

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



**Evaluación del Intercambio Neto de Bióxido de Carbono entre la
Atmósfera y un Cultivo de Caña de Azúcar (*Saccharum
officinarum* L.), en Xicotencatl, Tamaulipas**

**Por:
Eder Emmanuel Olivar Rodríguez**

**TESIS
Presentada como requisito parcial
para obtener el título de:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Mayo de 2010**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**

**Evaluación del Intercambio Neto de Bióxido de Carbono entre la
Atmósfera y un Cultivo de Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum* L.), en
Xicotencatl, Tamaulipas**

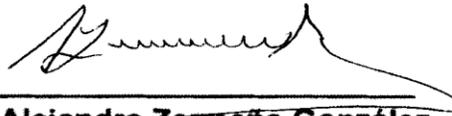
**POR:
Eder Emmanuel Olivar Rodríguez**

TESIS

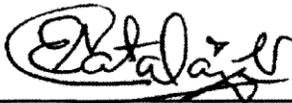
**Que somete a consideración del H. Jurado Examinador
como requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Agrónomo en Irrigación**

Aprobada

El presidente del jurado



**Dr. Alejandro Zermeno González
Asesor Principal**



**Dr. Ernesto A. Catalán Valencia
Asesor Externo**



**Dr. Miguel Ángel García Delgado
Asesor Externo**

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"
Coordinadora de la División de Ingeniería



**Dr. Raúl Rodríguez García
Coordinación de
Ingeniería**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
Mayo de 2010**

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres

Emma Estela Rodríguez Sandoval

Gerardo Olivar Villadoble

A mis hermanos

Irving Gerardo Olivar Rodríguez

Cristhian Abisay Olivar Rodríguez

Edwyn José Olivar Rodríguez

A mi Familia

Olivar Rodríguez

A todos mis abuelitos, tíos y primos

A mi novia

María Eugenia Santibáñez Flores

A mis amigos

Ing. Gerardo Sánchez M.

Iván Valdez F.

Guillermo Rodríguez P.

Uriel Villadoble D.

Sandino Villatoro M.

Gildardo Méndez L.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura.

Al departamento de Riego y Drenaje por darme la formación académica como Ingeniero Agrónomo en Irrigación.

Al Dr. Alejandro Zermeño González por su apoyo incondicional en la elaboración del trabajo de Investigación

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| DEDICATORIA | iii |
| AGRADECIMIENTOS | iv |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | vi |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | ix |
| RESUMEN | x |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA | 3 |
| 2.1 Importancia económica de la caña de azúcar | 3 |
| 2.2 Descripción botánica de la planta..... | 4 |
| 2.3 Manejo agronómico del cultivo | 6 |
| 2.4 Balance de energía sobre una superficie vegetal | 9 |
| 2.5 Tasa de asimilación de bióxido de carbono por diferentes tipos de vegetación..... | 10 |
| 2.6 Descripción del Intercambio Neto de bióxido de carbono del Ecosistema | 12 |
| 2.7 Eficiencia intrínseca del uso del agua por diferentes tipos de vegetación. | 13 |
| 2.8 Eficiencia del uso de la Radiación Fotosintéticamente Activa, por diferentes superficies vegetales..... | 14 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 17 |
| 3.1 Descripción de la localidad y sitio del estudio. | 17 |
| 3.2 Instrumentación y Mediciones | 18 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 23 |
| 4.1 Tasa instantánea del intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema | 23 |
| 4.1 Flujos integrados diurnos del intercambio neto de bióxido de carbono, evapotranspiración y radiación fotosintéticamente activa absorbida. | 32 |
| 4.3 . Eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo. | 36 |
| 4.4 . Flujos integrados bajo condiciones de cultivo en planta y soca | 41 |
| V. CONCLUSIONES | 43 |
| VI. BIBLIOGRAFIA CITADA..... | 44 |

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Torre y sensores para medir flujos de bióxido de carbono, calor latente, calor sensible, radiación neta y radiación fotosintéticamente activa sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar en Santa Anita, Xicoténcatl, Tamaulipas.20
- Figura 2. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), y valores integrados (mmol m^{-2}) observados del 18 al 19 de octubre de 2008, sobre un cultivo de caña de azúcar (en planta); valores negativos indican asimilación y positivos liberación.....24
- Figura 3. Flujos diurnos de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_abs) por un cultivo de caña de azúcar (en planta); la lamina de agua evapotranspirada (Lam_ET) y PAR_abs integrada durante el día, observados el 18 y 19 de octubre de 2008 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.24
- Figura 4. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), y valores integrados (mol m^{-2}) observados del 27 al 29 de octubre de 2008, sobre un cultivo de caña de azúcar (en planta); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2 por el ecosistema. Xicoténcatl, Tamaulipas, México.26
- Figura 5. Flujos diurnos de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_abs) por un cultivo de caña de azúcar (en planta); la lamina de agua evapotranspirada (Lam_ET) y PAR_abs integrada durante el día, observados el 27 y 28 de octubre de 2008 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.26
- Figura 6. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), y valores integrados (mmol m^{-2}) observados del 9 al 11 de octubre de 2009, sobre un cultivo de caña de azúcar (en soca); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2 por el ecosistema. Xicoténcatl, Tamaulipas, México.29

| | |
|--|----|
| Figura 7. Flujos diarios de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_abs) por un cultivo de caña de azúcar (en soca); la lamina de agua evapotranspirada (Lam_ET) y PAR_abs integrada durante el día, observados el 9 y 10 de octubre de 2009 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México. | 29 |
| Figura 8. Tasa instantanea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), y valores integardos (mmol m-2) observados del 16 al 18 de octubre de 2009, sobre un cultivo de caña de azúcar (en soca); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO2 ecosistema. Xicoténcatl, Tamaulipas, México | 31 |
| Figura 9. Flujos diarios de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_abs) por un cultivo de caña de azúcar (en soca); la lamina de agua evapotranspirada (Lam_ET) y PAR_abs integrada durante el día, observados el 16, 17 y 18 de octubre de 2009 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México..... | 31 |
| Figura 10. Relación entre la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la tasa de evapotranspiración (ET) observada sobre un cultivo de caña de azúcar durante el otoño de 2008 (caña-planta) y el otoño de 2009 (caña-soca) en Xicoténcatl, Tamaulipas, México..... | 33 |
| Figura 11. Relación entre la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la tasa de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el ecosistema (PAR_abs), observado sobre un cultivo de caña de azúcar (caña-planta y caña-soca), durante el otoño 2008-2009 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México. | 35 |
| Figura 12. Relación entre los valores integrados diarios (8:00 a 19:00 h) de la eficiencia intrínseca del uso del agua (Ef_H ₂ O) y la evapotranspiración (ET) en el mismo intervalo de tiempo, observada sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar (caña-planta y caña-soca) durante el otoño de 2008 y 2009, en Xicoténcatl, Tamaulipas, México..... | 38 |

Figura 13. Relación entre los valores integrados diurnos (8:00 a 19:00 h) de la eficiencia del uso de la radiación fotosintéticamente activa (Ef_PAR) y la PAR absorbida en el mismo intervalo de tiempo, observado sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar (caña-planta y caña-soca) durante el otoño de 2008 y 2009, en Xicoténcatl, Tamaulipas, México40

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Valores integrados (8:00 - 19:00 h) promedios diarios de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_abs), flujo de calor latente (LE), tasa de evapotranspiración (ET), intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la eficiencia promedio diaria del uso intrínseco del agua (Ef_H ₂ O) y la eficiencia del uso de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (Ef_PAR_abs) expresada en fracción molar y en porcentaje. Observados en condiciones de caña-planta y caña-soca, en Xicotécatl, Tamaulipas, México. | 42 |
|--|----|

Evaluación del Intercambio Neto de Bióxido de Carbono entre la Atmósfera y un Cultivo de Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum* L.), en Xicotencatl, Tamaulipas

Eder Emmanuel Olivares Rodríguez

RESUMEN

La caña de azúcar es una planta de tipo C4 por lo que este cultivo tiene una alta capacidad de asimilación de bióxido de carbono (CO₂). Los objetivos de este estudio fueron: Analizar la dinámica del flujo de CO₂ y los flujos de energía entre el dosel del cultivo de caña de azúcar y la atmósfera, en condiciones de caña-planta y de caña- soca, y evaluar la eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la superficie vegetal, en condiciones de caña-planta y de caña-soca. Para esto, se instaló un sistema eddy covarianza sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar, para realizar mediciones de flujo de CO₂, flujo de calor latente (evapotranspiración), y la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel del cultivo. Las mediciones se realizaron en el otoño de 2008 (caña-planta) y el otoño de 2009 (caña-soca) en la propiedad Santa Anita, Xicotencatl, Tamaulipas, México. Los resultados de la investigación mostraron que la de caña de azúcar tiene un alto potencial de asimilación de bióxido de carbono, tanto en caña-planta como en caña-soca, ya que la tasa instantánea de bióxido de carbono del ecosistema fue mayor a las observadas en bosques de diferentes especies. El intercambio neto de bióxido de carbono promedio diario del ecosistema fue mayor en condiciones de caña-planta que en condiciones de caña-soca. De igual forma, la eficiencia promedio diaria del uso intrínseco del agua y de la radiación fotosintéticamente activa fue mayor bajo condiciones de caña-planta que de caña-soca.

Palabras clave: caña de azúcar, intercambio neto de bióxido de carbono, covarianza eddy, eficiencia del uso del agua, eficiencia cuántica

I. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), proveniente del sureste asiático, pertenece a la familia de las gramíneas y del grupo de las plantas C₄. Esta entre los cultivos de mayor extensión a nivel mundial por su gran importancia económica, no solamente se utiliza en la obtención de azúcar aprovechando su elevado contenido en sacarosa, sino también en la producción de alcohol, papel, alimentación animal, etc.

Es un cultivo que se propaga vegetativamente, que asimila muy bien la radiación solar, tiene una eficiencia cercana a 2% de conversión de la energía incidente en biomasa, además es una planta que necesita abundante agua. Actualmente a nivel nacional se tiene una superficie sembrada de 812 mil hectáreas. El rendimiento promedio en 2010 fue de 64.1 t ha⁻¹. La industria del azúcar en nuestro país genera 440,000 empleos directos y 2.5 millones de empleos indirectos (UNC, 2010).

Las especies C₄ muestran altas tasas de fotosíntesis, sus valores oscilan entre 32 y 47 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; las especies C₃ tienen menores tasas de fotosíntesis y sus valores se encuentran entre 18 y 32 $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (El-Sharkawy *et al.*, 1984; El-Sharkawy y Cock, 1987). Estudios previos han reportado valores de la tasa fotosintética entre 15 y 25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en el cultivo de caña de azúcar (Saliendra *et al.*, 1996; Glaz *et al.*, 2004).

La siembra del cultivo de caña de azúcar se realiza con esquejes, debido a que la planta es de propagación vegetativa, a esta condición se le denomina caña-planta que comprende de la siembra al primer corte. Cuando el siguiente ciclo de producción se realiza con el rebrote de las mismas plantas se le denomina caña-soca. La capacidad de asimilación de bióxido de carbono y la eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo puede cambiar cuando el sistema de producción cambia de caña-planta a caña-soca. Por lo que se establecieron los siguientes objetivos:

Objetivos de la investigación:

Analizar la dinámica del flujo de CO₂ y los flujos de energía entre el dosel del cultivo de caña de azúcar y la atmósfera, en condiciones de caña-planta y de caña-soca.

Evaluar la eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la superficie vegetal, en condiciones de caña-planta y de caña-soca.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia económica de la caña de azúcar

El cultivo de la caña de azúcar es uno de los cultivos más antiguos del mundo. Estudios realizados señalan que hace más de 5 mil años ya se cultivaba. Este cultivo llegó a España procedente del lejano oriente en el siglo IX. Posteriormente este país la llevó a América en el siglo XV.

La distribución mundial de este cultivo está comprendida entre los trópicos de cáncer y capricornio, definiéndose estas zonas como propicias para el desarrollo de la caña de azúcar. Su uso principal es para la producción de azúcar. Los principales productores en el mundo son Brasil con 30%, la India con 21% y China con 7%. México es el sexto productor con aproximadamente cinco millones de toneladas que representan poco más del 3% de la producción mundial (SAGARPA, 2010).

