



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**

**Evaluación del Flujo del Calor Sensible en Función del Flujo  
de Calor Sensible Sónico Sobre una Superficie Vegetal.**

**POR:**

**JOSÉ SÁNCHEZ JORGE**

**T E S I S**

**Presentada como Requisito Parcial para  
Obtener el Título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.**

**Mayo de 2007**

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

Evaluación del Flujo del Calor Sensible en Función del Flujo de  
Calor Sensible Sónico Sobre una Superficie Vegetal.

Por:

**JOSÉ SÁNZHEZ JORGE**

**TESIS**

Que Somete a la Consideración del H. Jurado Examinador  
como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

Aprobada por el Comité de Tesis

Asesor Principal

---

Dr. Alejandro Zermeño González.

Asesor

Asesor Externo

---

M.C. J. Alexander Gil Marín

---

Dr. Juan P. Munguia López.

Coordinador de la División de Ingeniería

---

Dr. Raúl Rodríguez García.

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.  
Mayo de 2007

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar a **Dios**, ya que sin Él nada podemos hacer. Dios es quien nos concede el privilegio de la vida y nos ofrece lo necesario para lograr nuestras metas. **Señor Jesús**, Gracias de todo corazón por permitirme estar aquí, por ser mi mejor amigo, mi fortaleza, por darme todo lo que tengo, por las pruebas que me hacen crecer como persona y ser humano y me permiten dar lo mejor de mí, pero sobre todo, me acercan más a ti, pues todo en este mundo es perecedero y solamente lo que viene de ti es verdadero y es eterno.*

*A mi "**Alma Terra Mater**" por abrirme las puertas y darme la oportunidad de estudiar una carrera, por ser mi segundo hogar y por todas las facilidades prestadas para culminar satisfactoriamente mi formación profesional, por permitirme pertenecer a esta familia y formar parte de su historia. **Orgullosamente Buitre... de la "Antonio Narro"**.*

*Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** a través del fondo sectorial y de investigación en materia agrícola, pecuaria, acuacultura, agro biotecnología y recursos fitogenéticos, a través del proyecto titulado: Modelo en base de los componentes del balance de energía para medir el consumo de agua en los cultivos de tomate, chile y papa, con número de registro 133 de la convocatoria de **SAGARPA** 2003-002, por el apoyo recibido.*

*Al **Dr. Alejandro Zermeño Gonzáles** por darme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación, por su tiempo y paciencia que tuvo conmigo para finalizarlo.*

*Al M.C. José Alexander Gil Marín y al Dr. Juan Munguía López por el apoyo en la realización de esta investigación.*

*Al M.C. Luís Samaniego Moreno por escucharme y comprenderme, gracias por su amistad, su apoyo y consejos brindados.*

*Al Dr. Javier de Jesús Cortez Bracho que más que ser un maestro me permitió ser su amigo, gracias por todo el apoyo brindado durante toda mi estancia en la Universidad.*

*Al Dr. Raúl Rodríguez García por su amistad y apoyo moral durante toda mi estancia en la Universidad.*

*Al la Sra. Nely y al Sr. Aurelio por su cariño y amistad que me brindaron a lo largo de mi carrera y por el apoyo demostrado durante la elaboración de esta tesis, siempre les estaré agradecido.*

*A mis compañeros y amigos de la carrera de Ingeniero Agrónomo en Irrigación de la generación CII Gerardo, Vicente, Luís Alberto, Miguel, Hugo, Jacobo, Benjamín, Francisco Arriaga, Verónica, Yesenia, Cristóbal, Regina, Erick, Mariano, Robertoni, Francisco Jiménez, Rubén, Antonio, Vladimir, Efraín, Alberto, Manuel y Eder. Gracias por compartir las aulas, el tiempo, experiencias y este logro, siempre estarán presentes en mí.*

*A mis amigos de Universidad Ing. Elías, Ing. Cesar, Ramón, Teofilo, Ing. Juan, José Cervantes, Cruz, Juan, Carlos, Inés, Jesús Sansores, Ing. Arturo, Ing. Juan Luís, Guillermo, Ing. Juan Rivera, Ing. Omar, Ing. Adrián, Antonio, Lic. Marco David, Anselmo, Jesús Román, Nivardo, Ascari, Ricardo, Ismael, Oscar, Francisco, Miguel,*

*Sergio, Pablo. Gracias por confiar en mí en situaciones que pensaron que yo era la persona adecuada para ayudarlos, por dejarme entrar en su vida. Siempre fui fiel en lo que es la amistad, espero que ustedes hayan sido sinceros consigo mismo y conmigo. Se que tengo muchos amigos, pero se quienes son los verdaderos, pues muchos fingimos serlo. Así que solo me queda agradecerles por su tiempo, por su amistad, por su confianza, por los alegres y tristes momentos que compartimos y las lecciones aprendidas. Solo espero que sea yo un ejemplo para ustedes y ustedes serlo para mí, para que vean que personas como nosotros (jóvenes) somos el futuro y que todo el mundo cuenta con nosotros para crear uno mejor.*

*Al Ing. José Raúl (Búfalo) por haberme ofrecido tu amistad, por tu confianza, tu apoyo, por los regaños y consejos brindados en los momentos en que los necesitaba. Por permitirme acompañarte a lo largo de esta etapa de nuestra formación profesional enfrentando y superando retos difíciles que nos han hecho crecer como personas. Gracias por todos los momentos alegres y tristes que vivimos y sobretodo por no haber dejado nunca de darme ánimo.*

*A todo el equipo de Foot-Boll Americano por haberme recibido y darme la oportunidad de pertenecer a esa gran familia de compañeros. Gracias por todas las experiencias vividas y por permitirme aprender juntos cosas que nunca pensé poder hacerlas.*

*A todas las personas que de alguna u otra manera intervinieron a lo largo de mi estancia en la universidad; Gracias.*

## DEDICATORIA

*A mis padres:*

*Sr. José Sánchez Rodríguez.*

*Sra. Juana Jorge Aldaco.*

*Por ser los mejores y estar conmigo incondicionalmente en las buenas y en las malas; por educarme, aconsejarme, impartirme valores para conducirme correctamente y ofrecerme el sabio consejo en el momento oportuno, gracias porque sin ellos y sus enseñanzas no estaría aquí ni sería quien soy ahora, a ellos les dedico esta tesis.*

*A mis abuelos*

*Sr. Miguel Sánchez (†)*

*Sra. Esperanza Rodríguez (†)*

*Que estén donde estén, que la luz ilumine su sombra y su sombra defina su luz. Gracias por todo lo que me enseñaron.*

*A ti **Jazmín** por dejarme experimentar lo que es en verdad amar y por dejarme saber que es ser amado en ese mismo instante. Por que siempre estas a mi lado compartiendo tristezas y alegrías, viendo mis éxitos, mis esfuerzos por lograrlos y el coraje que tengo para realizarlos y porque en mis fracasos estas ahí para levantarme, dándome consuelo y fuerzas para reponerme. Te dedico mi éxito a ti amor por todo el cariño y el apoyo que me has dado, por ser quien eres y formar parte de mí; por ser la luz de mi camino, el motivo, la inspiración y la razón de mí existir. Solo tu y yo sabemos los momentos que vivimos juntos, los lugares que caminamos y el motivo o propósito de*

*cada uno, tal vez el mundo se entere después, pero tu eres quien lo vive primero conmigo.*

*A mis hermanas:*

***Teresa, Gabriela y Maricruz**, por haber creído en mi, por su apoyo, comprensión y confianza incondicional, por tener siempre dispuesto un hombro donde llorar, un oído para escucharme y criterio para entenderme.*

*A mis hermanos:*

***Javier** y muy especialmente a **Omar**, por ser mi alma gemela, porque nunca me ha desamparado, aunque estemos distantes o no nos veamos. Él siempre me ha dado su palabra, su cariño, su opinión, y la fuerza para conseguir lo que quiero. Le dedico mi logro por el sacrificio que hizo día con día para yo poder obtenerlo.*

*A mis cuñados **Ramón, Jesús y Enrique** por permitirme ser su amigo y por todo su apoyo económico y moral durante toda mi estancia en la universidad.*

*A mis sobrinos **Ulises (†), Diana, Dulce, Paola, Ronaldo, Osvaldo, Héctor y Ángel** por ser inocentes de todo y provocar la alegría del hogar.*

*A la familia Rodríguez Martínez por el apoyo y comprensión que me brindaron.*

## INDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>V</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1 BALANCE DE ENERGÍA SOBRE UNA SUPERFICIE VEGETAL. ....	4
2.1.1 <i>Radiación Neta</i> .....	6
2.1.2 <i>Flujo de calor sensible</i> .....	8
2.1.3 <i>Flujo de calor latente</i> .....	9
2.1.4 <i>Flujo de calor en el suelo</i> .....	11
2.2 MÉTODOS MICROMETEREOLÓGICOS PARA EVALUAR FLUJOS SUPERFICIALES. ..	12
2.2.1 <i>Método de la relación de Bowen</i> .....	13
2.2.2 <i>Método de la covarianza eddy</i> . ....	16
2.3 INSTRUMENTACIÓN PARA MEDIR LA TEMPERATURA DEL AIRE. ....	20
2.3.1 <i>Anemómetro-Termómetro. Sónico</i> .....	21
2.3.2 <i>Termopar</i> .....	22
2.4 RELACIÓN ENTRE EL ANEMÓMETRO-TERMÓMETRO SÓNICO Y EL TERMOPAR ...	23
<b>III. MATERIALES Y METODOS</b> .....	<b>24</b>
3.1 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SITIO EXPERIMENTAL.....	24
3.2 ESTABLECIMIENTO DEL EXPERIMENTO .....	24
3.3 INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIONES .....	25
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>29</b>
4.1 FLUJOS DE CALOR SENSIBLE POSITIVOS Y NEGATIVOS CON Y SIN CORRECCIÓN POR EFECTO DE HUMEDAD.....	29
4.2. FLUJO DE CALOR SENSIBLE POSITIVO CON Y SIN CORRECCIÓN POR EFECTO DE HUMEDAD.....	32

4.3. FLUJO DE CALOR SENSIBLE CON BASE A LA TEMPERATURA DEL AIRE Y LA TEMPERATURA SÓNICA DURANTE EL DÍA.....	34
4.4. FLUJO DE CALOR SENSIBLE CON BASE A LA TEMPERATURA DEL AIRE Y LA TEMPERATURA SÓNICA DURANTE LA NOCHE.....	37
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>41</b>
<b>VI. RESUMEN .....</b>	<b>42</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>44</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Representación esquemática de los componentes de la ecuación del balance de energía, radiación neta ( $R_n$ ), flujo de calor sensible ( $H$ ), flujo de calor latente ( $LE$ ), flujo de calor en la superficie del suelo ( $G$ ), almacenamiento o liberación de energía por cambios de temperatura ( $S$ ) y energía usada en la fotosíntesis ( $SH$ ) sobre una superficie vegetal.....	6
3.1	Sensores de un sistema eddy para mediciones de flujo de calor sensible ( $H$ ) y latente ( $\lambda E$ ). 3-D anemómetro sónico, termopar de alambre fino, e hygrometro de kriptón de respuesta rápida.....	27
4.1	Relación entre el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire ( $H_{TC}$ ) y el obtenido con la temperatura sónica ( $H_{sonic}$ ), sin corrección por efecto de flujo de humedad. Cada punto de la grafica es el promedio de la covarianza de una frecuencia de toma de datos de 10 Hz y promedios de 20 min en una población de 20 días.....	30
4.2	Relación entre el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire ( $H_{TC}$ ) y el obtenido con la temperatura sónica con corrección por efecto de flujo de humedad ( $H_{sonic\_hum}$ ). Cada punto de la grafica es el promedio de la covarianza de una frecuencia de toma de datos de 10 Hz y promedios de 20 min en una población de 20 días.....	31
4.3	Relación entre el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire ( $H_{TC}$ ) y el obtenido con la temperatura	

	sónica (H_sonic), sin corrección por efecto de flujo de humedad y considerando únicamente valores positivos. Cada punto de la grafica es el promedio de la covarianza de una frecuencia de toma de datos de 10 Hz y promedios de 20 min en una población de 20 días.....	33
4.4	Relación entre el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire (H_TC) y el obtenido con la temperatura sónica con corrección por efecto de flujo de humedad (H_sonic_hum),y considerando únicamente valores positivos. Cada punto de la grafica es el promedio de la covarianza de una frecuencia de toma de datos de 10 Hz y promedios de 20 min en una población de 20 días.....	34
4.5	Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H_TC) y el derivado con la temperatura sónica, corregido por efecto de flujo de humead (H_sonic_hum), durante el día (valores positivos), observados los días: A) 129, B) 138, C) 141 y D) 142 del año, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico negro.....	37
4.6	Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H_TC) y el derivado con la temperatura sónica corregido por efecto de flujo de humedad (H_sonic_hum), observados del día 127 a las 20:00 h al día 128 a las 8:00 h, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico.....	39

4.7	Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H_TC) y el derivado con la temperatura sónica corregido por efecto de flujo de humedad (H_sonic_hum), observados del día 128 a las 20:00 h al día 129 a las 8:00 h, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico.....	39
4.8	Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H_TC) y el derivado con la temperatura sónica corregido por efecto de flujo de humedad (H_sonic_hum), observados del día 129 a las 20:00 h al día 130 a las 8:00 h, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico.....	40
4.9	Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H_TC) y el derivado con la temperatura sónica corregido por efecto de flujo de humedad (H_sonic_hum), observados del día 130 a las 20:40 h al día 131 a las 8:20 h, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico.....	40

## INTRODUCCIÓN

El balance de energía sobre una superficie, determina en gran parte el microclima sobre la misma. El balance de energía, es un parámetro fundamental que controla procesos biológicos e hidrológicos en dicha superficie. Los componentes principales de la ecuación del balance de energía se pueden representar como (Oke, 1978; Twine *et al.*, 2000):

$$R_n = H + LE + G + S + PH \quad (1)$$

Donde:  $R_n$  es la radiación neta ( $W\ m^{-2}$ ),  $H$  es el flujo de calor sensible ( $W\ m^{-2}$ ),  $LE$  es el flujo de calor latente ( $W\ m^{-2}$ ),  $G$  es el flujo de calor en el suelo ( $W\ m^{-2}$ ),  $S$  es el almacenamiento o liberación de energía (calor) por cambios de temperatura ( $W\ m^{-2}$ ) y  $PH$  es la energía usada en el proceso de fotosíntesis, o liberada en el de respiración ( $W\ m^{-2}$ ).

