

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA QUÁNTICA E INTRÍNSECA DEL USO DEL  
AGUA DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR**

**SANDINO VILLATORO MORENO**

**TESIS**

**Presentada como requisito parcial**

**Para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA**

**“ANTONIO NARRO”**



**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México**

**Junio de 2011**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA QUÁNTICA E INTRÍNSECA DEL USO  
DEL AGUA DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

TESIS

POR  
SANDINO VILLATORO MORENO

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y  
Aprobada como requisitos parcial, para optar al grado de

MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN


COMITE PARTICULAR

Asesor principal:



Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor:



Dr. Ernesto A. Catalán Valencia

Asesor:




Dr. Miguel Ángel García Delgado

Asesor:



Dr. Martín Cadena Zapata

  
Dr. Fernando Ruíz Zárate  
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Junio 2011

## **DEDICATORIAS**

**Este documento está dedicado a mi Esposa e Hijos:**

Corintia Olvera Carmona

Isis Alejandra Villatoro Olvera

Argos Vladimir Villatoro Olvera

**A mis padres por su apoyo:**

Hernán Villatoro Barrios y Rosalba Moreno González

**A mis hermanos con cariño:**

Hernán Villatoro Moreno

Sendic Villatoro Moreno

Libia Yunuen Villatoro Moreno

**A mis sobrinos:**

Osiris Regina, Hernán y Ximena Yunuen

**A mis amigos:**

Arturo, Javier, Claudia, Paola, Sasirot, Martel, Julio, Fernando, Froylan, Luis,  
Pacheco, Genaro, Edrodes, Obet.

Y a mis amigos de licenciatura:

Ali, Prisciliano, Eusebio, Manuel, Cristian, Arguelles, Uriel, Eder. A todos por  
compartir buenos momentos

**A mi ALMA MATER**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al CONACYT por el apoyo brindado durante el periodo de mi investigación.

Al Dr. Alejandro Zermeño González, por facilitar el los medios físicos y técnicos que me ayudaron a finalizar esta investigación.

Al la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por mantener aun los servicios de Comedor y Transporte que me han sido de gran utilidad a todos los egresados.

**COMPENDIO**

**EFICIENCIA QUÁNTICA E INTRÍNSECA DEL USO DEL AGUA DE UN CULTIVO  
DE CAÑA DE AZÚCAR**

**POR**

**SANDINO VILLATORO MORENO**

**MAESTRÍA**

**INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

**Buenavista Saltillo, Coahuila. Junio 2011**

**Dr. Alejandro Zermeño González**

**Asesor**

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

La caña de azúcar es un cultivo que se establece mediante esquejes y puede mantenerse hasta por 20 años sin renovar las plantas madre, esta condición puede afectar la capacidad de asimilación de bióxido de carbono del ecosistema vegetal, la eficiencia intrínseca del uso del agua, la eficiencia cuántica y el rendimiento. Por lo

que los objetivos de esta investigación fueron: Analizar la dinámica de los flujos instantáneos de bióxido de carbono del ecosistema vegetal (NEE) y su relación con la tasa de evapotranspiración (ET), la tasa de absorción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) así como su relación con el rendimiento bajo condiciones de planta y de soca. Para esto, se instaló en una torre de 5 m de altura un sistema eddy covariance sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar en el rancho Santa Anita en el municipio de Xicotencatl, Tamaulipas, durante el otoño 2008 (planta) y otoño 2009 (soca), para medir los flujos de CO<sub>2</sub>, flujo de calor latente y la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel. Se observó que el cultivo de caña de azúcar tiene un alto potencial de asimilación de bióxido de carbono, tanto en planta como en soca, ya que la tasa instantánea de NEE fue mayor a la reportada en bosques y praderas de distintas especies pese que el estudio se realizó en otoño cuando el cultivo disminuye su actividad fisiológica. El NEE de las dos zafra fue muy sensible a los cambios en la tasa de ET y de absorción de la radiación PAR absorbida por el dosel. El intercambio neto de bióxido de carbono, la eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación fotosintéticamente activa absorbida promedio diaria del ecosistema fue mayor en condiciones de planta que en condiciones de soca, de igual manera se comportó el rendimiento del cultivo.

## **ABSTRACT**

**Quantum yield and water use efficiency of a sugar cane crop**

**By**

**Sandino Villatoro Moreno**

**MASTER OF SCIENCE**

**IN**

**PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA**

**ANTONIO NARRO**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila. June 2011**

**Dr. Alejandro Zermeño González      Adviser**

**Key words:** net ecosystem exchange, eddy covariance, intrinsic water use efficiency, quantum yield, sugarcane.

Sugarcane is a crop that is seeded by cuttings and can remain in the field up to 20 years without reseeding. This condition can affect the carbon dioxide net ecosystem exchange (NEE), the quantum and intrinsic water use efficiency and the crop yield. Therefore, the objectives of the study were: To analyze the dynamics of the NEE and its relation to the rate of evapotranspiration (ET), the rate of absorption of the photo

synthetically active radiation (PAR) as well as its relation to yield for plant and first ratoon. The flux measurements of CO<sub>2</sub>, water vapor, PAR absorbed by the crop canopy were made by mounting the sensors of an eddy covariance system in a tower of 5 m tall (2 m above the crop canopy), in a sugarcane crop in the property Santa Anita, county of Xicontencatl, Tamaulipas, during the fall of 2008 (plant) and the fall of 2009 (first ratoon). The results of this study showed that the sugarcane crop has a high potential of CO<sub>2</sub> assimilation, in plant as well as in the first ratoon, because the instantaneous rate of NEE was higher than that reported for forests and grasslands of different species, despite that the study was conducted in fall when the crop had a low rate of growth. NEE in plant as well as in first ratoon was very sensitive to the changes of the ET rate and the absorption of PAR by the crop canopy. NEE, the intrinsic water use efficiency and quantum yield efficiency was higher on the plant growing cycle than on the first ratoon, as well as the crop yield.



## INDICE DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIAS .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>IV</b>
<b>COMPENDIO .....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VII</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS .....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>NUMERO DE FIGURA                      PAGINA.....</b>	<b>XI</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
LA CAÑA DE AZÚCAR. ....	3
ASPECTOS AGRONÓMICOS DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR. ....	5
TÉCNICA DE COVARIANZA DE REMOLINOS.....	9
INTERCAMBIO NETO DE BIÓXIDO DE CARBONO DEL ECOSISTEMA.....	11
EFICIENCIA CUÁNTICA E INTRÍNSECA DEL USO DEL AGUA. ....	14
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
SITIO DE ESTUDIO. ....	18
INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIONES. ....	20
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>25</b>
TASA INSTANTÁNEA DE INTERCAMBIO NETO DE BIÓXIDO DE CARBONO DEL ECOSISTEMA DE CAÑA PLANTA Y SOCA. ....	25
RELACIÓN ENTRE LA TASA DEL INTERCAMBIO NETO DE BIÓXIDO DE CARBONO Y LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CONDICIONES DE PLANTA Y DE SOCA. ....	30
RELACIÓN ENTRE LA TASA DEL INTERCAMBIO NETO DE BIÓXIDO DE CARBONO Y LA TASA DE RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA ABSORBIDA POR EL DOSEL DEL CULTIVO EN CONDICIONES DE PLANTA Y DE SOCA. ....	32
FLUJOS INTEGRADOS PROMEDIO DIARIOS, EFICIENCIAS Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO EN CONDICIONES DE PLANTA Y DE SOCA .....	35
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>37</b>
<b>VI. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>39</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

### Numero de Cuadro

### Página

Cuadro 4.1. 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 y rendimiento. Observados en condiciones de planta y soca, en Xicoténcatl, Tamaulipas, México. .... 36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Numero de Figura	Página
Figura 3.1. Plantación de caña de azúcar ( <i>saccharum officinarum</i> L.) En el rancho santa anita, municipio de xicoténcatl, tamaulipas, méxico. ....	19
Figura 3.2. Sistema de covarianza de remolinos montado sobre andamios a más de 6 m sobre el nivel del suelo, en una plantación de caña de azúcar del rancho santa anita, en el municipio de xicoténcatl, tamaulipas, méxico. ....	21
Figura 4.1. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema, y valores integrados ( $\text{mmol m}^{-2}$ ) observados del 16 al 18 de octubre de 2008, sobre un cultivo de caña de azúcar (planta); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de $\text{CO}_2$ por el ecosistema. Xicoténcatl, tamaulipas, méxico. ....	26
Figura 4.2. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema, y valores integrados ( $\text{mmol m}^{-2}$ ) observados del 18 al 19 de octubre de 2008, sobre un cultivo de caña de azúcar (planta); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de $\text{CO}_2$ .....	27
Figura 4.3. Flujos diurnos de calor latente ( $le$ ) y radiación fotosintéticamente activa absorbida ( $par_{abs}$ ) por un cultivo de caña de azúcar (planta); la lámina de agua evapotranspirada ( $lam_{et}$ ) y $par_{abs}$ integrada durante el día, observados el 18 de octubre de 2008 en xicoténcatl, tamaulipas, méxico. ....	27
Figura 4.4. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema ( $nee$ ), y valores integrados ( $\text{mmol m}^{-2}$ ) observados del 9 al 11 de octubre de 2009, sobre un cultivo de caña de azúcar (soca); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de $\text{CO}_2$ por el ecosistema. Xicoténcatl, tamaulipas, méxico. ....	29
Figura 4.5. Flujos diurnos de calor latente ( $le$ ) y radiación fotosintéticamente activa absorbida ( $par_{abs}$ ) por un cultivo de caña de azúcar (soca); la lamina de agua evapotranspirada ( $lam_{et}$ ) y $par_{abs}$ integrada durante el día, observados el 10 de octubre de 2009 en xicoténcatl, tamaulipas, méxico. ....	29
Figura 4.6. 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 (planta) y el otoño de 2009 (soca) en xicoténcatl, tamaulipas, méxico. ....	32
Figura 4.9. 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 durante el otoño 2008 (planta) y otoño 2009 (soca) en xicoténcatl, tamaulipas, México. ..**34**

## I. INTRODUCCIÓN

A la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) no se le conoce un centro de origen determinado, sin embargo existen evidencias que el centro de origen del género *Saccharum* es la región que comprende parte de la India, China, Nueva Guinea y zonas aledañas, por encontrarse ahí el mayor número de especies. Posteriormente este género se difundió a otras zonas como Hawaii, África Oriental, Madagascar, Medio Oriente, el Mediterráneo y el Atlántico en las Islas Canarias. Las especies del género *Saccharum* fueron importantes en la dieta de las civilizaciones primitivas alrededor de los años 3000 antes de nuestra era. Además se valoraba como un producto de lujo, por lo tanto, se comercializó a altos precios. La India es considerada como el primer centro de explotación comercial (Subirós, 2000).