La caña de azúcar es un cultivo ampliamente difundido en México. Representa una de las actividades económicas de mayor importancia nacional, está considerado entre los cinco productos básicos alimentarios junto con los cultivos de maíz, frijol, trigo y café.

Existen más de 15 regiones cañeras distribuidas en la costa del pacífico, área central, golfo de México y área caribeña en la península de Yucatán.

Actualmente en nuestro país operan 54 ingenios azucareros. Los principales estados productores y número de ingenios azucareros en ellos son: Veracruz (19), Jalisco (6), San Luis Potosí (4), Oaxaca (3), Michoacán (3), Tabasco (3), Sinaloa (3), Chiapas (2), Nayarit (2), Puebla (2), Tamaulipas (2), Morelos (2), Quintana Roo (1), Colima (1), Campeche (1), (UNC, 2010).

El principal estado productor en nuestro país en el año 2009, fue Veracruz con un volumen de producción de 17.4 millones de toneladas, representa el (35%) de la producción nacional, Jalisco es el segundo productor con 5.7 millones de toneladas, que representa el (11.6%), estos dos estados en conjunto aportan el 46.6% de la producción total nacional (23.1 millones de toneladas), San Luis Potosí ocupa el tercer lugar en producción con un volumen de 3.8 millones de toneladas, representa el (7.7%), seguido de Oaxaca con 3.7 millones (7.5%), en quinto lugar está Tamaulipas con volumen de producción 3.6 millones de toneladas (7.4%), todos estos estados, en conjunto aportan el 69.1% de la producción nacional (SIAP, 2010).

2.2 Descripción botánica de la planta

Raíz

El sistema radicular de la caña funciona como anclaje para la planta y absorción del agua y los nutrientes minerales del suelo. Son de forma cilíndrica y

está constituida por la cofia, el punto de desarrollo, la región de elongación y la región de pelos radiculares.

Tallo

La caña de azúcar se desarrolla en forma de matas, procedentes del tallo, sus hábitos de desarrollo son diferentes, pero en general producen tallos de 2 a 3 metros de longitud, los tallos también sirven como tejidos de transporte de agua y nutrientes extraídos del suelo para abastecer la punta que está en crecimiento. El tallo está compuesto por: la epidermis o corteza; los tejidos y las fibras que se extienden en toda la longitud del tallo, poseen aproximadamente un 75% del agua.

El tallo de la caña de azúcar se considera como fruto agrícola, ya que de él se distribuye y almacena azúcar. Se va acumulando entre los entrenudos inferiores disminuyendo su concentración a medida que asciende hacia la parte superior del tallo.

Hoja

Las hojas de la caña de azúcar son la fábrica, donde las materias primas son: agua, bióxido de carbono y los nutrientes se convierten en carbohidratos bajo la acción de la luz del sol. Las hojas son laminas largas, delgadas y planas que miden generalmente entre 0.90 a 1.5 metros de largo y varían de 1 a 10 cm de ancho, según la variedad.

Inflorescencia

Es una panícula formada por pequeñas flores perfectas y sedosas llamadas espigas. La floración es un proceso natural que ocurre cuando las plantas han cumplido su ciclo vegetativo para iniciar el periodo reproductivo.

Nudo

Es la porción dura y más fibrosa del tallo, este sirve para separar dos entrenudos vecinos. El nudo está formado por el anillo de crecimiento, la banda de raíces, la cicatriz foliar, el nudo propiamente dicho, la yema y el anillo ceroso.

Entrenudo

Es la porción del tallo localizado entre dos nudos. En la parte apical del tallo, los entrenudos miden unos pocos milímetros y en ellos ocurre la división celular, que a su vez, determina la elongación y longitud final.

2.3 Manejo agronómico del cultivo

Siembra

En nuestro país la siembra se realiza entre los meses de noviembre a enero. El material de siembra debe ser de preferencia de unos 6 a 9 meses, se recomienda utilizar la parte media del tallo, se deben utilizar preferentemente esquejes (trozos de caña inmaduros) con 3 yemas.

Fertilización

La planta de caña requiere altos requerimientos nutricionales, en consideración a su elevada capacidad de extracción y remoción de nutrientes del suelo y a su alta producción de materia seca y verde. Necesita de nutrimentos que obtiene del suelo, agua, atmósfera que obtiene de manera natural, otros se complementan por medio de aplicaciones de fertilizantes vía foliar, al suelo o en el agua de riego. Estos nutrimentos son indispensables para el desarrollo de la caña y se clasifican en función de la cantidad en que son requeridos. Se tienen los macronutrimentos que son los elementos que la planta consume en mayor cantidad, y los micronutrimentos que son los que utiliza en cantidades pequeñas, pero también son importantes para un buen desarrollo de la planta. Los macronutrimentos son: carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno, fosforo, potasio, calcio, magnesio, y azufre. Los micronutrimentos son: zinc, manganeso, fierro, boro, cobre, cloro y molibdeno.

Riego

El agua es vital en la agricultura. La caña de azúcar es un cultivo con relativamente alta eficiencia del uso consuntivo del agua. Sus rendimientos de campo y azúcar son más altos donde se le da atención a las necesidades del agua. El consumo total del agua de la caña de azúcar en los diferentes países varia en forma amplia, debido a las diferencias en los ciclos del cultivo. Por lo general, su consumo oscila entre 1200 y 1500 mm por año del cultivo. Su evapotranspiración (ET) puede ser de hasta 6 mm d^{-1} (Watanabe *et al.* 2004).

Otros estudios realizados por Yoshikazu *et al.* (2005), obtuvieron tasas de ET de 6.4 mm d⁻¹ durante junio, y 3.5 mm d⁻¹ durante octubre.

Control Fitosanitario

Las enfermedades pueden ser fungosas o bacterianas, las cuales se combaten sembrando variedades resistentes a las mismas. La caña de azúcar es atacada por un gran número de plagas, que le pueden causar daños considerables. En este tipo se emplean varios tipos de control y eliminación de plagas: el control biológico, en el cual se emplean enemigos naturales de las plagas, el control cultural, consiste en la quema de residuos y eliminación de hierbas hospederas, y el control químico, mediante la aplicación de sustancias químicas (insecticidas, fungicidas, bactericidas, nematocidas, acaricidas), aplicados con bomba manual de espalda o con equipo de fumigación de alta presión incorporada a una motobomba, este equipo puede ser accionado por tractor ó vía aérea.

Cosecha

La etapa de cosecha está integrada básicamente por la quema controlada, corte, carga y transporte de la caña. El tiempo corte varía entre los 11 y 17 meses dependiendo de la variedad y la zona. La planta retoña varias veces y puede seguir siendo cosechada, estos corte consecutivos se llaman “zafras”. La planta se deteriora con el tiempo y por el uso de maquinaria que pisa las raíces, así que se debe plantar cada 7 a 10 años, aunque existen cañaverales de 25 o más años de edad. El corte de la caña de azúcar se realiza con caña quemada o sin

quemar, en forma mecánica (si la topografía del terreno lo permite) y en forma manual (machete).

2.4 Balance de energía sobre una superficie vegetal

El balance de energía (BE), puede ser definido como la manera que se distribuye la radiación neta, que es la radiación disponible para el desarrollo de los procesos que ocurren a nivel de superficie. R_n corresponde a la radiación neta, G al flujo de calor en el suelo, H al flujo de calor sensible y LE flujo de calor latente, (Di Bella *et al.*, 2000, Friedl *et al* 2002, Schirmbeck y Rivas, 2007, Villa Nova *et al.*, 2007).

El conocer el BE en los cultivos permite entender y manejar los flujos de masa y energía y su repercusión sobre el rendimiento de las plantas. Las mediciones de los componentes del BE (incluida la evapotranspiración como flujo de calor latente) se utilizan en la agricultura y en la meteorología para estudiar diversos procesos en el manejo de agua que incluye: la calibración y validación de los modelos de balance hídrico en áreas cultivadas (Moguel-Ordoñez *et al.*, 2001).

Un gran número de trabajos sobre aplicación de balance de energía a escala regional demuestran que los términos R_n y G , son sencillos de estimar (Boegh *et al.*, 2002, Kustas *et al.*, 1990). LE y H no son sencillos de estimar (Wang *et al.*, 2006).

Estudios previos en una parcela con pastura mixta en Buenos Aires, Argentina, presentaron que del total de la radiación neta, la mayor parte se pierde por transferencia de calor latente (95%) y una mínima proporción, por flujo de calor en el suelo (3%), y por flujo de calor sensible (2%), (Schirmbeck y Rivas, 2007).

Otro estudio realizado en Piracicaba, Sao Paulo Brasil, utilizando el modelo Deardorff para estimar los componentes de balance de energía en el cultivo de la caña de azúcar, indican que la R_n alcanzo de verano a primavera, de 500 Wm^{-2} a 700 Wm^{-2} , el flujo de calor latente presento durante las primeras semanas del verano máximos valores de 490 Wm^{-2} , visto que a mediados de otoño estos pueden alcanzar solamente 150 Wm^{-2} , (Rolim *et al.*, 2008).

En una parcela de 20 ha ubicada en Toulouse, Francia, la vegetación del sitio estuvo representada por más de cuarenta especies, en condiciones naturales, presentaron relaciones mensuales de R_n/H (23.31%), R_n/LE (70.41%) y R_n/G (5.12%), (González-Sosa, 2000).

2.5 Tasa de asimilación de bióxido de carbono por diferentes tipos de vegetación

Steduto y Hsiao, (1998) utilizando las técnicas de Bowen-ratio/energy balance/ CO_2 gradient (BREB+), encontraron flujos en el cultivo de maíz de $30\text{-}35 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, los valores fueron más altos en la mañana que en la tarde, para la misma densidad de flujo de fotones fotosintéticos.

Kellomäki, y Wang (2000), realizaron un estudio en un bosque boreal de pino (*Pinus sylvestris*) en el este de Finlandia, a finales de la estación de crecimiento de 1998, en la que obtuvieron la tasa media de fijación de CO₂ durante el día fue de 5.76 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y la máxima de 15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y durante la noche la tasa media de liberación de CO₂ fue de 2.2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y la máxima 4.8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la máxima captura de CO₂ fue de 7.3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en los inicios de la mañana y 3.6 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ liberados durante la noche.

La tasa de fotosíntesis de la caña puede ser muy variable, estudios realizados por CENICAÑA (1993) midieron tasas de asimilación de bióxido de carbono mayores de 25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Irvine (1967), en diferentes variedades de caña obtuvo tasas de asimilación neta mayor de 15 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Asseng y Hsiao. (2000). En el cultivo de alfalfa se presentaron valores alrededor del medio día en días soleados que alcanzaron 39 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y en días nublados relativamente frescos que alcanzaron 55 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

En una investigación que se realizó para estudiar las relaciones de agua y la fotosíntesis en dos variedades de hojas de caña de azúcar. Una sensible a la sequía (BL-4) y otra tolerante ha ella (CP 43/33), en ambas presentaron similar tasa de asimilación de CO₂, en la variedad BL-4 (13.65 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y en la variedad CP 43/33 (13.51 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), Basra *et al.*, (1999).

2.6 Descripción del Intercambio Neto de bióxido de carbono del Ecosistema

El intercambio neto de bióxido de carbono de un determinado ecosistema (suelo-vegetación) se define como la tasa neta de intercambio de CO₂ entre el ecosistema vegetal y la atmosfera (Martens *et al.*, 2004):

El intercambio neto de CO₂ entre el ecosistema y la atmósfera, (NEE), depende de la actividad fotosintética que fija el CO₂ atmosférico y de la respiración que libera CO₂ a la atmosfera. La respiración total del ecosistema se compone de la respiración de la cobertura foliar, del tejido leñoso y de las raíces de los árboles (respiración autotrófica del suelo) así como de la respiración de los microorganismos del suelo (respiración heterotrófica del suelo) (Janssens *et al.*, 2001).

