

Enfoque de la Evaporación a Equilibrio en la
Determinación de la Evapotranspiración Real del
Pasto Ryegrass en la Agricultura de las
Zonas Áridas

HECTOR VAZQUEZ HERNANDEZ

TESIS

Presentada como Requisito Parcial

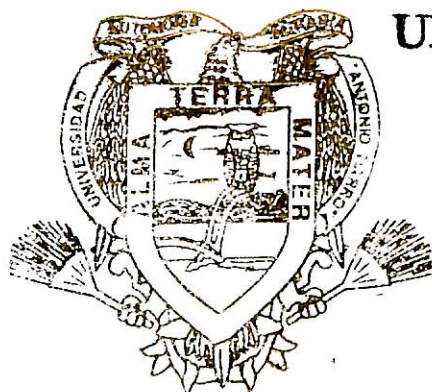
Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"

para Obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias en
Ingeniería de Sistemas Agrícolas



BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"

Programa de Graduados

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre del 2003

14061

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

Enfoque de la Evaporación a Equilibrio en la Determinación de la
Evapotranspiración Real del Pasto Ryegrass en la Agricultura de las Zonas
Áridas

POR

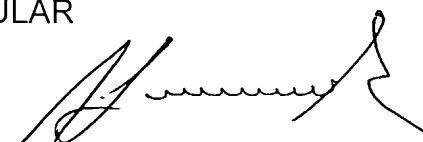
HÉCTOR VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

Elaborada bajo supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como
requisito parcial para obtener el grado de:


MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERIA DE SISTEMAS AGRICOLAS

COMITÉ PARTICULAR


Asesor principal:


Dr. Alejandro Zermeño González

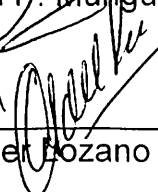
Asesor:



Dr. Eduardo A. Narro Farías

Asesor:


Dr. Juan P. Muñguía López

Asesor:


Dr. Javier Lozano del Río


Dr. Jerónimo Landeros Flores
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre del 2003

DEDICATORIA

A DIOS NUESTRO SEÑOR:

Que debe ser parte fundamental en la vida de cada individuo, lo nombre como lo nombre.

A mí esposa Enedina Sánchez González, por su apoyo incondicional en todo momento, a mí hijo **Héctor Vázquez Sánchez** motivo fundamental de mi vida.

CON PROFUNDO RESPETO Y AMOR A MIS PADRES:

Sra. Felicitas Hernández Sánchez.

Sr. Servando Vázquez Pineda.

A quienes debo la vida, así como la formación y principios de superación que me inculcaron, que Dios los guarde siempre.

A MIS HERMANOS:

Enrique

Delia

Servando

Valentín

Griselda

Minerva

César

A quien quiero mucho por esos lazos fraternales que nos unen, y en gratitud por el apoyo y estímulo que siempre me han brindado.

A MIS ABUELOS:

Timoteo (+)

Isabel (+)

Ángel (+)

Elena (+)

Gracias por su amor y cariño, por sus sabios consejos. Que Dios los tenga en su seno.

A MIS SOBRINOS:

Por llevar toda la felicidad y alegría del mundo a nuestros hogares y hacer sentir a sus padres y abuelos orgullosos de ustedes.

A MIS AMIGOS:

Alejandro Cabrera y toda su familia, Josafat Santiago Nava, Adrián González Zaragoza, Gerardo Quero Sosa, J. Fernando Arévalo, Javier Olage, Ángel Ramírez, Juan Santiago, Nacho, Octavio, David Sánchez A., Juan José Funes y Yabulani Yiyane. Gracias por su amistad, ayuda y por haberme aceptado hasta este momento de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Alejandro Zermeño González. Por la revisión, aportaciones y sugerencias para la buena presentación de este trabajo, así como su orientación en todo el trabajo de campo. Y por su valiosa amistad que me ofreció durante el presente trabajo.

Al Dr. Eduardo A. Narro Farias. Por brindarme desinteresadamente gran parte de su valioso tiempo en el asesoramiento, supervisión y desarrollo del presente trabajo; así como por su amistad incondicional que siempre me ha demostrado dentro y fuera de la Universidad reconociendo su capacidad profesional y reiterándole mis más sinceros agradecimientos.

Al Dr. Juan P. Munguía López. Por la revisión de este trabajo y sugerencias para la mejora del presente trabajo, por su amistad y por su valiosa participación como miembro del jurado.

Al Dr. Javier Lozano del Río. Por la revisión de este trabajo, por su tiempo y su participación como miembro del jurado.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, mi **Alma Terra Mater** por abrirme las puertas y darme las herramientas para enfrentarme a la vida.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	<i>viii</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>ix</i>
INTRODUCCIÓN	1
REVISION DE LITERATURA	4
Definición de Términos.....	4
Evapotranspiración.....	4
Evapotranspiración Real o Actual (ET).....	5
ET de Referencia (ET _r).....	5
Evapotranspiración a Equilibrio (ET _{equ.}).....	6
Factores que Afectan la Evapotranspiración.....	6
Advección Local.....	7
Ecuación de Penman -Monteith.....	8
Método de la Covarianza Eddy.....	12
Valores del Factor de Advección Obtenidos en Otros Cultivos.....	14
Característica Generales del Pasto Ryegrass Anual.....	15
Taxonomía.....	15
Adaptación y Comportamiento del Ryegrass Anual.....	16
MATERIALES Y MÉTODOS	18
Ubicación y Descripción del Sitio Experimental.....	18
Tipo de Clima.....	18
Suelo.....	19
Agua.....	20
Establecimiento y Manejo del Cultivo.....	21
Instrumentación y Mediciones.....	22
Procesamiento de Datos.....	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28

Componentes del Balance de Energía y la Evapotranspiración	
a Equilibrio.....	28
Factor de Advección.....	33
Relación del Factor de Advección y el Flujo de Calor Sensible.....	36
Relación del Factor de Advección y la Velocidad del viento.....	37
Relación del Factor de Advección y la Dirección del viento.....	38
CONCLUSIONES.....	39
RESUMEN.....	41
LITERATURA CITADA.....	44
PAGINAS WEB CONSULTADAS.....	50

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
2.1 Clasificación del pasto ryegrass anual.....	15
3.1 Análisis físico-químico del suelo a una profundidad 0-30 cm.....	20
3.2 Análisis químico del agua.....	21
4.1 Valores integrados, para cada componente del balance de energía, LE, LE _{equ} , factor de advección y factor de advección promedio.....	34

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
3.1.	Elementos de una estación eddy para medir flujo de calor sensible (H) y flujo de calor latente (LE), en la cual se muestra el 3-D anemómetro sónico, el termopar de alambre fino y el kriptón hygrometro de respuesta rápida.....	24
3.2	Representación esquemática del área de estudio, donde se instaló la estación de la covarianza eddy y el balance de energía.....	25
3.3	Representación esquemática de la distribución de los instrumentos y sensores de medición.....	26
4.1	Flujos de energía y masa observados el día del año 107 ($W m^{-2}$).....	29
4.2	Flujos de energía y masa observados el día del año 123 (Wm^2).....	30
4.3	Flujos de energía y masa observados el día del año 125 ($W m^{-2}$).....	31
4.4	Flujos de energía y masa observados el día del año 130 ($W m^{-2}$).....	33
4.5	Relación del factor de advección y el flujo de calor sensible (H) en ($MJ m^{-2}$).....	36
4.6	Relación del factor de advección y la velocidad del viento en ($m s^{-1}$).....	37
4.7	Relación del factor de advección y la dirección del viento.....	38

COMPENDIO

Enfoque de la evaporación a equilibrio en la determinación de la evapotranspiración real del pasto ryegrass en la agricultura de las zonas áridas

POR

HÉCTOR VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DICIEMBRE 2003

Dr. Alejandro Zermeño González - Asesor

Palabras Claves: Evapotranspiración actual, Evapotranspiración a equilibrio, Advección, Correlación Eddy, Balance de energía, ecuación de Priestley – Taylor, Ryegrass.

El objetivo de esta investigación fue aplicar el enfoque de la evapotranspiración a equilibrio (LE_{equ}) para determinar la evapotranspiración real (LE) del pasto Ryegrass en condiciones áridas y semiaridas. De acuerdo con este enfoque, LE se calcula con la ecuación, $LE = LE_{equ} * \alpha$, donde α es un factor de advección que depende de las características climáticas de la región y de la magnitud de la advección local. La implementación de este método

requiere del conocimiento del factor de advección, el cual debe determinarse previamente para el cultivo y la región de interés. El factor de advección se obtuvo a partir de la relación $\alpha = LE/LE_{equ}$ para los diferentes segmentos de tiempo y así obtener el factor de advección promedio de todos ellos.

Los resultados de esta investigación muestran que la radiación neta (R_n), flujo de calor latente real (LE) y el flujo de calor latente a equilibrio (LE_{equ}) siguen la misma tendencia que la radiación solar incidente (R_{sw}), y que existe una estrecha relación entre la tasa de evapotranspiración real y la evapotranspiración a equilibrio.

El factor de advección promedio por segmento de tiempo obtenido fue 1.24 con un coeficiente de variación de 23.6 por ciento. Este resultado indica que es posible obtener una buena evaluación de la evapotranspiración real a partir de la evapotranspiración a equilibrio. Se observó una relación directa entre el incremento del flujo de calor sensible de la atmósfera hacia el dosel del pasto (H negativo) y el incremento del factor de advección. Los resultados obtenidos también muestran que existe una tendencia media de la reducción de la velocidad del viento con un decremento del factor de advección y al parecer no se observó relación entre la dirección del viento y el factor de advección.

ABSTRACT

Equilibrium evaporation approach for determining in the actual evapotranspiration of Ryegrass in agriculture of arid lands

By

HÉCTOR VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

MASTER OF SCIENCE
ENGINEERING OF AGRICULTURAL SYSTEM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DECEMBER 2003

Dr. Alejandro Zermeño González - Asesor

Key words: Actual evapotranspiration, Equilibrium evapotranspiration, advection, Eddy correlation, energy balance, Priestley–Taylor equation, Ryegrass.

The objective of this research was to apply the equilibrium evapotranspiration (LE_{equ}) approach to determine actual evapotranspiration (LE) of ryegrass in the agricultural lands of the arid and semiarid regions. According to this approach, LE is calculated with the equation $LE = LE_{equ} * \alpha$, where α is an advection factor that depends on the climatic properties of the region and the magnitude of the local advection. Application of this method requires of the knowledge of the advection factor, which must be previously determined for the

crop and region. The advection factor was obtained from the relation $\alpha = LE/LE_{equ}$ for different time segments, to obtain the average advection factor.

The results of this study showed that net radiation (Rn), latent heat flux (LE) and the equilibrium latent heat flux (LE_{equ}) have the same tendency than solar radiation (Rsw). It was also observed a close relation between actual evapotranspiration and equilibrium evapotranspiration.

The value of the average advection factor was 1.24 with a variation coefficient of 23.6 percent. This result suggests that it is possible to obtain good estimations of actual evapotranspiration from the equilibrium evapotranspiration. Besides, a direct relation between the increase of latent heat flux from the atmosphere to the canopy (negative H) and the increase of the advection factor was observed. It was also observed a direct relation between a decrease of wind speed and a decrease of the advection factor. No relation between wind direction and the advection factor was observed.

INTRODUCCION

Debido a la sobre explotación, mal uso del agua y la escasa precipitación en muchas regiones del país, principalmente en el norte y centro se ha observado un importante y preocupante abatimiento de los acuíferos.

Para mejorar la eficiencia del uso del agua en la agricultura, es necesario, medir o estimar el consumo de agua diario de los diferentes cultivos (evapotranspiración), para poder determinar el momento oportuno de riego y la cantidad de agua por aplicar.

A la fecha, se han desarrollado un gran número de métodos que estiman *la evapotranspiración de cultivos. Dichos métodos involucran el empleo de ecuaciones empíricas, las cuales* requieren de información climatológica fácil de conseguir y, por lo tanto, tienen gran utilidad en la planeación agrícola (Penman, 1948; Thornthwaite, 1942; Rosenberg *et. al.* 1983). Sin embargo, estas ecuaciones estiman una evapotranspiración potencial o de referencia generalmente en base a datos promedio mensuales.