El método de la covarianza eddy para determinar los flujos de masa y energía como  $H$ ,  $LE$  y Flujo de bióxido de carbono ( $FCO_2$ ) consiste en expresar el flujo vertical de una entidad transportada en un determinado punto como una covarianza entre las fluctuaciones de la concentración de esta entidad con las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento (Zermeño, 2001; Itier y Brunet, 1996). El principio del método de la covarianza eddy es detectar las contribuciones de todos los movimientos turbulentos responsables del transporte vertical de los flujos.

De acuerdo con el método de la covarianza eddy, el flujo de calor sensible (H) se obtiene con la relación (Zermeño-Gonzalez y Hipps, 1997, Jiyane y Zermeño-González, 2002):

$$H = \rho_a C_p \overline{w'Ta'} \quad (2)$$

Donde  $\rho_a$  es la densidad del aire ( $\text{Kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  es la capacidad calorífica del aire ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ), el producto  $w'Ta'$  es la covarianza entre la velocidad vertical del viento ( $\text{m s}^{-1}$ )  $w'$  y  $Ta'$  son las fluctuaciones respecto a la media de la velocidad vertical del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) y la temperatura del aire (K) la barra superior indica un promedio en un determinado intervalo de tiempo. La temperatura del aire se mide con termopares de alambre fino que son uniones de dos metales (chromel-constantan) en las que se produce un voltaje que depende de la temperatura, sin embargo estos son muy propensos a romperse y cuando esto sucede provoca la pérdida de datos por el periodo de tiempo que se demora para reemplazarlo.

Para evitar la pérdida de datos debido al rompimiento del termopar de alambre fino, el flujo de calor sensible se puede obtener a partir del flujo de calor sensible sónico, donde la temperatura del aire se reemplaza por la temperatura sónica, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$H_{\text{sonic}} = \rho_a C_p \overline{w'Ts'} \quad (3)$$

Donde:  $H_{\text{sonic}}$  es el flujo de calor sensible sónico y  $w'T_s'$  es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la temperatura sónica. La determinación de  $H$  en función de  $H_{\text{sonic}}$ , depende del flujo de humedad en el aire en la localidad donde se realizan las mediciones, de tal forma que para mejorar las estimaciones de  $H$  en función de  $H_{\text{sonic}}$ , es necesario realizar una corrección por efecto de flujo de humedad.

### **Objetivo**

Evaluar la estimación del flujo de calor sensible en función del flujo de calor sensible sónico con y sin corrección por efecto de flujo de humedad, para las condiciones climáticas de las zonas áridas del Noreste de México.

Analizar la relación entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor sensible sónico, corregido por efecto de flujo de humedad, durante el transcurso del día y la noche.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Balance de energía sobre una superficie vegetal.

El balance de energía es un parámetro fundamental que controla procesos biológicos e hidrológicos en la superficie terrestre. A gran escala, es una fuente de origen de calor latente y sensible dentro de la atmósfera. A escala mas local el balance de energía afectará la evaporación diaria y el calentamiento o enfriamiento de la capa limite atmosférica y del suelo (Oke, 1978).

El intercambio de calor entre un cuerpo y su medio, siempre que exista una diferencia de temperatura entre ambos se presenta en tres formas (Garreaud y Meruane, 2005):

- **Radiación** → Transmisión de calor sin contacto de los cuerpos por ondas electromagnéticas o fotones.
- **Conducción (sólidos y líquidos)** → Transmisión de calor por un cuerpo sin desplazamiento de sus moléculas.
- **Convección (líquidos y gases)** → Movimiento turbulento de un gran numero de moléculas.

La radiación neta (despreciando los términos menores) equivale a la sumatoria de los flujos de calor sensible, calor latente y flujo de calor en el suelo; siendo estos los componentes de la ecuación del balance de energía.

Estos flujos son transferencias de energía ocurridas en una superficie terrestre con vegetación y la atmósfera.

Todos los modelos de la energía superficial y del intercambio de masa se basan en los principios fundamentales de la conservación de la energía. Los componentes principales de la conservación de la ecuación de la energía, a que referimos a menudo como “cierre del balance energético” se pueden representar como (Twine *et al.*, 2000):

$$R_n = H + LE + G + S + PH \quad (1)$$

$$R_n - (H + LE + G + S + PH) = 0 \quad (4)$$

Donde  $R_n$  es la radiación neta ( $W m^{-2}$ ),  $H$  es el flujo de calor sensible ( $W m^{-2}$ ),  $LE$  es el flujo de calor latente ( $W m^{-2}$ ),  $G$  es el flujo de calor en el suelo ( $W m^{-2}$ ),  $S$  es el almacenamiento o liberación de energía (calor) por cambios de temperatura ( $W m^{-2}$ ) y  $PH$  es la energía usada en la fotosíntesis (almacenamiento de energía) ( $W m^{-2}$ ).

$(R_n - G)$  Es la energía disponible en la superficie, mientras que  $(H + LE)$  son los flujos de energía en la superficie. La figura 2.1 muestra una representación esquemática de los flujos de energía en una superficie vegetal.

Las medidas independientes de los componentes principales del flujo del balance energético no son a menudo constantes con el principio de la conservación de la energía. Esto se refiere como falta del cierre del balance energético superficial. La mayoría de los resultados en la literatura han demostrado que la suma de los flujos de calor sensible y latente medidos con la covarianza eddy es menos que la diferencia entre la radiación neta y el flujo de calor en el suelo (Twine *et al.*, 2000).

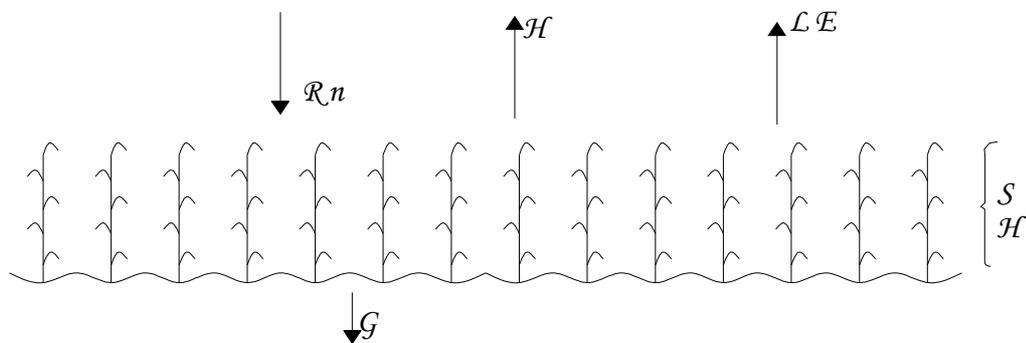


Figura 2.1. Representación esquemática de los componentes de la ecuación del balance de energía, radiación neta ( $R_n$ ), flujo de calor sensible ( $H$ ), flujo de calor latente ( $LE$ ), flujo de calor en la superficie del suelo ( $G$ ), almacenamiento o liberación de energía por cambios de temperatura ( $S$ ) y energía usada en la fotosíntesis ( $PH$ ) sobre una superficie vegetal.

### 2.1.1 Radiación Neta

La radiación neta ( $R_n$ ) es la diferencia entre el flujo de radiación total hacia la atmósfera y hacia la superficie vegetal y es una medida de energía disponible en la superficie de la tierra. La importancia de este parámetro es que es la cantidad fundamental de energía disponible en la superficie de la

tierra para conducir los procesos de evaporación, calentamiento del aire y suelo, así como otros procesos de consumos de energía pequeños como por ejemplo fotosíntesis. (Rosenberg, *et al.*, 1983). El flujo de  $R_n$  o energía disponible es la fuerza principal que determina, en mayor medida, las pérdidas de agua de una cubierta vegetal cuando el agua en el suelo no es limitante (Jensen *et al.*, 1990). Lamentablemente, la mayoría de las estaciones meteorológicas automáticas no incluyen sensores para medir el flujo de  $R_n$ , por lo que se hace necesario estimarlo a través de modelos físicos que utilizan como variable de entrada la radiación solar ( $R_s$ ), temperatura del aire ( $T_a$ ) y humedad relativa (HR) (Ortega-Farías *et al.*, 1996).

La radiación total esta compuesta de la radiación solar de onda corta (0.2 a 1.4  $\mu m$ ) y radiación terrestre de onda larga (2 a 50  $\mu m$ ). El pico de la longitud de onda de la energía emitida por la mayoría de los objetos terrestres es de 9  $\mu m$  (Tarara y Ham, 1999). La cantidad de la energía solar que llega a la superficie de la tierra es la energía disponible para llevar a cabo procesos importantes como evapotranspiración (Bastiaansen *et al.*, 1998; Martínez y Aguilera, 1996; Pereira *et al.*, 1996). La radiación fotosintéticamente activa comprende una banda de 0.4 a 0.7  $\mu m$  de longitud de onda; la energía solar con una longitud de onda mayor que 0.7  $\mu m$  es llamada radiación infrarrojo cercano. La radiación de onda larga es comúnmente llamada radiación infrarroja o termal. La radiación solar puede ser directa o puede ser difusa debido a la dispersión causada por las nubes, moléculas atmosféricas y vegetación. El total de la radiación directa y

radiación difusa es llamada radiación global ( $R_s$ ). Por convención los flujos de energía son asignados con valores positivos o negativos para denotar su dirección: la transferencia de energía hacia el cultivo se le asigna un valor positivo y la energía que se mueve fuera del cultivo recibe un valor negativo para definir la dirección del vector. Así durante el día  $R_n$  la cual es dominante por provenir de  $R_s$ , es positivo, pero durante la noche  $R_n$  es negativo (Tarara y Ham, 1999; Rosenberg, *et al.*, 1983).

En una superficie uniforme,  $R_n$  puede ser medida con un radiómetro neto que cuantifica la radiación de onda corta y larga. El radiómetro neto se basa en realizar el balance de radiaciones reportando la diferencia entre los flujos hacia y desde la superficie de estudio (Idso, 1974).

### ***2.1.2 Flujo de calor sensible***

Convección es la transferencia de energía a o desde una superficie por el movimiento de un fluido, denotándose como  $H$  al flujo de calor sensible, se denomina así por que se puede sentir. En una superficie vegetal el fluido es el aire (Ham y Senock, 1992; Tarara y Ham 1999).

El flujo turbulento de calor sensible se define como (Zermeño, 2001; Prueger *et al.*, 1998; Garreaud y Meruane, 2005):

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T'_a} \quad (2)$$

Donde  $\rho_a$  es la densidad del aire;  $C_p$  es la capacidad calorífica del aire a presión constante ( $1004.67 \text{ J K}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$ ) y  $\overline{w'T'_a}$  es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la temperatura del aire;  $w'$  y  $T'$  son fluctuaciones turbulentas instantáneas de velocidad vertical ( $w = \bar{w} + w'$ ) y Temperatura ( $T = \bar{T} + T'$ ). Las barras horizontales superiores indican un promedio en un intervalo de tiempo y las primas denotan desviaciones de la media.

La convección denota generalmente a la transferencia vertical de energía; cuando H es transferido horizontalmente entre dos superficies desiguales es llamado advección debido a los gradientes horizontales en la temperatura, humedad y velocidad del aire que existen en zonas o áreas no homogéneas (Itier *et al.*, 1996; Zermeño y Hipps, 1997). El viento sirve como transportador del calor sensible desde los alrededores al terreno irrigado (Zermeño y Hipps, 1997). Por esta razón, la contribución de la advección local del calor sensible es mayor en días con viento fuerte.

### ***2.1.3 Flujo de calor latente***

El flujo de calor latente (LE) es el proceso total de transferencia de energía como vapor de agua de las superficies de la tierra con vegetación a la atmósfera (Bastiaanssen *et al.*, 1998; Martínez y Aguilera, 1996). El flujo de calor latente se expresa en unidades de  $\text{W m}^{-2}$  o como evapotranspiración en mm/día.

