

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"**

**DIVISION DE INGENIERIA.**

**DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**

**Partición Temporal del Balance Energético Sobre un Matorral Desértico  
en el Noreste De México.**

**Por:**

**ARMANDO FLORES ALVAREZ**

**Tesis**

Que se somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito parcial  
para obtener el título de:

Ingeniero Agrónomo en Irrigación.

**APROBADO**

---

**Dr. Alejandro Zermeño Gonzáles**  
PRESIDENTE

---

**Dr. Raúl Rodríguez García**  
SINODAL

---

**Ing. Carlos Rojas Peña**  
SINODAL

---

**M. C. Juan José Rojas Rangel**  
SINODAL (suplente)

---

**M. C. Luis Edmundo Ramírez Ramos**  
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERIA

## AGRADECIMIENTOS

AL Dr. Alejandro Zermeño Gonzáles, por la revisión, aportaciones y sugerencias para la realización de este trabajo, y su valiosa amistad que me ofreció durante el desarrollo del mismo.

A mis asesores; Dr. Raúl Rodríguez García, ing. Carlos Rojas Peña, Ing. Juan José Rojas Rangel por su apoyo, disposición, sugerencias y opiniones, que con su experiencia contribuyeron en la culminación del presente trabajo.

A todos los maestros que con su esfuerzo y dedicación influyeron en mi formación académica.

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

A mi esposa Sra. Aracely Macedo Castillo, por el apoyo incondicional durante todo el tiempo de mis estudios.

## DEDICATORIAS.

A mi hermana consuelo (+) quien tenia el entusiasmo de que nosotros como hermanos termináramos una carrera profesional.

A mi esposa Sra. Aracely Macedo Castillo, mi querida compañera y mejor amiga, por su amor, apoyo y comprensión incondicional en todo momento tan difícil.

A mi hijo José Armando Flores quien representa el motivo más grande para ser siempre mejor y mi segundo sueño en mi vida, mi familia.

CON PROFUNDO AMOR Y RESPETO A MIS PADRES:

Sr. Alfonso Flores Castro

Y

Sra. Petra Álvarez Torres.

Quienes conformaron mi educación para la vida, brindándome su apoyo incondicional, con la esperanza siempre de ver siempre a sus hijos alcanzar sus metas.

**Con mucho cariño a mis hermanos:** Consuelo, Laura, Salvador, Ángel, y Isabel, por su apoyo y gratificante compañía en mi vida.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	<b>Pag.</b>
<b>INDICE DE CUADROS</b> .....	VII
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	VIII
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
Generalidades de las zonas áridas y semiáridas.....	3
Descripción de las zonas áridas y semiáridas del noreste de México.....	5
Distribución.....	5
Características generales.....	6
Ubicación geográfica.....	7
Extensión territorial.....	7
Tipo de suelos.....	8
Tipo de climas.....	8
Tipo de Vegetación.....	8
Componentes del balance de energía.....	12
El balance energético sobre una superficie vegetal.....	12
Medición de los componentes del balance de energía.....	15
Método de la relación Bowen.....	15
Método de correlación de Eddy.....	18
Descripción de la instrumentación del Método de la correlación de Eddy.....	20
<b>MATERIALES Y METODOS</b> .....	21
Localización y descripción del Sitio Experimental.....	21
Tipo de clima.....	22
Tipo de Suelo.....	22
Tipo de vegetación.....	23
Establecimiento y manejo del experimento.....	24

Instrumentación y mediciones.....	24
Procesamientos de datos.....	27
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>29</b>
Componentes del Balance de Energía.....	29
Componentes del balance de energía durante el día.....	30
Días soleados.....	30
Días parcialmente nublados.....	33
Días nublados.....	35
Componentes del balance de energía durante la noche.....	37
Flujos integrados durante el día en diferentes rangos de tiempo.....	39
Flujos integrados durante la noche.....	42
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>43</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>45</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>49</b>
<b>PAGINAS WEB CONSULTADAS.....</b>	<b>53</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
3.1	Análisis físico-químico del suelo a una profundidad de 0-30 cm.....	23
4.1	Valores integrados de flujo ( $\text{MJm}^{-2}$ ) para diferentes segmentos de tiempo para condiciones de cielo despejado, observados los DDA 150, 153 y 154.....	40
4.2	Valores integrados de flujo ( $\text{MJm}^{-2}$ ) para diferentes segmentos de tiempo para condiciones de cielo parcialmente nublado, observados los DDA 148, 149 y 158.....	41
4.3	Valores integrados de flujo ( $\text{MJm}^{-2}$ ) para diferentes segmentos de tiempo para condiciones de cielo nublado, observados los DDA 146 y 151.....	41
4.4	Valores integrados de flujo ( $\text{MJm}^{-2}$ ) para condiciones nocturnas, observados durante las noches de los DDA 149-150, 150-151.y 151-152.....	42

## INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Mapa de la republica mexicana que muestra las regiones faunisticas y ecosistemas principales de México.....	13
3.1 Ubicación geográfica del sitio experimental dentro de la república mexicana.....	21
3.2 Elemento de una estación Eddy para medir flujo de calor sensible (H) y el flujo de calor latente (LE), en el cual se muéstrale 3-d anemómetro sónico, el termopar de alambre fino y el Kriptón girómetro de respuesta rápida.....	26
3.3 Representación esquemática de la distribución de los instrumentos y sensores de medición.....	28
4.1 Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 150 ( $Wm^{-2}$ ).....	31
4.2 Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 153 ( $Wm^{-2}$ ).....	32
4.3 Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 154 ( $Wm^{-2}$ ).....	33
4.4 Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 148 ( $Wm^{-2}$ ).....	34
4.5 Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 149 ( $Wm^{-2}$ ).....	35
4.6 Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 146 ( $Wm^{-2}$ ).....	36
4.7 Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 158 ( $Wm^{-2}$ ).....	36
4.8 Distribución de los componentes del balance de energía	

	observados los DDA 149 a 150 ( $\text{Wm}^{-2}$ ).....	38
4.9	Distribución de los componentes del balance de energía observados los DDA 150 al 151 ( $\text{Wm}^{-2}$ ).....	38
4.10	Distribución de los componentes del balance de energía observados los DDA 151 a 152 ( $\text{Wm}^{-2}$ ).....	39



## INTRODUCCIÓN.

La región Noreste del país está integrada por los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. El mayor porcentaje de la superficie de esta región está compuesto de matorral desértico, con una gran variedad de formas biológicas dominadas por especies arbustivas que dan una fisonomía de matorrales, es una comunidad formada del 70% de plantas sin espinas, como los matorrales de *Larrea tridentata* (gobernadora), *Flourenzia cernua* (hojasén), *Cordia gregii* (navaja blanca o trombillo), *Ambrosia damosa* (hierba de burro), y otras (INEGI, 2002). Entre la vegetación encontramos pastos (tipo de fotosíntesis C4), las malezas que emergen en temporada de lluvias (C3) y toda la familia agavacea (CAM).

El intercambio de materia (vapor de agua, bióxido de carbono, oxígeno) y energía (radiación, calor) entre una superficie vegetal y la atmósfera, tiene un gran efecto en el microclima de una determinada localidad. La fuente principal de energía sobre una superficie vegetal es la radiación solar, la cual al incidir sobre la superficie, parte se refleja, parte se absorbe y parte se re-emite en forma de radiación de onda larga, resultando en una radiación neta sobre la superficie la cual se transforma en un flujo de calor sensible, flujo de calor latente y flujo de calor en la superficie del suelo. (Rosenberg *et al.*, 1983; Baldocchi, 1988; Verma, 1990). Parte de la radiación neta absorbida es utilizada por las plantas en el

proceso de la fotosíntesis, y en el calentamiento de la vegetación y el aire circundante.

La partición del balance energético de una superficie suelo-vegetación es muy diferente al de una superficie urbanizada, de tal forma que antes de modificar las características de la superficie de un determinado ecosistema natural, debido al proceso de urbanización o industrialización, es necesario conocer la distribución de los componentes del balance energético, para poder predecir el efecto que la urbanización o industrialización tendrá en el microclima de la localidad y poder recomendar estrategias para mitigar el cambio microclimático ocasionado por la urbanización.

## **OBJETIVO**

- Analizar la distribución, variación diurna y nocturna de los componentes del balance de energía sobre un ecosistema compuesto de matorral desértico, en el Noreste de México

## **HIPÓTESIS**

La distribución del balance energético varía de acuerdo a la superficie suelo-vegetación en una área a diferentes horas del día.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Generalidades de las zonas áridas y semiáridas.