Es un cultivo que se propaga vegetativamente, que asimila muy bien la radiación solar, tiene una eficiencia próxima al 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<sup>-1</sup>. La industria del azúcar en nuestro país genera 440,000 empleos directos y 2.5 millones de empleos indirectos (UNC, 2011).

Por ser un cultivo semiperenne, las practicas agronómicas que se realizan por cada corte llegan a compactar el suelo, empobrecerlo, dañar las raíces, disminuir la capacidad de rebrote, por lo tanto su capacidad de asimilación de CO<sub>2</sub>, eficiencia cuántica y su eficiencia en el uso del agua puede verse afectada cuando el cultivo cambia de planta a soca.

### **Objetivos de la investigación.**

Analizar la dinámica de los flujos instantáneos de NEE y su relación con la tasa de asimilación de la radiación fotosintéticamente activa y la tasa de evapotranspiración.

Determinar el cambio en los flujos integrados diarios de NEE entre planta y soca.

Evaluar el cambio en la eficiencia intrínseca del uso del agua y de la eficiencia cuántica de planta y soca.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### **La caña de azúcar.**

A la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) no se le conoce un centro de origen determinado, sin embargo existen evidencias para suponer que el centro de origen del género *Saccharum* es la región que comprende parte de la India, China, Nueva Guinea y zonas aledañas, por encontrarse ahí el mayor número de especies. Posteriormente este género se difundió a otras zonas como Hawái, África Oriental, Madagascar, Medio Oriente, el Mediterráneo y el Atlántico en las Islas Canarias. Las especies del género *Saccharum* fueron importantes en la dieta de las civilizaciones primitivas alrededor de los años 3000 A.C. Además se valoraba como un producto de lujo, por lo que era vendido a altos precios. La India es considerada como el primer centro de explotación comercial (Subirós, 2000).

La caña de azúcar es uno de los cultivos tropicales con metabolismo del carbono tipo C4 más cultivados, aunado con su naturaleza semi-perenne, es uno de los cultivos más productivos. Es el más utilizado en la producción de azúcar, aportando aproximadamente dos terceras partes de la producción mundial (D'hont *et al*, 2008).

México ocupa el sexto lugar a nivel mundial en la producción de azúcar y el séptimo en su consumo según (SAGARPA, 2007a).

La caña de azúcar es la materia prima de la industria azucarera la cual es una actividad de alto impacto social por su producción, por el empleo que crea en el campo mexicano y por que el azúcar está profundamente ligada en la cultura y la economía del país y es un producto básico en la dieta del mexicano. En este sentido el consumo nacional aparente de azúcar de caña es de 4.8 millones de toneladas anuales (promedio 2001-2007), el valor generado en la producción de azúcar es por más de 3 mil millones de dólares anuales y el 57% se distribuye entre los 164 mil productores de caña. La caña de azúcar aporta el 13.5% del valor de la producción agrícola nacional y representa el 0.4% del PIB y el 7.3% del PIB agropecuario, genera más de 450 mil empleos directos y beneficios directos a más de 2.2 millones de personas. La producción nacional de caña se lleva a cabo en 15 estados de la república, los cuales abastecen a 57 ingenios. Los coproductos y subproductos de la agroindustria azucarera (sacarosa, melazas, bagazo, cachazas y vinazas) sirven como insumo para las industrias de refrescos y bebidas, jugos, néctares, galletera, repostería, licores, fabricas de papel y cartón, tableros aglomerados, industria de alimentos pecuarios y farmacéutica entre otros usos, contribuyendo al desarrollo industrial del país (PRONAC, 2011).



## **Aspectos agronómicos del cultivo de la caña de azúcar.**

El conocimiento de la morfología y la fisiología de la caña de azúcar son fundamentales para poder cultivarla adecuadamente, por esta razón es necesaria una descripción básica de las partes que constituyen la planta y del funcionamiento de estas.

La siguiente descripción es reportada por Subirós (2000).

**La raíz** tiene por función principal el absorber agua y nutrientes, proporcionar anclaje y almacenar compuestos de reserva. La raíz primaria está ubicada en el embrión, las raíces que se originan en el tallo son adventicias, estas últimas se clasifican en dos tipos, las primordiales y las permanentes. Las primeras tienen su origen en los primordios radicales, son delgadas y ramificadas, son de duración efímera, tienen la función principal de absorber agua y minerales para que la yema se desarrolle, una vez desarrollada la yema, estas raíces son sustituidas por raíces perennes; el segundo tipo de raíces son las que brotan cuando se inicia el amacollamiento, son de mayor diámetro, numerosas y largas, su número aumenta de acuerdo con el desarrollo de la planta.

Algunos factores que afectan el desarrollo radical son la variedad de caña a utilizar, la textura del suelo y la compactación de este, así como la disponibilidad de agua y niveles freáticos elevados.

**El tallo** es el órgano de mayor importancia en este cultivo (desde el punto de vista económico), debido a que en él se almacenan los carbohidratos producto de la fotosíntesis de la planta. Durante la geminación se forma el primer tallo (eje), de este tallo se generan nuevas yemas que darán lugar a nuevos tallos (secundarios) y estos generaran yemas que darán origen a los terciarios y así constitutivamente hasta lograr una aglomeración, proceso que se denomina amacollamiento. Durante el crecimiento los tallos tienen diferente comportamiento para disponerse, a lo que se le denomina hábito de crecimiento. Los arreglos son variados: curvos, postrados y en estados intermedios.

**Las hojas** llevan a cabo principalmente la fotosíntesis, la respiración celular, la transpiración y el intercambio gaseoso. La lámina foliar de la caña de azúcar es ligeramente asimétrica. Las hojas están insertadas en cada nudo y poseen un arreglo alterno, las hojas están compuestas por la lámina, nervadura central, vaina, lígula y aurícula. El área foliar puede llegar a ser 12 u 80 veces más que el área ocupada por la planta, la eficiencia fotosintética depende en parte de ello.

**La inflorescencia** es una panícula abierta, cuya forma, color, tamaño y ramificación dependen de la variedad. Las flores son hermafroditas, a veces autoestériles, formadas por un ovario y dos estigmas largos y plumosos. La formación de la flor en caña tiene aspectos benéficos y negativos, la principal ventaja es que proporciona material para trabajar en programas de mejoramiento genético. La desventaja desde el punto de vista agronómico es la paralización del crecimiento, muchas veces acompañado con la aparición de corcho, lo cual disminuye el rendimiento.

Para que la caña de azúcar termine satisfactoriamente sus distintas fases: germinación, crecimiento y maduración, debe de contar con condiciones climáticas favorables, las principales son:

**Temperatura**, la optima para la geminación de las yemas y el desarrollo del cultivo, se ubica entre los 27 a 33°C, cuando la temperatura es menor, el crecimiento disminuye, y cuando es mayor, aumenta la respiración y disminuye la tasa fotosintética, lo que ocasiona una reducción en el crecimiento y por lo tanto menor acumulación de materia seca.

No solo la temperatura ambiental es un factor importante, sino también la del suelo, debido a que juega un papel importante en el desarrollo radical, en la absorción de nutrimentos y la actividad biológica. Esta temperatura debe de encontrarse alrededor de los 27 °C.

**Precipitación.** La caña de azúcar puede prosperar en una amplia diversidad de zonas con diferentes regímenes de lluvia. El suministro de agua, ya sea de forma natural o mediante riego es necesario durante todo el periodo de crecimiento, en promedio se requieren de 1200 a 1500 mm anuales distribuidos de tal forma que la mayor disponibilidad de agua se tenga durante el periodo vegetativo. Tanto la sequia como los excesos de humedad son perjudiciales.

**Radiación.** La proveniente del sol es la principal fuente de energía para las plantas. Estas utilizan determinadas longitudes de onda (entre 400 y 700 nanómetros, que corresponde al ámbito de la radiación fotosintéticamente activa). La caña de azúcar pertenece al grupo de las plantas que poseen un metabolismo tipo C4, existen sin embargo diferencias en la capacidad de asimilación entre variedades. Por lo general, las plantas expuestas a pleno sol, producen tallos cortos y gruesos, hojas de mayor longitud, contrario a las plantas expuestas a poca luminosidad.