La evaporación traducida al lenguaje de transferencia de energía es el flujo de calor latente (LE). La condensación es un proceso de calentamiento y la evaporación un proceso de enfriamiento de la superficie (Tarara, 2000). Cuantiosos trabajos han sido conducidos en los últimos 50 años sobre LE de las superficies naturales y cultivadas. Esto ha conducido a un mejor entendimiento de los procesos físicos y biológicos de la tasa de LE, y en el desarrollo de varios métodos para medir LE tal como el método de la covarianza eddy, método de la relación Bowen, entre otros (Itier y Brunet, 1996). La evaporación transfiere energía de la superficie al vapor de agua, el cual entonces se difunde o es transportado a la atmósfera. El flujo de calor latente enfría la superficie de la hoja así que la temperatura del follaje se relaciona con la tasa de transpiración, una situación paralela ocurre para la superficie húmeda del suelo la evaporación reduce las diferencias en temperaturas entre la superficie y el aire (Tarara, 2000; Jones, 1992).

El flujo turbulento de calor latente se define como (Zermeño, 2001; Prueger *et al.*, 1998; Garreaud y Meruane, 2005):

$$LE = \rho_a \lambda \overline{W\rho_v} \quad (5)$$

Donde  $\lambda$  es el calor latente de evaporización y  $\overline{W\rho_v}$  es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la densidad del vapor de agua.

#### 2.1.4 Flujo de calor en el suelo

La transferencia de calor en el suelo ( $G$ ) ocurre por conducción, el movimiento de energía por vibración de las moléculas en un sólido o entre un sólido y un fluido inmóvil. Si el calor se mueve hacia la superficie, será flujo positivo, y hacia el interior del perfil del suelo (es flujo negativo) de acuerdo con la ley de Fourier (Ham y Kluitenberg, 1994).

$$G = -K \frac{dT}{dz} \quad (6)$$

Donde  $K$  es la conductividad del suelo; que es la capacidad de conducir calor en  $W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$  y  $dT/dz$  es el gradiente vertical de temperatura.

Para estimar el flujo de calor en la superficie del suelo ( $G$ ) un método combinado ha sido establecido como técnica estándar (Kimball y Jackson, 1979). Este método es una aplicación práctica de la ley de Fourier, involucra mediciones de la conducción de calor a alguna profundidad en el suelo ( $G_z$ ) comúnmente a 8 cm, con platos de flujo de calor (Fuchs, 1986) estimando la capacidad calorífica volumétrica ( $\rho C_p$ ) del suelo entre la superficie y los platos de flujo de calor y midiendo la tasa de cambio de temperatura con respecto al tiempo,  $dT/dt$ .

$$G = G_z + \rho C_p \frac{dT}{dt} * \Delta z \quad (7)$$

Históricamente, estimaciones de  $\rho C_p$  es la última parte de fiar del método combinado porque se requiere de muestreos gravimétricos del contenido de humedad en el suelo de la capa comprendida entre la superficie del suelo y los platos del flujo de calor. Una limitación la constituye la frecuencia de los muestreos del método gravimétrico (ejemplo diario, semana). Recientemente el desarrollo de sensores para medir  $\rho C_p$  directamente cerca de la superficie del suelo en un pequeño volumen del suelo han mejorado y ha hecho más confiable el método combinado para realizar mediciones frecuentes sobre los platos del flujo de calor (Campbell *et al.*, 1991; Tarara y Ham, 1997).

## **2.2 Métodos micrometeorológicos para evaluar flujos superficiales.**

La biometeorología se encarga de estudiar los procesos físicos que gobiernan los cambios entre las superficies biológicas y la atmósfera baja, tales cambios pueden ser de momento, de calor sensible, de vapor de agua, además de varios gases y partículas de materias. En individuos como en comunidades, estos procesos son fundamentales para entender cómo los cultivos agrícolas utilizan el agua y como las comunidades vegetales intercambian el bióxido de carbono con la atmósfera (Dugas *et al.*, 1991).

Los métodos micrometeorológicos tienen varias ventajas ya que estos causan mínimas alteraciones del microclima del ecosistema bajo estudio, permiten realizar mediciones continuas y proveen mediciones integrales del

flujo. Además que las mediciones realizadas corresponden a superficies extensas (Zermeño, 2001).

### ***2.2.1 Método de la relación de Bowen.***

Es uno de los métodos más sencillos y más prácticos para la estimación del flujo de calor y vapor de agua de las superficies vegetales a la atmósfera. Ha sido ampliamente utilizado para condiciones de rangos amplios de flujos de calor y vapor de agua y ha mostrado ser uno de los métodos más confiables en la estimación del flujo de calor latente (LE) (Ashktorab *et al.*, 1994; Jones, 1992; Zermeño, 2001).

El método de la relación Bowen (Bowen, 1926) ha hecho una técnica estándar para medir flujos de calor sensible y latente del balance energético superficial. La exactitud del método ha sido repasada a fondo por Fuchs y Tanner (1970), Sinclair *et al.* (1975), Revheim y Jordan (1976) y otros.

El método de la relación Bowen se basa en la consideración de que el mecanismo de transporte del flujo de calor latente y calor sensible son idénticos. Mediciones simultáneas de gradientes de temperatura y densidad de vapor de agua cercanas a la superficie, junto con la radiación neta y flujo de calor en el suelo son necesarias para calcular la relación de Bowen y el flujo de calor latente (Malek *et al.*, 1990).

El método de la relación Bowen para determinar flujos de calor latente y sensible es basado en un cambio de la ecuación superficial del balance de energía por Bowen (1926) para quedar:

$$LE = \frac{(Rn - G)}{1 + \beta} \quad (8)$$

Donde,  $LE$  es el flujo de calor latente,  $Rn$  es la radiación neta,  $G$  es el flujo de calor en la superficie del suelo y  $\beta$  es el coeficiente de Bowen

El valor de la relación de Bowen se obtiene a partir de las relaciones de gradiente de flujo (Zermeño, 2001). Por lo tanto, todo lo que se necesita para estimar  $LE$  es: la radiación neta sobre la cubierta vegetal, el flujo de calor en la superficie del suelo, temperatura del aire y humedad específica a dos elevaciones sobre el dosel del cultivo (Jones, 1992; Itier y Brunet, 1996). Bowen (1926) introdujo el concepto de la relación Bowen ( $\beta$ ), de calor sensible ( $H$ ) y calor latente ( $LE$ ) sobre la superficie del océano como:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (9)$$

Esta relación puede ser expresada como:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta\theta}{\Delta e} \quad (10)$$

Donde  $\gamma$  es la constante psicométrica,  $\Delta\theta$  y  $\Delta e$  son la diferencia en temperatura potencial de aire y presión de vapor en un intervalo de altura.

$\beta$  es mas pequeño para superficies húmedas, donde hay mayor energía para la evaporación, y mas grande para superficies secas. Típicamente tiene valores de 5 para regiones semiáridas, 0.5 para prado y bosques, 0.2 sobre zonas de riego y 0.1 sobre el océano.

A diferencias de otras técnicas de flujo de perfil, el método de la relacion Bowen es muy resistente a las condiciones atmosféricas adversas; no requiere asistencia continua ya que puede operarse por periodos prolongados de tiempo (Zermeño, 2001); no requiere información de velocidad del viento y características aerodinámicas de la superficie ni requiere el conocimiento de la conductancia fisiológica actual o de la capa frontera (Heilman *et al.*, 1989; Jones, 1992); es muy sencillo de operar y el cálculo de los flujos es independiente de la estabilidad atmosférica (Itier y Brunet, 1996; AShtorab *et al.*, 1994; Heilman *et al.*, 1989). El método asume la semejanza de los perfiles de la temperatura y de la humedad. Sin embargo, las diferencias del perfil pueden desaparecer en una cierta elevación sobre la superficie (Heilman *et al.*, 1989). Los datos de Garratt (1978) indican que la elevación mínima para las medidas es tres a cinco veces la altura de los elementos de la aspereza.

El requisito principal para el método de la Relación Bowen es que los gradientes de temperatura y presión de vapor sean suficientemente grandes

y estén preferiblemente medidos dentro de la capa límite interna y en la porción de la capa límite que está en equilibrio con la superficie para poder alcanzar precisiones aceptables, lo que prácticamente excluye usar este método sobre superficies rugosas y en ecosistemas muy secos donde los gradientes verticales de humedad específica son muy pequeños (Ashktorab *et al.*, 1994). Otro problema de este método es el caso cuando la relación Bowen tiende a un valor de menos uno por lo cual la Ecuación 10 es indeterminada. Esta situación nada más ocurre por periodos cortos en las mañanas y en las tardes cuando LE es muy insignificante (Ashktorab *et al.*, 1994; Williams y Stout, 1981; Heilman *et al.*, 1989).

### ***2.2.2 Método de la covarianza eddy.***

El método de la covarianza eddy es el método más directo para medir los flujos superficiales (Prueger *et al.*, 1998; Jones, 1992; Kizer y Elliott, 1991; Itier y Brunet, 1996; Zermeño, 2001). Este método consiste en expresar el flujo vertical de una entidad transportada en un determinado punto como una covarianza entre las fluctuaciones de la concentración de esta entidad con las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento (Zermeño, 2001; Itier y Brunet, 1996). El principio del método de la covarianza eddy es detectar las contribuciones de todos los movimientos turbulentos responsables del transporte vertical de los flujos (Itier y Brunet, 1996). Esto requiere mediciones de flujos a una frecuencia suficientemente alta (típicamente 10 – 20 Hz) y promediando las covarianzas en un periodo suficiente (típicamente 15 – 30 minutos) (Itier y Brunet, 1996).

Rosenberg, et al., (1983) indica que en flujo totalmente turbulento, el flujo vertical medio  $F$  de una entidad  $s$  por unidad de masa del fluido esta dado como:

$$F = \overline{\rho_a w s} \quad (11)$$

Donde,  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $w$  es la velocidad vertical, y la barra superior denota el promedio evaluado durante un periodo de tiempo convenientemente largo.

En la capa superficial, todas las entidades atmosféricas exhiben fluctuaciones de corto periodo sobre su valor medio. Por lo tanto los valores instantáneos de  $w$ ,  $s$ , y  $\rho_a$  pueden ser expresados como.

$$w = \bar{w} + w', \quad s = \bar{s} + s' \quad \text{y} \quad \rho_a = \bar{\rho}_a + \rho' \quad (12)$$

Donde los valores primos representan una desviación instantánea del valor medio. Estas expresiones pueden ser substituidas en la Ecuación 11 y, si descuidamos las fluctuaciones en densidad, el flujo medio vertical  $F$  se reduce a:

$$F = \bar{\rho}_a \bar{w} \bar{s} + \bar{\rho}_a \overline{w' s'} \quad (13)$$

O escribiendo  $\rho_a$  por  $\bar{\rho}_a$

$$F = \rho_a \overline{ws} + \rho_a \overline{w's'} \quad (14)$$

El primer término en el lado derecho representa el flujo debido al flujo vertical medio o a la transferencia total. El segundo término representa el flujo debido al flujo eddy. El término de la transferencia total puede presentarse de una convergencia o divergencia del aire debido a la superficie inclinada. Para un periodo de tiempo suficientemente largo sobre un terreno horizontalmente uniforme la cantidad total de aire ascendiente es aproximadamente igual a la cantidad que desciende y el valor medio de la velocidad vertical será insignificante (Rosenberg, *et al.*, 1983). Por lo tanto la ecuación (14) se reduce a:

$$F \approx \rho_a \overline{w's'} \quad (15)$$

En principio, el método de la covarianza eddy puede ser utilizado para cualquier proceso de transporte (Jones, 1992), pero suele ser utilizado en las mediciones de flujos de calor latente (LE), calor sensible (H) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Considerando nada más los flujos del ímpetu (momentum), vapor de agua, LE y H, se puede expresar para una superficie horizontal homogénea de la siguiente manera (Rosenberg, *et al.*, 1983; Zermeño, 2001; Prueger *et al.*, 1998):

$$\text{Flujo del ímpetu (momentum)} \quad \tau = \rho_a \overline{u'w'} \quad (16)$$

$$\text{Flujo de vapor de agua} \quad E = \frac{\epsilon}{P} \rho_a \overline{w' e'_a} \quad (17)$$

$$\text{Flujo de calor sensible} \quad H = \rho_a C_p \overline{w' T'} \quad (18)$$

$$\text{Flujo de calor latente} \quad LE = L \rho_a \overline{w' q'} \quad (19)$$

Donde,  $u'$  es la velocidad horizontal instantánea del aire ( $\text{m s}^{-1}$ );  $w'$  es la velocidad vertical instantánea del aire ( $\text{m s}^{-1}$ );  $T'$  es la temperatura instantánea del aire (K);  $C_p$  es la capacidad calorífica del aire ( $\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );  $\rho_a$  es la densidad del aire ( $\text{Kg m}^{-3}$ );  $e'_a$  es la presión de vapor;  $\epsilon$  es el cociente del peso molecular del aire y vapor de agua  $= M_w / M_a$  y  $P$  es la presión atmosférica. Las barras horizontales superiores indican un promedio en un intervalo de tiempo y las primas denominan desviaciones de la media.