Lai *et al* (2003) observaron en una pradera de pastizales mixtos (C₃ y C₄) en Manhattan, Kansas el patrón de comportamiento diurnos para NEE durante el periodo de lluvias y de sequia, en el cual observaron una mayor absorción al mediodía durante el periodo de lluvias (9 μmol m⁻² s⁻¹), el cual fue tres veces mayor que en el periodo de sequía a la misma hora del día. Así mismo Li *et al* (2005) en un pastizal de pastoreo en la estepa central de Mongolia encontró valores máximos instantáneos de asimilación de NEE hasta de 3.6 μmol m⁻² s⁻¹, para las máximas horas diurnas, y valores instantáneos de liberación de hasta 1.2 μmol m⁻² s⁻¹ en las máximas horas nocturnas.

2.7 Eficiencia intrínseca del uso del agua por diferentes tipos de vegetación.

Las plantas pierden agua a expensas de ganar carbón. La relación entre la fotosíntesis y transpiración es una medida del uso eficiente del agua. Teóricamente es una relación, que esta función de concentración interna de CO₂ en las hojas y la diferencia de presión de vapor de aire en la hoja (Jones, 1983).

Amaya, A. *et al.*, (1995). En estudios previos indican que la eficiencia intrínseca del uso del agua de las hojas de la planta de caña de azúcar son de 3.5 a 4.0 $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol H}_2\text{O}^{-1}$. El-Sharkawy *et al.*, (1984) encontraron en frijol (C₃) valores de 3.9 $\text{mmol CO}_2 \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$, en yuca, valores de 5.1 $\text{mmol CO}_2 \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$ y en sorgo (C₄), 7.1 $\text{mmol CO}_2 \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$.

López *et al.*,(2001) mencionan que al realizar un estudio en Chinchiná, Colombia en especies que sirven como sombra en cafetales, observaron que Bertol (*T. rosea*) fue la especie que presento la mayor incorporación neta de CO₂ por unidad de agua transpirada (5.2 $\text{mmolCO}_2 \text{molH}_2\text{O}^{-1}$) seguida de Meliaceae (*C. odorota*), capa prieto ó laurel (*C. alliodora*), Taruma o Pechiche (*V. cymosa*) y Catarina Cherry (*P. integrifolia*) con valores de 5.1, 4.0, 4.3, y 3.5 $\text{mmolCO}_2 \text{molH}_2\text{O}^{-1}$ respectivamente. Al estimar la cantidad de H₂O requerida para producir 1g de biomasa se encontró que *T. rosea* consumo menos agua (117.7g) seguida de *C. odorota*, *C. alliodora*, *V. cymosa* Y *P. integrifolia* con gastos de 119.3, 138.3, 144.3, y 177.8 g de agua respectivamente. Desde el punto de vista de captura de

carbono, *C. odorata* y *C. alliodora* fueron las que mayor tasa de asimilación de CO₂ presentaron.

Hastings *et al.* (2005) mencionan que realizaron un estudio en Baja California sur, México, durante tres años, en especies comunes de arbustos de desierto de esta región, en la que reportan valores máximos de eficiencia del uso del agua de 3.45 mmolCO₂ molH₂O⁻¹ para el año 2001, 2.25 mmolCO₂ molH₂O⁻¹ en el año 2002 y 2.64 molCO₂ molH₂O⁻¹ en el año 2003, se hace mención que los valores obtenidos en la eficiencia del uso del agua se debió a que en esos años hubo mayor precipitación.

2.8 Eficiencia del uso de la Radiación Fotosintéticamente Activa, por diferentes superficies vegetales

Las plantas para realizar la fotosíntesis utilizan solo la radiación de 0.400 a 0.700 μm, esta longitud de onda está definida como radiación fotosintéticamente activa (PAR), y corresponde aproximadamente a 48 % de la radiación solar total incidente (Nobel, 1991; Jones, 1992). El resto de la radiación solar absorbida por las hojas induce efectos térmicos, afectando la temperatura foliar y la tasa de transpiración (Gallo y Daughtry, 1986).

La correcta medición de la PAR es la base para el estudio de fenómenos biológicos y ecológicos que ocurren en el entorno natural. La distribución de la radiación fotosintéticamente activa en las plantas tiene un efecto sustancial en su

crecimiento y desarrollo debido a su influencia en los procesos de biosíntesis, intercambio gaseoso y transpiración (Torrecillas *et al.*, 1999).

La eficiencia del uso de la radiación fotosintéticamente activa se puede definir como la relación de cambio entre los flujos de bióxido de carbono y la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el ecosistema (PAR_abs).

Se puede definir la eficiencia del uso de la PAR de diferentes formas, ya que también se puede expresar en gramos de materia seca por Mega Joule de PAR absorbida por el cultivo, en fracción o como porcentaje, DeLucia *et al* (2002) define el uso eficiente de la radiación fotosintéticamente activa como la tasa de acumulación de biomasa por unidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida.

Muchow y Sinclair (1994). Estudios realizados en la eficiencia del uso de la radiación en cultivos de maíz y sorgo, se obtuvieron valores más altos en el maíz que en el sorgo con 1.7 g MJ^{-1} y 1.3 g MJ^{-1} respectivamente.

Betancourt *et al.*, 2005. En San Miguel Tlaixpan, Estado de México, los resultados obtenidos en esta investigación fueron que el pasto *rhodes* fue eficiente en el uso de la radiación al producir $1.77 \text{ g MS MJ}^{-1}$, y la alfalfa presento menor eficiencia del uso de la radiación que el pasto *rodhes*, con un valor de $1.17 \text{ g MS MJ}^{-1}$. Estos resultados coinciden con los reportados Sinclair y Muchow (1999), quienes indicaron que las gramíneas son más eficientes en el uso de la radiación

para formar biomasa, ya que las leguminosas utilizan gran parte de la radiación interceptada para formar otros compuestos como las proteínas.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción de la localidad y sitio del estudio.

El estudio se realizó en la propiedad Santa Anita, municipio de Xicotécatl, Tamaulipas. Las coordenadas geográficas del sitio son: 22° 56' 23" latitud N, 99°00'33" longitud O. La elevación de la localidad es de 67 msnm. El clima de la región es semicálido con lluvias en verano. La precipitación media anual oscila entre 500 y 800 mm. la temperatura media anual fluctúa entre 22 °C y 26 °C, predominando los vientos del sur y sureste. Siendo frecuentes los frentes fríos del norte en otoño e invierno.

La siembra se realizó del 2 al 4 de octubre de 2007 utilizando la variedad CP 722086. En total se dieron 10 riegos por año de una lámina de aproximadamente 15 cm por riego. La fertilización consistió en 500 Kg/ha de la formulación 22-11-55 al momento de la siembra, y 500 kg/ha de la dosis 20.5-00-00 (sulfato de amonio) a 60 días después de la siembra.

Durante el 2009 (soca), se aplicó una lámina total de agua de 154.69 cm (febrero a octubre), con una lámina promedio mensual de 16.85 cm. La fertilización consistió en tres aplicaciones de 300 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio, aplicadas el 10 de marzo, 30 de abril y 10 de julio.

Las mediciones se realizaron en una sección de 200 m (dirección este-oeste) por 400 m (dirección norte-sur), del 3 de octubre al 22 de noviembre de 2008 (en caña-planta), y del 9 al 22 de octubre de 2009 (en caña-soca).

3.2 Instrumentación y Mediciones

El flujo de bióxido de carbono (FCO_2), flujo de calor latente (LE) y flujo de calor sensible (H) entre el dosel de la vegetación y la atmósfera se obtuvieron con el método de la covarianza eddy, utilizando las siguientes ecuaciones (Ham y Heilman, 2003):

$$LE = L \overline{w' \rho_{wv}'} \quad (1)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w' Ts'} - 0.51 Ta \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (2)$$

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

Donde: ρ_a y C_p son la densidad y capacidad calorífica del aire respectivamente, L es el calor de vaporización del agua, Ta es la temperatura del aire. Los productos $w' \rho_{CO_2}'$, $w' \rho_{wv}'$, $w' Ts'$ 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 (Ts) respectivamente. La barra horizontal representa el valor medio del producto de las desviaciones en un determinado segmento de tiempo (30 min).

También se obtuvo el balance de energía sobre la superficie vegetal, con la siguiente relación:

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

Donde: R_n es la radiación neta, H y LE definidos anteriormente y G es el flujo de calor en la superficie del suelo.

La velocidad vertical del viento y la temperatura sónica se midieron con un anemómetro sónico tridimensional (CSI-CSAT3, Campbell, Sci, Inc), mientras que ρ_{wv} y ρ_{CO_2} con un analizador de bióxido de carbono y vapor de agua de sendero abierto (open path CO_2/H_2O analyzer, LI-7500; LI-COR).

Ambos sensores se montaron en una torre de 5 m de alto (2 m sobre el dosel de la vegetación) (Figura 1). La torre se instaló a 200 m hacia el sur y 100 m hacia el oeste del extremo noreste del área de estudio. El anemómetro sónico tridimensional se orientó hacia el norte, para lograr un fetch (distancia horizontal desde la ubicación de los sensores al límite del área de estudio) de por lo menos 200 m, en la dirección norte-sur y 100 m en la dirección este-oeste respecto a la orientación del anemómetro sónico tridimensional (vientos dominantes del norte en esta localidad, 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.

El flujo de calor latente (LE) y el de bióxido de carbono (FCO_2) se corrigieron por efectos de densidad (Webb *et al.*, 1980). Posteriormente, 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 CO_2 se corrigió con el mismo factor (Ham y Heilman, 2003). La temperatura del aire se midió (misma altura de las mediciones de T_s) con un sensor de

temperatura y humedad relativa (HP45C, Vaisala, Inc), a una frecuencia de 1 s y promedios de 30 min.



Figura 1. Torre y sensores para medir flujos de bióxido de carbono, calor latente, calor sensible, radiación neta y radiación fotosintéticamente activa sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar en Santa Anita, Xicoténcatl, Tamaulipas.

La radiación neta se midió con un radiómetro neto (LITE, Keep and Zonen), que se colocó en la torre a una altura de 2 m sobre el dosel del cultivo. El flujo de calor en la superficie del suelo se midió usando dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific, Inc.) que se colocaron a una profundidad de 0.08 m bajo la superficie del suelo, uno al punto medio entre dos hileras y el otro a la distancia media entre dos plantas. A cada valor de G medido a 0.08 m, se le sumó el cambio de energía del estrato de suelo sobre el transductor por cambios

de temperatura del perfil de suelo sobre el sensor. La temperatura del suelo se midió con un termopar (chromel-constantan) de cuatro puntas (Kanemasu *et al.*, 1992; Kustas *et al.*, 2000). Estas mediciones se realizaron a una frecuencia de un segundo y se generaron promedios de 30 min.

El intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), formado por el suelo y la vegetación se obtuvo con la siguiente relación (Martens *et al.*, 2004):

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

Donde: FCO_2 , es el flujo de bióxido de carbono medido con el método de la covarianza eddy (negativo hacia la superficie vegetal), $\Delta\rho_{CO_2}$ es el cambio en la densidad del CO_2 medido a la misma altura a la que se midió el flujo de CO_2 , Δt es el intervalo de tiempo (30 min) y Δz es la altura a la que se realizaron las mediciones (5 m). La retención de CO_2 por el ecosistema se estimó 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 incidente y la radiación PAR reflejada. Que se midieron con dos sensores quantum colocados a 2 m sobre el dosel, una orientado hacia el cenit y el otro hacia el dosel de la vegetación. Las mediciones se realizaron a una frecuencia de 1 s y promedios de 30 min.