Por otro lado existen métodos micrometeorológicos que estiman la evapotranspiración (ET) en intervalos cortos de tiempo (20-30 minutos), por lo que permiten estimar este parámetro en tiempo real (Rosenberg, 1974). Dentro de estos métodos se encuentran los que se basan en el Balance de energía, como el método de la Relación de Bowen y el de la Covarianza Eddy (Pal Arya, 1988; Stull, 1991; Verma *et al.*, 1986; Baldochi *et al.*, 1988). Al considerar estos métodos se obtienen valores muy precisos de la evapotranspiración diaria de los cultivos en grandes superficies. Los problemas que se tienen al utilizar esta técnica y tecnología son sin duda el alto costo del equipo e instrumental, así mismo de que se debe de contar con personal capacitado para su utilización, por lo que se dificulta su acceso en la mayoría de los productores.

El enfoque de la Evaporación a equilibrio se ha utilizado principalmente para condiciones de zonas húmedas (Priestley y Taylor, 1972). Según (Zermeño y Hipps, 1997) para las zonas áridas generalmente se observa un transporte horizontal de déficit de presión de vapor proveniente de las áreas circundantes hacia las zonas regadas por lo que es necesario multiplicar la ecuación de evaporación a equilibrio por un factor de advección. Este factor es función de la magnitud del transporte horizontal del déficit de presión de vapor, el cual es influenciado por la velocidad del viento.

El enfoque de la evapotranspiración a equilibrio podría emplearse para estimar la evapotranspiración real de los cultivos en base diaria, la aplicación de

este método sería mucho menos costoso que la aplicación de los métodos micrometeorológicos y la estimación de la evapotranspiración diaria sería mucho más precisa que el uso de los modelos empíricos que se basan en información climatológica promedio mensual. Sin embargo, la implementación de este método requiere del conocimiento del factor de advección, el cual debe determinarse previamente para el cultivo y la región de interés.

Objetivos

- Analizar la relación entre la evaporación real y la evaporación a equilibrio para el pasto Ryegrass en la agricultura de riego de las zonas áridas.
- Obtener el factor de advección para determinar la evapotranspiración real en función de la evaporación a equilibrio.
- Analizar los factores climáticos que afectan el valor del factor de advección.

REVISIÓN DE LITERATURA

Definición de Términos

Evapotranspiración

La evaporación (E) es el proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Incluye tanto la evaporación de agua líquida o sólida directamente desde el suelo o desde las superficies vegetales vivas o muertas (rocío, escarcha, lluvia interceptada por la vegetación), como las pérdidas de agua a través de las superficies vegetales, particularmente las hojas. En este último proceso, denominado transpiración (T), el agua absorbida por medio de las raíces, se transfiere a la atmósfera fundamentalmente a través de los estomas situados en las hojas (Sanchez-Toribio, 1992). Debido a la dificultad de separar E y T en condiciones naturales, se definió el concepto de evapotranspiración (ET). Por lo tanto la evapotranspiración constituye la transferencia total de agua desde el sistema suelo – vegetación hacia la atmósfera.

Evapotranspiración Real o Actual (ET)

La evapotranspiración real es la cantidad de agua, que es efectivamente evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal. Es el proceso total de la transferencia del agua como vapor de las superficies de la tierra con cultivos a la atmósfera (Bastaanssein *et al*, 1998; Elizondo, y Contreras, 1996). La evapotranspiración es expresada en unidades de mm/día, cm/día, o como un flujo de calor latente ($W m^{-2}$).

ET de Referencia (ET_r)

Doorenbos y Pruitt (1997), Allen *et al.* (1994), Propusieron una nueva definición basada en la ecuación de combinación de Penman-Monteith, según la cual la ET de referencia (ET_o) sería la tasa de ET de un cultivo hipotético con valores fijos de altura (12 cm), resistencia de la cubierta vegetal ($70 s m^{-1}$) y albedo (0.23), que representa la ET de una superficie extensa cubierta de gramíneas verdes, de altura uniforme y crecimiento activo, que cubre completamente el terreno y no padece de deficiencia de agua.

La evapotranspiración de referencia puede ser descrita en función de la evaporación a equilibrio según (Doorenbos y pruit, 1997 y Allen *et al.*, 1994) puede ser descrita de la siguiente manera:

$$ET_o = (K_e)_o E_e \quad (1)$$

Donde ET_o es la evapotranspiración de referencia, $(K_e)_o$ es el coeficiente del cultivo de referencia y E_e es la evapotranspiración a equilibrio.

Evapotranspiración a Equilibrio (ET_{equ})

Raupach (1991), Zermeño y Hlpps (1997), Yiyane y Zermeño (2003) mencionan que ET_{equ} es básicamente el primer término de la ecuación de Penman-Monteith y representa la tasa de evaporación que ocurriría cuando la conductancia de la capa frontera entre la superficie vegetal y la atmósfera vecina es muy pequeña de tal forma que el intercambio de materia y energía es muy limitado debido a un pobre acoplamiento de la superficie con su medio ambiente.

Factores que Afectan la Evapotranspiración

Los factores que afectan la evapotranspiración pueden ser divididos en factores fisiológicos y factores ambientales. Los factores fisiológicos son: la densidad y comportamiento de los estomas, variedad, especie, ciclo vegetativo, edad, el grado y carácter de cobertura, estructura y tamaño de la hoja, el grado de la resistencia del dosel (r_c), eficiencia del sistema radicular en la absorción

de la humedad y enfermedades de la planta (Jones, 1990; Michel, 1983, Eizondo y Contreras, 1996).

Los factores ambientales o físicos son: la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento, resistencia aerodinámica del aire (r_a), la humedad relativa del aire, la humedad del suelo, la altitud y la latitud, la estación del año, la hora del día y condiciones de nubosidad (Elizondo y Contreras, 1996; Jones, 1990; Ahmad y El-Sayed, 1996).

Advección Local

Advección es el transporte del calor sensible o la humedad en el plano horizontal en la dirección del viento, debido a los gradientes horizontales de la temperatura y humedad que existen en zonas o áreas no homogéneas (Itier *et al.*, 1996; Zermeño y Hipps, 1997; Yiyane y Zermeño-Gonzalez 2003). En este caso es el transporte horizontal del calor sensible desde las zonas o áreas circundantes secas y con mayores temperaturas hacia las superficies cultivadas y regadas.

En zonas áridas, donde los cultivos regados pueden ser rodeados por áreas que relativamente no están cubiertas por plantas es posible que el aire esté significativamente más caliente y seco que en los cultivos, de esta manera se suministra una fuente extra de energía de tal manera que la

perdida de calor latente puede exceder significativamente cualquier ganancia de la energía disponible – (R_n-G).

Investigadores como (Rosenberg, 1969; Brakke *et al.*, 1978; Williams y Stout, 1981; Jury y turner, 1975; Shouse *et al.*, 1980) mencionan que se aumenta el flujo de calor latente entre la superficie y el aire, $W m^{-2}$ (LE), inducida por la advección horizontal del calor sensible de las áreas circundantes a las húmedas.

Mohoseni-Saravi *et al.* (1996) observaron que la LE de los cultivos regados en Maricopa Agricultural Center (MAC), Arizona, incremento sustancialmente hasta un 50% diario por la advección del calor sensible de las regiones desérticas circundantes Schuepp y Ya Guo (1994) atribuyeron a la advección local el aumento de LE por transporte local horizontal del aire mas caliente y seco de las fajas de rastrojo a un suelo desnudo.

Ecuación de Penman -Monteith

La ecuación de Penman-Monteith es uno de los modelos que mejor describe el proceso evapotranspirativo de una superficie vegetal. (Rana *et al.* 1997; Leite *et al.* 1990; Biddlake, 2000). Varios autores e investigadores han usado y recomendado este modelo como el mas preferido para la determinación de LE diaria actual. Se puede aplicar este modelo exitosamente

en todas las superficies, incluyendo las que están con cultivos de cobertura total. Es la ecuación que da mejores resultados en todos los climas y cultivos mundialmente (Howell, 1996). Según (Evet et al., 1998; Bidlake, 2000) esta ecuación se puede describir de la siguiente manera:

$$LE = \frac{S(R_n - G) + \rho_a C_p \delta e / r_a}{S + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (2)$$

Donde, LE es el flujo de calor latente entre la superficie y el aire, $W m^{-2}$, R_n es La radiación neta, $W m^{-2}$, G es el flujo de calor en la superficie del suelo, $W m^{-2}$, ρ_a = La densidad del aire, $kg m^{-3}$, C_p es capacidad calorífica del aire, $J kg^{-1} K^{-1}$, δe es el déficit de saturación del aire en Pascales (Pa), S es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación vs temperatura del aire, γ es la constante psicométrica, r_a es la resistencia aerodinámica al flujo de calor, $s m^{-1}$, r_c es la resistencia de la superficie de área verde (cannopy) al flujo de vapor de agua, $s m^{-1}$.

La ecuación de Penman-Monteith puede ser descrita de la siguiente forma (Zermeño y hipps, 1997; Rana et al., 1997; Evett et al., 1998; Yiyane y Zermeño, 2003):

$$LE = \frac{S}{S + \gamma} (R_n - G) + \frac{\rho_a C_p (D_i - D_{equ})}{(S + \gamma)r_a + \gamma r_c} \quad (3)$$

Donde, D_i es el déficit de saturación del aire D_{equ} es el déficit de saturación a equilibrio.

La ecuación anterior esta compuesta por dos términos, el primero representa la tasa de evaporación a equilibrio, y el segundo representa el incremento en la evapotranspiración sobre la tasa de evaporación a equilibrio, debido a la aportación de déficit de saturación de las áreas circundantes (Rana et al., 1997; Zermeño y Hipps, 1997; Jones, 1990; Raupach, 1991). En esta ecuación, D_{equ} representa el déficit de saturación a equilibrio. Cuando el transporte de déficit de saturación de las áreas circundantes es mínimo, y la conductancia del aire al flujo de calor y vapor de agua es muy pequeña, la tasa de evaporación real tiende hacia la tasa de evaporación a equilibrio.

Según Evett *et al.* (1998), la ecuación de Priestley-Taylor (1972) es ampliamente usada como una medición de LE_{equ} ; y mostraron que bajo ciertas condiciones de R_n y G puede ser suficiente para determinar el flujo de vapor y el calor sensible en la superficie de la tierra. Rana *et al.* (1997) dicen que LE_{equ} ocurre cuando $r_a \approx \infty$, cuando la velocidad del viento es baja.

Raupach (1991) menciona que la LE_{equ} ocurre en superficies relativamente húmedas y aire saturado, de tal manera que $r_c = 0$, y $r_a \rightarrow \infty$. De Bruin y Stricker (2000) mencionan que la evaporación de pastos sin restricciones de agua es primeramente determinado por la energía disponible ($R_n - G$), es decir buenas estimaciones de la tasa de evaporación pueden ser

obtenidas por usar simplemente el termino radiativo de la ecuación de Penman-Monteith (evapotranspiración a equilibrio). Cuando $r_c = 0$, y $r_a \rightarrow \infty$, la expresión de Penman-Monteith sería (Raupach ,1991; Bruin y Stricker ,2000; Zermeño y Hipps ,1997; Leite *et al.*, 1990; Yiyane y Zermeño 2003):

$$LE_{equ} = \frac{S}{S + \gamma} (Rn - G) \quad (4)$$

Donde LE_{equ} representa el limite inferior de la evapotranspiración potencial (LE), ya que corresponde a la ET mínima posible de una superficie sin restricciones hídricas y puede ser calculada simplemente con base a la disponibilidad de la energía, (Rn-G).