Algunos análisis recientes (Webb *et al.*, 1980; Webb, 1982) indican que los flujos turbulentos atmosféricos de componentes de menor importancia tales como vapor de agua y  $\text{CO}_2$  pueden ser influenciados por las variaciones de la densidad debido a la transferencia simultánea de calor sensible y de vapor de agua (el efecto de la densidad puede causar una velocidad vertical media del aire muy pequeña pero diferente a cero).

El método de la covarianza Eddy, cuando se aplica correctamente, proporciona estimaciones de flujos razonablemente exactas, más que los otros métodos micrometeorológicos, encima de las superficies ásperas, por

ejemplo, los coeficientes turbulentos de intercambio son grandes y por lo tanto los gradientes verticales de la temperatura y de la humedad son excesivamente pequeños. Correspondientemente, las fluctuaciones de la velocidad vertical son absolutamente grandes. Por lo tanto, como Kanemasu *et al.*, (1979) precisa que el método de la covarianza Eddy debe ser más exacta que esos métodos que confina en la medida de gradientes verticales.

En la aplicación del método de covarianza Eddy, dos puntos requieren de particular atención. En primer lugar, los instrumentos deben ser tan sensibles como para ser capaz de detectar cambios simultáneos (fluctuaciones) en cantidades tales como velocidad, temperatura y humedad causada por el paso rápido de diversos remolinos. La frecuencia de estas fluctuaciones aumenta mientras se aproxima a la superficie. Las ventajas de este método son: mide directamente los flujos, sin la necesidad de asumir coeficientes de difusividad, ni relaciones de similitud, ni condiciones de cobertura de la superficie; permite analizar la precisión del balance de energía; es considerado el método más preciso para medir los flujos superficiales (Zermeño, 2001; Prueger *et al.*, 1998).

### **2.3 Instrumentación para medir la temperatura del aire.**

La medida de la temperatura del aire es relativamente simple aunque un número de precauciones importantes son necesarias si se requiere alcanzar la exactitud. Virtualmente cualquier sensor usado normalmente para la medida de la temperatura se puede adaptar correctamente para la

medida de temperatura del aire en la micrometeorología (Rosenberg et al., 1983). Tales sensores incluyen el mercurio o el alcohol en los termómetros de cristal, termopares, termistores, termómetros de platino resistente, y diodos termosensibles.

### ***2.3.1 Anemómetro-Termómetro. Sónico***

Como un aparato de medición de temperatura los anemómetros sónicos miden una cantidad híbrida (la temperatura virtual sana) que consiste en la mezcla de la temperatura y de la humedad. Por esto y otras razones la opción de temperatura de anemómetro sónico ha recibido poca atención (Larsen, *et al.*, 1993). Como un instrumento que mide la temperatura, el anemómetro sónico es probable que hoy sea el instrumento menos sensible a la contaminación de partículas de sal, un problema frecuente para la mayoría de los otros instrumentos usados para medir fluctuaciones de temperatura en regiones marinas o costeras (Schmitt, *et al.*, 1978; Schacher and Fairall 1976; Davidson, *et al.*, 1978; Larsen, *et al.*, 1980). Por lo tanto se justifica considerar al anemómetro sónico como un termómetro (Larsen, *et al.* 1988; Kaimal and Gaynor 1991).

Una característica del anemómetro sónico es que no prohíbe las medidas simultáneas de fluctuaciones de temperatura sobre la misma trayectoria, pero aun existen las preguntas con respecto a la magnitud de errores en la medida de la temperatura sónica causada por fluctuaciones horizontales del viento (Campbell and Unsworth, 1979). Kaimal (1969) indicó que estos errores podían ser substanciales. Miyake y McBean (1970)

también obtuvo medidas de temperatura sónica pobres bajo algunas condiciones, pero atribuyo el problema a la relación pobre señal-ruido (signal-to-noise) en el circuito de la temperatura de su instrumento cuando las fluctuaciones de la temperatura eran pequeñas.

### *2.3.2 Termopar*

Los termopares (Thermocouples) son uniones de dos metales en las que se produce un voltaje que depende de la temperatura, es decir, de una diferencia de temperaturas. Los termopares son sensores estables de temperatura, sin embargo, producen una señal pequeña que requiere métodos costosos para la lectura y la amplificación. La señal puede ser aumentada conectando con alambre una gran cantidad de ensambladuras del termopar en series. Si las ensambladuras se ponen en diversas localizaciones y muestrean diversas condiciones, la señal que resulta da una integración de la condición de temperatura media. Las ensambladuras del termopar también pueden ser conectadas con alambre en paralelo, en este caso se aumenta la corriente y el voltaje medido da la temperatura media para todos los puntos muestreados (Rosenberg *et al.*, 1983; Campbell and Unsworth, 1979; Kaimal y Gaynor 1991).

Las temperaturas se pueden medir generalmente directamente con los termopares con una exactitud entre 0.1 y 0.25 °C. Es posible, sin embargo, medir diferencias de temperatura con una exactitud considerablemente mayor cuando los termopares se atan con alambre diferenciado (Rosenberg *et al.*, 1983).

## 2.4 Relación entre el anemómetro-termómetro sónico y el Termopar

Según Ham y Heilman (2003) las estimaciones de la temperatura sónica del aire, cuando está corregido por la humedad, están en excelente acuerdo con los resultados del termopar (thermocouple) de alambre-fino. Los promedios de 30 minutos de temperaturas derivadas del sonic y del thermocouple están dentro de 0.3 °C. Cuando las diferencias entre los dos sensores son calculadas como  $T_{sonic} - T_{fine-wire}$ ; también realizaron comparaciones sobre una pradera y observaron ligeramente mas variación, pero el anemómetro sónico y el termopar de alambre fino siempre coincidieron dentro de  $\pm 0.5$  °C. Así mismo, el  $H$  calculado usando covarianzas derivadas del anemómetro sónico y del thermocouple están en excelente acuerdo sin mostrar la diferencia media. Cuando la diferencia entre los dos flujos son calculados como  $T_{sonic} - T_{fine-wire}$ , la diferencia media es menos que  $2 \text{ W m}^{-2}$  (Ham y Heilman, 2003). Miyake and McBean (1970) midieron fluctuaciones de temperatura con un termómetro sónico y un termómetro de alambre fino resistente y encontraron un valores similares en condiciones inestables. Estos datos confirman que las medidas de la temperatura del aire derivadas del anemómetro sónico son adecuadas para sustituir los termopares de alambre fino por ser muy frágil.

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1 Ubicación y Características del Sitio Experimental**

El trabajo experimental se realizó durante el ciclo agrícola primavera verano de 2006 (marzo-junio) en el rancho Santa Rita, en el municipio de Ramos Arizpe, Coahuila, ubicado a 40 km al norte de Saltillo, Coahuila. Las coordenadas geográficas del sitio son: 25° 40' 50" latitud Norte, 101° 07'25" longitud Oeste y una elevación de 1140 m.

El clima de la región es semiseco templado, la temporada de lluvias se presenta en primavera y verano, con un rango de 300 a 400 mm anuales. La temperatura media anual oscila entre 14 y 18 °C y los vientos predominantes son de dirección norte y velocidad promedio de 22.5 km h<sup>-1</sup>

#### **3.2 Establecimiento del Experimento**

El sitio de estudio corresponde a una superficie de aproximadamente 10 ha recién desmontada e incorporada a la agricultura. En esta superficie se delimitaron 3 has; 200 m en la dirección este-oeste y 300 m. en la dirección norte-sur. Se utilizo un marco de plantación a doble hilera con una separación entre hileras de 40 cm y 30 cm entre plantas, con arreglo en tresbolillo entre las hileras de plantas, se realizaron camas con un ancho promedio de 67 cm y 113 cm de pasillo; para el acolchado se utilizo plástico de color negro de 1.20 m de ancho y de 20 µm de espesor.

La irrigación del cultivo se realizó con un sistema de riego por goteo, colocado por debajo del acolchado plástico. Los riegos se aplicaron a una frecuencia promedio de 3 días. El gasto de aplicación fue de 325 L h<sup>-1</sup> /100 m, el tiempo promedio de riego fue de 6 h, de tal forma que para el ancho de camas considerado, se aplicó una lamina promedio de 10 mm por riego. El control de plagas y enfermedades se realizó siguiendo las normas establecidas para la región y no se tuvieron problemas que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas

### 3.3 Instrumentación y Mediciones

De acuerdo con el método de la covarianza eddy, el flujo de calor sensible se define con la siguiente relación:

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T_a'} \quad (2)$$

Donde: H es el flujo de calor sensible (W m<sup>-2</sup>),  $\rho_a$  es la densidad del aire (kg m<sup>-3</sup>),  $C_p$  es la capacidad calorífica del aire (J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>),  $T_a$  es la temperatura del aire (K),  $w$  es la velocidad vertical del viento (m s<sup>-1</sup>). El producto  $w'T_a'$  representa la covarianza entre  $w$  y  $T_a$ , y la barra superior denota un promedio en un determinado intervalo de tiempo, que en este trabajo se estableció como 20 min. La frecuencia de las mediciones de  $w$  y  $T_a$  fue de 10 Hz, la velocidad vertical del viento se obtuvo con un 3-D anemómetro sónico y la temperatura del aire con un termopar de alambre fino de chromel-constantan de 12.7  $\mu$ m de diámetro, que se colocaron a una

altura de 1 m sobre el dosel de las plantas. El sistema eddy se colocó en la parte sur del lote experimental (Figura 3.1). Para el análisis de datos, únicamente se consideraron vientos con dirección menor de 90° y mayor de 270° para evitar aquellos que impactaban en la parte posterior del sistema. Las mediciones se realizaron durante las diferentes etapas de desarrollo del cultivo.

El flujo de calor sensible obtenido de esta forma se definió como  $H_{TC}$ , donde TC indica que se utilizó el termopar de alambre fino para determinar la temperatura del aire. El problema con esta determinación, es que debido al pequeño diámetro del termopar, es muy frágil y muy susceptible a que se rompa cuando se encuentra operando en el campo. Por tal motivo, se recomienda que el flujo de calor sensible se determine utilizando la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la temperatura sónica (Ecuación 3)

$$H_{sonic} = \rho_a C_p \overline{w'T_s'} \quad (3)$$

El flujo de calor sensible derivado con esta ecuación se definió como flujo de calor sensible sónico ( $H_{sonic}$ )



Figura 3.1. Sensores de un sistema eddy para mediciones de flujo de calor sensible (H) y latente ( $\lambda E$ ). 3-D anemómetro sónico, termopar de alambre fino, e hygrometro de kriptón de respuesta rápida.

El flujo de calor sensible derivado con la temperatura sónica, es afectado por la magnitud del flujo de calor latente, de tal forma que para mejorar las determinaciones del flujo de calor sensible a partir del flujo de calor sensible sónico, es necesario aplicar una corrección por efecto de flujo de humeado de acuerdo con la Ecuación 20

$$H_{\text{sonic\_hum}} = \rho_a C_p \overline{w'Ts'} - 0.51Ta \frac{\rho_a C_p}{\lambda} \lambda E \quad (20)$$

Donde:  $H_{\text{sonic\_hum}}$  es el flujo de calor sensible sónico corregido por flujo de humeado,  $\lambda$  es el calor de vaporización del agua ( $\text{J kg}^{-1}$ ) y  $\lambda E$  es el

flujo de calor latente ( $W m^{-2}$ ), que se obtuvo con un hygrometro de kriptón de respuesta rápida (Figura 3.1) de acuerdo con la Ecuación 24.

$$\lambda E = \lambda \overline{w' \rho_{wv}'} \quad (21)$$

Donde  $w' \rho_{wv}'$ , es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la densidad del vapor de agua, la barra superior indica que la covarianza se promedia en intervalos de 20 min, con frecuencia de mediciones de 10 Hz. Los valores de  $\lambda E$  se corrigieron por absorción de oxígeno y por efecto de densidad (Webb *et al.*, 1980)

Para el registro de datos, todos los sensores se conectaron a un datalogger 23X, que operó a una frecuencia de 10 hz en la toma de datos y generó promedios de 20 min para la determinación de las covarianzas.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Flujos de calor sensible positivos y negativos con y sin corrección por efecto de humedad.

En la Figura 4.1 se muestra la relación lineal entre el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire ( $H_{TC}$ ), y el obtenido con la temperatura sónica ( $H_{sonic}$ ), sin corrección por efecto de humedad, obtenidos durante el día (valores positivos) y durante la noche (valores negativos). Nótese que para valores negativos y valores positivos pequeños (menores de  $60 \text{ W m}^{-2}$ ),  $H_{TC}$  y  $H_{sonic}$  son muy similares y que a medida que aumenta el flujo de calor sensible, se incrementa la sobrestimación de  $H_{TC}$  en función de  $H_{sonic}$ . El propósito de esta relación es derivar el valor de  $H_{TC}$  en función de  $H_{sonic}$ , ya que para obtener  $H_{TC}$  es necesario medir la temperatura del aire con un termopar de alambre fino ( $12.7 \mu\text{m}$  de diámetro), que es muy frágil y fácilmente se rompe.