La eficiencia intrínseca del uso del agua (Ef_{H_2O}) y de la PAR_{abs} ($Ef_{PAR_{abs}}$) por el ecosistema, se obtuvieron con las siguientes relaciones:

$$Ef_{H_2O} = \frac{NEE_Int}{ET_Int} \quad (6)$$

$$Ef_{PAR_abs} = \frac{NEE_Int}{PAR_abs_Int} \quad (7)$$

Donde: NEE_Int, PAR_abs_Int y ET_int, se obtuvieron integrando los valores instantáneos diurnos (8:00 a 19:00 h) de NEE, PAR_abs y ET. La evapotranspiración en unidades molares (ET) en el segmento de tiempo mencionado, se obtuvo dividiendo el flujo de calor latente integrado (LE_int) por el calor de vaporización del agua ($L=2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$) y transformando kg a moles de agua.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Tasa instantánea del intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema

Del 18 al 19 de octubre de 2008 (caña-planta) la máxima tasa instantánea diurna de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) fue de hasta $-28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y se observó entre las 11:00 y 16:00 h. Durante la noche, la máxima tasa instantánea de NEE fue de hasta $6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 2). La máxima tasa diurna de NEE indica la capacidad de asimilación de CO_2 del ecosistema vegetal, ya que fue hasta tres veces mayor ($9.74 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) que la tasa máxima diurna (11:00 a 12:00 h) de una pradera alpina en la meseta Tibetana de China, (Lingling *et al.*, 2006). También fue 2.7 veces mayor ($10.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) que el valor reportado por Litvak, *et al.* (2003) en un bosque boreal canadiense de 36 años de edad.

Del 18 de octubre a las 8:00 h al 19 de octubre a las 8:30 h, la asimilación integrada diurna de CO_2 fue 6.5 veces mayor que la liberación nocturna integrada (Figura 2). Se observó que el decremento en la tasa instantánea de NEE observado en la (Figura 2) ocurrió a la misma hora del día donde se presentó un decremento en la tasa de absorción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR_abs) y en el flujo de calor latente (Figura 3). Demostrando la sensibilidad del NEE a los cambios en la PAR absorbida y el flujo de calor latente, principalmente a las 13:30 h donde este efecto fue más marcado.

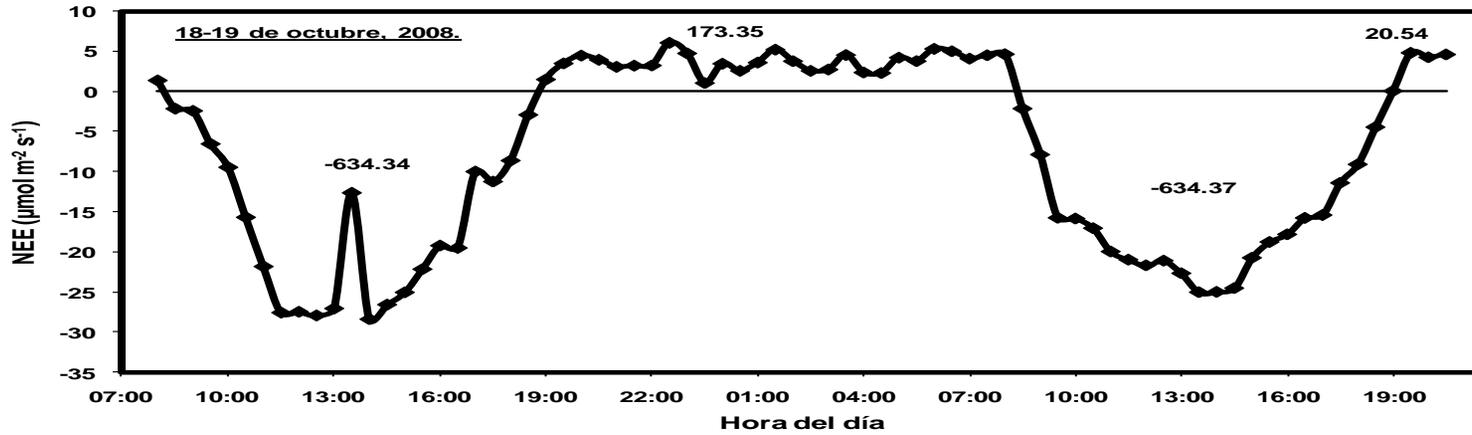


Figura 2. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), y valores integrados (mmol m^{-2}) observados del 18 al 19 de octubre de 2008, sobre un cultivo de caña de azúcar (en planta); valores negativos indican asimilación y positivos liberación.

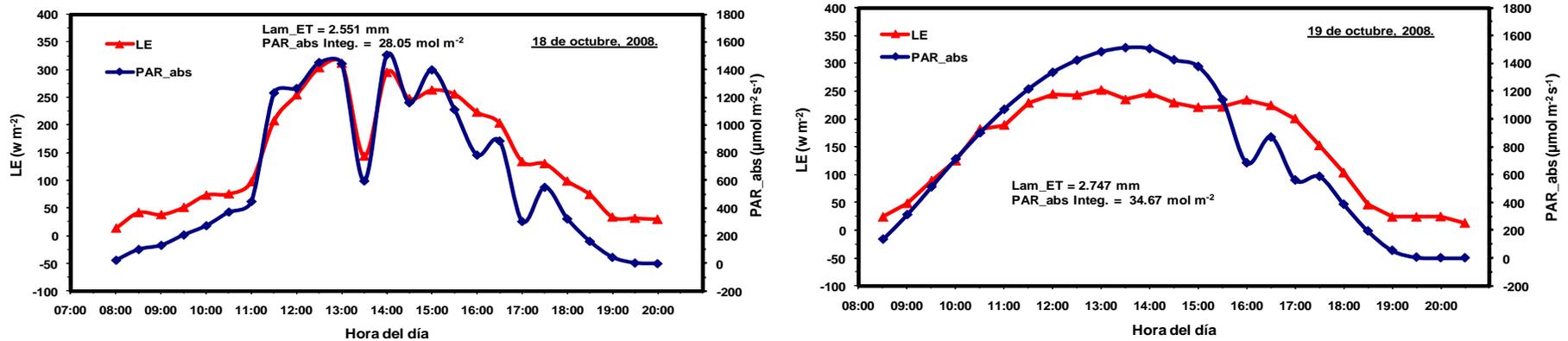


Figura 3. Flujos diarios de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_abs) por un cultivo de caña de azúcar (en planta); la lámina de agua evapotranspirada (Lam_ET) y PAR_abs integrada durante el día, observados el 18 y 19 de octubre de 2008 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

Del 27 al 29 de octubre de 2008 (caña-planta) la máxima tasa instantánea diaria de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) fue de hasta $-27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, y se observó entre las 11:00 y 16:00 h. Durante la noche, la máxima tasa instantánea de NEE fue de hasta $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 4).

Del 27 de octubre a las 8:00 h al 29 de octubre a las 7:30 h, la asimilación integrada diaria de CO_2 fue 3.96 veces mayor que la liberación nocturna integrada, indicando nuevamente el poder de asimilación de CO_2 que tiene este ecosistema vegetal (Figura 4). El decremento en la tasa instantánea de NEE observado el 27 y 28 de octubre (Figura 4) ocurrió a la misma hora del día donde se presentó un decremento en la tasa de absorción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR_abs) y en el flujo de calor latente (Figura 5). Esto nuevamente mostró la sensibilidad del NEE a los cambios en la PAR absorbida y el flujo de calor latente. Santos *et al* (2004) también observaron que los cambios en la tasa de NEE coinciden con los cambios en la PAR_abs y en el flujo de calor latente (LE) en un pastizal de *Brachiara brizantha* en la región de Cerrado, Brasil, indicando que los cambios fueron más marcados en la temporada de sequía que en la temporada de lluvia, demostrando que los flujos están estrechamente relacionados.

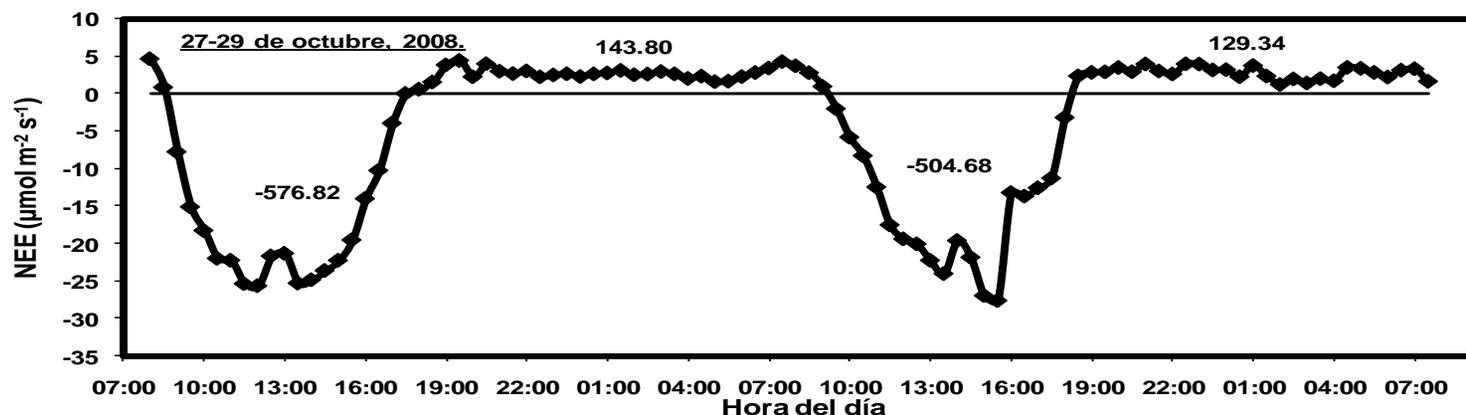


Figura 4. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), y valores integrados (mol m^{-2}) observados del 27 al 29 de octubre de 2008, sobre un cultivo de caña de azúcar (en planta); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2 por el ecosistema. Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

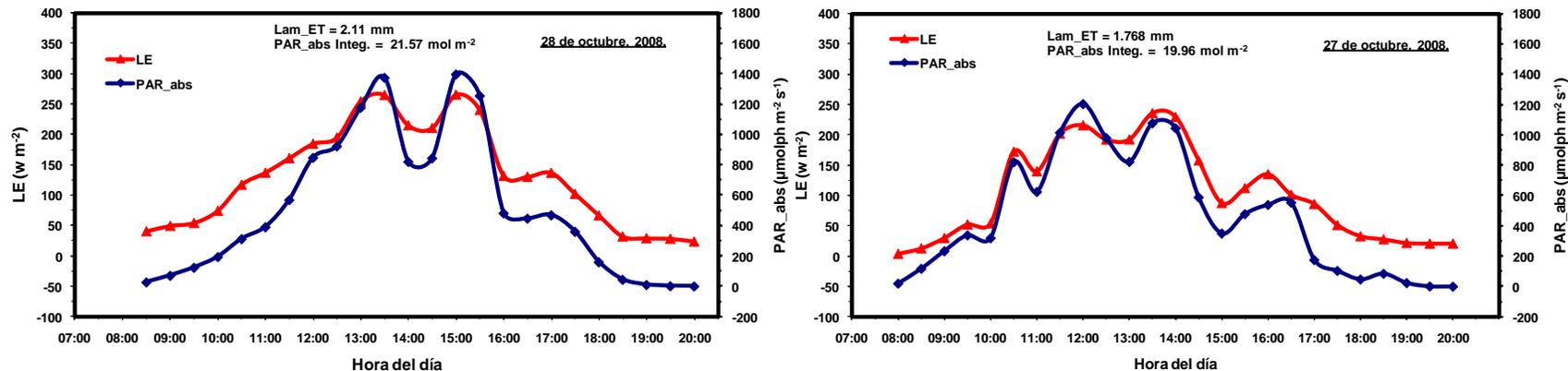


Figura 5. Flujos diarios de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_{abs}) por un cultivo de caña de azúcar (en planta); la lámina de agua evapotranspirada (Lam_{ET}) y PAR_{abs} integrada durante el día, observados el 27 y 28 de octubre de 2008 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

Del 9 al 11 de octubre de 2009 (caña-soca) la máxima tasa instantánea diaria de NEE fue muy similar a la observada en caña-planta ($-28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), y también se presentó entre las 11:00 y las 16:00 h. Durante la noche, la máxima tasa instantánea de NEE fue de hasta $9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 6). La máxima tasa diaria de NEE indicó el potencial de asimilación de CO_2 que tiene este ecosistema vegetal, ya que fue mayor a la tasa de NEE observada en un bosque de ciprés Siberiano, donde se observó una tasa máxima instantánea de NEE de $18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Dolman *et al.*, 2004), y que la observada en Mongu, Zambia por la especie *Brachystegia spiciformis*, donde el valor instantáneo máximo reportado (época de lluvias) fue de $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Scanlon y Albertson, 2004). Sin embargo, fue menor a la observada en un pastizal de *Brachiara brizantha* en la región del Cerrado en Brasil ($40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) durante el mediodía en la época de lluvias (Santos, *et al.*, 2004).