Para incorporar el efecto de la advección local en la evapotranspiración a equilibrio, es necesario introducir el factor de advección (Leite *et al.*, 1990; Bastiaanssen *et al.*, 1998; Wilson y Baldocchi, 2000) de acuerdo con la siguiente relación.

$$LE = \alpha LE_{equ} \quad (5)$$

Donde, α es el valor empírico llamado constante de Priestley-Taylor, o factor de advección, cuyo valor medio es de 1.26 para superficies sin restricciones hídricas, superficies desnudas saturadas o en océanos (Leite *et al.*, 1990; Brisson *et al.* 1998). Lhomme P.J. (1997), menciona que el factor de

advección puede ser definido por la relación de evaporación potencial sobre la evaporación a equilibrio. Esta relación es considerada para hacer esta determinación (Leite *et al.*, 1990; Wilson y Baldocchi, 2000; Yiyane y Zermeño, 2003):

$$\alpha = \frac{LE}{LE_{\text{equ}}} \quad (6)$$

Método de la Covarianza Eddy

Swinback (1951) propuso el método de la correlación Eddy para estimar el flujo de vapor de agua dado por una superficie horizontal y fetch adecuado. El fetch se define como la distancia horizontal que debe de recorrer el viento cuando se mueve de una superficie a otra con propiedades diferentes para que el aire logre un equilibrio con la nueva superficie. 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 Burnet, 1996).

El principio del método de la correlación Eddy es detectar las contribuciones de todos los movimientos turbulentos responsables para el transporte vertical de los flujos (Itier y Brunet, 1996). Esto requiere mediciones de flujos a una tasa suficientemente alta de (10-20 Hz) y promediando las

covarianzas en un promedio suficiente (15-30 minutos) (Itier y Brunet, 1996). En un principio, el método de la correlación Eddy se utilizó para cualquier proceso de transporte (Jones, 1992), pero suele ser utilizado en las mediciones de flujos del calor latente (LE), calor sensible (H) y bióxido de carbono (CO₂).

Considerando nada más los flujos LE y H, se pueden expresar para una superficie homogénea de la siguiente manera (Zermeño, 2001; Prueger *et al.*, 1998):

$$H = \rho C_p \overline{w'T'_a} \quad (7)$$

$$LE = L \overline{\rho'w'_v} \quad (8)$$

Donde, $\overline{w'T'_a}$ es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y temperatura del aire, $\overline{\rho'w'_v}$ es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la densidad de vapor del agua, ρ es la densidad del aire (kg m⁻³), C_p a la capacidad calorífica del aire (J kg⁻¹ K⁻¹), L es el calor de vaporización del agua (J kg⁻¹). Las barras horizontales superiores indican un promedio de un intervalo de tiempo y las primas denotan desviaciones de la KPa. Las barras horizontales superiores indican un promedio en un intervalo de tiempo y las primas denotan desviaciones de la media.

Valores del factor de Advección Obtenidos en Otros Cultivos

Partiendo de las determinaciones de (Priestley – Taylor, 1972) cuyo valor medio del factor de advección obtenido de 1.26, para superficies sin restricciones hídricas, superficies desnudas saturadas o en océanos. Se desprenden otras investigaciones realizadas principalmente en áreas con mayor necesidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua, y con cultivos afines a esas características de suelo, agua y clima.

Entre estas investigaciones se encuentran las realizadas por Stricker (1981), al trabajar con cultivos de cobertura total (Alfalfa y Grass) obtuvo un valor medio del factor de advección de 1.28, el cual es parecido al obtenido por Priestley – Taylor (1972). Medeiros *et al.* (2003) al hacer comparaciones de la evapotranspiración de referencia por distintos métodos, obtuvieron un valor promedio del factor de advección de 1.19 en trabajos realizados con pastos. En trabajos realizados por (Leite., *et al* 1990) se obtuvo un coeficiente de advección de 1.3 para una superficie sembrada con frijol.

En estudios realizados en el cultivo de Maíz en Gómez Palacios, Durango, México., (Yiyane y Zermeño- González, 2003) obtuvieron un promedio del factor de advección de 1.25, observaron que el factor de advección depende de la velocidad del viento. A bajas y altas velocidades del viento el factor de advección aumenta; obteniéndose un valor menor y estable a velocidades de viento medias. También observaron que el factor de advección

es muy alto cuando el flujo de calor sensible es muy negativo, y cuando el flujo de calor sensible es positivo, el valor del factor de advección baja; sin embargo Lhomme P.J. (1997), al examinar el factor de advección de Priestley – Taylor, indica que el valor de 1.26 no es un valor fijado universalmente, este solo es sugerido por este autor. Este factor puede incrementarse en condiciones de clima árido y semiárido, este es ajustado por el modelo durante la ejecución, dependiendo del valor del déficit de presión de vapor de cada día.

Características Generales del Pasto Ryegrass Anual

Taxonomía

Gould y Shaw (1992), en el Cuadro 2.1 describen la siguiente clasificación del pasto Ryegrass anual:

Cuadro 2.1 clasificación del pasto Ryegrass anual

Nombre científico	Lolium multiflorum
División	Magnoliophita
Clase	Liliopsida (Monocotiledóneas)
Familia	Poaceae (Graminae)
Subfamilia	Pooideae (Festucoideae)
Tribu	Poeae
Genero	Lolium
Especie	multiflorum

Este cultivo se puede encontrar con los siguientes sinónimos:

Lolium italicum A. Br.

Lolium multiflorum var. *Italicum* Beck.

A esta especie (*Lolium multiflorum*) también se le conoce como ballico anual, ballico italiano y Ryegrass italiano. El Ryegrass anual es originario de la costa del mediterráneo, sur de Europa, norte de Asia y Asia menor, existen datos que hacen suponer que fue introducido a Estados Unidos en la época de la colonia. Se considera anual, pero bajo algunas condiciones toma un hábito de bianual o incluso perenne, de vida corta.

Presenta un crecimiento en matas (manojos) independientes o aisladas, con un gran número de tallos, el tallo es erecto, acosado, sin ramificaciones y amacollado. Puede alcanzar alturas hasta de 90 cm, la inflorescencia es una espiga discontinua grande, aplanada y compacta, las espiguillas son multiflorales (Whyte, *et al.* 1959).

Adaptación y Comportamiento del Ryegrass Anual

El zacate ballico anual es el más utilizado en praderas irrigadas en el norte del país, su importancia es debida a su volumen y calidad de forraje, a su adaptabilidad a las condiciones de la región y además a que esta especie puede ser utilizada en corte directo (verdeo) y en pastoreo (Quiroga, 1991). El

Rye Grass se adapta principalmente a regiones húmedas con inviernos poco rigurosos. Las temperaturas extremas, tanto muy altas como muy bajas detienen su desarrollo vegetativo, soporta temperaturas menores de 0°C (hasta -12 °C). Con relación a las altas temperaturas, el desarrollo del Ryegrass anual se detiene a los 32 °C (Carambula, 1977).

En cuanto a su adaptación a suelos, es de amplio margen, sin embargo, en tierras poco fértiles es necesario utilizar densidades altas de siembra y fertilización que forme una cubierta vegetal satisfactoria y pueda dar altas producciones, se adapta a suelos calcáreos, no tolera suelo con estancamiento de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y Descripción del Sitio Experimental

Este trabajo se realizó durante el ciclo primavera - verano del año 2002 en el rancho "El Padrino", Ejido la Providencia, Saltillo, Coahuila. Este rancho está ubicado al Suroeste de la ciudad de Saltillo, sobre la carretera federal No 54, tramo Saltillo-Concepción del Oro, con intersección a carretera General Zepeda Km. 6. Geográficamente se encuentra en las coordenadas: 25° 14' 07" latitud norte y 101° 10' 25" longitud oeste, con una altitud de 1749 msnm.

Tipo de Clima

El clima de esta localidad es semiseco con lluvias en verano y escasas a lo largo del año. Los meses más lluviosos son de Julio a Septiembre, concentrándose la mayor parte en el mes de Julio. La temperatura y la precipitación pluvial media anual son de 18°C y 368 mm respectivamente.

La evaporación promedio mensual es de 178 mm, los valores máximos se presentan en abril (230 mm), mayo (222 mm), junio (226) y las mínimas en

Diciembre con valores menores a 100 mm. El valor medio de la humedad relativa mensual es de 55 por ciento. Los valores más altos se presentan en invierno y en los meses lluviosos, 80 y 85 por ciento respectivamente. Los vientos son predominantes del sureste durante todo el año.

Suelo

Los lomeríos y las sierras encontradas en los extremos del valle provienen de rocas sedimentarias lutita-arenisca, lo cual provoca en el fondo del valle una acumulación de suelos aluviales. El suelo predominante en la zona es Xh/2: Xerosol háplico de textura media en los 30 cm superficiales del suelo con fase física petrocálcica. En el Cuadro 3.1 se presentan los resultados del análisis físico – químico obtenido para este sitio, en un estrato de 0- 30cm. Son suelos que se localizan en zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Su vegetación natural es de matorrales y pastizales. Se caracterizan por tener una capa superficial de color claro y muy pobre en humus. Debajo de ella puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien muy semejante a la capa superficial. Su utilización agrícola está restringida la mayor parte de las ocasiones a las zonas con agua de riego.

Cuadro 3.1. Análisis físico-químico del suelo a una profundidad 0-30 cm.

pH (saturación)	8.58
Materia Orgánica (%)	3.46
Nitrógeno Total (%)	0.17
Potasio Inter. (Kg/Ha)	-
Fosforo Aprov. (Kg/Ha)	17.1
Carbonatos Totales (%)	39.63
% Arcilla	31.6
% Limo	23.6
% Arena	44.8
Textura	Migajón- Arcilloso
C.E. (dS/m)	0.805
K*(meq/lto)	-
Na* (meq/lto)	0.54
Ca* (meq/lto)	4.25
Mg* (meq/lto)	6.25
Cl- (meq/lto)	4.9
SO=4 (meq/lto)	16.53
CO=3 (meq/lto)	1.5
HCO=3(meq/lto)	4.0
D.A.p gr/cc	

Agua

El agua de riego es de buena calidad y proviene de pozos profundos que operan con bombas de turbina con motores eléctricos. Los análisis químicos del agua Cuadro 3.2, realizados por el laboratorio de salinidad del departamento de Riego y Drenaje de la UAAAN en el año 2002, indican una

clasificación: C2 Medio, S1 Bajo; que de acuerdo al personal del laboratorio de salinidad de los E.U.A. el agua es de salinidad media, respecto al sodio no se tienen posibilidades de alcanzar niveles peligrosos para los cultivos.

Cuadro 3.2 Análisis químico del agua.

PH	7.56
C.E. (dS/m)	0.648
Carbonatos(meq/lto)	0.6
HCO ⁻ ₃ (meq/lto)	3.6
Ca ^{**} (meq/lto)	1.34
Mg ^{**} (meq/lto)	9.38
Cl ⁻ (meq/lto)	2.1
SO ⁼ ₄ (meq/lto)	4.93
Na ⁺ (meq/lto)	0.5
K ⁺ (meq/lto)	

Establecimiento y Manejo del Cultivo

Se trabajo con pasto forrajero Ryegrass, variedad Tetraploide, anual; la fecha de siembra fue del 15 al 30 de Agosto y se realizo al boleto con una densidad de siembra de 40 kg/ha. Este cultivo se utilizo como pradera para el ganado, por lo que el terreno cultivado se dividía con alambre electrificado. El área considerada para del establecimiento del pasto Ryegrass fue de 20 has,

con una longitud a lo largo de 530 metros (Este- Oeste) y a lo ancho de 380 metros (Sur – Norte). Con el objetivo de dar las condiciones necesarias para la siembra se realizo un barbecho y un rastreo, el sistema de riego utilizado fue un sistema por aspersión side-Roll, de 4" y de 360 metros en su longitud de tirada, el cual se alimentaba por un rebombeo. Este pasto fue manejado adecuadamente, con una lamina de riego de 8.5 mm por hora, con riegos de 8 horas cada 7 días, para mantenerlo con suficiente humedad y evitar estrés hídrico del cultivo.

Instrumentación y Mediciones

Para obtener la evapotranspiración real del cultivo, se midieron los componentes del balance de energía; radiación neta (R_n), flujo de calor en el suelo (G), flujo de calor sensible (H) y el flujo de calor latente (LE).