La relación de la Figura 4.1 muestra que para las condiciones climáticas (zonas áridas del Noreste de México), en las que se desarrollo el estudio, las estimaciones de  $H_{TC}$  en función de  $H_{sonic}$  son sobreestimadas en aproximadamente un promedio de 10%, cuando no se realiza la corrección por efecto de flujo de humedad en el aire. La sobrestimación absoluta es mayor a valores altos de flujo de calor sensible.

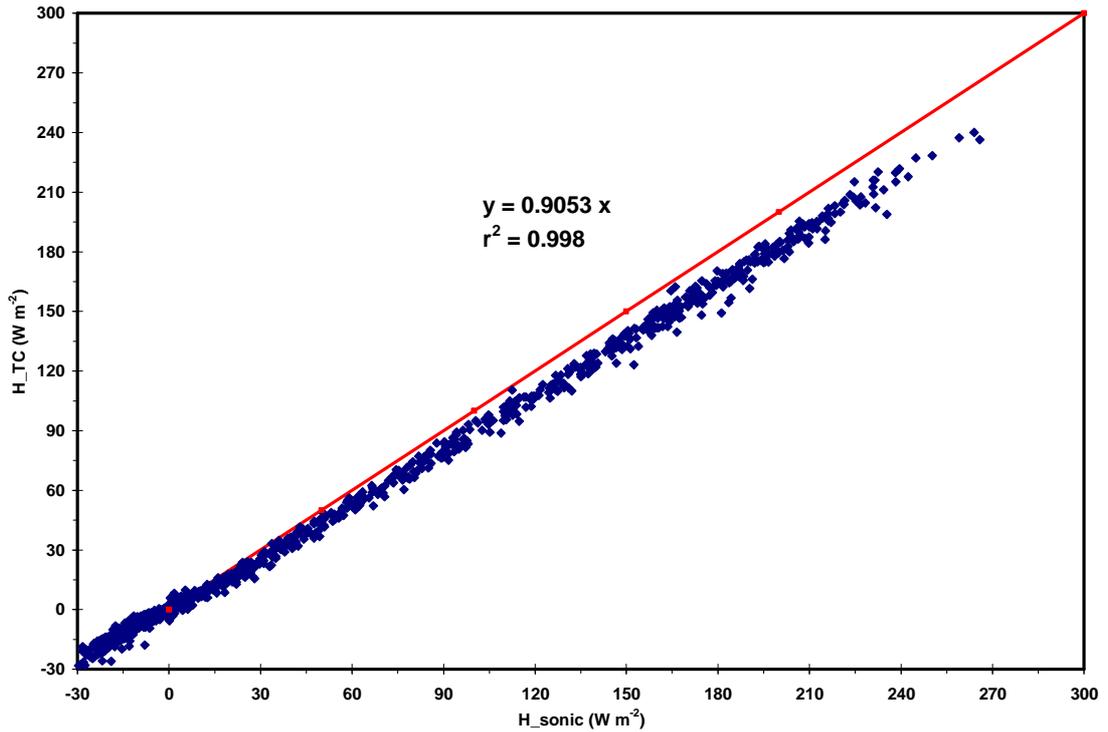


Figura 4.1. Relación entre el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire ( $H_{TC}$ ) y el obtenido con la temperatura sónica ( $H_{sonic}$ ), sin corrección por efecto de flujo de humedad. Cada punto de la grafica es el promedio de la covarianza de una frecuencia de toma de datos de 10 Hz y promedios de 20 min en una población de 20 días.

Cuando se hace la corrección por efecto de humedad en el aire se mejora notablemente la estimación de  $H_{TC}$  en función de  $H_{sonic\_hum}$  (Figura 4.2), en este caso, las estimaciones de  $H_{TC}$  en función de  $H_{sonic\_hum}$  se sobrestiman en promedio menos de 5 % (Figura 4.2) este resultado indica que inclusive en las atmósferas secas de las zonas áridas, es necesario hacer la corrección por flujo de humedad en el flujo de calor sensible sónico para determinar  $H_{TC}$ . Ham and Heilman (2003) reportaron una diferencia de apenas  $2 \text{ W m}^{-2}$  entre  $H_{Tc}$  y  $H_{sonic\_hum}$  por lo que recomiendan determinar el flujo de calor sensible en función del flujo de calor

sensible sónico, corregido por efecto de humedad para evitar usar el termopar de alambre fino, ya que es muy frágil y existe un alto riesgo de que se rompa cuando se encuentra operando en el campo.

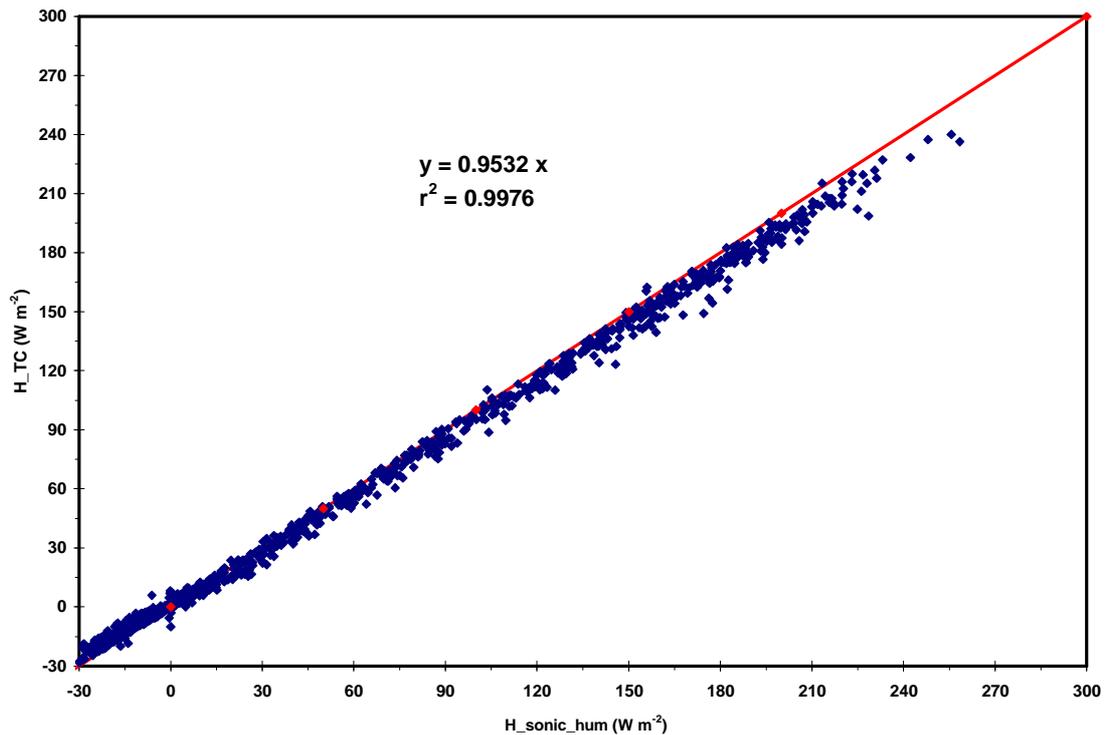


Figura 4.2. Relación entre el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire (H\_TC) y el obtenido con la temperatura sónica con corrección por efecto de flujo de humedad (H\_sonic\_hum). Cada punto de la grafica es el promedio de la covarianza de una frecuencia de toma de datos de 10 Hz y promedios de 20 min en una población de 20 días.

El resultado anterior sugiere que para efectos del balance de energía sobre una superficie vegetal, podría utilizarse la estimación de H\_TC en función del flujo de calor sensible sónico corregido por efecto de humedad

( $H_{\text{sonic\_hum}}$ ), ya que las sobrestimaciones serían menores del 5%. Si se quisiera mejorar la estimación podría multiplicarse el valor de  $H_{\text{sonic}}$  por el coeficiente 0.9532, esto para las condiciones de las zonas áridas del noreste de México.

#### **4.2. Flujo de calor sensible positivo con y sin corrección por efecto de humedad.**

Considerando únicamente flujos positivos (durante el día), la relación entre  $H_{\text{TC}}$  y  $H_{\text{sonic}}$  sin corrección por efecto de humedad (Figura 4.3) es muy similar a la que se obtuvo incluyendo valores negativos (Figura 4.1), Parece ser que la sobrestimación de  $H_{\text{TC}}$  en función de  $H_{\text{sonic}}$  se reduce ligeramente, ya que el coeficiente de ajuste se incrementa de 0.9053 a 0.9058. Nótese nuevamente que las sobrestimaciones de  $H_{\text{TC}}$  en función de  $H_{\text{sonic}}$  son de aproximadamente 10 %.

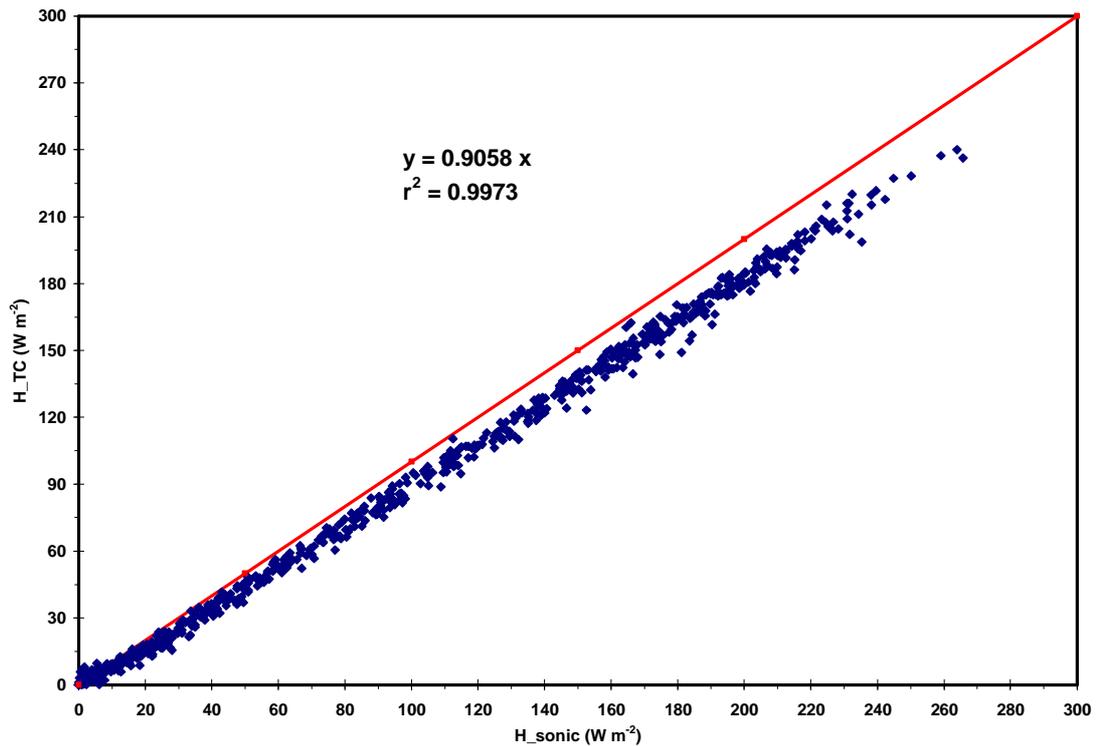


Figura 4.3 Relación entre el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire ( $H_{TC}$ ) y el obtenido con la temperatura sónica ( $H_{sonic}$ ), sin corrección por efecto de flujo de humedad y considerando únicamente valores positivos. Cada punto de la grafica es el promedio de la covarianza de una frecuencia de toma de datos de 10 Hz y promedios de 20 min en una población de 20 días.