La aridez de un lugar es resultante de factores físicos como son la radiación solar, la temperatura, la cantidad de lluvia, la dirección y fuerza de viento, la evapotranspiración, etc. (Mosiño, 1979), estas zonas áridas no constituyen un solo ecosistema, sino muchos pequeños sistemas que permiten el desarrollo de numerosas especies; estas especies, generalmente se encuentran provistas de una armadura de espinas, que además de defenderlas del maltrato de los animales, evitan considerablemente la evapotranspiración. Estas plantas por lo general conservan siempre una reserva de agua que es almacenada en las hojas y en sus tallos suculentos, o bien bajo la superficie del suelo en tubérculos. En algunas de estas especies, la resistencia de altas temperaturas es sorprendente, pues existen plantas que reducen la pérdida de agua desarrollando hojas pequeñas o careciendo de ellas; en otras, las hojas crecen en forma vertical, por lo que la exposición de las mismas hacia el sol es mínima (Maldonado, 1979) o bien desarrollan una capa cerosa que oculta los estomas. La gobernadora por ejemplo, es un arbusto que durante periodos prolongados de sequía deja morir algunos de sus tallos, evitando pérdidas de agua hasta en un cincuenta por ciento. (Maldonado, 1979).

Las especies de las zonas áridas generalmente son de color claro, debido a que los follajes oscuros absorben más calor, durante las sequías prolongadas, las plantas suculentas, como los nopales, se tornan de colores grisáceos, delgados y arrugados. En cambio las especies anuales cuentan con un mecanismo biológico que al sentir los rigores de una sequía, inmediatamente apresuran su maduración para prolongar la existencia de la especie (Maldonado, 1979).

Por lo tanto la energía es un factor importante en un ecosistema desértico que se considera básicamente en dos: *la primera*, la radiación de energía aprovechable que es capturada y convertida a energía química potencial por las plantas; *la segunda*, la radiación de energía que es absorbida, reflejada y conducida por el suelo, el aire y que se convierte en calor. Así la importancia de los efectos de temperatura en la dinámica de un ecosistema es considerada una gran interacción con el flujo de agua en las plantas (J. A. Ludwig, 1981).

El calor se define como una forma de energía cinética que puede transformarse en otros tipos de energía o transmitirse de un cuerpo relativamente caliente a otro más frío (Daubenmire, 1990), esta energía calorífica puede transmitirse en tres maneras: *por radiación*, entre el cuerpo radiador y el receptor no existe un medio material alguno (así se recibe la energía solar); *por convección*, característica de los fluidos (líquidos y gases), el calor se transporta por materia que es la forma principal de transmisión de calor en la atmósfera y *por conducción*,

el calor se transmite de molécula a molécula, este tipo de transmisión de calor no es significativo en la atmósfera pero es muy importante (Torres, 1995).

### **Descripción de las zonas áridas y semiáridas del noreste de México.**

#### **Distribución.**

La extensión territorial de México, es de 1,964,375 kilómetros cuadrados de los cuales 1,959,248 kilómetros cuadrados son superficie continental y 5,127 kilómetros cuadrados corresponden a superficie insular (INEGI 2003).

En México, existen 1,097,178.88 kilómetros cuadrados cubiertos por zonas áridas y 599,529.89 kilómetros cuadrados de zonas semiáridas, que sumadas equivalen a aproximadamente el 86.6 % de la superficie total del país y están divididas en ocho áreas: Sonorense, Chihuahuense, Queretana, Poblana, Guerrerense, Oaxaqueña y Yucateca (CNA, 2003), determinando que el 56 por ciento de las áreas secas de México son áridas; cerca del 30.6 por ciento semiáridas y el 13.4 por ciento son áreas semihúmedas y húmedas.

Estas zonas áridas y semiáridas las caracterizan un sistema de suelo-vegetación que define la distribución de los componentes del balance energético sobre la superficie, esto a su vez tiene un efecto directo con las características del clima de estas regiones. Por lo tanto es muy importante conocer la distribución del balance energético sobre estas superficies y el posible impacto en los cambios de

la distribución energética ocasionada por la deforestación y cambios en el manejo de dichas áreas lo cual tiene un efecto directo en el microclima de estas regiones.