Los flujos de calor sensible (H) y calor latente (LE) se midieron utilizando el enfoque de la covarianza Eddy, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$H = \rho C_p w' T'_a$$

$$LE = L w' \rho'_v$$

Donde, $w' T'_a$ es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y temperatura del aire, $w' \rho'_v$ es la covarianza entre la velocidad vertical del

viento y la densidad de vapor del agua, ρ es la densidad del aire (kg m^{-3}), C_p a la capacidad calorífica del aire ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), L es el calor de vaporización del agua (J kg^{-1}). Las barras horizontales superiores indican un promedio de un intervalo de tiempo y las primas denotan desviaciones de la media. La velocidad vertical del viento (w) se midió con un anemómetro sónico tridimensional (CSAT3, Campbell Scientific, inc., Logan, UT), en la parte, media del anemómetro sónico se colocó un termopar tipo E de chromel-constantan de $12.7\mu\text{m}$ de diámetro para medir la temperatura del aire (T_a), la densidad del vapor de agua (ρ_v) se midió utilizando un hygrometro de kriptón de respuesta rápida (Figura 3.1). Todos los sensores se colocaron a una altura de un metro sobre el dosel del pasto. Las mediciones se realizaron a una frecuencia de 5 Hz y promedios de 20 minutos, utilizando un datalogger modelo 23X (Campbell, Sci, Inc.).

La radiación neta se midió utilizando un radiómetro neto (modelo Q-7.1 Radiation and Energy Balance Systems Inc.) colocado a una altura de un metro sobre el dosel del pasto. El flujo de calor en el suelo se obtuvo midiendo el flujo de calor a 8 cm bajo la superficie el suelo usando dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific inc., Logan UT), a los cuales se sumó el cambio en la energía almacenada en el estrato de 8 cm de suelo por cambios de temperatura. R_n y G fueron medidos a una frecuencia de dos segundos y promedios de 20 minutos. El registro de datos se realizó con un datalogger (modelo CR7X, Campbell, Sci., Inc.).

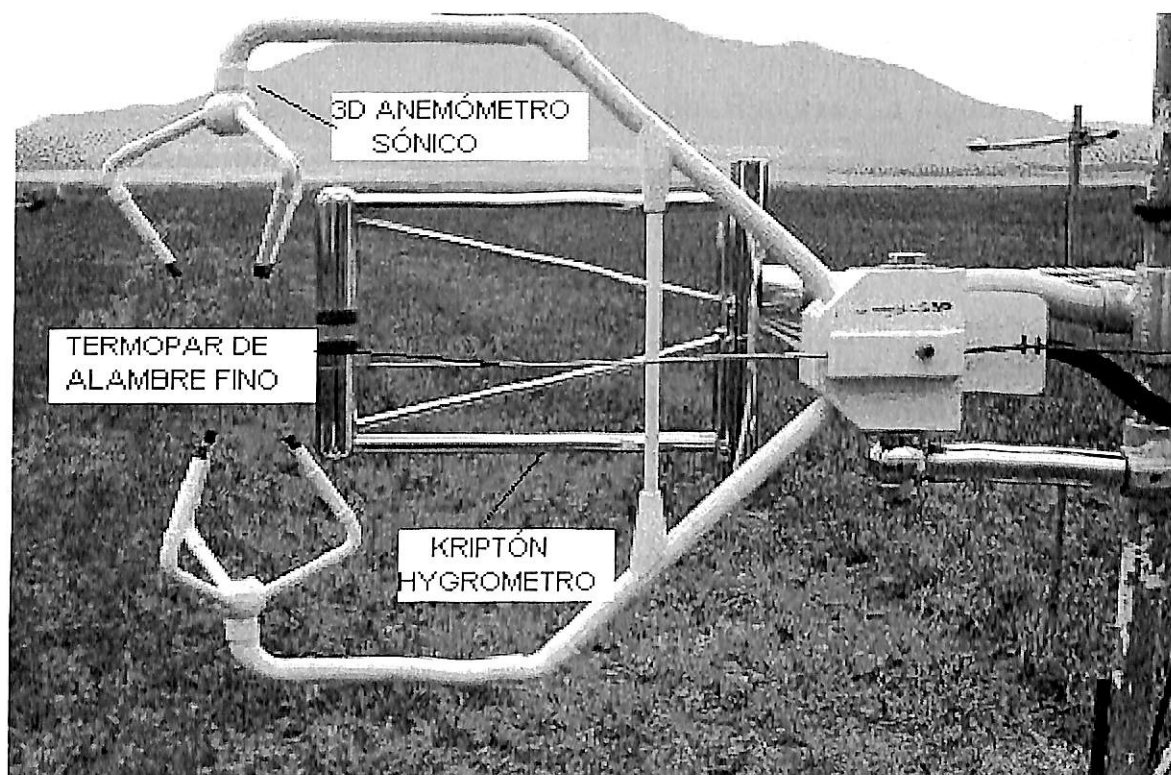


Figura 3.1. Elementos de una estación eddy para medir flujo de calor sensible (H) y flujo de calor latente (LE), en la cual se muestra el 3-D anemómetro sónico, el termopar de alambre fino y el kriptón hygrometro de respuesta rápida.

También se midió la radiación solar total incidente (R_{sw}), la velocidad y dirección del viento y la humedad relativa. Estas mediciones también se realizaron a una frecuencia de dos segundos y promedios de 20 minutos. R_{sw} se midió con un pyronómetro de silicon (modelo LI200x, LI-COR, Inc), la humedad relativa se midió con un sensor de humedad (Vaisala, modelo HM45C), la velocidad y dirección del viento se midieron con una veleta de viento y un anemómetro de 3 tazas (wind sentir modelo 03101-5 R.M. Young). Figura 3.2. El registro de datos también se realizó con el datalogger modelo CR7X.

La estación de mediciones de la correlación Eddy y del balance de energía fue establecida dentro del cultivo de Ryegras. La Figura 3.2 muestra las dimensiones del área de estudios y la ubicación de los sensores en campo, mientras que la Figura 3.3 muestra la distribución del equipo y sensores de medición. Los sensores para medir H y LE se colocaron dentro del área de estudio de tal forma, que fuera posible obtener un fetch suficiente para considerar los vientos en cualquier dirección. Sin embargo, se trato de considerar únicamente vientos con un ángulo de aproximadamente 180° con respecto a la orientación de los sensores. Los segmentos de tiempo con lluvias y con nubosidad intermitente no fueron considerados en el análisis.

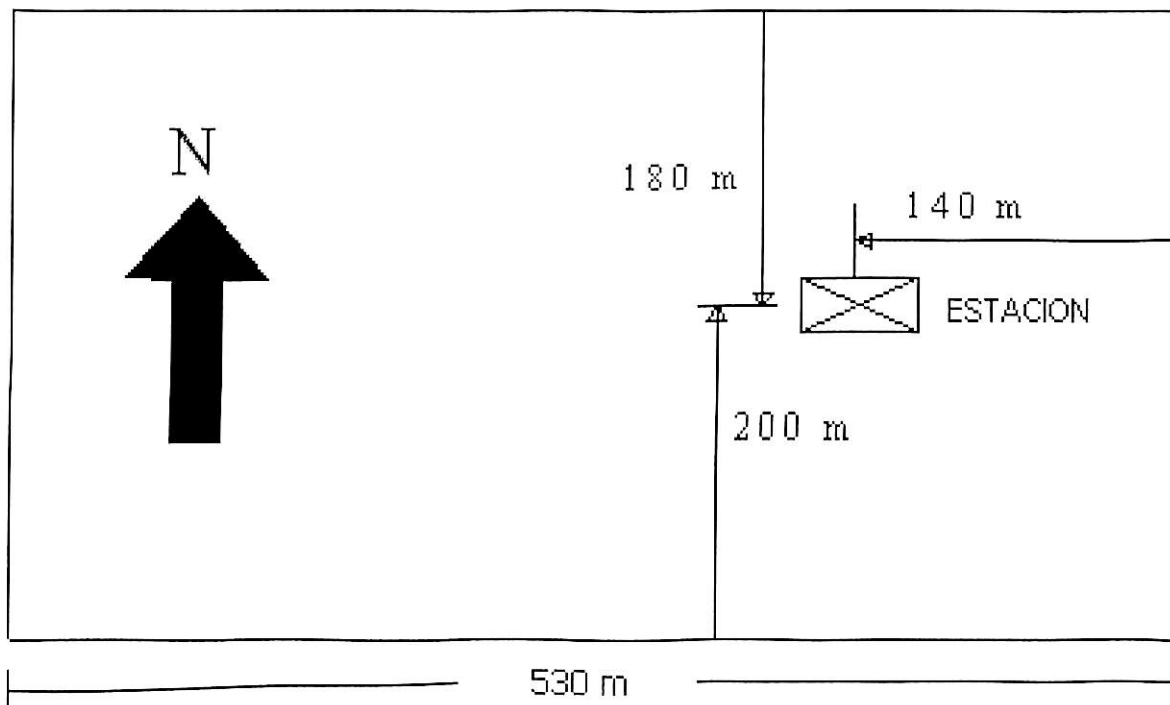


Figura 3.2 Representación esquemática del área de estudio, donde se instaló la estación de la covarianza eddy y el balance de energía.

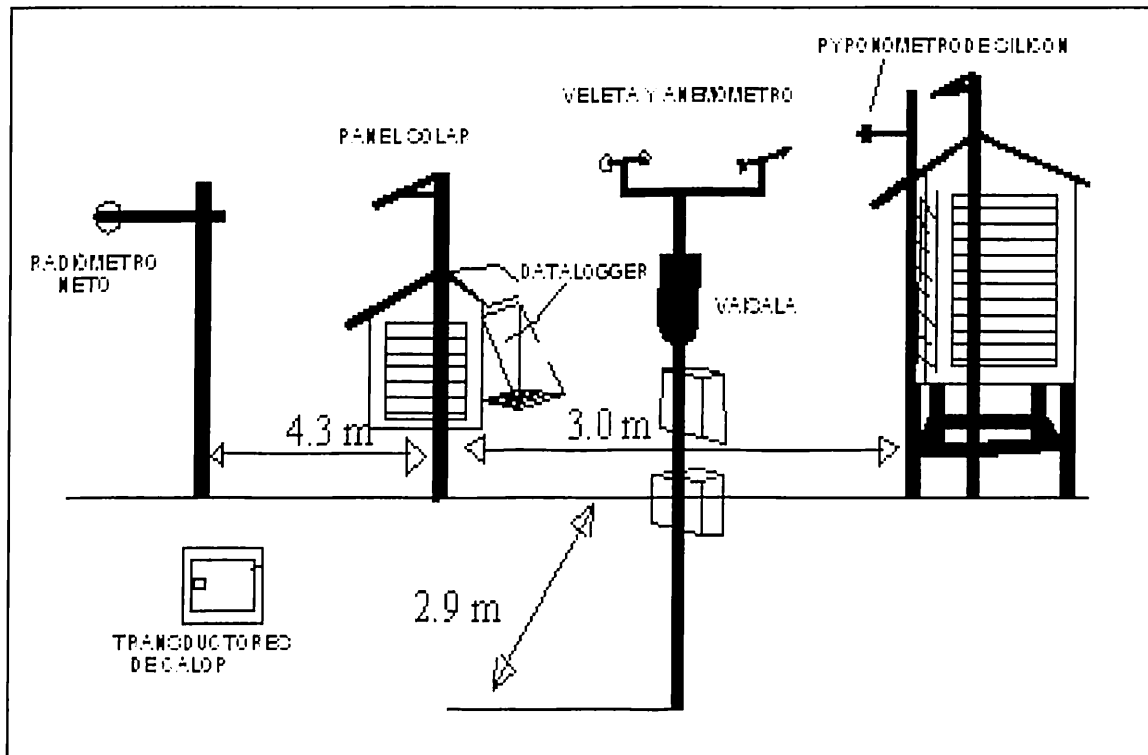


Figura 3.3 Representación esquemática de la distribución de los instrumentos y sensores de medición.

Procesamiento de Datos

Con los datos promedio de 20 minutos de R_n y G , se determinó la evaporación a equilibrio (LE_{equ}) de acuerdo con la siguiente relación.

$$LE_{equ} = \frac{S}{S + \gamma} (R_n - G)$$

Donde: S es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación vs la temperatura del aire y γ es la constante psicrométrica la cual se determinó con la siguiente relación.

$$\gamma = \frac{P * C_p}{L} \quad (9)$$

Donde P es la presión barométrica de la localidad, C_p es la capacidad calorífica del aire a presión constante y L es el calor de vaporización del agua.