Haciendo la corrección por efecto de humedad al flujo de calor sensible sónico ( $H_{sonic\_hum}$ ), se reducen las sobrestimaciones de  $H_{TC}$  en función de  $H_{sonic\_hum}$  a menos de un 5% (Figura 4.4). Considerando únicamente flujos positivos, parece ser que reducen las sobreestimaciones, ya que también se incrementa el coeficiente de ajuste de 0.9532 (Figura 4.2) a 0.9555 (Figura 4.4)

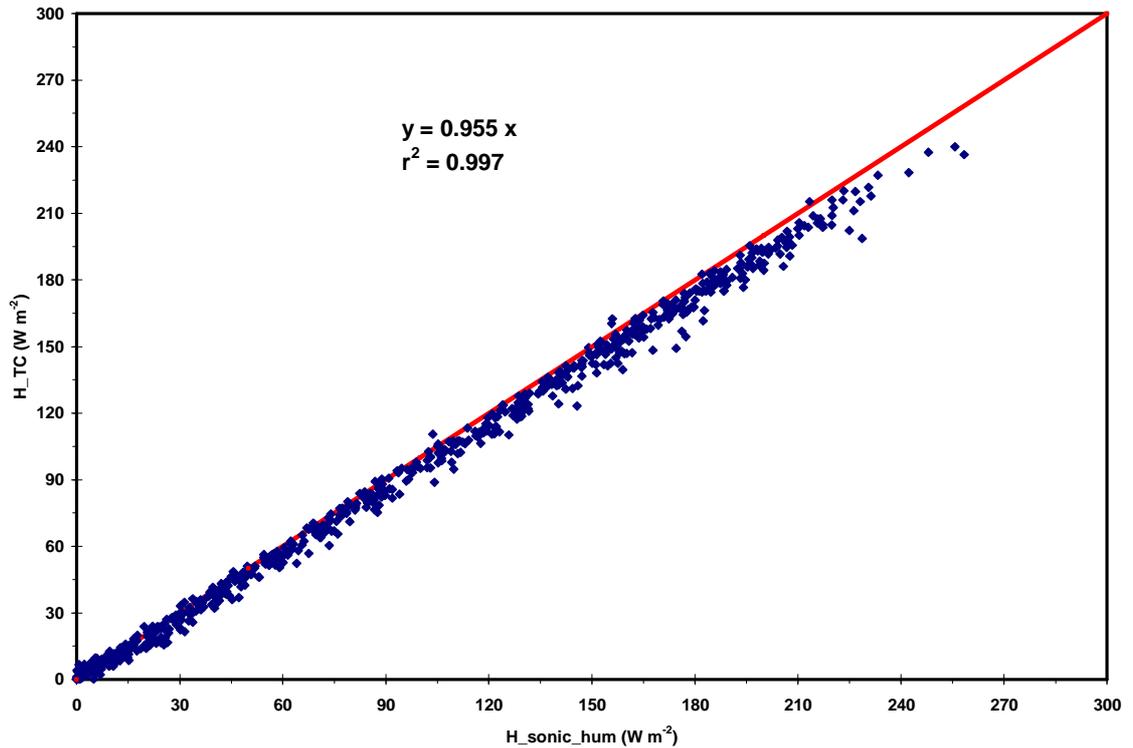


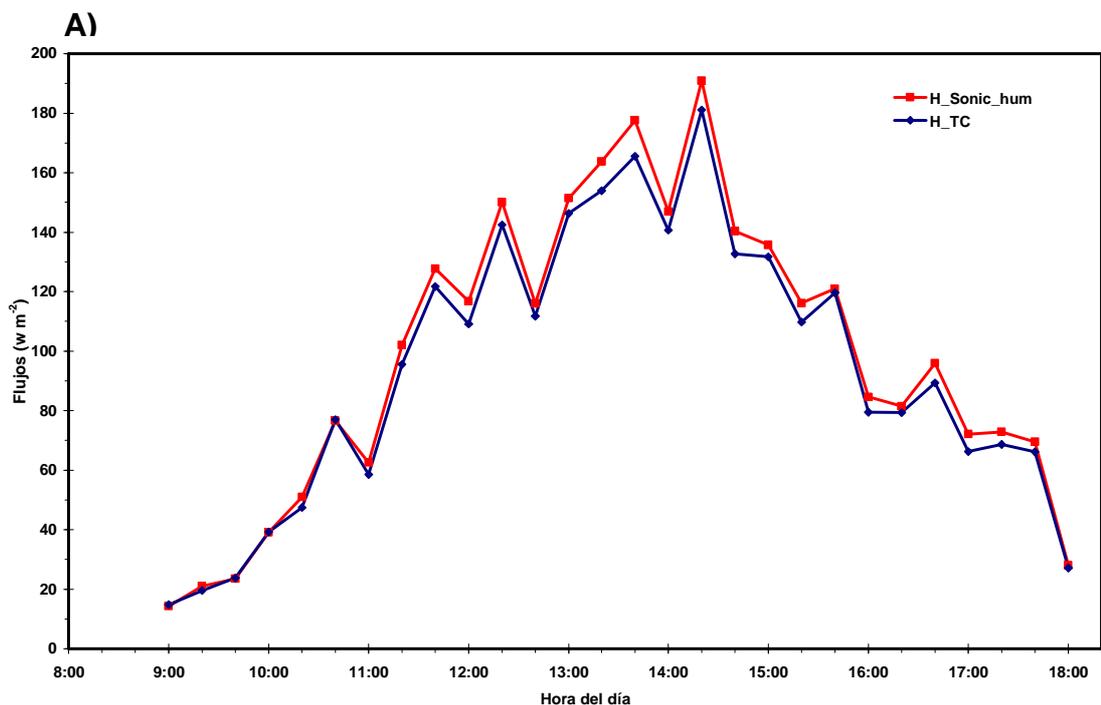
Figura 4.4. Relación entre el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire (H\_TC) y el obtenido con la temperatura sónica con corrección por efecto de flujo de humedad (H\_sonic\_hum), y considerando únicamente valores positivos. Cada punto de la grafica es el promedio de la covarianza de una frecuencia de toma de datos de 10 Hz y promedios de 20 min en una población de 20 días.

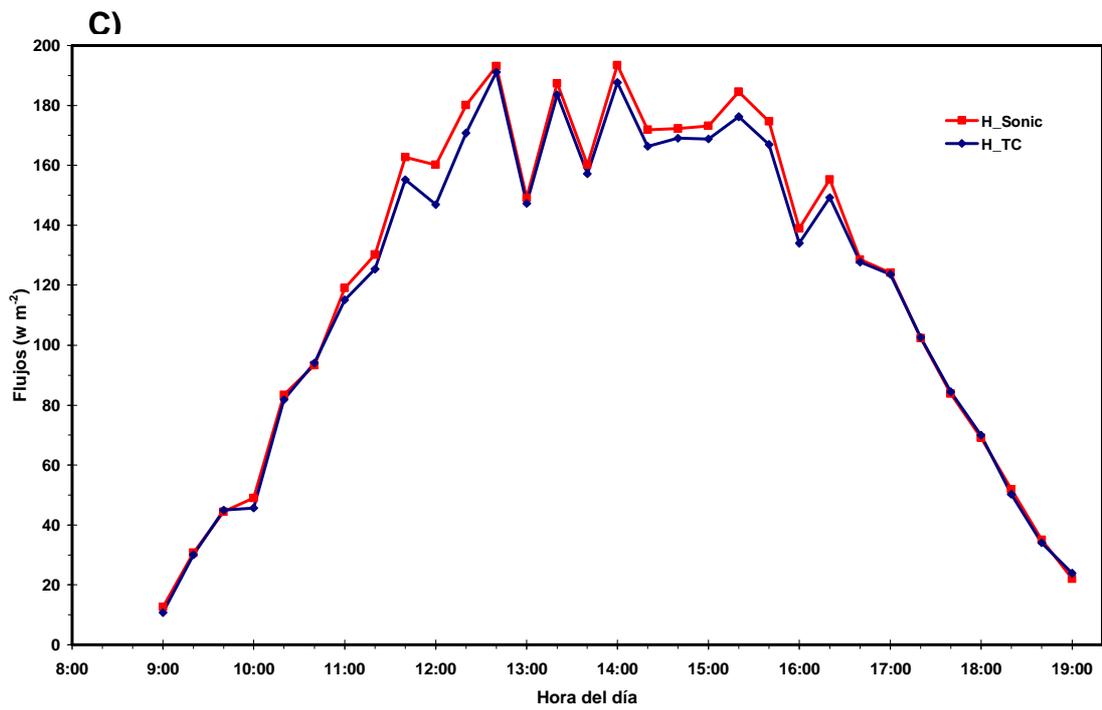
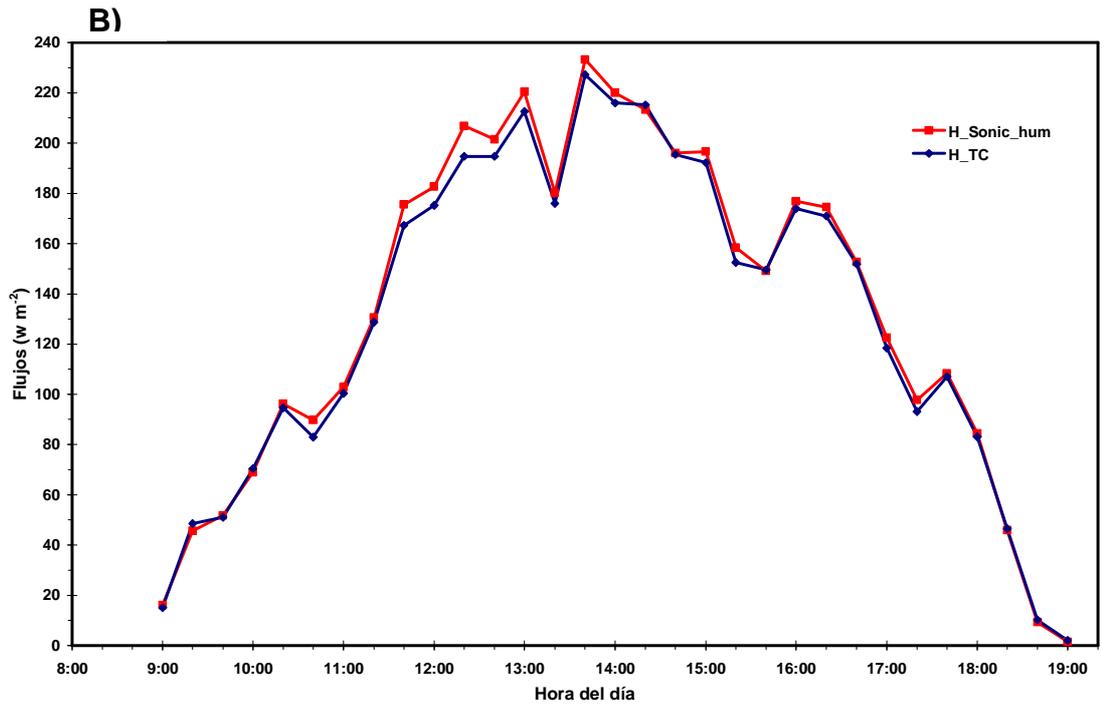
### 4.3. Flujo de calor sensible con base a la temperatura del aire y la temperatura sónica durante el día.

En la Figura 4.5 se muestra la evolución durante el día (valores positivos) del flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire (HC\_TC) y el obtenido con la temperatura sónica corregido por efecto de flujo de humedad en el aire (H\_sonic\_hum), observados en diferentes días del año. Todas las figuras indican que durante las primeras horas de la mañana y durante la tarde, H\_TC es básicamente igual a H\_sonic\_hum, y

que  $H_{\text{sonic\_hum}}$  es ligeramente mayor que  $H_{\text{TC}}$  entre aproximadamente las 12 y las 14 hr del día, esto debido a que en este periodo de tiempo se presentan los valores mayores de flujo de calor sensible.

Nuevamente, estos resultados muestran que es bastante aceptable estimar el flujo de calor sensible con base a la temperatura del aire ( $H_{\text{TC}}$ ) a partir del flujo de calor sensible sónico corregido por efecto de flujo de humedad ( $H_{\text{sonic\_hum}}$ ), ya que durante la mayor parte del día los dos flujos son básicamente iguales; de aproximadamente las 12 a las 14 hr,  $H_{\text{sonic}}$  sobre estima a  $H_{\text{TC}}$  en menos de un 5 % en promedio.





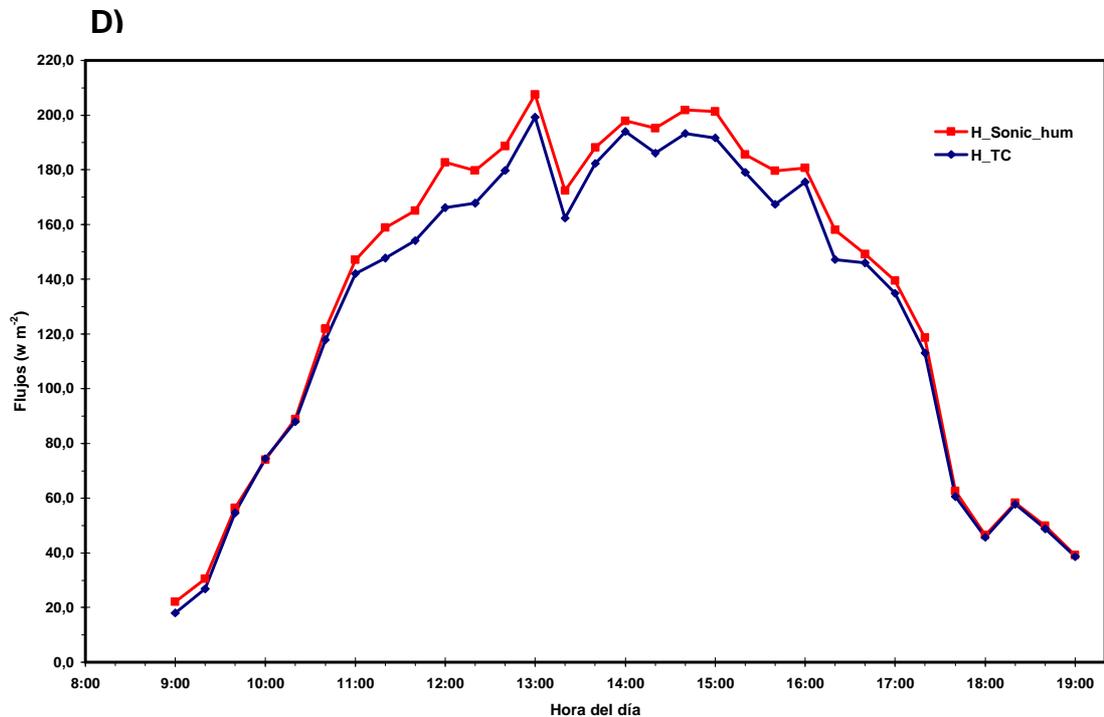


Figura 4.5. Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H\_TC) y el derivado con la temperatura sónica, corregido por efecto de flujo de humeado (H\_sonic\_hum), durante el día (valores positivos), observados los días: A) 129, B) 138, C) 141 y D) 142 del año, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico negro.