**Viento.** Según sea su velocidad, daña el follaje, aumenta la evapotranspiración, disminuye el crecimiento, causa la ruptura de tallos o en casos extremos, pérdida total del cultivo.

Existen algunos otros factores del clima que particularmente son de zonas más alejadas de los trópicos, como son las granizadas y las heladas.

### **Requerimientos edáficos.**

La caña de azúcar puede desarrollarse en una amplia variedad de suelos, desde arcillosos pesados, hasta completamente orgánicos, sin embargo, unos presentan mejores características que otros para que el cultivo de la caña se desarrolle favorablemente. Es aconsejable que la textura del suelo sea franco arcillosa, franco arenosa o limosa, con buena estructura y capacidad de retención de humedad, pero a la vez friable y con un horizonte profundo, sin problemas de drenaje y salinidad, características que deben predominar por lo menos los primeros 50cm del suelo,

donde se localiza la mayor cantidad de raíces, el nivel freático debe de estar preferentemente por debajo de los 75cm. El pH debe de oscilar entre los 5.5 y 8.0.

### **Técnica de covarianza de remolinos.**

La técnica de eddy covariance estima la tasa de intercambio de CO<sub>2</sub> a través de la interface entre la atmosfera y el dosel de la planta mediante mediciones de la covarianza entre las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento y la relación de mezcla de CO<sub>2</sub> (Baldocchi, 2003). Este método es uno de los más directo para medir los flujos de agua, energía y CO<sub>2</sub> por encima de un cultivo u otro ecosistema (Ham y Heilman, 2003).

La esencia del método es que los flujos verticales pueden presentarse como una covarianza entre las mediciones verticales del viento, los movimientos ascendentes y descendentes y la concentración de la entidad de interés.

La capa superficial se compone de aproximadamente el 10% de la capa límite de la atmosfera. Los flujos de vapor de agua y de calor en esta capa, son aproximadamente constantes con respecto a la altura, cuando se toma en cuenta el siguiente criterio: la superficie tiene homogeneidad horizontal aproximada. El sistema de *eddy covariance* mide directamente el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente, si la radiación neta y el flujo de calor en el suelo también son medidos, se

puede hacer el cierre del balance de energía, y puede ser examinado usando la ecuación del balance de energía de una superficie:

$$1$$

Donde  $R_n$  es la radiación neta,  $G$  es flujo total de calor en el suelo,  $LE$  es el flujo de calor latente y  $H$  es el flujo de calor sensible.  $LE$  y  $H$  están dadas por:

$$2$$

$$3$$

Donde  $L_v$  es el calor latente de vaporización del agua,  $w'$  es la desviación instantánea de la velocidad vertical del viento con respecto a la media,  $\rho'_v$  es la desviación instantánea de la densidad del vapor de agua con respecto a la media,  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $C_p$  es la capacidad calorífica del aire a presión constante y  $T$  es la desviación instantánea de la temperatura con respecto de la media (Campbell Scientific, 1998).

El método de eddy covariance es más preciso cuando las condiciones atmosféricas (viento, temperatura, humedad y  $CO_2$ ) son estables, la vegetación subyacente es homogénea y cuando la torre, que soporta los sensores y el equipo, está situada en un terreno plano (Baldocchi, 2003). La conservación de la energía, representada por

el balance de energía en una superficie vegetal, es un eje teórico que los micrometeorólogos usan para evaluar la precisión de las mediciones de los flujos de masa y está dada por la ecuación 1, todo expresado en  $W m^{-2}$  (Ham y Heilman, 2003).

Este método se utiliza como una importante herramienta para medir de forma continua los intercambios de bióxido de carbono y vapor de agua entre los ecosistemas terrestres y la atmosfera.

### **Intercambio Neto de Bióxido de Carbono del Ecosistema.**

El intercambio neto de bióxido de carbono de un ecosistema (NEE por sus siglas en ingles) medido con un sistema de covarianza de remolinos tiene como objetivo final la partición de los flujos mediante algoritmos para estimar la respiración del ecosistema (Reco) y la retención neta de bióxido de carbono de un ecosistema ( $RNCO_2$ ) de acuerdo a la definición de la ecuación.

4

Estos algoritmos de partición de flujos pueden clasificarse de acuerdo en los usos (filtrados) de los datos de la noche para la respiración y los datos del día para la asimilación, estos últimos los relaciona y compara con las curvas de los flujos de energía del periodo diurno (Marcus *et al.*, 2005). Estos son controlados por procesos físicos y biológicos que varían a escalas temporales múltiples (Law *et al.*, 2002).

El NEE depende de la actividad fotosintética que fija el CO<sub>2</sub> atmosférico y de la respiración que libera CO<sub>2</sub> 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 organismos y microorganismos del suelo (respiración heterotrófica del suelo) (Janssens *et al.*, 2001).

Los campos de cultivo representan aproximadamente el 12% de la superficie del planeta (Wood *et al.*, 2000) y por lo general poseen un mayor intercambio neto de bióxido de carbono que los ecosistemas naturales (Verma *et al.*, 2005, Barford *et al.*, 2001)

Saliendra *et al.* (1995) Estudiaron los flujos de bióxido de carbono en cuatro clones de caña de azúcar bajo tres regímenes de riego durante 65 días bajo condiciones de invernadero, encontraron que las variaciones de intercambio gaseoso son atribuibles a la variación en la permeabilidad de la haz de la vaina al CO<sub>2</sub> debido a que la presión parcial intracelular de CO<sub>2</sub> en condiciones ambientales permanece relativamente constante, excepto a niveles relativamente bajos de disponibilidad de agua.

Osvlado *et al.* (2003) midieron los flujos de calor sensible, vapor de agua y CO<sub>2</sub> sobre el dosel de un cultivo de caña de azúcar, donde obtuvieron un promedio de 2.3mm día<sup>-1</sup> de evapotranspiración, los flujos máximos de CO<sub>2</sub> observados durante el verano fueron de 50μmolCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>.



Igrea *et al.* (2008) realizaron mediciones de NEE en pastizales mediterráneos de especies C3-C4, durante los años 2004-2005 (seco) y 2005-2006 (normal), dichos años se caracterizaron por tener diferencias en eventos hidrológicos y encontraron que para el año seco el NEE fue de  $49 \text{ g C m}^{-2}$  y para el año normal fue de  $-190 \text{ g C m}^{-2}$ . Por lo tanto, los pastizales fueron un recurso de carbono para la atmosfera durante los años secos y un sumidero considerable de carbono para el año húmedo.

Verma *et al.* (2005) Evaluaron diferentes sistemas de producción: maíz con riego, maíz-soya de riego y maíz de temporal, durante tres años, reportaron que dentro de los diferentes sistemas de producción, el que representa una mayor fuente de emisiones de  $\text{CO}_2$  hacia la atmosfera es el de maíz-soya con riego y la que representa una menor fuente es el de maíz-soya de temporal.

Reichstein *et al.* (2007) en un estudio realizado en los bosques del hemisferio norte de Europa que el nivel de sumidero del ecosistema, no es el factor que determina completamente la producción primaria neta, cuando los factores climáticos son limitantes. señalaron que la disponibilidad de agua es por lo general un regulador importante en la producción primaria neta.

Las diferencias interanuales del intercambio neto de bióxido de carbono entre localidades podrían ser atribuidas a disturbios históricos, climáticos, nutricionales, tipo de bióma y diferencias fisiológicas asociadas con la edad (Law *et al.*, 2001, Schulze *et al.*, 1999, 2000)

### **Eficiencia cuántica e intrínseca del uso del agua.**

El uso eficiente del agua ha sido reconocido como una importante característica de la producción de biomasa en varias disciplinas de las ciencias naturales por décadas, recientemente se ha determinado a nivel ecosistema, donde existen diferentes métodos para caracterizar el uso eficiente del agua. Este parámetro puede ser calculado de diferentes formas, dependiendo de las escalas temporales y espaciales de interés, o bien de la cuestión científica de interés. Sin embargo varias definiciones de uso eficiente del agua son aplicadas en diferentes disciplinas científicas, la característica común en la eficiencia del uso del agua es la relación de la ganancia de carbón con respecto a la pérdida de agua (Kuglitsch *et al.*, 2008).

El uso eficiente del agua (WUE por sus siglas en inglés) es una manera de llamar una relación entre dos entidades fisiológicas (fotosíntesis y transpiración) o agronómicas (rendimiento y consumo de agua del cultivo) (Blum., 2005). Se puede inferir que el WUE instantáneo y WUE intrínseco es utilizada para definir la relación entre la tasa fotosintética neta con la transpiración y la conductancia estomática (Pita *et al.*, 2005).

Para calcular el WUE mediante el método Eddy covariance, en esta investigación se utilizó la relación de los valores integrados diurnos de los flujos de CO<sub>2</sub> y evapotranspiración.

Los niveles de radiación fotosintéticamente activa (PAR) tienen una gran influencia sobre el crecimiento y rendimiento de las plantas, como se puede observar en plantas bajo condiciones de sombra, comparadas con las que están en luz solar total. Al igual que el WUE, la eficiencia cuántica puede ser definida como la relación entre los moles de CO<sub>2</sub> fijados por cada micromol de fotón PAR interceptado. Por otra parte, la relación entre la cantidad de materia seca producida por unidad de radiación fotosintéticamente absorbida es usualmente descrita como el uso eficiente de la radiación (Stockle *et al.*, 2003).