Se calcularon los flujos de calor latente (LE), calor sensible (H), evaporación a equilibrio (LE_{equ}), flujo de calor en el suelo (G) y radiación neta (R_n) para segmentos de tiempo en los cuales se tuvieron condiciones estables de dirección de viento y cielo despejado, integrando los valores promedio de 20 minutos para los diferentes segmentos de tiempo considerados, para obtener los flujos totales ($MJ m^{-2}$), de acuerdo con la siguiente relación.

$$\text{Flujo}(MJm^{-2}) = 1 \times 10^{-6} * \int_1^2 \text{flujo}(Wm^{-2}) dt \quad (10)$$

Con los flujos integrados de LE y LE_{equ} , se obtuvieron los factores de advección (α) para los diferentes segmentos de tiempo, de acuerdo con la relación.

$$\alpha = \frac{LE}{LE_{equ}}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mediciones de los componentes del balance de energía se realizaron del día del año 104 (14 de Abril, 2002) al día del año 132 (12 de Mayo, 2002). Para el análisis de datos únicamente se consideraron los días sin lluvias, ya que las características de los sensores y equipos utilizados para medir los flujos de calor sensible y latente con el enfoque de la covarianza Eddy, no les permiten operar en días con lluvia.

Componentes del Balance de Energía y la Evapotranspiración a Equilibrio.

Las relaciones entre los componentes del balance de energía y el flujo de calor latente a equilibrio (evapotranspiración a equilibrio) se discuten únicamente para los días del año 107, 123, 125 y 130, ya que resultados similares se observaron en el resto de los días analizados. La Figura 4.1 muestra los valores observados de radiación solar incidente (R_{sw}), radiación neta (R_n), flujo de calor latente real (LE), flujo de calor latente a equilibrio (LE_{equ}), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor en la superficie del suelo (G), el día del año 107 de las 8 a las 19 horas. Note que R_n , LE y LE_{equ} siguen la

misma tendencia que R_{sw} . Note también que el flujo de calor latente a equilibrio, se mantiene siempre por debajo del flujo de calor latente real y sigue las mismas tendencias de cambio.

En este día también se observa que H es aproximadamente cero o menor que cero durante el tiempo de observaciones, lo cual sugiere que LE es mayor que LE_{equ} cuando H es cero o negativo. En estas condiciones, el factor de advección para estimar LE en función de LE_{equ} será mayor que la unidad.

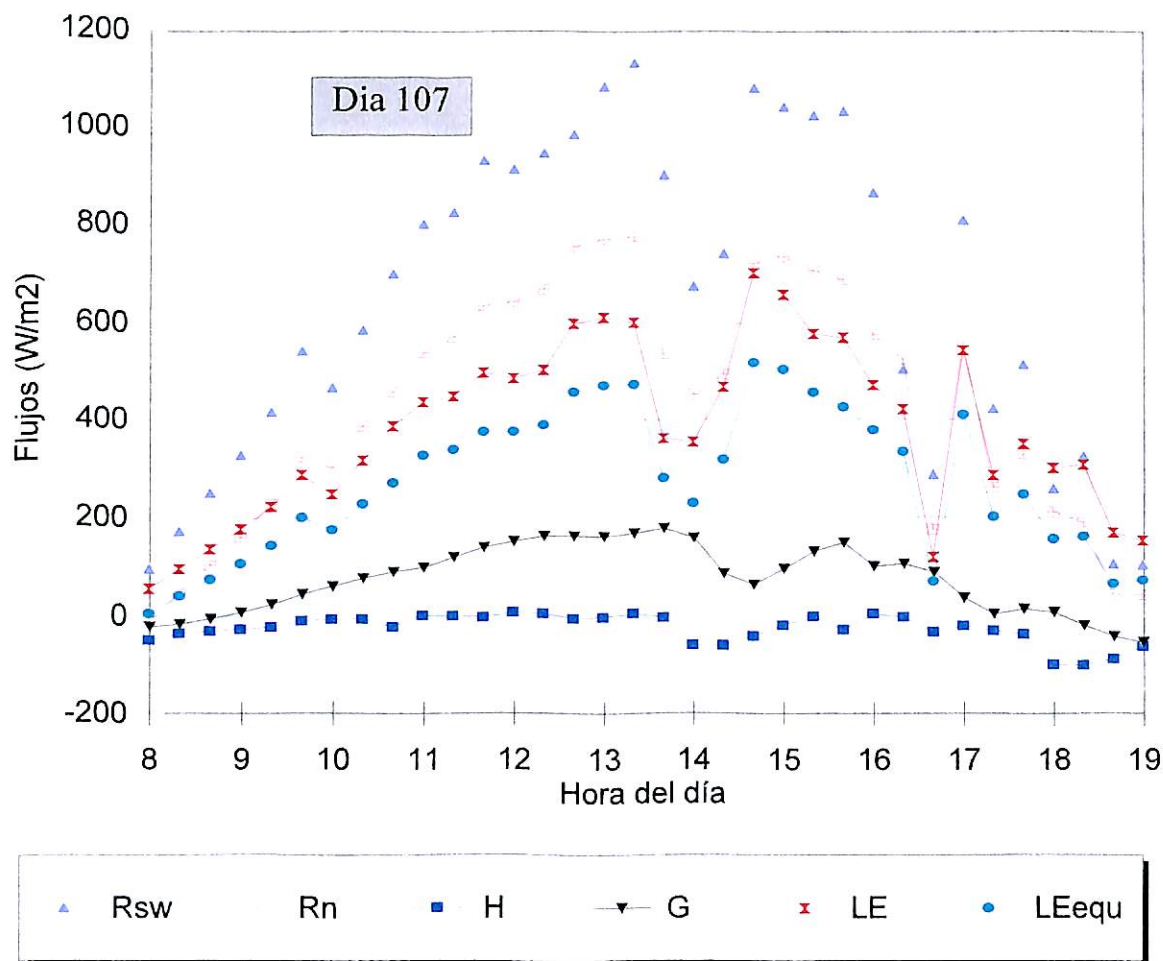


Figura 4.1. Flujos de energía y masa observados el día del año 107 ($W m^{-2}$).

La Figura 4.2 presenta la misma información que la Figura 4.1, pero para el día del año 123. Note que de las 8 a las 10 horas, H es aproximadamente cero y LE es mayor que LE_{equ} . En las horas de la máxima incidencia de radiación solar (12-15 hrs) H es mayor que cero y LE es aproximadamente igual a LE_{equ} . De las 17 a las 19 hrs, H es cero o menor que cero y LE es mayor que LE_{equ} . Esto sugiere que el valor del factor de advección para estimar el flujo de calor latente real en función del flujo de calor latente a equilibrio será función de la magnitud del valor de H .

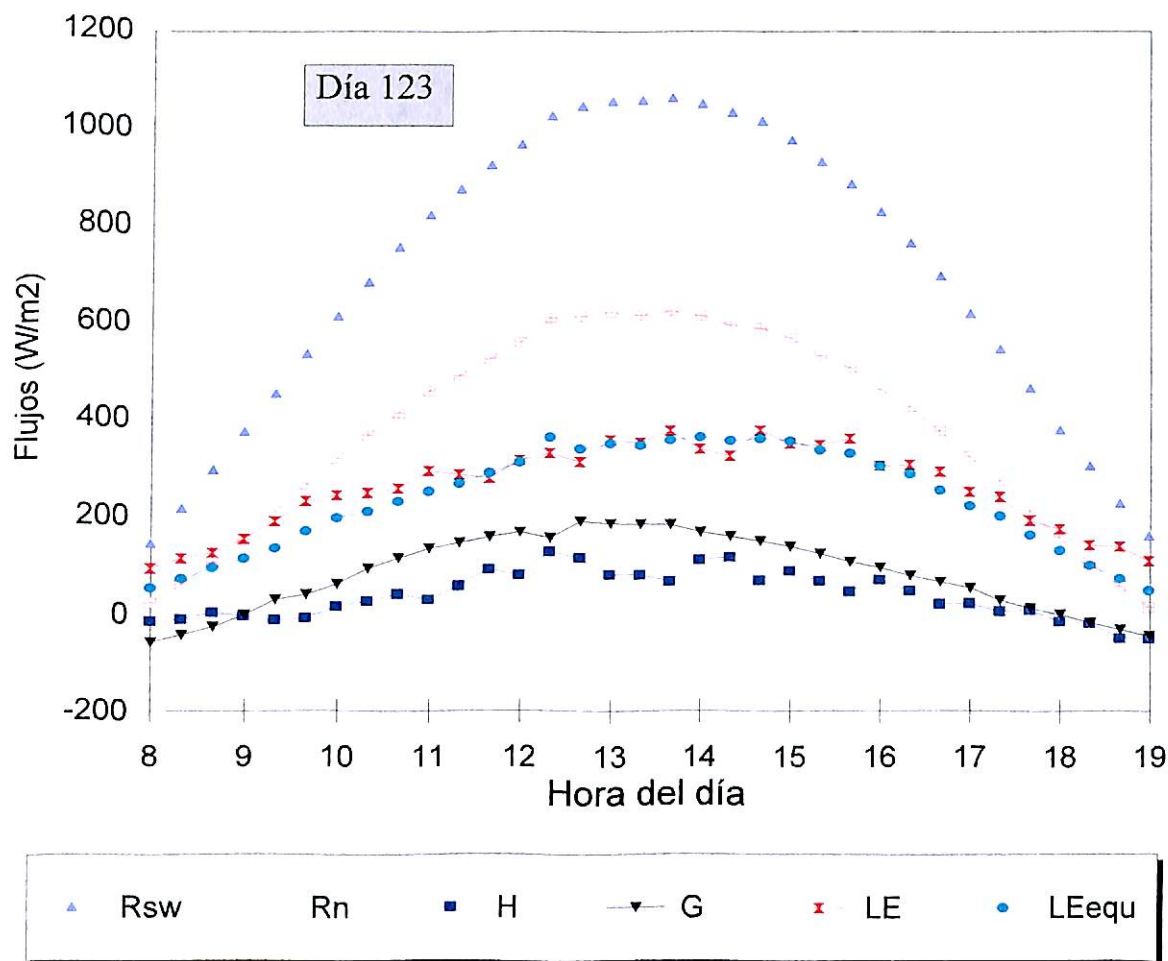


Figura 4.2. Flujos de energía y masa observados el día del año 123 ($W m^{-2}$).

La Figura 4.3 muestra la misma información que las figuras anteriores pero para el día del año 125. Note que en este día, en las horas de máxima incidencia de radiación solar (12-15 hrs) H es notablemente mayor que cero ($H > 150 \text{ W m}^{-2}$) y LE_{equ} es mayor que LE . Esto significa, que para este caso, el factor de advección (α) para estimar LE en función de LE_{equ} será menor que la unidad.