#### 4.4. Flujo de calor sensible con base a la temperatura del aire y la temperatura sónica durante la noche.

En las Figura 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 se muestra la evolución durante la noche (valores negativos) del flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire (HC\_TC) y el obtenido con la temperatura sónica

corregido por efecto del flujo de humedad en el aire ( $H_{\text{sonic\_hum}}$ ), observados en diferentes días del año. Todas las figuras indican una relación muy estrecha entre  $H_{\text{TC}}$  y  $H_{\text{sonic\_hum}}$  y que siempre  $H_{\text{sonic\_hum}}$  es más negativo que  $H_{\text{TC}}$ , indicando una ligera sobre estimación de  $H_{\text{TC}}$  en función de  $H_{\text{sonic\_hum}}$ . Sin embargo, las diferencias observadas en los días evaluados entre  $H_{\text{TC}}$  y  $H_{\text{sonic\_hum}}$  fueron menores de  $6 \text{ W m}^{-2}$

Estos resultados vuelven a mostrar que las estimaciones de  $H_{\text{TC}}$  en función de  $H_{\text{sonic\_hum}}$  son muy buenas, y dado que por la noche el valor absoluto del flujo de calor sensible es mucho menor que durante el día, las diferencias absolutas entre  $H_{\text{TC}}$  y  $H_{\text{sonic\_hum}}$  son mucho menores.

Con base a los resultados anteriores, se podría recomendar estimar el flujo de calor sensible con base a la temperatura del aire, a partir del flujo de calor sensible sónico corregido por efecto de flujo de humedad, para su uso en los balances de energía sobre superficies vegetales. De esta forma, se puede eliminar el uso de los termopares de alambre fino ya que por su fragilidad, el riesgo de que se rompan cuando se encuentran operando en el campo es muy alto.

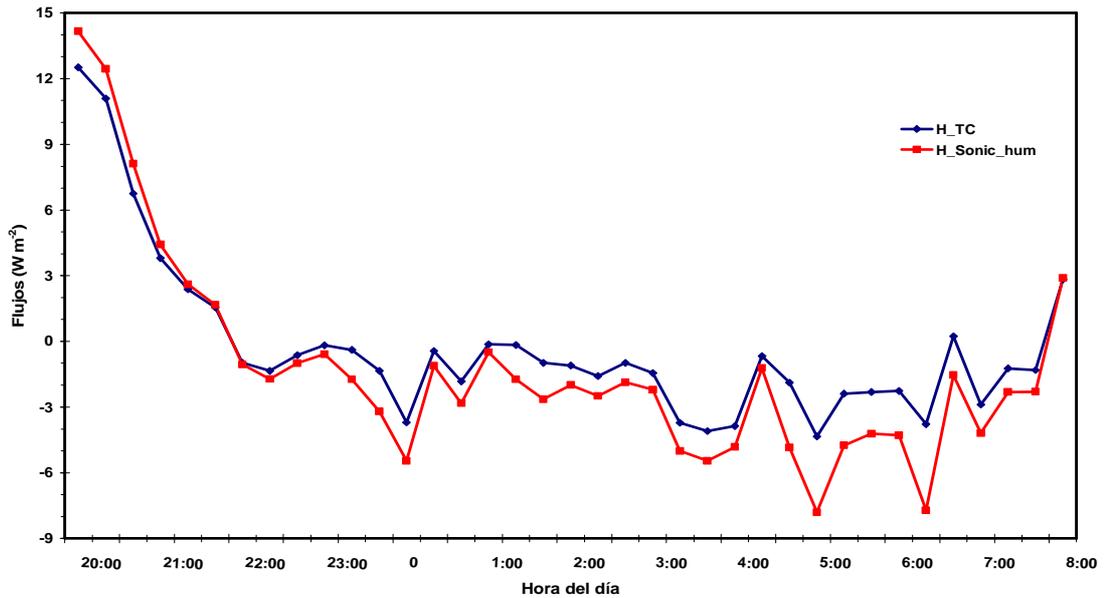


Figura 4.6. Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H\_TC) y el derivado con la temperatura sónica corregido por efecto de flujo de humedad (H\_sonic\_hum), observados del día 127 a las 20:00 h al día 128 a las 8:00 h, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico.

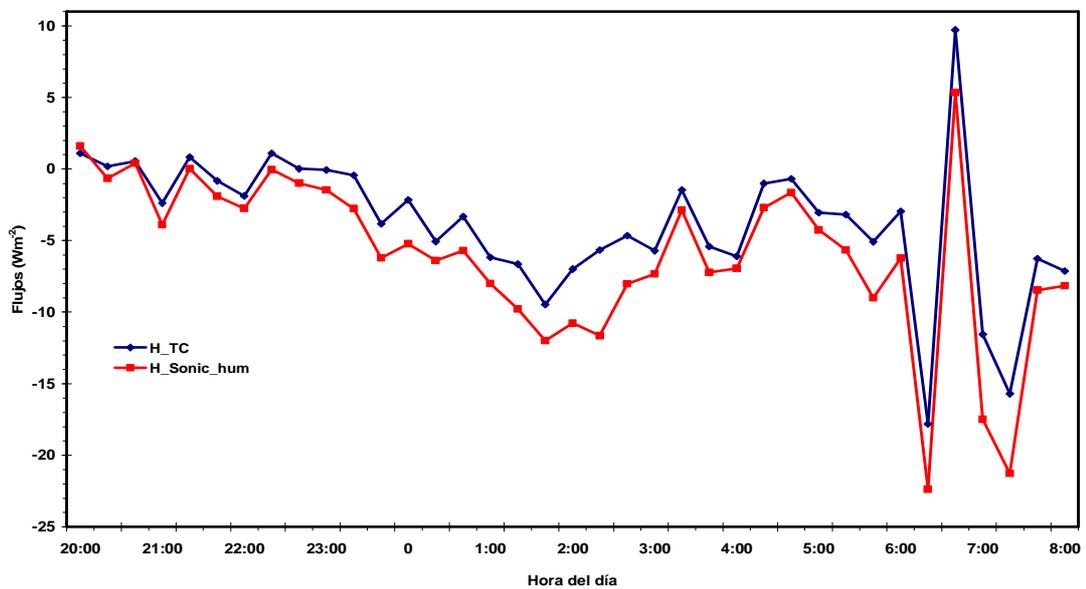


Figura 4.7. Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H\_TC) y el derivado con la temperatura sónica corregido por efecto de flujo de humedad (H\_sonic\_hum), observados del día 128 a las 20:00 h al día 129 a las 8:00 h, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico.

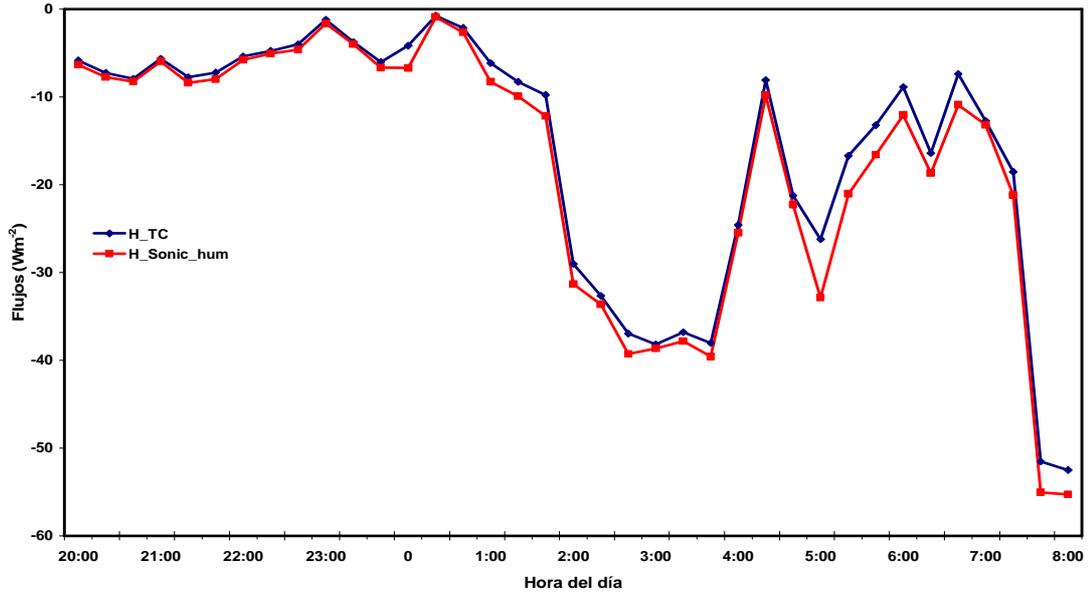


Figura 4.8. Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H\_TC) y el derivado con la temperatura sónica corregido por efecto de flujo de humedad (H\_sonic\_hum), observados del día 129 a las 20:00 h al día 130 a las 8:00 h, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico.

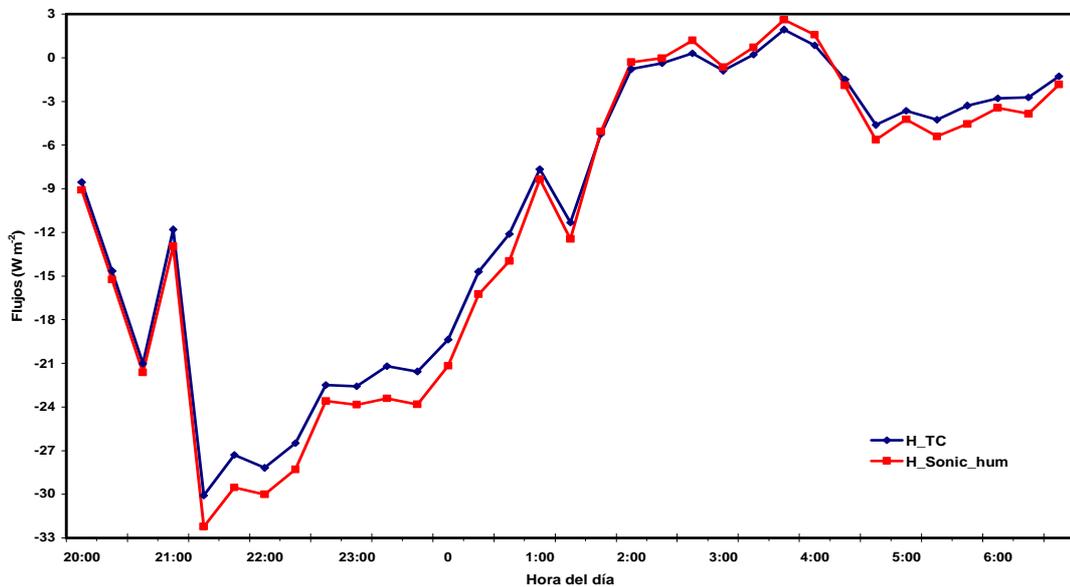


Figura 4.9. Relación entre el flujo de calor sensible derivado con la temperatura del aire (H\_TC) y el derivado con la temperatura sónica corregido por efecto de flujo de humedad (H\_sonic\_hum), observados del día 130 a las 20:40 h al día 131 a las 8:20 h, sobre un cultivo de chile Morrón con acolchado plástico.

## V. CONCLUSIONES

El flujo de calor sensible con base a la temperatura del aire ( $H_{TC}$ ) estimado a partir del flujo de calor sensible con base a la temperatura sónica ( $H_{sonic}$ ) se sobreestima en un promedio de 10 % cuando no se hacen las correcciones a  $H_{sonic}$  por efecto de humedad en el aire. Haciendo las correcciones por efecto de humeada, las sobrestimaciones se reducen a menos de 5 % en promedio.

La evolución durante el día de  $H_{TC}$  y  $H_{sonic}$  indica que durante las primeras horas de la mañana y por la tarde,  $H_{TC}$  y  $H_{sonic}$  son básicamente iguales, y se observa una ligera sobreestimación de  $H_{sonic}$  de las 12 a las 14 hr cuando el flujo de calor sensible es mayor, sin embargo las diferencias son menores del 5 % en promedio. Durante la noche, el flujo de calor sensible absoluto es menor que durante el día, y las diferencias absolutas entre  $H_{TC}$  y  $H_{sonic}$  son menores.

Con base a los resultados de este estudio, se puede recomendar estimar  $H_{TC}$  a partir de  $H_{sonic}$ , con la corrección correspondiente por efecto de humedad en el aire, para evitar el uso del termopar de alambre fino, ya que tiene un alto riesgo de que se rompa cuando se encuentra operando en el campo; para su aplicación en los balances de energía sobre superficies vegetales.