La asimilación del bióxido de carbono puede ser medida de forma indirecta sobre el dosel de un cultivo y de esta manera se determina la eficiencia cuántica de este (Muchow y Sinclair, 1997).

El valor de la eficiencia cuántica de un dosel está usualmente determinado por la pendiente de la regresión entre la radiación fotosintéticamente absorbida y la asimilación de CO<sub>2</sub> de la parte vegetal del ecosistema (Pitman, 2000).

Park *et al.*, (2005) define el uso eficiente de la radiación como la cantidad de biomasa neta acumulada por encima del suelo por unidad de radiación interceptada. Estos investigadores encontraron que los cultivos de caña de azúcar en Australia, más de la mitad de los 34 sitios experimentales el uso eficiente de la radiación del cultivo, disminuye dentro de los 223 y 665 días después del inicio del cultivo. La media máxima del uso eficiente de la radiación en el cultivo en planta fue mayor que el cultivo en soca en 1.37 y 1.19 g MJ<sup>-1</sup> respectivamente.

Datos disponibles sugieren que el incremento de la diferencia de la presión de vapor entre el aire sub-estomático y el aire que rodea las hojas puede inducir a la reducción en la conductancia de la hoja y la capacidad fotosintética de plantas bien regadas y por lo tanto una reducción en el uso eficiente de la radiación tanto en sorgo como en maíz (Stockle y Kiniry, 2003).

Sivamani *et al.* (2000) reportan valores de uso eficiente de agua de hasta  $0.68 \text{ g kg}^{-1}$  en un trigo de verano transgénico, el cual creció en maceta con un moderado déficit hídrico.

Yu *et al.* (2007) con la utilización de sistemas de covarianza de remolinos, encontraron variaciones de WUE en tres sitio de bosques en china, cuyos valores fueron de 9.43, 9.27 y  $6.90 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ , el primero tiene características de amplios niveles de temperatura, el segundo es una plantación de coníferas subtropicales y el tercero un bosque siempre verde de amplio nivel. También encontraron que la temperatura y los ecosistemas de bosques subtropicales tienen diferentes relaciones entre la producción primaria neta y la evapotranspiración. Las variaciones encontradas en el uso eficiente del agua indican diferencias del acoplamiento entre los ciclos del carbono y agua.

El impacto en el rendimiento del cultivo de la variación genética en el uso eficiente del agua puede depender de tres factores: el impacto de la variación en el uso eficiente del agua en la tasa de crecimiento del cultivo, el impacto en la variación en el uso eficiente del agua en la tasa del uso del agua del cultivo y como el crecimiento

y el uso del agua interactúan sobre la duración del cultivo para producir el rendimiento en grano (Condon *et al.*, 1999).

Los dos componentes del rendimiento de la caña son la biomasa y la sacarosa de ésta. Al Incrementar una o ambas se puede promover el incremento del rendimiento. Maximizando la radiación interceptada, la eficiencia en el uso de la radiación, o ambas. La fecha de inicio del cultivo tiene un impacto significativo sobre la intercepción de la radiación, así como el inicio del retoño (soca) (Singels *et al.*, 2005).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### **Sitio de estudio.**

El estudio se realizó en un cultivo de caña de azúcar en el rancho “Santa Anita”, (Figura 3.1). El predio se ubica en el Km 3.0 de la carretera interestatal “Y” Griega-Ingenie “Aarón Sáenz Garza” en el municipio de Xicoténcatl, 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 predominante de la región es semi-húmedo cálido con temperatura media anual de 24.8 °C, con una precipitación promedio anual de 1,040.6 mm y una evaporación de 1,572 mm (CNA, 2005). Predominando los vientos del sur y sureste. Siendo frecuentes los frentes fríos del norte en otoño e invierno.



Figura 3.1. Plantación de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en el rancho Santa Anita, municipio de Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

La siembra se realizó del 2 al 4 de octubre de 2007 utilizando la variedad CP 722086. En total se aplicaron 10 riegos por año de una lámina de aproximadamente 15 cm por riego. La fertilización consistió en 500 Kg ha<sup>-1</sup> de la formulación 22-11-55 al momento de la siembra, y 500 kg ha<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> de sulfato de amonio, aplicadas el 10 de marzo, 30 de abril y 10 de julio.

Las mediciones se realizaron en una fracción del terreno, 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 planta), y del 9 al 22 de octubre de 2009 (en soca), en la zafra 2009-2010.

### **Instrumentación y Mediciones.**

Los estudios que caracterizan los flujos de masa y energía son esenciales para comprender procesos que van desde el comportamiento de las plantas hasta el desarrollo de modelos orientados a predecir el tiempo y los cambios climáticos (Granier *et al.*, 2003). En los flujos de masa destacan, el flujo de vapor de agua ( $H_2O$ ) y el de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), ya que son los responsables de los procesos fisiológicos de transpiración, respiración y asimilación, los cuales son vitales para las plantas.



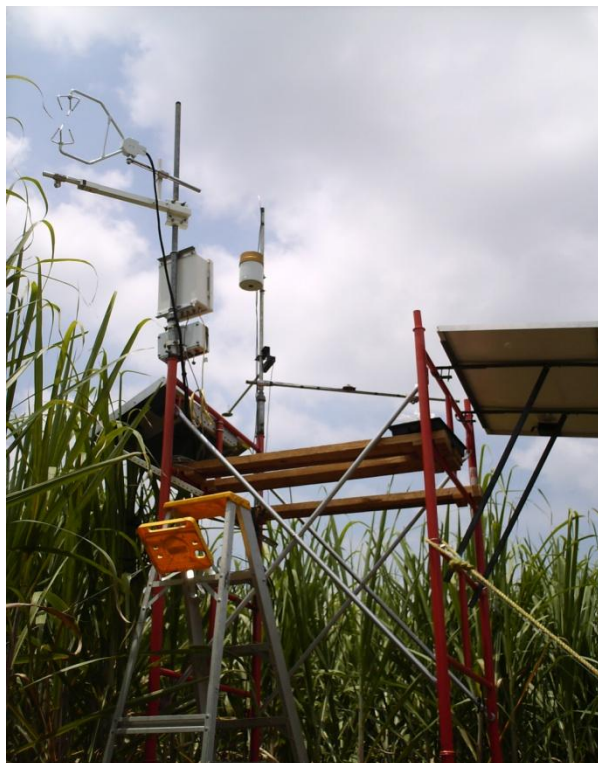


Figura 3.2. Sistema de covarianza de remolinos montado sobre andamios a más de 6 m sobre el nivel del suelo, en una plantación de caña de azúcar del rancho Santa Anita, en el municipio de Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

El flujo turbulento de una entidad de masa gaseosa en una plantación o en un cultivo se calcula a partir de las medidas de las fluctuaciones de los componentes del viento y la concentración de entidad que nos interesa. El movimiento gaseoso se desplaza en tres dimensiones es difícil de describir, pero si suponemos mediciones en intervalos de tiempo iguales (fijos), una parcela lo suficientemente amplia (la homogeneidad permite despreciar el transporte horizontal), y una ubicación plana (la velocidad vertical media es nula):

El flujo en la altura  $z$  es el flujo difusivo sumado a la contribución de las fuentes y sumideros en la capa debajo de la medición.

Los flujos de LE y H se obtuvieron mediante el método eddy covariance, para el caso de medir los flujos de  $\text{CO}_2$  se utiliza la fórmula general:

6

Donde  $W$  es la velocidad vertical del viento y  $\rho_{\text{CO}_2}$  es la densidad del bióxido de carbono, La barra horizontal representa el valor medio del producto de las desviaciones en un determinado segmento de tiempo (en este caso 30 min).

Para corroborar la fiabilidad de los flujos obtenidos, se determinó el balance de energía sobre la superficie vegetal mediante la fórmula 1.

La velocidad vertical del viento y la temperatura sónica se midieron con un anemómetro sónico tridimensional (CSI-CSAT3, Campbell, Sci, Inc), mientras que el vapor de agua y el  $\text{CO}_2$  se midieron con un analizador infrarrojo de sendero abierto (open path  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  analyzer, LI-7500; LI-COR). Ambos sensores se montaron 2 metros sobre el dosel de la vegetación. 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* de por lo menos 200 m (cada metro de elevación sobre la vegetación de los sensores corresponde a por lo menos 50-100 metros para que se estabilicen los flujos sobre la superficie vegetal),

en la dirección norte-sur y 100 m en la dirección este-oeste respecto a la orientación del anemómetro sónico tridimensional (Figura 3.2). Las variables fueron medidas a una frecuencia de 10 Hz, y las covarianzas se calcularon cada 30 minutos.

El flujo de calor latente (LE) y el de bióxido de carbono ( $\text{FCO}_2$ ) se corrigieron por efectos de densidad. 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  $\text{CO}_2$  se corrigió con el mismo factor (Ham y Heilman, 2003). La temperatura del aire se midió con un sensor de temperatura y humedad relativa (HP45C, Vaisala, Inc), a una frecuencia de 1 s y promedios de 30 min a dos metros sobre el dosel.

## 7

La radiación neta se midió con un radiómetro neto (LITE, Keep and Zonen), el sensor se colocó a la misma altura de los demás sensores. El flujo de calor en la superficie del suelo (G) se midió por medio de 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 centro de 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 cada 30 minutos.