### **Características generales.**

Con los términos extremadamente áridas, áridas y semiáridas se designan regiones en las cuales las lluvias son inexistentes o reducidas y como consecuencia se desarrollan ecosistemas con características peculiares, en tales condiciones, la actividad agrícola y ganadera es desde “imposible” hasta “muy difícil” y limitada. Las lluvias cuando ocurren en las zonas áridas, son poco frecuentes e irregulares, cubren áreas pequeñas y caen en muchos casos con gran intensidad (Suárez, 1979). Así los indicadores de aridez de grandes extensiones de la superficie terrestre, la describen los botánicos, como una expresión visible de las relaciones clima-vegetación que rigen el comportamiento de las plantas frente a los agentes atmosféricos y a la radiación solar (Mosiño, 1983)

Se entiende por zonas áridas aquellas áreas cuya precipitación es menor a 500 mm anuales, que presentan una distribución de lluvias muy irregular durante el ciclo vegetativo, que cuentan con una temperatura media anual que oscila entre los 15 y 25°C y con no menos de 7 meses de sequía y cuya cubierta vegetal es menor al 70 %, predominando en ella los elementos xerófitos.

Existen también las zonas semiáridas, las cuales se definen como aquellas áreas cuya precipitación pluvial varía de 500 - 1000 mm anuales y cuya vegetación dominante está constituida principalmente por diferentes tipos de matorrales y pastizales naturales (Villa Salas, 1981).

Mientras que la ONU (1994), considera por zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas aquellas zonas en las que la proporción entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial está comprendida entre 0.05 y 0.65, excluidas las regiones polares y subpolares.

### **Ubicación geográfica.**

Respecto a la localización de la región noreste de México, está situado al norte 29° 53', al sur 22° 12'; al este 97° 08', al oeste 103° 58' de longitud oeste respecto del Meridiano de Greenwich (INEGI, 2002)

### **Extensión territorial.**

En el noreste del país comprendidos por los estado de Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila, la superficie total es de 295,847 km<sup>2</sup> (INEGI, 2002), son lugares áridas y semiáridas que corresponde al 68.2% de la superficie total de está región (INEGI 2002).

### **Tipo de suelos.**

Los suelos dominantes de las regiones áridas y semiáridas son del tipo xerosol, que tienen las siguientes características: suelos áridos que contienen poca materia orgánica; la capa superficial es clara, debajo de ésta puede haber acumulación de minerales arcillosos y/o sales, como carbonatos y sulfatos

### **Tipo de climas.**

El clima es el resultado de la interacción de diversos elementos y factores atmosféricos, como la lluvia, el viento, la vegetación, las nubes, la altitud, los cuerpos de agua y el relieve. A su vez, los climas definen el tipo de flora y fauna que predomina en una región y hacen lo propio con el hombre y sus actividades. Estos climas son: muy seco, seco y templado subhúmedo. (CNA, 2003).

### **Tipo de Vegetación.**

De acuerdo con (COTECOCA, 1973; INEGI, 2002), la vegetación del Noreste de México se puede agrupar en 4 asociaciones que son: la selva, el bosque, el matorral, y el pastizal. Las selvas son caducifolias y varían de bajas a



medianas, están restringidas al estado de Tamaulipas donde se desarrollan en laderas de sierras con suelos someros derivados de calizas. Incluyen especies como el orejón (*Enterelobium cyclocarpum*), raspador (*Lysiloma microphyllum*) y la mahuirá (*Phoebe tampicensis*). Una variante espinosa de la selva se distribuye preferentemente hacia la costa y está caracterizada por la gran cantidad de leguminosas espinosas.

Los Bosques se localizan básicamente en las partes altas y medias de las sierras sobre suelos someros existen diferentes tipos como: el aciculifolio de pinos piñoneros (*Pinus cembroides*), el caducifolio que ocupa las zonas medias de la Sierra Madre Oriental en la vertiente oriental y se compone principalmente por encinos (*Quercus spp.*) y alamillos (*Liquidambar styraciflua*), el esclerófilo con una gran variedad de encinos en la sierra o bien en la planicie costera donde domina *quercus oleoides* y el bosque esclero-aciculifolio que está compuesto por una asociación de encinos (*Quercus spp.*) y pinos (*Pinus spp.*).

El matorral se subdivide en cuatro grandes comunidades: bajo, mediano, alto y matorral crasirrosulifolio.

*El matorral bajo espinoso e inerme* con altura de sus especies dominantes entre 0.30 y 1.5 m se encuentra en el altiplano al oeste de la Sierra Madre Oriental, abarca casi todo Coahuila, con excepción del sureste y noreste, el

sureste de Nuevo León y suroeste de Tamaulipas algunas de las especies predominantes son, el guayacán (*Poerleria angustifolia*), cenizo (*Leucophyllum texanum*), hojásén (*Flourensia cernua*), gobernadora (*Larrea tridentata*), chaparro prieto (*Acacia rigidula*), palma (*Yucca spp.*), nopal (*Opuntia spp.*) etc..