Los pequeños decrementos en la tasa instantánea de NEE observado el 9 y 11 de octubre de 2009 (Figura 6) ocurrieron a las mismas horas del día donde se presentó un decremento en la tasa de absorción de la radiación fotosintéticamente activa y en el flujo de calor latente (Figura 7). Esto nuevamente mostró la sensibilidad del NEE a los cambios en la PAR absorbida y el flujo de calor latente, principalmente el día 10 de octubre donde el NEE fue muy pequeño debido a una muy baja disponibilidad de radiación fotosintéticamente activa, que también estuvo relacionada con una tasa pequeña de flujo de calor latente (Figuras 7). Goulden *et al* (1996) observaron una relación directa del incremento instantáneo de la radiación neta con los incrementos en

la asimilación de bióxido de carbono y el flujo de calor sensible en un bosque de caducifolios del Noreste de Estados Unidos.

Del 9 de octubre a las 8:00 h al 11 de octubre a las 7:30 h, la asimilación diurna de CO₂ fue 2 veces mayor que la liberación nocturna. Este valor fue menor que el observado el ciclo de producción caña planta (Figura 3 y 5) debido a que se presentó un día con muy baja incidencia de radiación (por nubosidad) que resultó en un valor muy pequeño del NEE diurno (Figura 6)

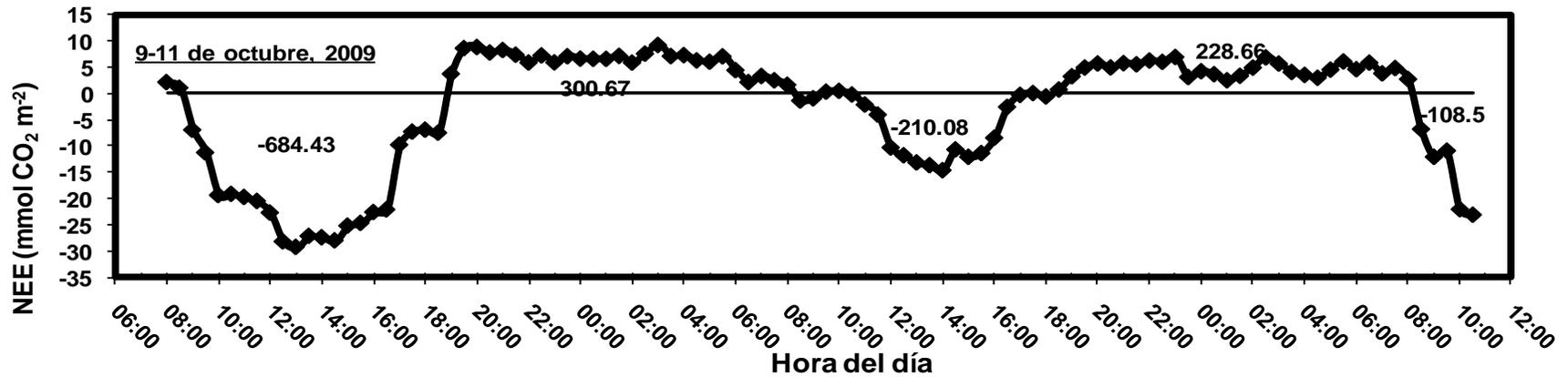


Figura 6. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), y valores integrados (mmol m^{-2}) observados del 9 al 11 de octubre de 2009, sobre un cultivo de caña de azúcar (en soca); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2 por el ecosistema. Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

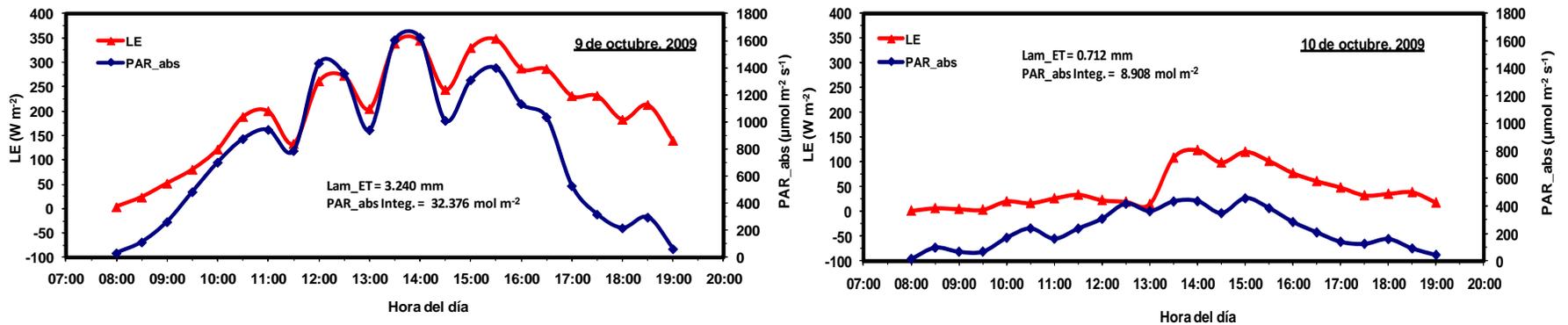


Figura 7. Flujos diurnos de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_abs) por un cultivo de caña de azúcar (en soca); la lamina de agua evapotranspirada (Lam_ET) y PAR_abs integrada durante el día, observados el 9 y 10 de octubre de 2009 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

Del 16 al 18 de octubre de 2009 (caña-soca) la máxima tasa instantánea diaria de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) fue de hasta $-30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, y se observó entre las 11:00 y 16:00 h. Durante la noche, la máxima tasa instantánea de NEE fue de hasta $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 8).

Del 16 de octubre a las 00:00 h al 18 de octubre a las 22:00 h, la asimilación integrada diaria de CO_2 fue 1.5 veces mayor que la liberación nocturna integrada (Figura 8). Se observó que el decremento en la tasa instantánea de NEE observado el 16 y 18 de octubre (Figura 8) ocurrió a la misma hora del día donde se presentó un decremento en la tasa de absorción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR_abs) y en el flujo de calor latente (figura 9). Nótese que el 17 de octubre corresponde al día con el valor menor del NEE integrado diario ($-126.43 \text{ mmol m}^{-2}$), y corresponde con el menor valor de la PAR absorbida y del flujo de calor latente (LE).

Tanto en caña-planta como en caña-soca, los valores máximos de la tasa instantánea de NEE se observaron entre las 11:00 y las 16:00 h. Además los picos instantáneos diarios de mayor y menor asimilación de bióxido de carbono se observaron a las mismas horas del día en que ocurrieron las fluctuaciones de la PAR absorbida y el flujo de calor latente.

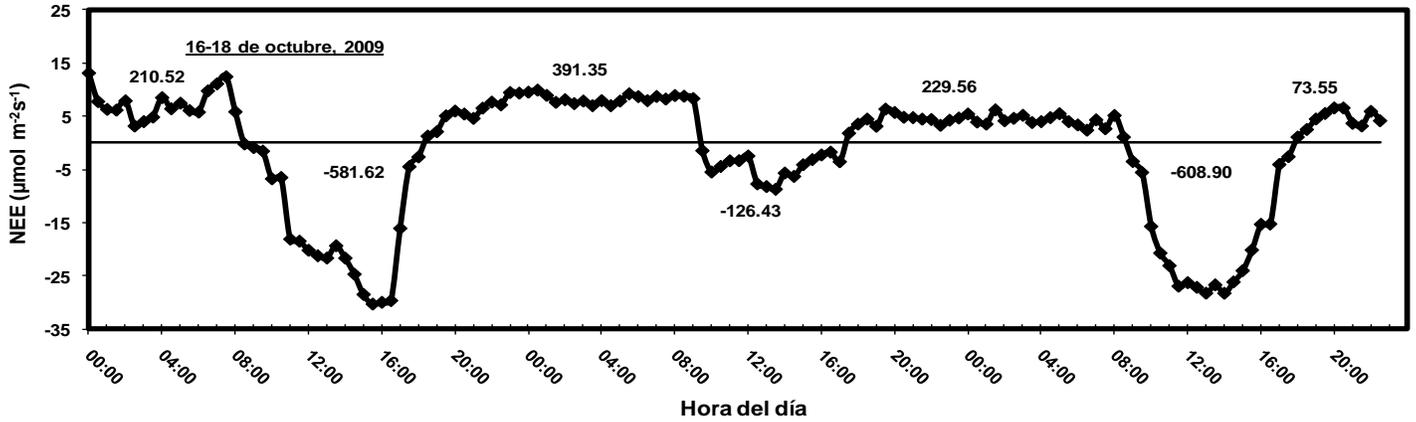


Figura 8. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), y valores integrados (mmol m^{-2}) observados del 16 al 18 de octubre de 2009, sobre un cultivo de caña de azúcar (en soca); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2 ecosistema. Xicotencatl, Tamaulipas, México

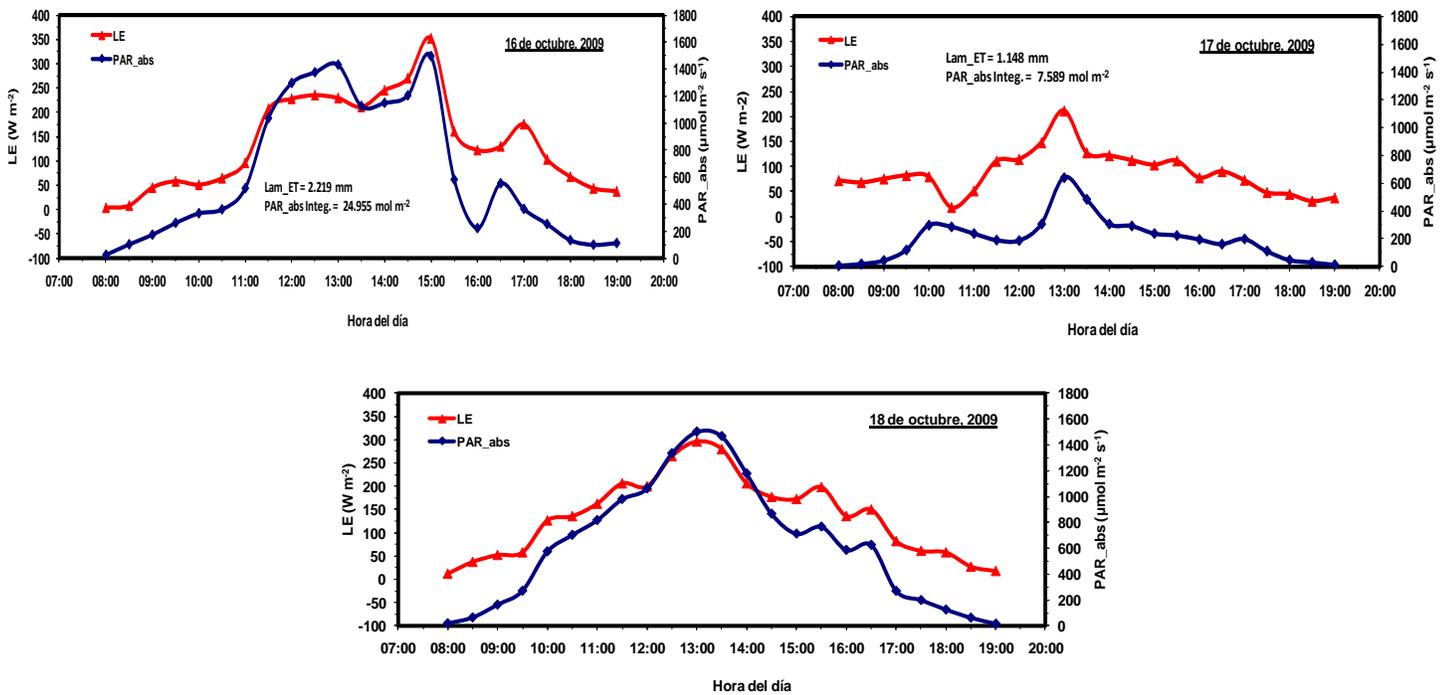


Figura 9. Flujos diarios de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_{abs}) por un cultivo de caña de azúcar (en soca); la lamina de agua evapotranspirada (Lam_{ET}) y PAR_{abs} integrada durante el día, observados el 16, 17 y 18 de octubre de 2009 en Xicotencatl, Tamaulipas, México.