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

$$\text{---} \qquad \qquad \qquad 8$$

Donde:  $FCO_2$ , es el flujo de bióxido de carbono medido con el método de la covarianza eddy,  $\Delta pCO_2$  es el cambio en la densidad del  $CO_2$ ,  $t$  es el intervalo de tiempo (30 min) y  $z$  es la altura a la que se realizaron las mediciones (2 metros sobre la superficie vegetal). 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. Los dos tipos de radiación 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 se registraron los promedios de cada 30 minutos.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### **Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema de caña en fase de planta y soca.**

Del 16 al 18 de octubre de 2008 (planta) la mayor tasa instantánea de NEE fue de 30  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , mientras que la mayor tasa instantánea de liberación fue de 6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (figura 4.1). El máximo intercambio diario de bióxido de carbono observado en esta etapa del cultivo fue menor al que observaron Verma *et al.*, (2005) en cultivares de maíz de riego y de temporal, ya que los valores instantáneos de los flujos de asimilación de  $\text{CO}_2$  durante la etapa de máximo desarrollo fueron de 59-68  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , sin embargo durante el periodo nocturno, estos cultivos mostraron valores de liberación de  $\text{CO}_2$  de 9-16  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . En comparación con la soya plantas con fotosíntesis C3 los valores máximos de asimilación diarios fueron de 34-39  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , mas sin embargo este cultivo presentó valores similares a los del maíz en cuanto a la liberación nocturna de  $\text{CO}_2$ .

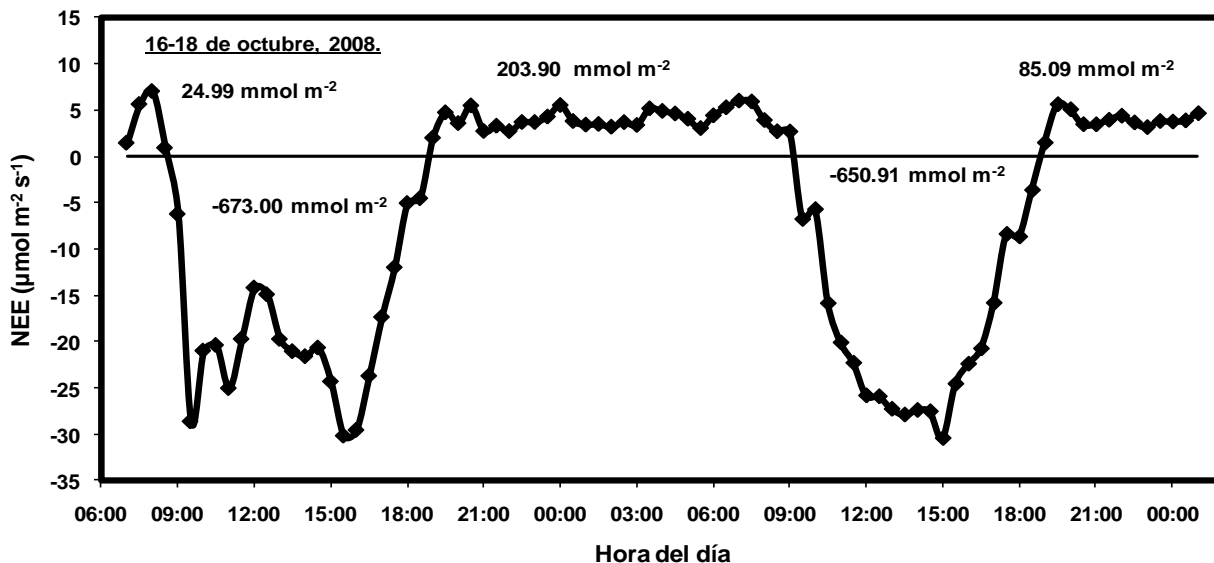


Figura 4.1. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema, y valores integrados ( $\text{mmol m}^{-2}$ ) observados del 16 al 17 de octubre de 2008 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México, sobre un cultivo de caña de azúcar (planta); Nota: valores negativos indican asimilación y positivos liberación de  $\text{CO}_2$  por el ecosistema.

El 18 de octubre se observó que el decremento en la tasa instantánea de NEE observado en la Figura 4.2, ocurrió a la misma hora del día en que se presentó un decremento en la tasa de absorción de la radiación fotosintéticamente activa ( $\text{PAR}_{\text{abs}}$ ) y en el flujo de calor latente (Figura 4.3). Lo que demuestra la alta sensibilidad del NEE y de flujo de calor latente a los cambios en la PAR absorbida, principalmente a las 13:30 h donde este efecto es más visible. Flanagan *et al.*, (2002) observaron un comportamiento similar en el intercambio neto de bióxido de carbono estacional e interanual con respecto a la densidad del flujo de fotones fotosintéticamente activos en pastizales templados al norte de Canadá. Miranda *et al.*, (1997) y Santos *et al.*, (2004) observaron que los flujos de  $\text{CO}_2$  fluctúan con respecto a las variaciones en el comportamiento de la radiación neta incidente, el

flujo de calor latente y la radiación fotosintéticamente activa que incide sobre el dosel de una mezcla de arbustos, arboles y pastos y en un pastizal en la región de Cerrado Brasil.

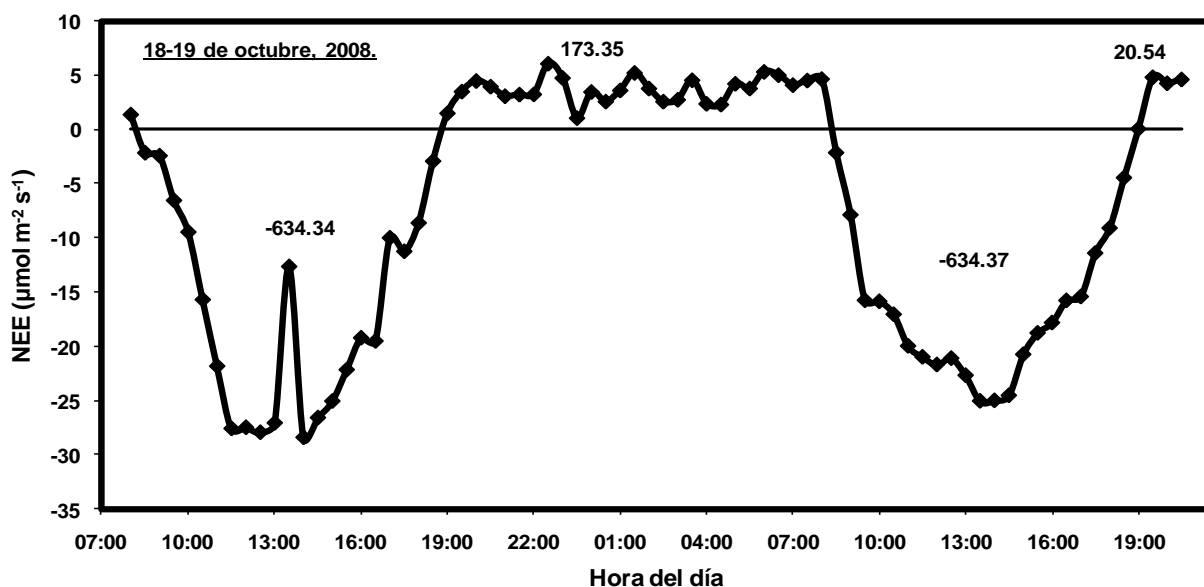


Figura 4.2. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema, y valores integrados ( $\text{mmol m}^{-2}$ ) observados del 18 al 19 de octubre de 2008, sobre un cultivo de caña de azúcar (planta); Nota: valores negativos indican asimilación y positivos liberación de  $\text{CO}_2$ .

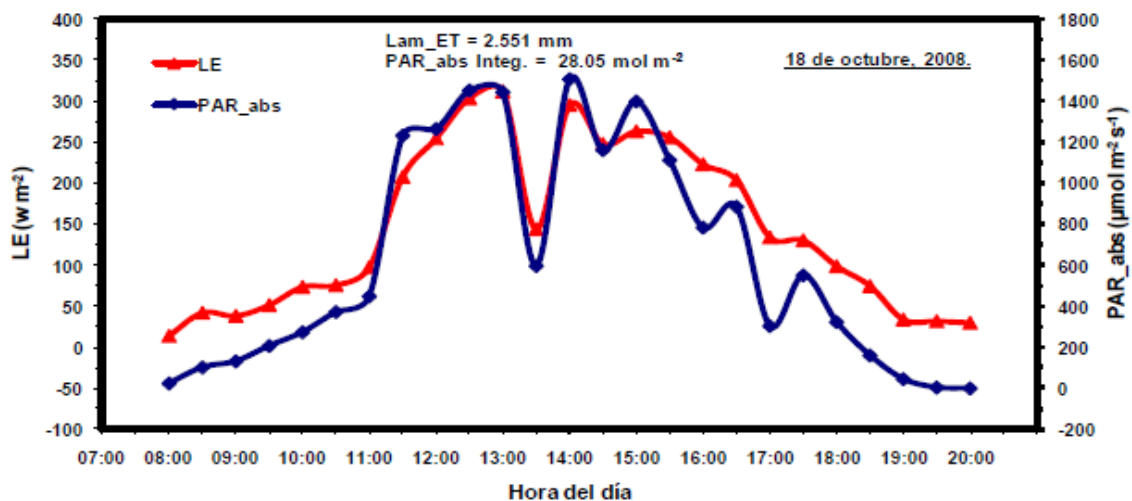


Figura 4.3. Flujos diarios de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR\_abs) por un cultivo de caña de azúcar (planta); la lámina de agua evapotranspirada (Lam\_ET) y PAR\_abs integrada durante el día, observados el 18 de octubre de 2008 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

Del 9 al 11 de octubre de 2009 (soca) la máxima tasa instantánea diurna de NEE fue muy similar a la observada en la fase de planta ( $-28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), y también se presentó entre las 11:00 y las 16:00 h. se observó que durante la noche, la máxima tasa instantánea de NEE fue de hasta  $9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figura 4.4). La máxima tasa diurna de NEE indicó el potencial de asimilación de  $\text{CO}_2$  que tiene este ecosistema vegetal, debido a que la tasa de NEE observada en caña de azúcar es mucho mayor a la que tiene 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).