## VI. RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar la determinación del flujo de calor sensible ( $H_{TC}$ ) en función del flujo de calor sensible sónico ( $H_{sonic}$ ), en un sistema de covarianza eddy. El trabajo se realizó durante el ciclo agrícola primavera verano (marzo-junio) en el Rancho Santa Rita municipio de Ramos Arizpe, Coahuila, ubicado al norte de Coahuila. Geográficamente esta localidad se localiza en las coordenadas  $25^{\circ} 40' 50''$  latitud norte,  $101^{\circ} 07'25''$  longitud oeste y con una altitud de 1140 metros sobre el nivel del mar.

El flujo de calor sensible se midió utilizando un 3-D anemómetro sónico, un termopar de alambre fino de chromel-constantan de  $12.7 \mu\text{m}$  de diámetro y un Higrómetro de Kriptón. Para el registro de datos, todos los sensores se conectaron a un datalogger 23X, que operó a una frecuencia de 10 hz en la toma de datos y generó promedios de 20 min para la determinación de las covarianzas. Como el termopar de alambre fino es muy frágil y muy susceptible a romperse cuando se encuentra operando en campo se recomienda que el flujo de calor sensible se determine utilizando la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la temperatura sónica, sin embargo, el flujo de calor sensible derivado con la temperatura sónica es afectado por la magnitud del flujo de calor latente de tal forma que fue necesario hacer una corrección por efecto de flujo de humedad para mejorar las determinaciones del flujo de calor sensible a partir del flujo de calor sensible sónico.

El análisis del flujo de calor sensible se realizó durante el día y durante la noche. La evaluación del flujo durante el día se realizó de las 8:00 a las 19:00 hr y durante la noche de las 20:00 a las 8:00 hr del día siguiente. La evaluación de estos datos arrojan los siguientes resultados; cuando no se hace la corrección por efecto de humedad para el ( $H_{\text{sonic}}$ ) el flujo de calor sensible obtenido con la temperatura del aire ( $H_{\text{TC}}$ ) sobreestima en un promedio de 10% al flujo de calor sensible obtenido con la temperatura sónica ( $H_{\text{sonic}}$ ). Haciendo la corrección por efecto de humedad las sobrestimaciones se reducen a menos de 5% en promedio. Durante las primeras horas de la mañana y por la tarde  $H_{\text{TC}}$  y  $H_{\text{sonic}}$  son básicamente iguales, pero se observa una ligera sobre estimación de  $H_{\text{sonic}}$  de las 12 a las 14 hr cuando el flujo de calor sensible es mayor, sin embargo las diferencias son menores del 5 % en promedio. Durante la noche, el flujo de calor sensible absoluto es menor que durante el día, y las diferencias absolutas entre  $H_{\text{TC}}$  y  $H_{\text{sonic}}$  son menores.

Con base a los resultados de este estudio, se puede recomendar estimar  $H_{\text{TC}}$  a partir de  $H_{\text{sonic\_hum}}$ , para evitar el uso del termopar de alambre fino, ya que tiene un alto riesgo de que se rompa cuando se encuentra operando en el campo. Esto para su aplicación en los balances de energía sobre superficies vegetales.

## VII. BIBLIOGRAFIA

- Ashktorab, H., W.O. Pruott and K.P. Paw. 1994. Partitioning of Evapotranspiration using Lisimeter and Micro-Bowen-Ratio System. *J. Irrig. And Drainage Eng.* 120 (2): 450-464.
- Bastiaanssen W., Palitha Bandara and Lucas Janssen. 1998. Land Surface Evapotranspiration for Water Balance in the Kirirndi Oya Watershed. A remote Sensing Approach. Articulo presentado en: National Water Conference on Status and Future Directions of water Research in Sri Lanka, Colombo, November 4 – 6, 1998. (p1-9).
- Bowen, I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* 27: 779-787.
- Campbell, G.S. and M.H. Unsworth. 1979. An Inexpensive Sonic Anemometer for Eddy Correlation. *Journal of Applied Meteorology.* 18: 1072-1077.
- Campbell, G.S., C. Calissindorff and J.H. Williams. 1991. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 55: 291-293
- Davidson, K.L., T. Houlihan, C.W. Fairall and G.E. Schacher. 1978; Observations of C2T over the ocean. *Bound. Layer Meteor.* 15: 507-523.
- Dugas, W.A., L.J. Fritschen, L.W. Gay, A. Held., A. Matthias., A.D. Reicosky, D.C. Steduto and P. Steiner. 1991. Bowen ratio, eddy correlation and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigation spring wheat. *Agric. For. Meteorol.* 56: 1-20.

- Fuchs, M. and C.B. Tanner. 1970. Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry. *Agric. Meteorol.* 7: 329-334.
- Fuchs, M. 1986. Heat flux. In Klute, A. (ed.) *Methods of soil Analysis: Physical and mineralogical methods.* Agron. Monogr. No. 9 (Part 1) Amer. Soc. Agron., Soil Sci. Soc. Amer., Madison, Wis. p. 957-968.
- Garrat, J.R. 1978. Flux profile relations above tall vegetation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 104: 199-211.
- Garreaud, S.R. and C.N. Meruane. 2005. *Flujos turbulentos.* Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geofísica. DGF. 9 pp.
- Ham, J.M. and J.L. Heilman. 2003. Experimental test and energy balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path eddy covariance. *Agronomy Journal.* 95: 1393-1403.
- Ham, J.M. and G.J. Kluitenberg. 1994. Modeling the effect of mulch optical properties and mulch-soil contact resistance on soil heating under plastic mulch culture. *Agric. For. Meteorol.* 71: 403-424.
- Ham, J.M. and R.S. Senock. 1992. On the measurement of soil surface temperature. *Soil. Soc. Amer. J.* 56: 370-377.
- Heilman, J.L., C.L. Brittin and C.M.U. Neale. 1989. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agric. For. Meteorol.* 44: 261-273.
- Idso S. B. 1974. The calibration and use of net radiometer. Pp 261-275 In: N.C. Brady (ed) *Adv. Agron.* Academic Press New York. 26: 261-275.
- Itier, B. and Y. Brunet. 1996. Recent Developments and present Trends in Evapotranspiration Research: A partial Survey. En: *Evapotranspiration*

and Irrigation Scheduling, Proc. Of the International Conference, 1996, San Antonio Texas, USA. (p1-20).

Itier, B., Y. Brunet, K.J., McAneney and J.P. Lagouarde. 1996. Evapotranspiration under Advective Conditions: Downwind evolution over Irrigated Fields. En: Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proc. Of the International Conference, 1996, San Antonio, Texas, USA. (p167-172).

Jiyane, J. and A. Zermeño-Gonzalez. (2002). Applying the equilibrium evapotranspiration approach to irrigated agriculture in arid lands. *Agrociencia*, 37 (6): 553-563.

Jensen M.E., R.D. Burman and R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. Manual and reports on engineers practices No. 70. American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, USA. pp332.

Jones, H.G. 1992. Plants and microclimate (A Quantitative Approach to Environmental Physiology). Second Edition, Cambridge University Press. United Kingdom.

Jones, F.E. 1992. Evaporation of water. Lewis publisher, Chelsea, Mich, p11.

Kaimal, J.C. and J.A. Businger. 1963. Continuous wave sonic anemometer-thermometer. *J. Appl. Meteor.*, 2: 156-167.

Kaimal, J.C., 1969. Measurement of momentum and heat flux variations in the surface boundary layer. *Ratio Sci.* 4: 1147-1153.

Kaimal, J.C. and J.E. Gaynor. 1991. Another look at sonic thermometry. *Bound-Layer Meteor.* 56: 401-410.

- Kanemasu, E.T., M.L. Wesely, B.B. Hicks and J.L. Heilman. 1979. Techniques for calculating Energy and Mass Fluxes. Modification of the Aerial Environment of Crops (B.J. Barfield and J.F. Gerber, eds). Am. Soc. Agric. Engineers, St. Joseph, Michigan.
- Kimbal, B. A. and R. D. Jackson. 1979. Soil heat flux. In B.J. Barfield and J.F. Gerger (eds). Modifications of the aerial Enviroment of Planted. Monogr. No. 2 Amer. Soc. Agric. Eng., St Joseph. Mich. p 211-229.
- Kizer, M.A. and R.L. Elliott. 1991. Eddy Correlation Systems for Measuring Evapotranspiration. Transactions of ASAE 34(2): 387-392.
- Larsen, S.E., J. Hojstrup and C.H. Gibson. 1980. Fast-response temperature sensors. Air-Sea Interaction. F. Dobson, R. Davis, and L. Hasse, Eds., Plenum, 169-291.
- Larsen, L.E., C.W. Fairall, J.B. Edson and P.G. Mestayer. 1988. Sonic temperature measurements during HEXMAX. Humidity Exchange over the Sea, Main Experiment (HEXMAX) Analysis and interpretation, W. A. Oost, S. D. Smidth, and K. B. Katsaros, Eds., Department of Atmospheric Sciences, University of Washington. 58-69.
- Larsen, S.E., J.B. Edson, C.W. Fairall and P.G. Mestayer. 1993. Measurement of Temperature Spectra by a Sonic Anemometer, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 10: 335-354.
- Malek, E., G.E. Bingham and G.D. McCurdy. 1990. Evapotranspiration from the margin and moist playa of a closed desert valley. J. Hydrol. 120: 15-34.
- Martinez, E.R. y C.M. Aguilera. 1996. Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. Universidad Autonoma Chapingo. México. P(29: 165-250).

- Mitsuta, Y. 1996. Sonic anemometer-thermometer for general use. *J. Meteor. Soc. Japan.* 44: 12-24.
- Miyake, M. and G. McBean. 1970. On the measurement of vertical humidity transport over land. *Bound.-Layer Meteor.*, 1, 88-101.
- Oke, T.R. 1978. *Boundary layer climates.* Methuen, second edition. London and New York. 435 pp.
- Ortega-Farias, S., R. Cuenca and M. Ek. 1996. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. *Agric. For. Meteorol.* 81:131-143.
- Pereira S., A. Perrier, G. Richard, Allen and I. Alves 1996. Evapotranspiration: Review of Concepts and Future Trends. En: *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proc. Of the International Conference, San Antonio, Texas, USA.* (p109-115).
- Prueger, J.H., T.J. Sauner and J.L. Hatfield. 1998. Turbulence Flux Estimates of Sensible and Latent Heat Near Shelterbelts During Low wind Conditions. *Transactions of ASAE* 4(6): 1643-1650.
- Revheim, K.J.A. and R.B. Jordan. 1976. Precision of evaporation measurements using the Bowen ratio. *Boundary-layer Meteorol.* 10: 97-111.
- Rosenberg, N.J., B.L. Blad and S.B. Verma. 1983. *Microclimate: The biological environment.* Wiley, New York, 495 pp.
- Schacher, G. and C.W. Fairall. 1976. Use of resistance wires for atmospheric turbulence measurements in the marine environment. *Rev. Sci. Instrum.*, 47: 703-707.

- Schmitt, K.F., Friehe and C.H. Gibson. 1978. Humidity sensitivity of atmospheric temperature sensors to salt contamination. *J. Phys. Oceanogr.* 8: 151-161.
- Sinclair, T.R., L.H. Allen Jr. and E.R. Lemon. 1975. An analysis of errors in the calculation of energy flux densities above vegetation by a Bowen-ratio profile method. *Boundary-Layer Meteorol.* 8: 129-139.
- Tarara, J.M. and J.M. Ham. 1997. Measuring soil water content in the laboratory and field with dual-probe heat-capacity sensors. *Agron. J.* 89: 535-542.
- Tarara, J.M. and J.M. Ham. 1999. Measuring sensible heat transport in plastic mulch culture with aerodynamic conductance sensors. *Agric. For. Meteorol.* 95: 1-13.
- Tarara, J.M. 2000. Microclimate modification with plastic mulch. *HortScience*, Vol. 35 (2) April 2000.
- Twine, T.E., W.P. Kustas, J.M. Norman, D.R. Cook, P.R. Houser, T.P. Meyers, J.H. Prueger, P.J. Starks and M.L. Wesely. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agric. For. Meteorol.* 103: 279-300.
- Webb, E., G. Pearman, and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 106:85-100.
- Webb, E.K. 1982. On the Correction of Flux Measurements for Effects of Heat and Water Vapour Transfer. *Boundary-Layer Meteorol.* 23: 251-254.

Williams, R.J. and D.G. Stout. 1981. Evapotranspiration and Leaf Water Status of Alfalfa Growing Under Advective Conditions. Canadian J. Plant Sci. 61: 601-607.

Zermeño G.A. and L.E. Hips. 1997. Downwind Evolution of Surface Fluxes over a Vegetated Surface during Local Advection of Heat and Saturation Deficit. Journal Of Hydrology 192: 189-210.

Zermeño G.A. 2001. Métodos Micrometeorológicos para Medir Flujos de Calor y Vapor de Agua entre los Cultivos y la Atmósfera. XIII Semana Internacional de Agronomía. 5-7 de Septiembre, Gomez Palacio, Durango, Mexico. (p53-57).