4.1 Flujos integrados diurnos del intercambio neto de bióxido de carbono, evapotranspiración y radiación fotosintéticamente activa absorbida.

La relación entre los valores diurnos integrados (8:00 - 19:00 h) del intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la evapotranspiración (ET) diurna en el mismo intervalo de tiempo, tanto en caña-planta como en caña-soca fue cuadrática (Figuras 10). Esto indicó que a partir de un determinado valor de evapotranspiración, incrementos adicionales no aumentan la tasa de asimilación de bióxido de carbono del ecosistema. Esto probablemente se debió a que una mayor apertura de los estomas promovió una mayor tasa de evapotranspiración, pero no una mayor tasa de asimilación de bióxido de carbono, debido a que la resistencia tanto del aire como de los estomas de las hojas al flujo de CO₂ es mayor que al flujo del vapor de agua. Otros estudios (Medrano *et al.*, 2002) realizados en un cultivo de vid mostraron que la tasa de asimilación de bióxido de carbono no se incrementa a valores mayores de conductancia estomática. De igual forma, Dolman *et al.*, (2004) reportaron que el intercambio neto de bióxido de carbono no aumenta a valores mayores de evapotranspiración en un bosque de ciprés.

Nótese que el coeficiente lineal de la relación cuadrática en condiciones de caña-planta (10.788) fue mayor que el observado en condiciones de caña-soca (8.724) (Figura 10). Esto indicó que el incremento en la asimilación de CO₂ por unidad de agua evapotranspirada fue mayor en caña-planta, sugiriendo una mayor eficiencia intrínseca del uso de agua en el ciclo de producción caña-planta que en el de caña-soca.

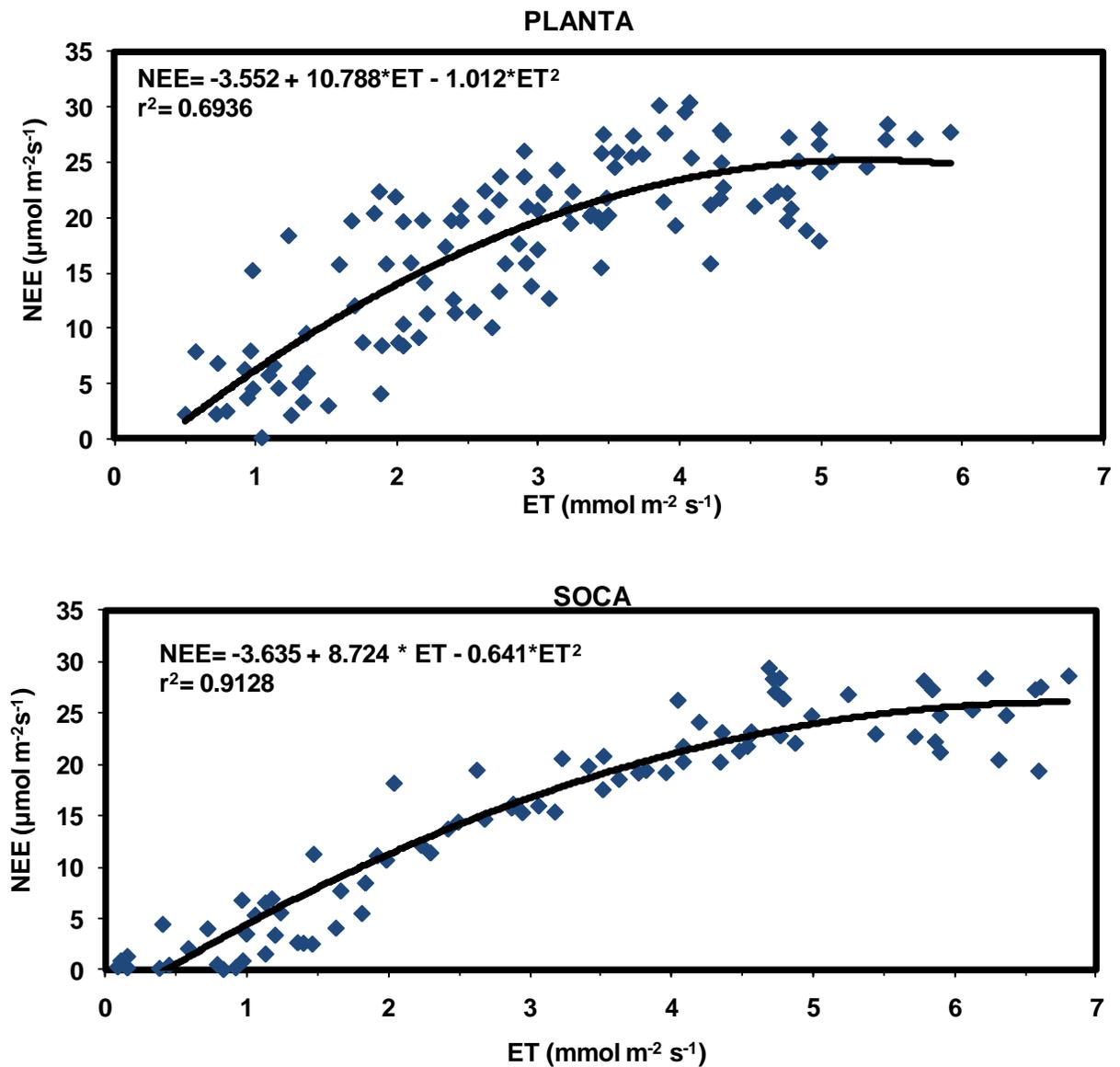


Figura 10. Relación entre la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la tasa de evapotranspiración (ET) observada sobre un cultivo de caña de azúcar durante el otoño de 2008 (caña-planta) y el otoño de 2009 (caña-soca) en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

De igual forma se observó (Figura 11) una relación cuadrática (caña-planta y caña-soca) directamente proporcional entre los valores integrados diurnos (8:00 - 19:00 h) del intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y los correspondientes de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_abs). Esto sugiere que a partir de un cierto valor de PAR_abs, incrementos adicionales de PAR_abs no se reflejan en incrementos en el NEE. Esto probablemente se debió a que las hojas del cultivo se saturan de radiación a niveles relativamente bajos, de tal forma que la absorción adicional de PAR, no se utiliza en la asimilación de bióxido de carbono. Relaciones similares fueron reportadas por Santos et al., (2004) en un pastizal de *Brachiara brizantha* en Cerrado, Brasil; Xu, y Baldocchi (2003) en un pastizal mediterráneo de California; Li et al (2005) en un pastizal de pastoreo en la estepa central de Mongolia

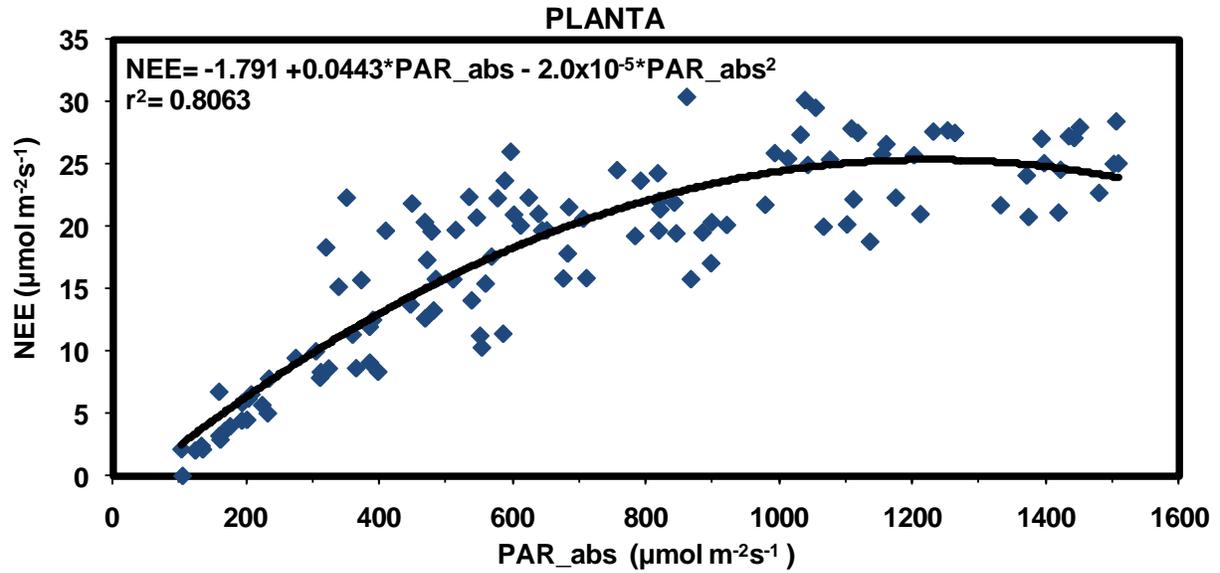


Figura 11. Relación entre la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la tasa de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el ecosistema (PAR_abs), observado sobre un cultivo de caña de azúcar (caña-planta y caña-soca), durante el otoño 2008-2009 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

4.3 . Eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo.

La eficiencia intrínseca del uso del agua, tanto en caña-planta como en caña-soca, decreció a medida que aumentó la tasa de evapotranspiración (Figura 12). Esto probablemente se debió a que el incremento en la apertura de los estomas de las hojas (por una mayor disponibilidad de agua en el suelo) resultó en un mayor flujo de vapor de agua del interior de las hojas hacia el aire, que el flujo de bióxido de carbono del aire hacia el interior de las hojas (Jones, 1992, Nobel, 2009). Además, debido a que el peso molecular del vapor de agua (18 g mol^{-1}) es menor que el del aire (28 g mol^{-1}), este fluye más rápido desde la superficie de las hojas hacia la atmósfera. Por el contrario, dado que el peso molecular del bióxido de carbono (44 g mol^{-1}) es mayor que el del aire, el flujo de este desde la atmósfera a la superficie de las hojas es menor.

En el ciclo de producción caña-planta, la mayor eficiencia intrínseca del uso del agua diaria, fue $5.874 \text{ mmol_CO}_2 \text{ mol_H}_2\text{O}^{-1}$ a una tasa de evapotranspiración de $98.19 \text{ mol_H}_2\text{O m}^{-2}$. Mientras que en el ciclo de producción caña-soca, la mayor eficiencia diaria fue $4.720 \text{ mmol_CO}_2 \text{ mol_H}_2\text{O}^{-1}$, a una tasa de evapotranspiración de $126.597 \text{ mol_H}_2\text{O m}^{-2}$. (Figura 12). Esto demostró que en el ciclo de producción caña-planta se tuvo una mayor eficiencia del uso del agua a un valor menor de evapotranspiración.

Otros estudios (Herrera *et al.*, 2001) han reportado que la eficiencia intrínseca del uso del agua decrece proporcionalmente con el incremento de la conductancia de los estomas de diferentes especies tropicales de tipo C3 y C4. De igual forma, Scanlon y Albertson (2004) observaron una relación decreciente de la eficiencia intrínseca del uso del agua con respecto al incremento del déficit de presión de vapor del aire en un bosque de Kataba al sureste de África. Baldocchi (1994) encontró que la eficiencia intrínseca del uso del agua en maíz y trigo decrece linealmente con el incremento en la tasa de evapotranspiración debido al aumento del déficit de presión de vapor.