Los pequeños decrementos en la tasa instantánea de NEE observado el 9 y 11 de octubre de 2009 (Figura 4.4) 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. Esto demostró y corrobora 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 de flujo de calor latente muy baja (Figuras 4.5). 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 arboles caducifolios del Noreste de Estados Unidos.



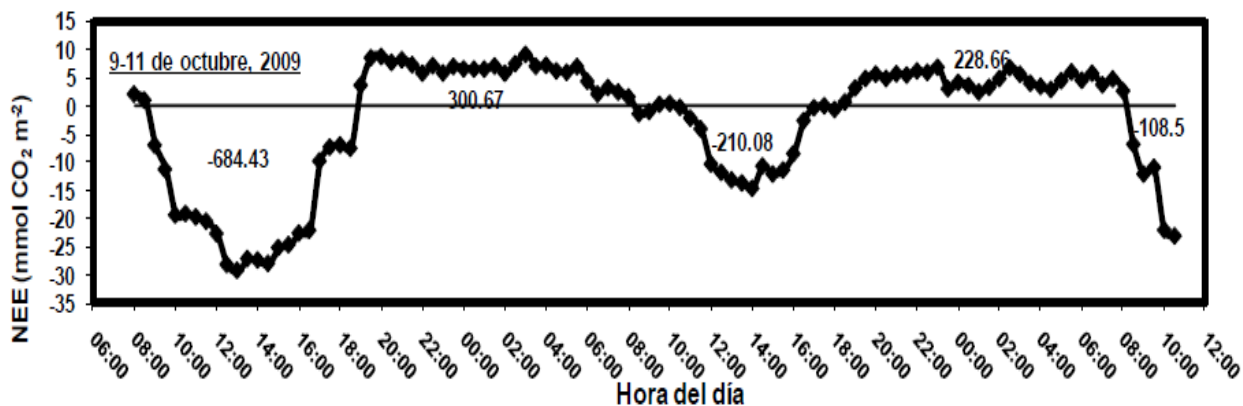


Figura 4.4. Tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE), y valores integrados ( $\text{mmol m}^{-2}$ ) observados del 9 al 11 de octubre de 2009, sobre un cultivo de caña de azúcar (soca); valores negativos indican asimilación y positivos liberación de  $\text{CO}_2$  por el ecosistema observado en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

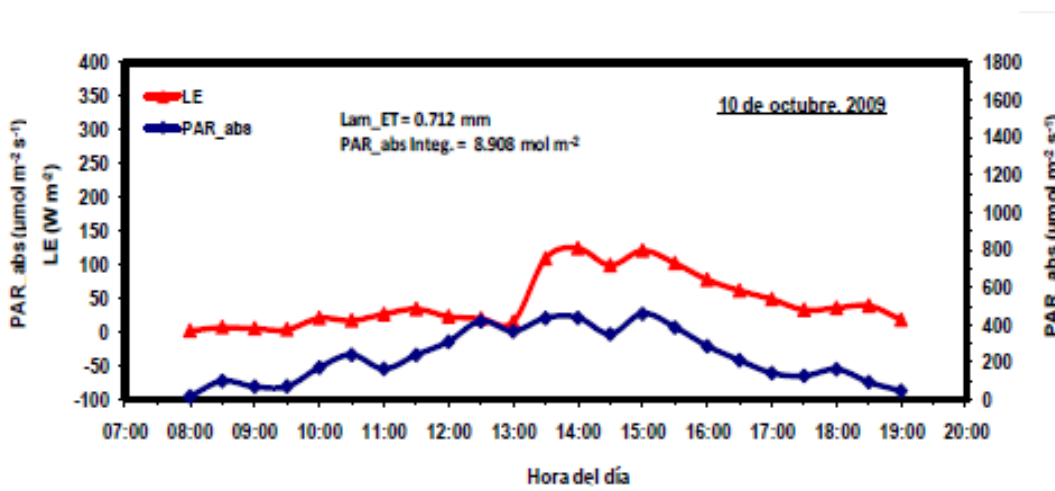


Figura 4.5. Flujos diarios de calor latente (LE) y radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR\_abs) por un cultivo de caña de azúcar (soca); la lamina de agua evapotranspirada (Lam\_ET) y PAR\_abs integrada durante el día, observados el 10 de octubre de 2009 en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

Tanto en la fase de planta como en soca del cultivo de caña, los valores máximos de la tasa instantánea de NEE se observaron entre las 11:00 y las 16:00 h. Además las fluctuaciones instantáneas diurnas 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.

### **Relación entre la tasa del intercambio neto de bióxido de carbono y la tasa de evapotranspiración en condiciones de planta y de soca.**

La relación entre la tasa del intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la tasa de evapotranspiración (ET), tanto en planta como en soca presento una tendencia de forma parabólica (Figura 4.6). Esto indicó que a partir de un determinado valor de la tasa de evaporación, los incrementos adicionales no inciden en los valores de la tasa de asimilación de bióxido de carbono del ecosistema. Esto probablemente se debió a que una mayor demanda evaporativa de la atmosfera, resulto en una mayor apertura de los estomas que incidió en una mayor tasa de evapotranspiración, pero no una mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub>, debido a que la resistencia tanto del aire como de los estomas de las hojas al flujo de CO<sub>2</sub> es mayor que al flujo del vapor de agua. Sasaki *et al* (2005) observaron un comportamiento similar en la eficiencia de la evapotranspiración con respecto al aumento de la radiación en un cultivar de caña de azúcar en las islas Miyako. De igual forma, Dolman *et al.*, (2004) reportaron que el intercambio neto de bióxido de carbono no se incrementa a valores mayores de evapotranspirativa en un bosque de ciprés.

Los coeficientes lineales de las ecuaciones parabólicas (Figura 8), representan la eficiencia intrínseca potencial del uso del agua del dosel del cultivo. Nótese que el

coeficiente lineal de la ecuación parabólica para condiciones en fase de planta ( $10.788 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ ) es mayor que el observado para condiciones de soca ( $8.724 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ ), lo que indica una mayor eficiencia del follaje en condiciones de planta que en soca para la asimilación de bióxido de carbono.

La tasa de evapotranspiración a la que se alcanza la máxima tasa de asimilación de bióxido de carbono por el dosel del cultivo se obtiene derivando la ecuación parabólica de la Figura 8. Para condiciones de planta se obtuvo un valor de  $5.46 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , mientras que para condiciones de soca fue  $6.8 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Esto nuevamente indicó una mayor eficiencia intrínseca del uso del agua en condiciones de planta, ya que con una menor tasa de evapotranspiración se obtiene la máxima tasa de NEE.

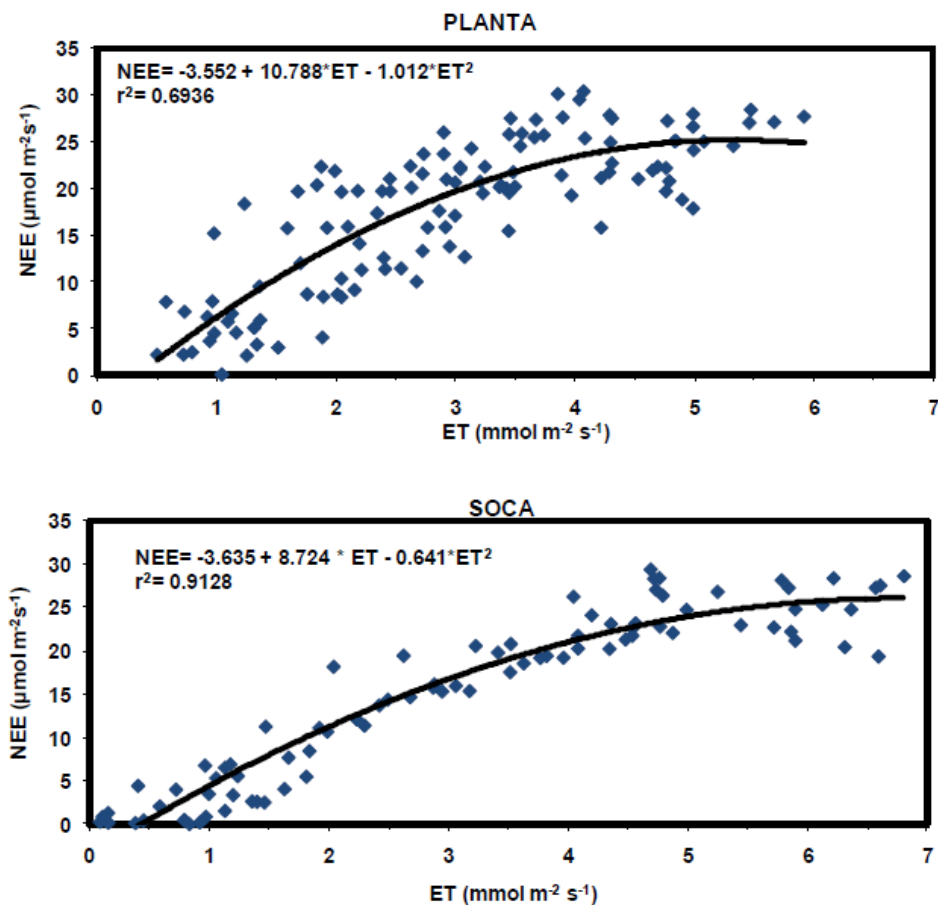


Figura 4.6. Relación entre la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la tasa de evapotranspiración (ET) observada sobre un cultivo de caña de azúcar durante el otoño de 2008 (planta) y el otoño de 2009 (soca) en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

**Relación entre la tasa del intercambio neto de bióxido de carbono y la tasa de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel del cultivo en condiciones de planta y de soca.**

De igual forma se observó una relación parabólica (planta y soca) directamente proporcional entre la tasa del intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema

(NEE) y los correspondientes a la tasa de radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR\_abs) por el dosel del cultivo (Figura 4.7). Esto sugiere que a partir de un cierto valor de PAR\_abs, incrementos adicionales de esta no se reflejan en incrementos en el NEE. Esto probablemente se debió a que las hojas del cultivo se saturaron de radiación a niveles relativamente bajos, de tal forma que la absorción adicional de PAR, la planta de caña no la 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.

