogeosciences* 1: 133-146.
- Dunn, A. L., C. C. Barford, S. C. Wofsy, M. L. Goulden, and B. C. Daube. 2007. A long-term record of carbon exchange in a boreal black spruce forest: means responses to interannual variability, and decadal trends. *Global Change Biol.* 13: 577-590.
- Foken, T. 2008. The energy balance closure problem: an overview. *Ecol. Appl.* 18(6):1351-1367.
- Glaz, B., D. R. Morris, and S. H. Daroub. 2004. Sugarcane photosynthesis, transpiration and stomatal conductance due to flooding and water table. *Crop Sci. Soc. Am.* 44: 1633-1641.
- Ham, J. M., and J. L. Heilman. 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path Eddy covariance. *Agron. J.* 95: 1393-1403.
- Hastings, S. J., W. C. Oechel, and A. Muhlia-Melo. 2005. Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO₂ exchange of a desert shrub community (*Sarcocaulis*) in Baja California, Mexico. *Global Change Biol.* 11: 927-939.
- Igreja-Aires, L. M., C. Adriano-Pio, and J. Santos-Pereira. 2008. Carbon dioxide exchange above a Mediterranean C3/C4 grassland during two climatologically contrasting years. *Global Change Biol.* 14: 539-555.
- Inman-Bamber, N. G., and D. M. Smith. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Res.* 92:185-202.
- Jans, W. W. P., C. M. J. Jacobs, B. Kruijt, J. A. Elberts, S. Barendse, and E. J. Moors. 2010. Carbon exchange of maize (*Zea*

CONCLUSIONS

Because the instantaneous rate of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) and daily average C retention of sugarcane crop was equal to or greater than that reported for different species of woods, pastures and other crops, it was confirmed that sugarcane has a high potential for CO₂ assimilation. But the retention of CO₂ is highly transient because it is an annual crop with burning applied for harvest.

There was a parabolic relationship directly proportional between NEE, the ET rate and PAR absorbed by the canopy, where the largest increases in NEE rate were observed at lower rates of ET and PAR.

It is worth noting that these results can vary because of crop management practices, growth cycle, phenological stage and weather conditions.

—End of the English version—

-----*

- mays* L.) crop: influence of phenology. *Agric., Ecosystems and Environ.* 139: 316-324.
- Jones, H. G. 1992. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. 2 ed. Cambridge, University Press, Cambridge. USA. 428 p.
- Kim, J., and S. B. Verma. 1990. Components of the surface energy balance in a temperate grassland ecosystem. *Boundary-Layer Meteorol.* 51(4): 401-417.
- Li, S. G., J. Asanuma, W. Eugster, A. Kotani, J. J. Liu, T. Urano, T. Oikawa, G. Davaa, D. Oyunbaatar, and M. Sugita. 2005. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biol.* 11(11):1941-1955.
- Loescher, H. W., S. F. Oberbauer, H. L. Gholz, and D. B. Clark. 2003. Environmental controls on net ecosystem-level carbon exchange and productivity in a Central America tropical wet forest. *Global Change Biol.* 9(3): 396-412.
- Lourenco, N. L., P. A. Arraes-Pereira, and D. Ellis. 2007. Biofuels in Brazil: an overview. *Crop Sci. Soc. Am.* 47:2228-2237.
- Martens, C., T. J. Shay, H. P. Mendlovitz, D. M. Matross, S. S. Saleska, S. C. Wofsy, W. S. Woodward, M. C. Menton, J. M. S. De Moura, P. M. Crill, O. L. De Moraes, and R. L. Lima. 2004. Radon fluxes in tropical forest ecosystem of Brazilian Amazonia: night-time CO₂ net ecosystem exchange derived from random and eddy covariance methods. *Global Change Biol.* 10: 618-629.
- Medrano, H., J. M. Escalona, J. Bota, J. Guliaas, and J. Flexas. 2002. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. *Annals Bot.* 89: 895-905.
- Moureaux, C., A. Debacq, B. Bodson, B. Heinesch, and M. Aubineta. 2006. Annual net ecosystem carbon exchange by a sugar beet crop. *Agric. For. Meteorol.* 139: 25-39.

- Nieveen, P. J., D. I. Campbell, L. A. Schipper, and I. J. Blair. 2005. Carbon exchange of grazed pasture on a drained peat soil. *Global Change Biol.* 11: 607-618.
- Nobel, P. S., 2009. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 4 ed. Academic Press. USA, 600 p.
- Pereira, J. S., J. A. Mateus, L. M. Aires, G. Pita, C. Pio, J. S. David, V. Andrade, J. Banza, T. S. David, T. A. Paco, and A. Rodrigues. 2007. Net ecosystem carbon exchange in three contrasting mediterranean ecosystems-the effect of drought. *Biogeosciences* 4:791-802.
- PRONAC. 2007. Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar. Gobierno Federal en: <http://www.sagarpa.gob.mx/cgcs/discursos/2007/abril/Pronac.pdf> (Consulta: abril 2011)
- Santos, A. J. B., C. A. Quesada, G. T. da Silva, J. F. Maia, H. S. Miranda, A. C. Miranda, and J. Lloyd. 2004. High rates of net ecosystem carbon assimilation by *Brachiaria* pasture in the brazilian Cerrado. *Global Change Biol.* 10: 877-885.
- Sakuratani, T., K. Watanabe, T. Yamamoto, T. Yamadac, E. Nawata, C. Noichana, A. Sributta, and H. Higuchi. 2004. Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. *Agric. Water Manage.* 67: 133-143.
- Scanlon, M. T., and J. D. Albertson. 2004. Canopy scale measurements of CO₂ and water vapor exchange along a precipitation gradient in southern Africa. *Global Change Biol.* 10: 329-341.
- Schimmel, D. S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biol.* 1(1):77-91.
- Suyker, A. E., and S. B. Verma. 2001. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. *Global Change Biol.* 7: 279-289.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quart J. R. Met. Soc.* 106: 85-100.
- Wilson, K., A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, A. Grelle, A. Ibrom., B. E. Law, A. Kowalski, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monson, W. Oechel, J. Tenhunen, R. Valentini, and S. Verma. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. For. Meteorol.* 113(1-4): 223-243.
- Xu, L., and D. D. Baldocchi. 2004. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a mediterranean annual grassland in California. *Agric. For. Meteorol.* 123: 79-96.