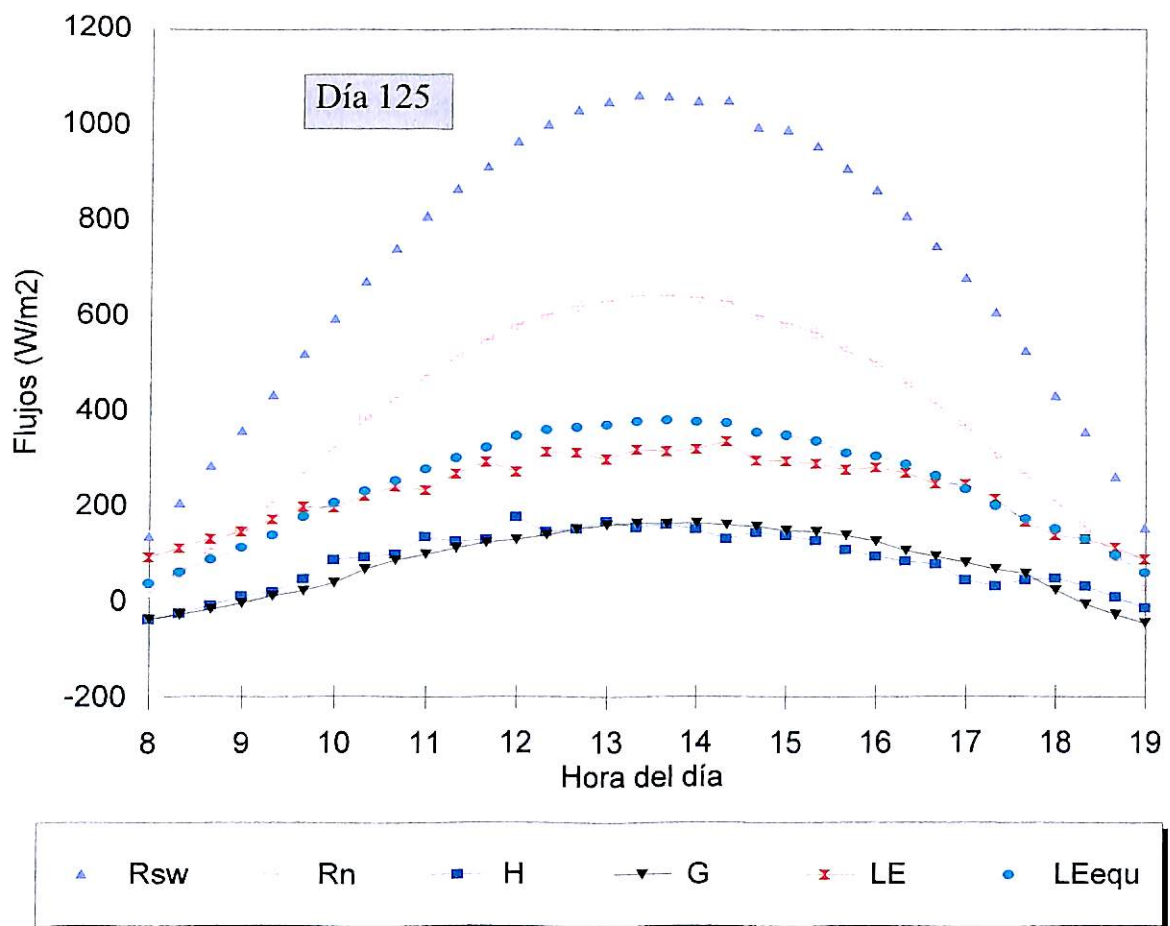


Figura 4.3. Flujos de energía y masa observados el día del año 125 (W m^{-2}).

El comportamiento de los componentes del balance de energía cuando se presenta nubosidad se muestra en la Figura 4.4. Observe que a partir de las 15 hrs ocurre la presencia de nubes que se mantiene durante el resto del día. Note que la magnitud de los componentes del balance de energía decrecen por la presencia de nubes, esto se debe a que la fuente principal de energía (R_{sw}) decrece.

Se observa que bajo la presencia de nubes, LE es mayor que R_n , esto se debe al aporte adicional de energía hacia el dosel del pasto en forma de calor sensible (H negativo), note también que de las 16 a las 19 hrs LE es mayor que LE_{equ} , que corresponde con valores negativos de H . De las 10 a las 14:30 hrs (condiciones de cielo despejado), H es cero o ligeramente mayor que cero y LE es mayor que LE_{equ} .

La información de las graficas anteriores indica que cuando H es aproximadamente cero o negativo, LE es mayor que LE_{equ} y el factor de advección es mayor que la unidad. Esto coincide con los resultados observados por Yiyane y Zermeño-González (2003). Ellos observaron que LE siempre es mayor que LE_{equ} cuando H es aproximadamente cero o negativo.

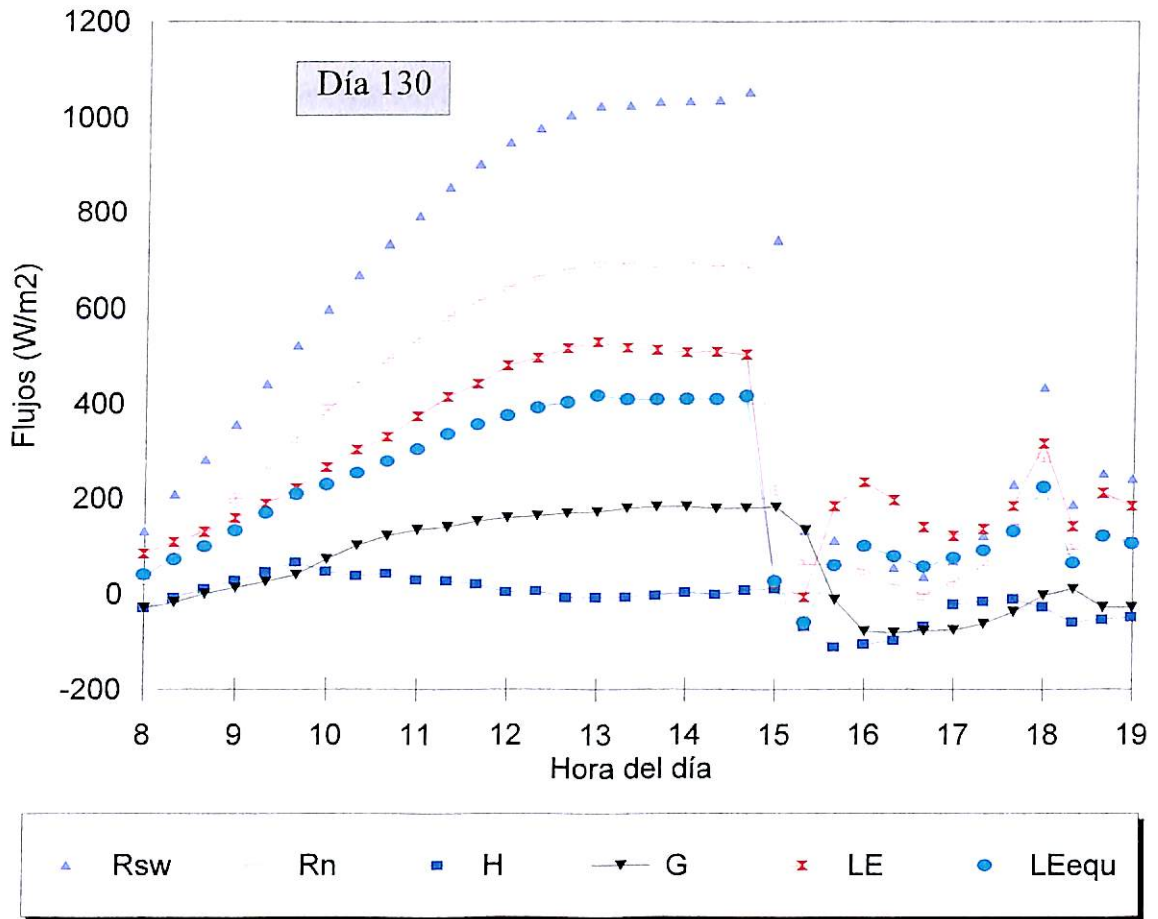


Figura 4.4. Flujos de energía y masa observados el día del año 130 ($W m^{-2}$).

Factor de Advección

El Cuadro 4.1 presenta los valores integrados para diferentes segmentos de tiempo del flujo de calor latente (LE), calor sensible (H), flujo de calor latente a equilibrio (LE_{equ}), flujo de calor en el suelo (G), Radiación solar (Rws), y radiación neta (Rn) y el factor de advección (α). También se presenta el factor de advección promedio de los diferentes segmentos de tiempo.

Se puede observar que los valores mas altos del coeficiente de advección se obtienen cuando el flujo de calor latente real (LE) es mayor que la radiación neta (Rn), debido a un aporte adicional de energía en forma de flujo de calor sensible (H negativo).

Cuadro 4.1 Valores integrados, para cada componente del balance de energía, LE, LE_{equ}, factor de advección y factor de advección promedio.

Totales (MJ m ⁻²)								
Día	Intervalo	Rsw	Rn	G	H	LE	LE _{equ}	α
104	9:00-13:20	13.20	8.52	0.62	0.07	6.51	5.00	1.30
105	9:00-12:00	4.17	2.82	0.42	-0.62	3.03	1.68	1.80
105	13:40-18:00	8.66	5.58	1.04	-0.15	4.69	3.37	1.39
107	9:00-13:00	11.95	8.11	1.65	-0.07	6.54	4.87	1.34
108	9:00-16:00	22.50	15.10	2.79	-0.45	12.76	9.45	1.35
109	10:00-16:00	20.21	13.34	2.76	-0.38	10.96	8.25	1.33
120	9:00-17:00	26.34	15.04	3.30	1.28	10.46	9.40	1.11
121	9:00-17:00	25.85	14.36	3.56	1.62	9.17	8.78	1.05
122	9:00-14:00	16.06	9.19	2.15	0.99	6.06	5.56	1.09
123	9:00-18:00	26.92	14.93	3.57	1.70	9.67	9.06	1.07
124	8:40-13:20	13.24	7.83	2.00	1.80	4.02	4.56	0.88
125	9:00-18:00	27.31	15.78	3.53	3.57	8.67	9.60	0.90
126	9:00-14:00	15.65	9.15	2.27	2.36	4.52	5.33	0.85
126	15:40-18:00	5.74	3.40	0.26	-0.19	3.34	2.53	1.32
127	9:00-12:00	8.03	4.86	1.22	0.75	2.89	2.80	1.03
130	9:00-14:00	15.93	10.67	2.52	0.39	7.76	6.29	1.23
130	15:00-18:00	2.12	1.03	-0.23	-0.65	1.91	0.97	1.97
131	9:00-14:00	14.05	9.34	2.14	1.22	5.98	5.45	1.10
132	9:00-14:00	14.75	9.48	2.76	1.21	5.50	5.20	1.06
132	15:00-18:00	1.35	0.69	-0.58	-0.28	1.54	0.99	1.56
							Prom.	1.24

C.V. 23.6%

El valor promedio del factor de advección obtenido fue 1.24 con un coeficiente de variación de 23.6 por ciento. Este resultado indica que es posible obtener una buena determinación de la evapotranspiración real a partir de la evapotranspiración a equilibrio, El valor del factor de advección es prácticamente igual al obtenido por otros investigadores, sin embargo las condiciones climáticas, edáficas e hídricas para este trabajo fueron diferentes, lo interesante de este trabajo es que coincide ampliamente con el resultado obtenido del factor de advección de 1.25 por Yiyane y Zermeño-González (2003), en el cual las condiciones que se presentaron son similares. Thompson (1975) verifico el valor del coeficiente de advección de 1.26 para superficies húmedas. Brisson *et al.* (1998) obtuvieron un valor promedio del coeficiente de advección de 1.32 en cultivos de cobertura total. Medeiros *et al.* (2003) al hacer comparaciones de la evapotranspiración de referencia por distintos métodos, obtuvieron un valor promedio del factor de advección de 1.19 en trabajos realizados con pastos. Leite *et al.* (1990) en trabajos realizados con un cultivo de frijol obtuvo un coeficiente de advección de 1.3.

Relación del Factor de Advección y el Flujo de Calor Sensible

La relación entre el flujo de calor sensible y el factor de advección se presenta en la Figura 4.5. Note que el factor de advección disminuye a medida que el flujo de calor sensible desde el dosel del cultivo hacia el aire aumenta (valores positivos de H). Y al contrario cuando el calor sensible incrementa su valor en forma negativa el coeficiente de advección se incrementa, lo que significa que el flujo de calor es de la atmósfera hacia la superficie de los cultivos y que la temperatura del aire es mayor que la del dosel de los cultivos. Estos resultados indican que existe una relación directa entre el incremento en valor del coeficiente de advección y el incremento de H negativamente.