El coeficiente lineal de las relaciones parabólicas de la Figura 9 representa el potencial de eficiencia del uso de la luz por el dosel del cultivo. Nótese que el coeficiente lineal en condiciones de planta ( $0.044 \mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol photons}$ ) fue mayor al observado en condiciones de soca ( $0.042 \mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol photons}$ ). Esto demostró una mayor eficiencia del uso de la luz por el dosel el cultivo en condiciones de planta.

El máximo valor del NEE se obtiene derivando la función parabólica (Figura 9). Para condiciones de planta se obtuvo un valor de  $22.44 \mu\text{mol CO}_2$ , mientras que para condiciones de soca fue  $18.15 \mu\text{mol CO}_2$ , esto nuevamente mostró una mayor capacidad de asimilación de  $\text{CO}_2$  por el dosel del cultivo en condiciones de planta.

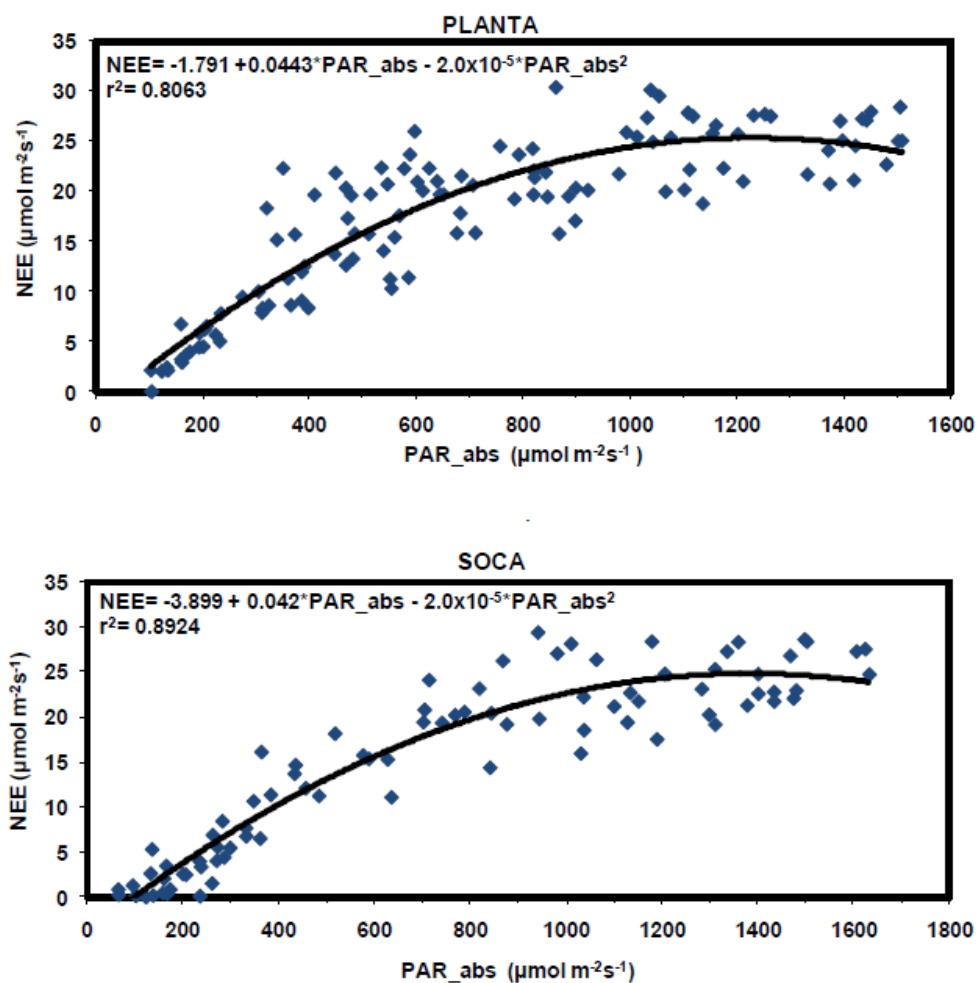


Figura 4.7. Relación entre la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema (NEE) y la tasa de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el ecosistema (PAR\_abs), observado sobre un cultivo de caña de azúcar durante el otoño 2008 (planta) y otoño 2009 (soca) en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

## **Flujos integrados promedio diarios, eficiencias y rendimiento del cultivo en condiciones de planta y de soca**

El ecosistema de la plantación de caña en condiciones de planta fue más eficiente que en condiciones de 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 NEE ( $581.230 \text{ mmol\_CO}_2 \text{ mol\_H}_2\text{O}^{-1}$ ) fue mayor al observado en condiciones de soca ( $523.596 \text{ mmol\_CO}_2 \text{ mol\_H}_2\text{O}^{-1}$ ). También se observó que tanto la eficiencia intrínseca promedio diaria del uso del agua (Ef\_H<sub>2</sub>O) como la eficiencia promedio diaria del uso de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (Ef\_PAR\_abs) fue mayor en el ecosistema bajo condiciones de planta que en condiciones de soca (Cuadro 1). La menor tasa de asimilación de bióxido de carbono, menor eficiencia intrínseca del uso del agua y de la PAR correspondió con un menor rendimiento del cultivo en condiciones de soca (Cuadro 1). Estudios previos muestran que la altura y el peso unitario del tallo decrecen cuando el ciclo de producción pasa de planta a 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 cuando el ciclo de producción cambia de planta a soca.

Cuadro 4.1. 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 y rendimiento. Observados en condiciones de planta y soca, en Xicoténcatl, Tamaulipas, México.

	<b>Planta</b> Otoño 2008	<b>Soca</b> Otoño 2009
<b>PAR_abs</b> (mol fot m <sup>-2</sup> )	24.830	24.863
<b>LE</b> (MJ m <sup>-2</sup> )	5.460	5.634
<b>ET</b> (mol m <sup>-2</sup> )	123.840	127.755
<b>NEE</b> (mmol m <sup>-2</sup> )	581.230	523.596
<b>Ef_H2O</b> (mmol_CO <sub>2</sub> mol_H2O <sup>-1</sup> )	4.840	4.264
<b>Ef_PAR_abs</b> mmol_CO <sub>2</sub> mol_fot <sup>-1</sup> )	24.110	21.310
<b>Ef_PAR_abs</b> %	5.190	4.589
<b>Rendimiento</b> (t ha <sup>-1</sup> )	87	72.25



## V. CONCLUSIONES

El ecosistema de caña de azúcar con fotosíntesis tipo C4 mostró un alto potencial de asimilación de bióxido de carbono, tanto en la fase de planta como en soca, debido a que la tasa instantánea de bióxido de carbono del ecosistema fue mayor a la reportada en bosques y praderas de distintas especies pese que el estudio se llevo a cabo en otoño.

La tasa instantánea de intercambio neto de bióxido de carbono del ecosistema cañero en los dos primeros ciclos de cultivo fue muy sensible a los cambios en la tasa de evapotranspiración y absorción de la radiación fotosintéticamente activa.

La relación entre la tasa de intercambio neto de bióxido de carbono (NEE) y la tasa de evapotranspiración diaria (ET) fue parabólica, lo que demuestra que después de que el cultivo alcanza un determinado valor en la tasa de ET, incrementos adicionales no aumentan la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> del ecosistema. De igual forma, la relación entre la tasa de NEE y la tasa de absorción de la radiación PAR, también fue parabólica, por lo tanto, después de que el cultivo un determinado valor de absorción de radiación PAR, los incrementos adicionales en la absorción de la radiación PAR, no aumentan la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> del ecosistema.

El intercambio neto de bióxido de carbono, la eficiencia intrínseca del uso del agua y de la radiación fotosintéticamente activa absorbida promedio diaria del ecosistema fue mayor en condiciones de planta que en condiciones de soca, lo que se manifestó en el rendimiento del cultivo.