*El matorral mediano principalmente espinoso y subinorme* con una altura de sus especies dominantes entre 1.5 y 3.0 m se localiza al noreste de Coahuila, al este de las sierras Del Burro y Santa rosa. En Nuevo León se encuentra al norte y noreste, al oriente de las sierras de Lampazos, Santa Clara, Sabinas y Picachos. Existe también este tipo de matorral en los municipios de Cadereyta, Montemorelos, Terán y Linares, en el centro sureste del estado. En Tamaulipas se encuentra localizado al norte y en la franja noroeste del estado. Algunas de las especies predominantes son, el chaparro amargoso (*Castela texana*), guayacán (*Poerleria angustifolia*), huajillo (*Acacia berlandieri*), mezquite (*Prosopis glandulosa*), chaparro prieto (*Acacia rigidula*), anacahuita (*Cordia boissieri*), cenizo (*Leucophyllum texanum*), tenaza (*Pithecellobium brevifolium*), palo verde (*Cercidium spp.*), ébano (*Pithecellobium flexicaule*), etc.

*El matorral alto, subinorme y espinoso*, con una altura de sus especies dominantes entre 3 y 5 m. se encuentra localizado al oriente de la Sierra Madre, a la altura de Monterrey hasta la costa tamaulipeca. Abarca la parte central de Nuevo León y el centro y parte del norte de Tamaulipas. En este último estado se excluye la parte sur de la sierra de Tamaulipas, algunas de las especies

predominantes son la barreta (*Helietta parvifolia*), zapotillo (*Diospyros palmeri*), anacahuita (*Cordia boissieri*), mezquite (*Prosopis glandulosa*) y chaparro prieto (*Acacia rigidula*) entre otras.

*El matorral crasirrosulifolio espinoso* se localiza en las laderas y lomeríos en la vertiente occidental de la Sierra Madre Oriental, en suelos coluviales, someros, como especies dominantes se puede mencionar a la lechuguilla (*Agave Lecheguilla*), guapilla (*Hechtia glomerata*) y el sotol (*Dasyllirion spp*).

Los pastizales los clasifican en mediano y amacollado abierto, halófito y zacatonal. Respecto a los pastizales mediano abierto y amacollado abierto se encuentran principalmente en el altiplano suroeste de Nuevo León y parte norte de Coahuila en donde las especies dominantes son del genero *Bouteloua spp.*, zacate búfalo (*Buchloe dactyloides*), etc. Los pastizales halófitos se localizan en cuencas cerradas sobre el altiplano y en las cuencas de la laguna, algunas de las especies dominantes son el zacate toboso (*Hilaria mutica*), zacate alcalino (*Sporobolus airoides*), jauja (*Suaeda spp*), zacate mezquite (*Hilaria belangeri*), etc., y los zacatonales localizados a lo largo de la costa del Golfo de México dominados por zacahuistle (*Spartina spartinae*), saladillo (*Clappia suaedaefolia*), etc. Es importante señalar que el zacate buffel ocupa grandes extensiones de las áreas que corresponden principalmente a los matorrales y selva baja espinosa con

más de 500,000 ha. en Tamaulipas (Saldívar 1991) y más de 250,000 en Nuevo León.

Briones en (1994) comenta que el patrón de precipitación durante el invierno en las zonas áridas y semiáridas favorece que las especies anuales que germinan principalmente en este periodo. Las especies de gramíneas tienen una proporción importante en la composición de la vegetación que en otros desiertos. Las cactáceas son generalmente abundantes, dominan los arbustos perennes y varias especies de agave y yucca que son comunes y conspicuas. En algunos lugares existen cactáceas columnares como *Myrtillocactus geometrizans* y especies arborescentes de yucca. La vegetación predominante consiste de matorrales xerófitos, aún cuando también son frecuentes los pastizales y bosques espinosos de *Prosopis spp.* En la figura 2.1 se observan los tipos de vegetación que existen en la república mexicana.

Actualmente, existen varias instituciones nacionales que participan en estudios de vegetación en la zona desértica, algunas son, el Centro de Estudios Biológicos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, la Universidad Autónoma de Chihuahua y el Instituto de Ecología.