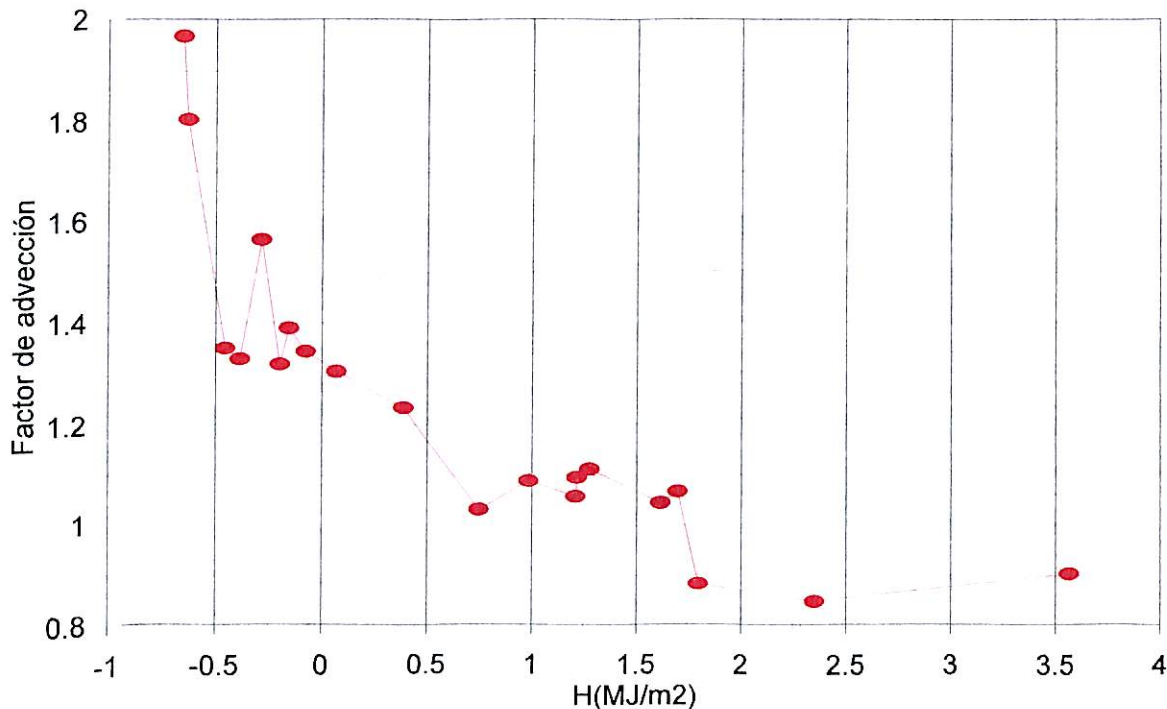


Figura 4.5. Relación del factor de advección y el flujo de calor sensible (H) en (MJ m^{-2}).

Relación del Factor de Advección y la Velocidad del viento

La Figura 4.6 muestra la relación entre el factor de advección y la velocidad el viento. Parece ser que no existe relación entre el factor de advección y la velocidad del viento, sin embargo, la tendencia media de la curva indica que el factor de advección disminuye a medida que aumenta la velocidad del viento.

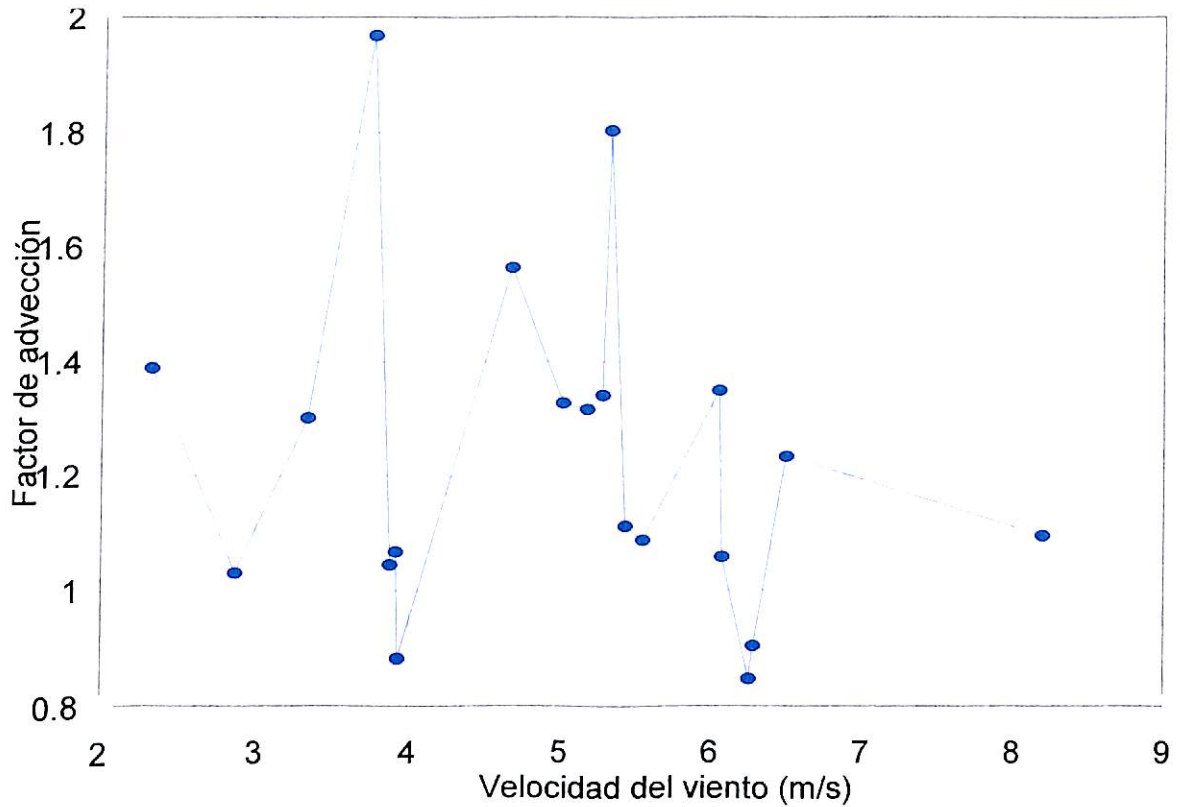


Figura 4.6 Relación del factor de advección y la velocidad del viento en (m s^{-1}).

Relación del Factor de Advección y la Dirección del viento

La relación entre el factor de advección y la dirección del viento se muestra en la Figura 4.7. Note que no existe relación entre la dirección del viento y el factor de advección. Esto sugiere que las características de las superficies circunvecinas al área de estudio eran similares, de tal forma que la advección local fue similar en todas direcciones.

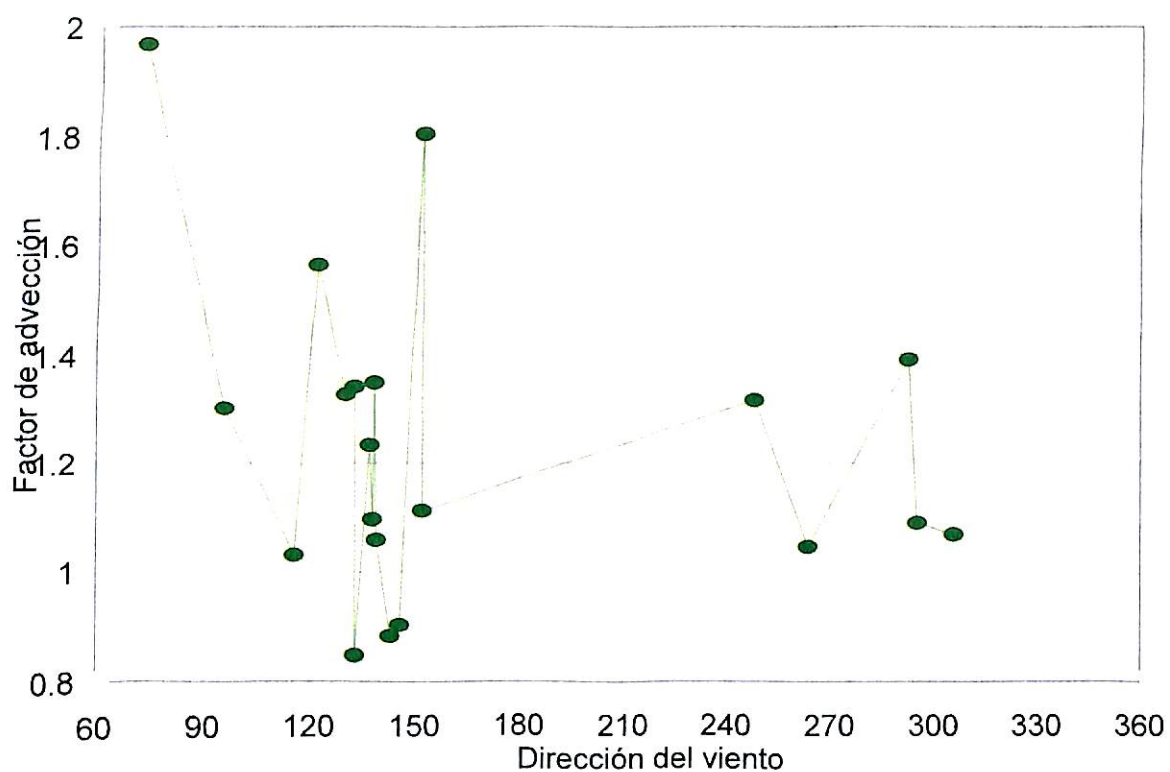


Figura 4.7 Relación del factor de advección y la dirección del viento.

CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en esta investigación, podemos concluir que la radiación neta (R_n), flujo de calor latente real (LE) y el flujo de calor latente a equilibrio (LE_{equ}) siguen la misma tendencia que la radiación solar incidente (R_{sw}). También se observó que, cuando el flujo de calor sensible (H) es aproximadamente cero o negativo, LE es mayor que LE_{equ} . Por el contrario, cuando H es apreciablemente mayor que cero LE es menor que LE_{equ} . Esto indica que cuando LE es mayor que LE_{equ} el factor de advección (α) es mayor que la unidad y cuando LE es menor que LE_{equ} α es menor que la unidad. Mohoseni-Saravi *et al.* (1996) observaron que la LE de los cultivos regados se incrementó sustancialmente hasta un 50 por ciento diario por la advección del calor sensible de las regiones desérticas circundantes.

Bajo la presencia de nubes, LE es mayor que R_n , debido al aporte adicional de energía hacia el dosel del pasto en forma de calor sensible (H negativo). En estas condiciones, α para estimar LE en función de LE_{equ} es mayor que la unidad. Esto coincide con los resultados observados por Yiyane y Zermeño-González (2003). Ellos observaron que cuando LE es mayor que LE_{equ} H es aproximadamente cero o negativo.

El valor promedio del factor de advección obtenido fue 1.24 con un

coeficiente de variación de 23.6 por ciento. Este resultado indica que es posible obtener una buena evaluación de la evapotranspiración real a partir de la evapotranspiración a equilibrio. El valor del coeficiente de advección es de 1.28 para una superficie libre de agua (sene *et al.*, 1992); 1.30 para una superficie sembrada con frijol (Leite., *et al* 1990); 1.26 para diferentes cultivos y climas por Priestley-Taylor (1972). 1.25 para una superficie sembrada con maíz Yiyane y Zermeño-Gonzalez (2003).

Se observo una relación directa entre el incremento del flujo de calor sensible de la atmósfera hacia el dosel del pasto (H negativo) y el incremento del factor de advección. Los resultados también muestran una relación entre la tendencia media de la reducción de la velocidad del viento con un incremento del factor de advección. No se observó relación entre la dirección del viento y el factor de advección, lo cual sugiere que las características de las superficies circunvecinas al área de estudio eran similares, de tal forma que la advección local fue similar en todas direcciones.

Los resultados de esta investigación sugieren que el enfoque de la evapotranspiración a equilibrio podría adaptarse para los cultivos de cobertura total en las zonas áridas y semiáridas. Rana *et al.*, (1997) indican que el principio de la evapotranspiración a equilibrio es aplicable a los cultivos de cobertura total.

RESUMEN

El recurso más importante en la agricultura de las zonas áridas y semiáridas es el agua, de tal forma que para mejorar la eficiencia del uso del agua en estas zonas, es necesario determinar el consumo de agua diario de los diferentes cultivos (evapotranspiración), y así poder determinar el momento oportuno de riego y la cantidad de agua por aplicar.