## VI. LITERATURA CITADA

- Andrade, F. H., S. A. Uhart and A. Cirilo. 2003. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Research* Vol. 32: pp. 17-25.
- Baldocchi, D. D. (2003). Assessing the Eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global changes biology*. Vol. 9: pp. 1-14.
- Barford, C. C., C. Wofsy Steven, Michael L. Goulden, J. William Munger, Elizabeth Hammond Pyle, Shawn P. Urbanski, Lucy Hutyra, Scott R. Saleska, David Fitzjarrald and Kathleen Moore. (2001). Factors Controlling Long- and Short-Term Sequestration of Atmospheric CO<sub>2</sub> in a Mid-latitude Forest. *Science*. Vol. 294: pp. 1688-1691.
- Campbell Scientific, INC. (1998). Instruction manual Eddy covariance system CA27 and KH<sub>2</sub>O.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2005. Normales climatológicas de estación meteorológica del ingenio Mante, Subgerencia Regional Golfo Norte, Cd. Victoria, Tam., México.
- Condon, A. G.; Richards R. A.; Rebetzke G. J. and Farquhar G. D. (1999). Improving Intrinsic Water-Use Efficiency and Crop Yield. *Crop science*. vol. 42: pp. 122-131.
- Cuenya, I. M, B. G. María, R. D. Carolina, O. Santiago, C. Diego and R.R. Eduardo. (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*. Las Talitas, Tucumán, Argentina. vol.84 num.1.
- D'Hont, A., G. M. Souza, M. Menossi, M. Vincentz, M. Van-Sluis, J. C. Glaszmann and E. Ulian. 2008. Sugarcane: A Major Source of Sweetness, Alcohol, and Bio-energy. *Genomics of Tropical Crop Plants*. Vol. 1: pp. 483-513.
- 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*. Vol. 1: pp. 133–146.
- Flanagan, B. L., A. W. Linda and J. C. Peter. (2002). Seasonal and interannual variation in carbon dioxide Exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology* . Vol. 8: pp. 599-615.
- 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*. Vol. 2: pp. 169-182.
- Granier, A., Ceschia, E., Damesin, C., Dufrene, E., Epron, D., Gross, P., 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. *American Society of Agronomy*. Vol. 95: pp. 1393–1403.
- Guzmán, C., M. Spada. del C. and J. C. Mombelli. 2007. Eficiencia del uso de la radiación de cultivos de alfalfa de distinto grado de reposo en Córdoba, Argentina. APPA – ALPA.
- 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. *Agrono. Journal*. Vol. 95: pp. 1393-1403.
- 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*. Vol. 7: pp. 269 – 278.
- 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 and J B Moncrieff. (1992). Surface flux measurements in FIFE: an overview. *J. Geophysics Res*. Vol. 97: pp. 18547- 18555.
- Kiniry, J. R., C. A. Jones, J. C. O'toole, R. Blanchet, M. Cabelguenne and D. A. Spanel. 1989. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. *Field Crops Research*. Vol. 20: 51-64.
- Kuglitsch, F. G., M. Reichstein, C. Beer, A. Carrara, R. Ceulemans, A. Granier, I. A. Janssens, B. Koestner, A. Lindroth, D. Loustau, G. Matteucci, L. Montagnani, E. J. Moors, D. Papale, K. Pilegaard, S. Rambal, C. Rebmann, E. D. Schulze,

- G. Seufert, H. Verbeeck, T. Vesala, M. Aubinet, C. Bernhofer, T. Foken, T. Grünwald, B. Heinesch, W. Kutsch, T. Laurila, B. Longdoz, F. Miglietta, M. J. Sanz and R. Valentini. (2008). Characterisation of ecosystem water-use efficiency of European forests from Eddy covariance measurements. *Biogeosciences Discussions*. Vol. 5: pp. 4481–4519.
- Kustas, W. P., J. H. Prueger and J. L. Hatfield. 2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agric. Forest Meteorol.* Vol. 103: pp. 249-264.
- Law, B. E., E. Falge and L. Gu. 2002. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agriculture for. Meteorology*. Vol. 113: pp. 97–120.
- Law, B. E., Williams, M., Anthoni, P., Baldocchi, D.D. and Unsworth, M.H., 2001. Measuring and modeling seasonal variation of carbon dioxide and water vapor exchange of a *Pinus ponderosa* forest subject to soil water deficit. *Glob. Change Biol.* Vol. 6: pp. 613–630.
- 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 CO<sub>2</sub> net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods. *Global Change Biology*. Vol. 10: pp. 618-629.
- Miranda, A. C., H. S. Miranda, J. Lloyd, J. Grace, R. J. Francey, J. A. McIntyre, P. Meir, P. Riggan, R. Lockwood and J. Brass. 1997. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Cell and Environment*. Vol. 20: pp. 315-328.
- Muchow, R. C. y T. R. Sinclair. (1997). Nitrogen Response of Leaf Photosynthesis and Canopy Radiation Use Efficiency in Field-Grown Maize and Sorghum. *Crop Sci.* Vol. 34: pp. 721-727.
- Oswaldo, M. R. Cabral, Humberto R. Da Rocha, Marcos Antonio V, Ligo, Orivaldo Brunini and María Assucao F.S. Días (2003). Turbulent Fluxes of sensible heat, water vapor and CO<sub>2</sub> above sugarcane (*saccharum* sp.) plantation in Sertãozinho-sp. *Revista Brasileira de Meteorologia*. Vol. 18: pp. 61-70.
- Park, S.E., M. Robertson and Inman-Bamber (2005). Decline in the growth of a sugarcane crop with age under high input conditions. *Field Crops Research*. Vol. 92: pp. 305-320.
- Pita P., I. Cañas, F. Soria and G. Toval (2005). Use of physiological traits in tree breeding for improve yield in drought-prone environments. The case of *Eucalyptus globulus*. *Invest Agrar.* Vol 14: pp. 383-393.

- Pitman J. I. (2000). Absorption of Photosynthetically Active Radiation, Radiation Use Efficiency and Spectral Reflectance of Bracken (*Pteridium aquilinum* L. Kuhn). Canopies. *Annals of Botany*. Vol. 85: pp. 101-111.
- PRONAC, (2011): Programa Nacional de la Agro industria de la Caña de Azúcar” en:<http://www.sagarpa.gob.mx/cgcs/discursos/2007/abril/Pronac.pdf>.
- Reichstein, M, Dario Papale, Riccardo Valentini, Marc Aubinet, Christian Bernhofer, Alexander Knohl, Tuomas Laurila, Anders Lindroth, Eddy Moors, Kim Pilegaard and Günther Seufert. (2007). American Geophysical Union.
- SAGARPA (2007a) Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar, Diciembre 2007, P.6.
- Saliendra, N. Z., F.C. Meinzer, P. Matthew and T. Margaret. 1995. Associations between partitioning of carboxylase activity and bundle sheath leakiness to CO<sub>2</sub>, 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*. Vol. 10: pp. 877–885.
- Sasaki, Y., R. Kimura, M. Ishimine and M. Ota. 2005. Evapotranspiration from a sugar cane field in the Miyako island. *J. Agric. Meteorol*. Vol. 61: pp. 77-81.
- Scanlon, T. M., and J.D. Albertson. 2004. Canopy scale measurements of CO<sub>2</sub> and water vapor exchange along a precipitation gradient in southern Africa. *Global Change Biology*. Vol. 10: 329–341.
- Schulze, E.-D., Lloyd, J., Kelliher, F.M., Wirth, C., Rebmann, C.,Luhker, B., Mund, M., Knohl, A., Milyukova, M.I., Schulze, W., Ziegler, W., Varlagin, A.B., Sogachev, A.F., Valentini, R., Dore, S., Grigoriev, S., Kolle, O., Panfyorov, M.I., Tchebakova, N., Vygorskaya, N.N., 1999. Productivity of forests in the Eurosiberian boreal region and their potential to act as a carbon sink—a synthesis. *Glob. Change Biol*. Vol. 5: pp. 703–722.
- Schulze, E.-D., and C. Heimann, M., 2000. Managing forests after Kyoto. *Science*. Vol. 289: pp. 2058–2059.
- Singels A., M.A. Smit, K.A. Redshaw and R.A. Donaldson. (2005). The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. *Field Crops Research*. Vol. 92: pp. 249-260.

- Sivamani, E., A. Bahieldin, J. M. Wraith, T. Al-Niemi, W. E. Dyer, T. D. Ho and R. Qu. (2000). Improved biomass productivity and water use efficiency under water deficit conditions in transgenic wheat constitutively expressing the barley HVA1 gene. *Plant Science* Vol. 155: pp. 1-9.
- Stockle, C. O. and James R. Kiniry (2003). Variability in crop radiation-use efficiency associated with vapor-pressure deficit. *Field Crops Research*. Vol. 25: pp. 171-181.
- Subirós, R. F. (2000). El cultivo de la caña de azúcar. Editorial, Universidad Estatal a distancia. Primera reimpresión. Costa Rica. pp. 19-49.
- UNC (Unión Nacional de Cañeros): <http://www.caneros.org.mx/> (Fecha de consulta 22 Febrero del 2011).
- Verma, S. B., A. Bobermann, K. G. Cassman, D. T. Walters, J. M. Knops, T. J. Arkebauer, A. E. Suyker, G. G. Burba, B. Amos, H. Yang, D. Ginting, K. G. Hubbard, A. A. Gitelson and E.A. Water-Shea. (2005). Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol.131: pp. 77–96.
- Wood, S., Sebastian, K., Scherr, S.J., 2000. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Agroecosystems. IFPRI, WRI, Washington, DC.
- Yu, G., X. Song, Q. Wang, Y. Liu, D. Guan, J. Yan, X. Sun, L. Zhang and X. Wen (2007). Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*.