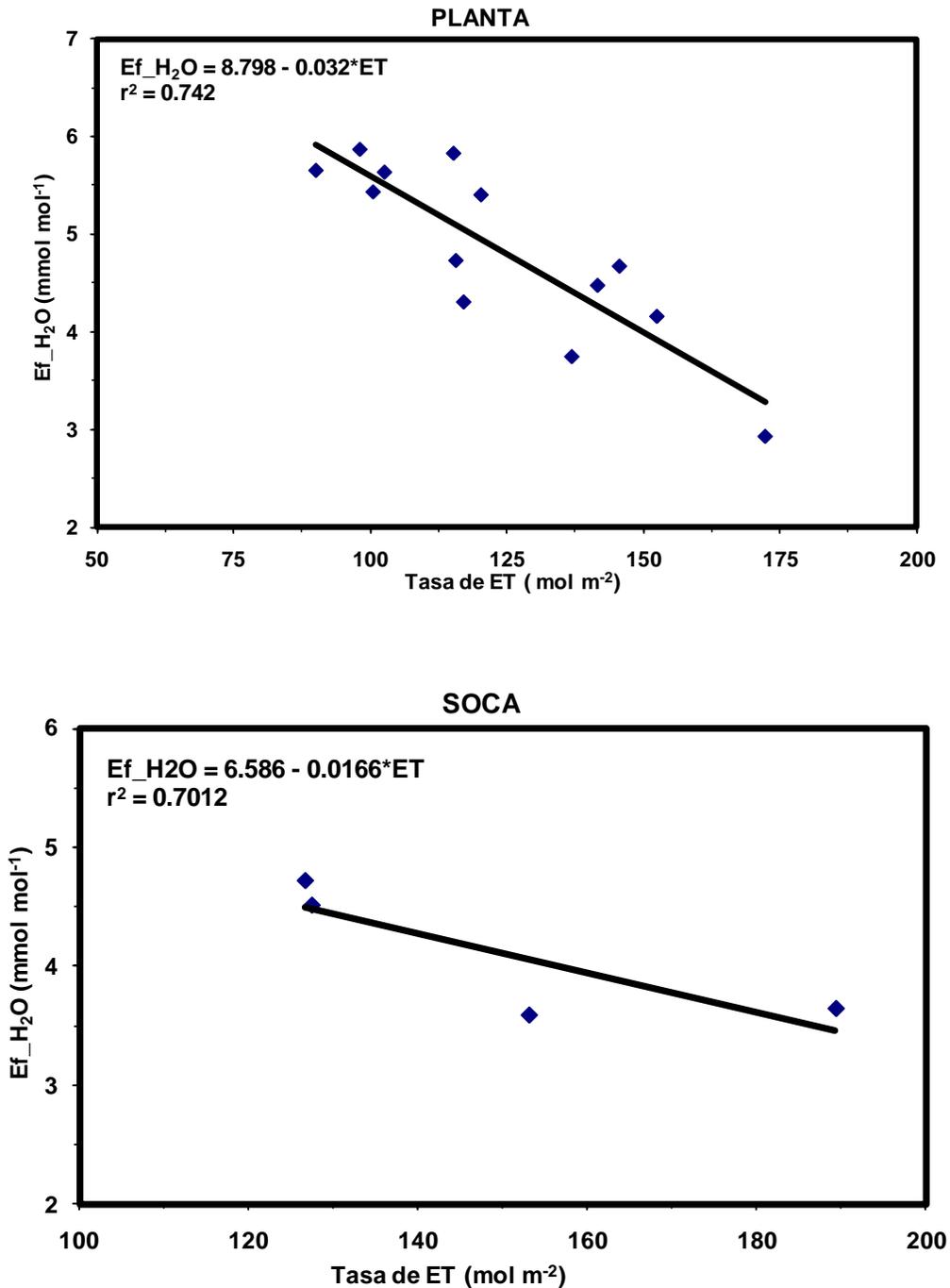


Figura 12. Relación entre los valores integrados diurnos (8:00 a 19:00 h) de la eficiencia intrínseca del uso del agua (Ef_H_2O) y la evapotranspiración (ET) en el mismo intervalo de tiempo, observada sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar (caña-planta y caña-soca) durante el otoño de 2008 y 2009, en Xicoténcatl, Tamaulipas, México

La eficiencia del uso de la radiación fotosintéticamente activa absorbida en la asimilación de bióxido de carbono ($E_f\text{-PAR}$) decreció linealmente con el incremento de la PAR absorbida por el cultivo en caña-planta y caña-soca (Figura 13). Esto probablemente se debió a que las hojas recibieron una cantidad mayor de energía en forma de radiación (PAR) que la requerida para la tasa de asimilación de bióxido de carbono, de tal forma que aporte adicional de PAR absorbida tuvo poca o nula participación en la asimilación de bióxido de carbono, disipándose en forma de calor y por consiguiente reduciendo la eficiencia del uso de la PAR absorbida en la asimilación de bióxido de carbono. Resultados similares fueron reportados por Feldhake y. Belesky (2009) en un pasto (*Dactylis Glomerata* L.), donde la eficiencia del uso de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) decreció con el incremento de la PAR absorbida por el pasto. Una relación similar fue reportada por Medina *et al.*, (2002) en dos especies de cítricos (*Citrus sinensis*, *Citrus limonia*) donde el rendimiento cuántico decreció a valores altos de radiación fotosintéticamente activa.

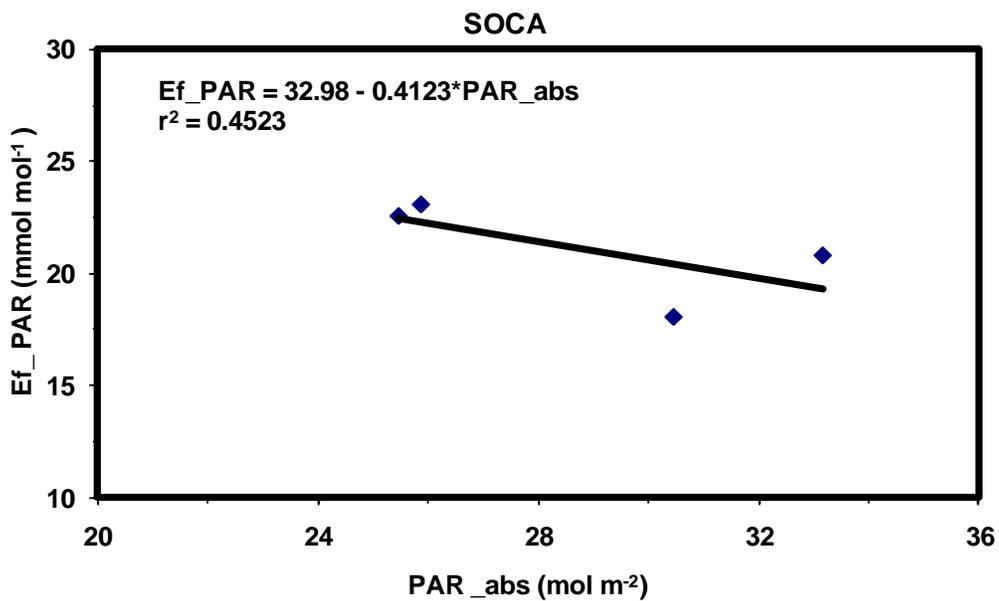
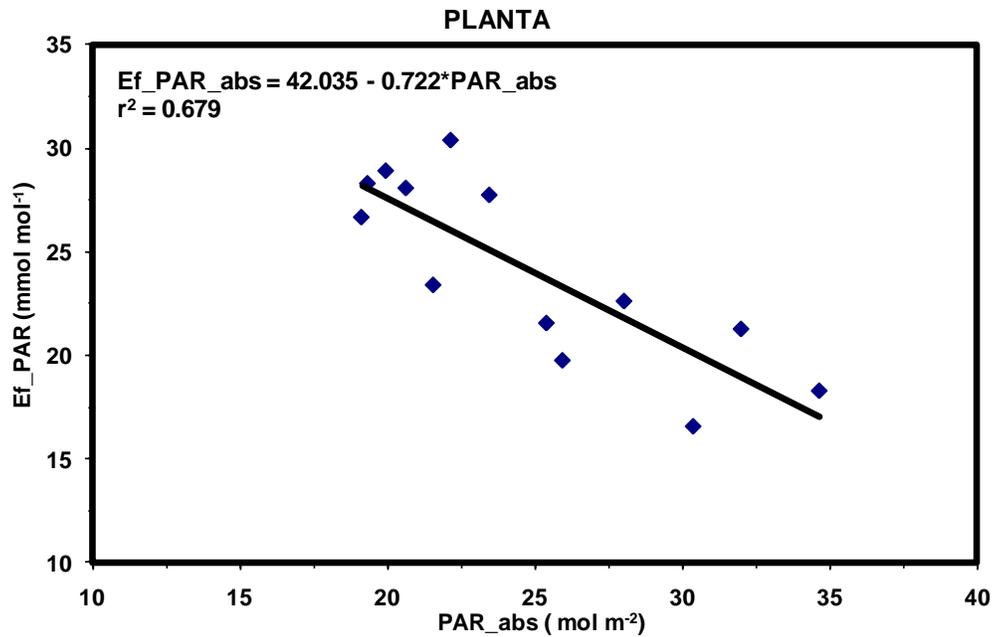


Figura 13. Relación entre los valores integrados diurnos (8:00 a 19:00 h) de la eficiencia del uso de la radiación fotosintéticamente activa (Ef_PAR) y la PAR absorbida en el mismo intervalo de tiempo, observado sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar (caña-planta y caña-soca) durante el otoño de 2008 y 2009, en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

4.4 . Flujos integrados bajo condiciones de cultivo en planta y soca

La información que se muestra en el Cuadro 1, indicó que el ecosistema en condiciones de caña-planta fue más eficiente que en condiciones de caña-soca, ya que para aproximadamente los mismos valores de radiación fotosintéticamente activa absorbida promedio diaria (PAR_abs) y de tasa promedio de evapotranspiración diaria (ET), el intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) fue $57.684 \text{ mmol_CO}_2 \text{ mol_H}_2\text{O}^{-1}$ (11.02 %) mayor en caña-planta que en caña-soca.

También se observó que tanto la eficiencia intrínseca promedio diaria del uso del agua (Ef_H₂O) como la eficiencia promedio diaria del uso de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (Ef_PAR_abs) fue mayor en el ecosistema bajo condiciones de caña-planta que en condiciones de caña-soca.

El decremento en la tasa de asimilación de bióxido de carbono y en la eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación observados en este estudio, cuando el ciclo de producción cambio de caña-planta a caña-soca, puede estar relacionado con una reducción en el rendimiento del cultivo, ya que estudios previos muestran que la altura y el peso unitario del tallo decrecen del ciclo de producción caña-planta a caña-soca (Cuenya *et al.*, 2007). De igual forma, Marcano *et al.* (2003) reportaron un decremento en el rendimiento y contenido de sacarosa de diferentes variedades, del ciclo de producción caña-planta al ciclo caña-soca.

Cuadro 1. Valores integrados (8:00 - 19:00 h) promedios diarios de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_abs), flujo de calor latente (LE), tasa de evapotranspiración (ET), intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la eficiencia promedio diaria del uso intrínseco del agua (Ef_H₂O) y la eficiencia del uso de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (Ef_PAR_abs) expresada en fracción molar y en porcentaje. Observados en condiciones de caña-planta y caña-soca, en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

| | caña-planta Otoño de 2008 | caña-soca otoño de 2009 |
|---|------------------------------|----------------------------|
| PAR_abs (mol_fot m ⁻²) | 24.830 | 24.863 |
| LE (MJ m ⁻²) | 5.460 | 5.634 |
| ET (mol m ⁻²) | 123.840 | 127.755 |
| NEE (mmol m ⁻²) | 581.280 | 523.596 |
| Ef_H ₂ O (mmol_CO ₂ mol_H ₂ O ⁻¹) | 4.840 | 4.264 |
| Ef_PAR_abs (mmol_CO ₂ mol_fot ⁻¹) | 24.110 | 21.31 |
| Ef_PAR_abs (%) | 5.190 | 4.589 |

V. CONCLUSIONES

El ecosistema (suelo-planta) de caña de azúcar mostró un alto potencial de asimilación de bióxido de carbono, tanto en caña-planta como en caña-soca, ya que la tasa instantánea de bióxido de carbono del ecosistema fue mayor a la en un bosque de ciprés Siberiano y que la de un bosque siempre verde en Zambia, pero menor a la observada en un pastizal de *Brachiara brizantha* en la región del Cerrado en Brasil.

La tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema tanto en caña-planta como en caña-soca fue muy sensible a los cambios en la tasa de evapotranspiración y de absorción de la radiación fotosintéticamente activa.

La relación entre el intercambio neto de bióxido de carbono integrado diurno (NEE) respecto a la evapotranspiración diaria (ET) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR) tanto en caña-planta como caña-soca fue cuadrática, indicando que después de un determinado valor de ET y de PAR, incrementos adicionales no aumentan la tasa de asimilación de CO₂ del ecosistema.

El intercambio neto de bióxido de carbono promedio diario del ecosistema fue mayor en condiciones de caña-planta que en condiciones de caña-soca. De igual forma, la eficiencia promedio diaria del uso intrínseco del agua y de la radiación fotosintéticamente activa fue mayor bajo condiciones de caña-planta que de caña-soca.

VI. BIBLIOGRAFIA CITADA

- Amaya, E. A., J.H. Cock, A. Hernández y J. Irvine. Biología. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, 1995. p. 31-62.
- Asseng, S., and T.C. Hsiao. 2000. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. *Field Crops Research*. 67(3): 191-206.
- Baldocchi, D. 1994. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C3 (wheat) and an open C4 (Corn) crop: II.CO₂ exchange and water use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*. 67:291-321.
- Basra, S.M.A., N. Ahmad and A. Khaliq. 1999. Water Relation Studies in Water Stressed Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) *Int. J. Agri. Bio.* 1(1-2): 1-4.
- Betancourt, P., B. S. Figueroa y C. S. Ortiz. 2005. Erosión hídrica y uso de la radiación solar por especies forrajeras en la cuenca del río Coxacoaco, México. *Rev. Fac. Agron.* 22(2): 155-166.
- Boegh, E., H. Soegaard y A. Thomsen. 2002. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance., *Remote Sensing of Environment* 79: 329– 343.
- CENICAÑA (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia). 1993. Informe anual. Cali, Colombia.
- Cuenya, M. I., M. B. Garcia, C.D. Romero, S. Ostengo, D. Costilla y E. R. Romero. 2007. Efectos de la calidad de la caña semilla en los componentes del rendimiento cultural de las variedades CP65-357 y LCP85-384 (*Saccharum* spp.) según diferentes edades de corte (Parte I). *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* Tomo 84 (1): 9-14.

- DeLucia, E.H., K. George and J. G. Hamilton.2002. Radiation-use efficiency of a forest exposed to elevated concentrations of atmospheric carbon dioxide. *Tree Physiology*. 22(14):1003-1010.
- Di Bella, C. M., Rebella, C. M., Paruelo J. M. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *Remote Sensing of Environment* 21: 791– 797
- 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.
- El-Sharkawy, M.A and J.H. Cock.1984. Water use efficiency of cassava. I. Effects of air humidity and water stress on stomatal conductance and gas exchange. *Crop Science* 24(3): 497-502.
- El-Sharkawy, M.A., and J.H. Cock.1987. C3-C4 intermediate photosynthetic characteristics of cassava (*Manihot esculenta Crantz*). *Photosynthesis Research*. 219-235.
- Feldhake, M. C., and D. P. Belesky.2009. Photosynthetically active radiation use efficiency of *Dactylis glomerata* and *Schedonorus phoenix* along a hardwood tree-induced light gradient. *Agroforest Syst* 75:189–196.
- Friedl, M.A. 2002. Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements *Remote Sensing of Environment* 79: 344–35.
- Gallo, K. P., and C. S. T. Daughtry. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Agron. J.* 78: 752-756.

- Glaz, B., D.R. Morris and S.H. Daroub. 2004. Sugarcane Photosynthesis, Transpiration, and Stomatal Conductance Due to Flooding and Water Table. *Crop Sci.* 44: 1633-164.
- González-Sosa, E. 2000. Observación y modelación del balance de masa y de energía de una parcela experimental, afectada por una cubierta de residuos vegetales o MULCH. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente: memorias técnicas. México, D.F., FEMISCA, 2000, p.1-11.
- Goulden, M.L., J.W. Munger, F. Song-Miao, B.C. Daube and S.C. Wofsy. 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global change Biology.* 2,169-182.
- Ham J M, J L Heilman (2003) Experimental Test of Density and Energy-Balance Corrections on Carbon Dioxide Flux as Measured Using Open-Path Eddy Covariance. *Agrono. Journal.* 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 Biology* 11:927-939.
- Herrera, A., M.D. Fernández, E. Rengifo y W. Tezara. 2001. Efecto de la concentración elevada de CO₂ sobre la fotosíntesis en especies tropicales. *Interciencia.* 26 (10): 469-471.
- Irvine, J.E. 1967. Photosynthesis in sugarcane varieties under field conditions. *Crop Sci.* 7:297-300.
- Janssens, I.A., H. Lankreijer, G. Matteucci, G. Kowalski, A.S. Buchmann, N. Epron, D. Pilegaard, K. Kutsch, W. Longdoz, B. Grünwald, T. Montagnani, L. Dore, S. Rebmann, C. Moors, E.J. Grelle, A. Rannik, Ü. Morgenstern, K. Oltchev, S. Clement, R. Gudmundsson, J. Minerbis, P. Berbigier, P. Ibrom, A. Moncrieff, J.B.

- Aubinet, M. Bernhofer, C. Jensen, N.O. Vesala, T. Granier, A. Schulze, E.D. Lindroth, A. Dolman, A.J.Jarvis, P.G. Ceulemans, and R. Valentini.2001. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across. European forests. *Global Change Biology*, 7: 269 – 278.
- Jones, H.G., 1983. *Plants and Microclimate*. Cambridge University Press, Cambridge, 323 pp.
- Jones, G. H. 1992. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental Plant Physiology*. Second edition.Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain. 428 p.
- Kanemasu E T, S B Verma, S A Smith, L J Frittschen, M Wesely, R T Field, W P Kustas, H Weaver, J B Stewart, R J Gurney, G Panon, J B Moncrieff.1992. Surface flux measurements in FIFE: an overview. *J. Geophysics Res.* 97:18547-18555.
- Kellomäki, S. and K. Y. Wang. 2000. Short-term environmental controls on carbon dioxide flux in a boreal coniferous forest: model computation compared with measurements by eddy covariance. *Ecological Modeling* 128(1):63-88.
- Kustas, W. P., M.S. Moran, R.D. Jackson, L.W. Gay, L.F.W. Duell, K.E. Kunkel y A.D. Matthias. 1990. Instantaneous and daily values of the surface energy balance over agricultural fields using remote sensing and a reference field in an arid environment. *Remote Sensing of Environment* 32: 125-141.
- Kustas W. P, J H Prueger, J L Hatfield .2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agric. Forest Meteorol.* 103:249-264.
- Lai, C.T., A.J. Schauer, C. Owensby, J.M. Ham and J.R. Ehleringer. 2003. Isotopic air sampling in a tallgrass prairie to partition net ecosystem CO₂ exchange. *Journal of geophysical research.* 108(D18), 4566.

- 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 Biology*. 11, 1941–1955.
- Lingling, X., Z. Xianzhou, S. Peili, Y. Guirui, and S. Xiaomin. 2006. Characteristics of net ecosystem carbon dioxide exchange (NEE) from August to October of Alpine meadow on the Tibetan Plateau, China. *Frontiers of Biology in China*. 1(4): 418-422.
- Litvak, M., S. Miller, S.C. Wofsy and M. Goulden.2003. Effect of stand age on whole ecosystem CO₂ exchange in the Canadian boreal forest. *J. Geophys. Res.* 108(D3), 8225.
- López, J. C., M. Riaño N. e Y. López F. 2001, Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales valdivia, Chile. Pp. 2-3
- Marcano, M., M. Garcia y L. Caraballo.2003. Evaluación de doce variedades de caña de azúcar (*Sacharum spp.*) bajo condiciones de secano en un suelo de sabana del oeste del estado Monagas, Venezuela. *Revista UDO Agrícola* 3 (1): 65-73.
- 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 radon and eddy covariance methods. *Global Change Biology*. 10, 618-629.
- Medina, L.C., R.P. Souza, E.C. Machado, R. V. Ribeiro and J. A. B. Silva.2002. Photosynthetic response of citrus grown under reflective aluminized polypropylene shading nets. *Scientia Horticulturae* 1821 1–11.

- 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 of Botany* 89: 895±905, 2002
- Moguel-Ordóñez, E., L. Tijerina-Chávez, A. Quevedo-Nolasco, G. Crespo-Pichardo y G. Haro-Aguilar. 2000. Evapotranspiración y balance de energía en el cultivo de alfalfa. *Agrociencia* 35: 13-21.
- Muchow, R.C. and T.R. Sinclair. 1994. Nitrogen response of leaf photosynthesis and canopy Radiation use efficiency in field-grown maize and sorghum. *Crop Sci.* 34: 721-727.
- Nobel, P. S. 1991. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Academic Press, Inc. Los Angeles, Calif. pp: 345-392.
- Nobel, P.S., 2009. *Physicochemical and environmental plant physiology academic press* 4 ed., USA, 600 pp.
- Rolim, G. S., J.F. Escobedo y A. P. Oliveira. 2008. Validation of the Deardorff model for estimating energy balance components for sugarcane crop. *Sci. Agric.* 65(4).
- SAGARPA, 2010. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <http://www.2000agro.com.mx/agroindustria/sagarpa-garantiza-abasto-nacional-de-azucar-para-2010/>. (Fecha de consulta 03 de Mayo del 2010).
- Saliendra, N.Z., F.C. Meinzer, P. Matthew and T. Margaret. 1996. Associations between partitioning of carboxylase activity and bundle sheath leakiness to CO₂, carbon isotope discrimination, photosynthesis, and growth in sugar cane. *Oxford Journals. J. of Experimental Botany.* 47(7): 907-914
- 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 *Brachiara* pasture in the Brazilian Cerrado. *Global Change Biology.* 10, 877–885.

- Scanlon, T.M., and J.D. Albertson. 2004. Canopy scale measurements of CO₂ and water vapor exchange along a precipitation gradient in southern Africa. *Global Change Biology*. 10, 329–341
- Schirmbeck, J., Rivas, R. 2007 Estimación de la radiación neta a nivel del suelo a partir de datos captados por el sensor ETM+. Anais del XV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto: 6159 - 6165
- SIAP, 2010. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera con información de las Delegaciones de la SAGARPA. Página WEB: <http://www.siap.gob.mx/ventanaIM.php?idCat=180&url=w4.siap.gob.mx/AppEstado/Monografias/Monografias2/CanaAzu.html>. (Fecha de consulta 01 de Marzo del 2010).
- Sinclair., R. Thomas, Muchow, C. Russell.1999. Radiation Use Efficiency. *Advances in Agronomy* 65. Academic Press. Pp 215-265.
- Steduto, P. and T.C. Hsiao. 1998. Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. *Agricultural and forest meteorology*. 89(3-4):169-184.
- Torrecillas, A., R. Galego, A. Perez-Pastor y M. C. Ruiz-Sanchez.1999. Gas exchange and water relations of young apricot plants under drought conditions. *J. Agric. Sci.* 132: 445- 452.
- UNC (Unión Nacional de Cañeros): <http://www.caneros.org.mx/>(Fecha de consulta 22 Febrero del 2010).
- Villa Nova, N.A., A.B. Pereira y C.C Shock. 2007. Estimation of Reference Evapotranspiration by an Energy Balance Approach. *Biosystems Engineering* 96: 605–615.
- Wang, K., Z. Li y M. Cribb.2006. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to

determine the Priestley–Taylor parameter. *Remote Sensing of Environment* 102: 293–305.

Watanabe, K., Y. Takashi, Y. Takashi, S. Tetsuo, N. Eiji, N. Chairat, S. Akadet and H. Hirokazu. 2004. Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. *Agricultural Water Management* 67(2): 133-143.

Xu, L. and D. D. Baldocchi. 2003. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology* 123(2004) 79–96

Yoshikazu, S., R. Kimura, M. Ishimine and M. Ota. 2005. Evapotranspiration from a sugar cane Field in the Miyako Islands. *Journal of Agricultural Meteorology*. 61(1): 77-81.