El objetivo fundamental de esta investigación fue aplicar el enfoque de la evapotranspiración a equilibrio (LE_{equ}) para determinar la evapotranspiración real (LE) del pasto Rye Grass en condiciones áridas y semiáridas. Por ello se estableció un trabajo de investigación durante el ciclo primavera - verano del año 2002 en el rancho "El Padrino", Ejido la Providencia, Saltillo, Coahuila. Ubicado al suroeste de la ciudad de Saltillo. Según Evett *et al.* (1998), la ecuación de Priestley-Taylor (1972) ha sido ampliamente usada como una medición de LE_{equ} y se representa con la siguiente relación,

$LE_{equ} = \alpha \frac{s}{s + \gamma} (Rn - G)$, donde α es el parámetro de Priestley-Taylor o el factor de advección, el cual debe determinarse previamente para el cultivo y la región de interés. El factor de advección se obtuvo a partir de la relación $\alpha =$

LE/LE_{equ} para los diferentes segmentos de tiempo y así obtener el factor de advección promedio de todos ellos.

Los flujos de calor sensible (H) y calor latente (LE) se midieron utilizando el enfoque de la covarianza Eddy. Para completar el balance de energía, también se midió la radiación neta (Rn) y el flujo de calor en la superficie del suelo (G), también se midió la radiación solar total incidente (Rsw), la velocidad y dirección del viento y la humedad relativa.

Los resultados de esta investigación muestran que la radiación neta (Rn), flujo de calor latente real (LE) y flujo de calor latente a equilibrio (LE_{equ}) siguen la misma tendencia que la radiación solar incidente (Rsw). Se observó que, cuando el flujo de calor sensible (H) es aproximadamente cero o negativo, LE es mayor que LE_{equ} . Por el contrario, cuando H es apreciablemente mayor que cero LE es menor que LE_{equ} . Esto indica que cuando LE es mayor que LE_{equ} el factor de advección (α) es mayor que la unidad y cuando LE es menor que LE_{equ} α es menor que la unidad. Bajo la presencia de nubes, LE es mayor que Rn, debido al aporte adicional de energía hacia el dosel del pasto en forma de calor sensible (H negativo). En estas condiciones, α para estimar LE en función de LE_{equ} es mayor que la unidad.

El valor promedio de α obtenido fue 1.24 con un coeficiente de variación de 23.6 por ciento. El valor del coeficiente de advección es de 1.28 para una superficie libre de agua (sene *et al.*, 1992); 1.30 para una superficie sembrada

con fríjol (Leite., *et al* 1990); 1.26 para diferentes cultivos y climas por Priestley-Taylor (1972). 1.25 para una superficie sembrada con maíz Yiyane y Zermeño-González (2003). El valor del α para estimar el flujo de calor latente real en función del flujo de calor latente a equilibrio es en función de la magnitud del valor de H. A medida que aumenta la velocidad del viento el factor de advección disminuye. También se observó que no existe relación entre la dirección del viento y el factor de advección debido a que las superficies circunvecinas al área de estudio eran similares, de tal forma que la advección local fue similar en todas direcciones.

Este trabajo de investigación sugiere que el enfoque de la evapotranspiración a equilibrio podría adaptarse para los cultivos de cobertura total en las zonas áridas y semiáridas.

LITERATURA CITADA

- Ahmadi A. Al-Shooshan y E.S., El-Sayed Ismail. 1996. Alfalfa Microclimate and evapotranspiration Under Arid Climate Conditions. En: Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, proc. Of the International Conference, 1996, San Antonio, Texas, USA. (p 48-53)
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A. and Pereira, L.S., 1994. An update for the calculation of the reference evapotranspiration . ICID Bulletin 43 (2):1-34.
- Baldocchi, D.D., B.B. Hicks y T.P. Meyers. 1988. Measuring Biosphere-Atmosphere Exchanges of Biologically Related Gases With Micrometeorological Methods, *Ecology*, 69(5), 1331-1340.
- Bastiaanssen W., Palitha Bandara y Lucas Janssen. 1998. Land Surface Evapotranspiration for Water Balance in the Kirindi 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).
- Bidlake R. William. 2000. Evapotranspiration from a Bulrush-dominated wetland in the Klamath Basin, Oregon. *J. of the American Water Resources Association* 36(6): 1309-1320.
- Brakke, T.W., S.B. Verma, y N.J. Rosenberg. 1978. Local and Regional Components of Sensible Heat Advection. *J. Appl. Meteorol.* 17: 955-963.

- Brissson, N., B. Itier, J.C. L'Hôtel y J.Y. Lorendeau. 1998. Parameterization of the Shuttleworth- Wallace Model to Estimate Daily Maximum Transpiration for Use in Crop Models. *Ecological Modeling* 107:159-169
- Carambula, M. 1997. *Producción y Manejo de Pasturas Sembradas*. Editorial Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay.
- De Bruin, H. A. R. y J. N. Stricker. 2000. Evaporation of Grass under non-Restricted Soil Moisture Conditions. *Journal of Hydrological Sciences* 45: 391-406.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper 24 (revised)*, FAO, Rome.
- Elizondo René Martínez y Contreras Mauricio Aguilera. 1996. Relación agua suelo planta atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo. México. P(29, 165-250)
- Evet, T.A. S.R. Evett, A.D. Schneider, R.W Todd y J.A. Tolck . 1998. Evapotranspiration of Irrigated Fescue Grass in Semi-Arid Environment. ASAE. Meeting Presentation, Paper No. 982117.
- Gould, F.W. y R. B. Shaw. 1992. Gramíneas. Clasificación sistemática. 1ª Edición en Español. AGT. Editor. México.
- Howell, T. A. 1996. Irrigation Scheduling Research and its Impact on Water Use. En: *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proc. Of the International conference, 1996, San Antonio, USA.* (p21-33).
- Itier, B. e 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).

- Jones, H.G. 1990. Physiological Aspects of the Control of Water Status in Horticultural Crops. Hort Science 25(1): 19-26.
- Jones, H.G. 1992. Plants and Microclimate (a quantitative Approach to Environmental Physiology). Second Edition, Cambridge University Press. United Kingdom.
- Juny, W.A., y C.B. Tanner. 1975. Advective Modification of the Priestly and Taylor Evapotranspiration Formula. Agron. J. 67: 840-842.
- Leite Maysa Lima, Gilberto C. Sedyama, Dirceu Teixeira Coelho y Hélio Alves Vieira. 1990. Determinação da Evapotranspiração de Equilíbrio numa superfície Cultivada com Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em duas densidades de plantio. Revista Ceres 37(210): 99-110.
- Lhomme, P.J. 1997 An examination of the Priestley-Taylor equation using a convective boundary layer model. Water Resources Research 97WR01897 Vol. 33 , No. 11 , p. 2571
- Medeiros, T.A., Sentelhas P. C., de Lima N.R. 2003. Reference Evapotranspiration Estimated by Penman-Monteith Equation, Lysimetric Measures and Empirical Equations in Paraipaba, State of Ceará, Brazil. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.23, n.1, p.31-40.
- Michael, A. M. 1983. Irrigation (Theory and Practice). Vikas Publishing House (Pvt) Ltd. New Delhi, India.
- Mohseni-Saravi M; Lloyd W. Gay y Paul W. Brown. 1996. Application of Penman' s Model in an Arid Environment. En: Evapotranspiration and irrigation Scheduling, Proc. Of the International Conference, 1996, San Antonio, Texas, USA. (p864-869).

- Pal Arya, S. 1988. Introduction to Micrometeorology. Academic Press Inc., U.S.A. p 307.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc. Royal Soc. London (A) 193: 120 – 145.
- Priestley, C.H.B. y R.J. Taylor. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. Monthly Weather Review 100:81-92.
- Prueguer, J. H., T. J. Sauer y 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.
- Quiroga G., H.M. 1991. Manejo Agronómico del Ballico Anual. En: Producción y Utilización de Praderas de los Ballicos Anual y Perenne. Publicación Especial No 20. Campo E xp. "Pabellón" – INIFAP – SARH. Aguascalientes, México.
- Rana, G., N. Katerji, M. Mastrorilli, M. El Moujabber y N. Brisson. 1997. Validation of a Model of Actual Evapotranspiration for Water Stressed Soybeans. Agricultural and Forest Meteorology 86: 215-224.
- Raupach, M.R. 1991. Vegetation-Atmosphere Interaction in Homogeneous and Heterogeneous Terrain: Some Implications of Mixed-Layer Dynamics. Vegetatio 91:105-120.
- Rosenberg, N.J. 1974. Microclimate. The biological environment. John Wiley. New York.
- Rosenberg, N.J., B.L. S.B. Verma. 1983. Microclimate: The Biological Environment, 2nd Edition. John Wiley & Sons. U.S.A. p(209-187).

- Rosenberg, N.J. 1969. Advective Contribution of Energy Utilized in Evapotranspiration by Alfalfa in the East Central Great Plains. *Agric. Met.* 6: 179-184.
- Sanchez-Toribio, M.I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geofoma Ediciones, 35 pp.
- Schuepp, P.H. y Ya Guo. 1994. An Analysis of Local Heat Advection on Evaporation over Wet and Dry Surface Strips. *J. Climate* 7(5): 641-652.
- Sene, K.J., J.H.C. Gash y D.D McNeil. 1992. Evaporation from a Tropical Lake: Comparison of Theory with Direct Measurements. *J. Hydrology* 127: 193-217.
- Shouse, P., W.A. Jury y L. H. Stolzy. 1980. Use of Deterministic and Empirical Models to Predict Potential Evapotranspiration in an Advective Environment. *Agron. J.* 72: 994-998.
- Stricker, J.N.M. 1981. Methods of Estimativg Evapotranspiration from Meteorological Data and their Applicability in Hydrology. En: *Evaporation in Relation to Hydrology* (ed. by C. Hooghart). Proceedings and Information No. 28.
- Stull, R.B. 1991. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. U.S.A. p 666.
- Swinbank, W.C. 1951. The Measurement of Vertical Transfers of Heat and Water Vapor by Eddies in the Lower Atmosphere. *J. Meteorol.* 8: 135-145.}

- Thompson, J.R. 1975. Energy Budgets for three Small Plots-Substantiation of Priestley and Taylor' s Lange Scale Evaporation Parameter. *J. Appl. Meteorol.* 14: 1399-1401.
- Thornthwaite, C.W. y B. Holzman. 1942. Measurement of evaporation from land and water surfaces. *US Dept. Agr. Tech. Bull.* 817: 75.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. R.* 38: 55-94
- Verma, S.B., D.D. Baldocchi, D.E. Anderson, D.R. Matt R.J. Clement. 1986. Eddy Fluxes of CO₂, Water Vapor and Sensible Heat over a Deciduous Forest. *Boundary-Layer Meteorol.*, 36, 71-91.
- Whyte, T.R., T.R.G. Moir y J.P. Cooper. 1959. Las Gramíneas en la Agricultura. *FAO. Roma.* 42:387-390.
- Williams, R.J. y D.G. Stout. 1981. Evapotranspiration and Leaf Water Status of Alfalfa Growing Under Advective Conditions. *Canadian J. Plant Sci.* 61: 601-607.
- Wilson B. Kell y Dennis D. Baldocchi. 2000. Seasonal and Interannual Variability of Energy Fluxes over a Broadleaved Temperate Deciduous Forest in North America. *And Forest Metereology* 100(2000):1-18.
- Yiyane, Y. y Zermeño González, A. 2003. Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego de las zonas áridas. *Agrociencia*, en Prensa.
- Zermeño González, A. y L.E. Hipps. 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 González, 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, Gómez Palacios, Durango, México. (p53-57)

PAGINAS WEB CONSULTADAS

- <http://www.W12.uni-kassel.de/kww/irrig-l/1998lo3/msg00007.html>
- <http://www.eas.ualberta.ca/jdwilson/jdw33.html>
- <http://www.Civil.Uwaterloo.ca/watlood/Manual/02-03-1.htm>
- <http://www.bsyse.Wsu.edu/crupsict/manual/parameters/location/et.htm>
- <http://emily.Soils.Wise.edu/~anderson/alexi/alexi-budget.html>
- <http://www.fs.fed.us/rm/value/docs/et-trends/.pdf>
- <http://www.agu.org/pubs/abs/wr/97WR01897/97/97WR01897.html>
- <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishyd97/library/wbtexas/.htm>
- <http://www.sbea.org.br/rea/2003-v23-n1/04-p3140.htm>
- <http://www.indiana.edu/~climate/SAM/ExpDesingnNEW.htm>