## **Componentes del balance de energía**

### **El balance energético sobre una superficie vegetal.**

Toda la energía recibida en la superficie de la tierra se origina del sol, excepto otra poca cantidad de calor que proviene del centro de la tierra. Cierta parte de la radiación es reflejada nuevamente al espacio. La tierra re-irradia parte de la energía recibida del sol. La cantidad de energía solar que llega a la superficie de la tierra conocida como radiación neta (Rn) es la energía disponible para llevar a cabo ciertos procesos muy importantes como la evapotranspiración (Bastiaanssen *et al.*, 1998; Elizondo y Contreras, 1996;

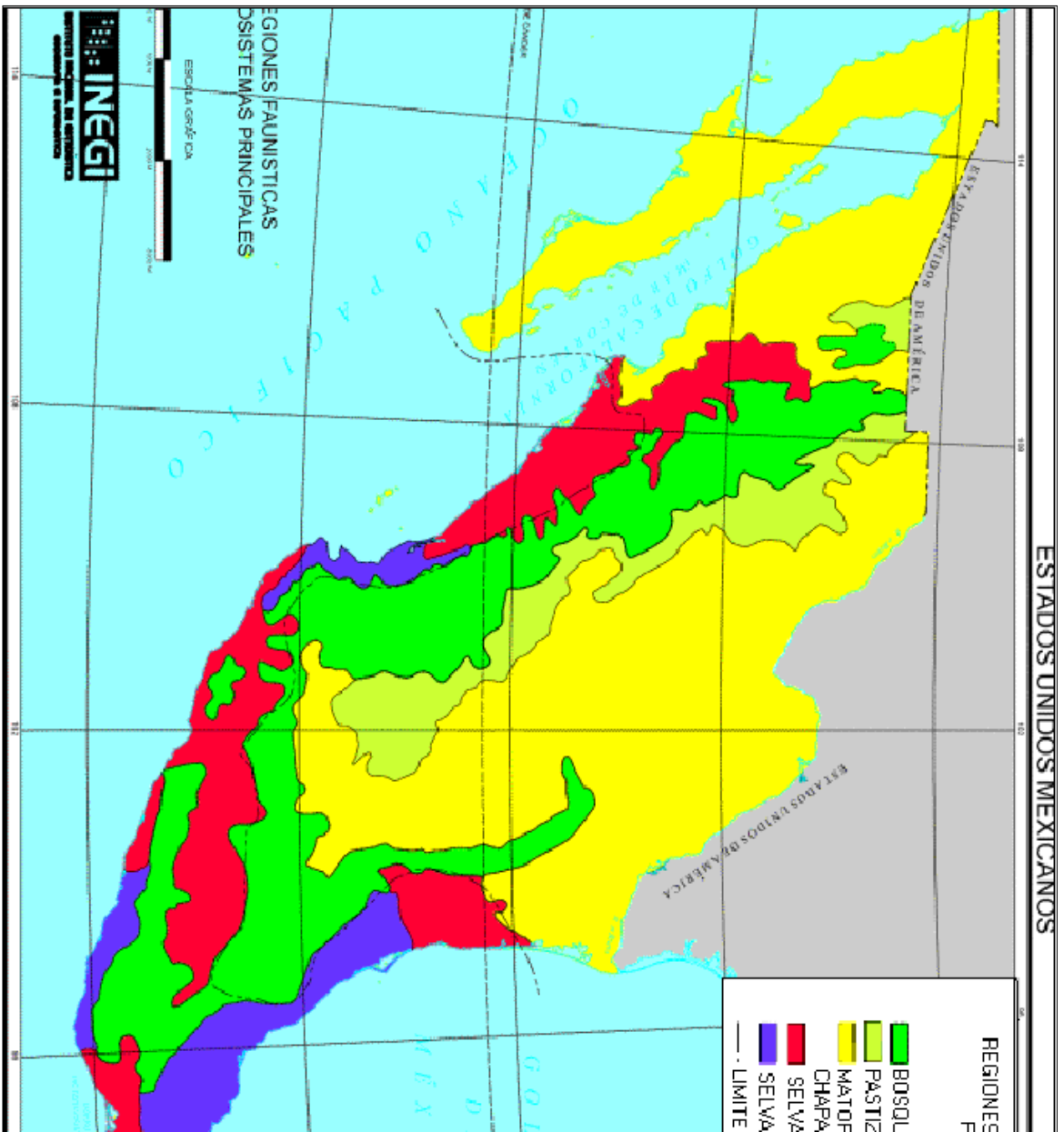


Figura 2.1. Mapa de la república mexicana que muestra las regiones faunísticas y ecosistemas principales de México (INEG, 2002)

Pereira *et al.*, 1996). Como se mencionó anteriormente, la ecuación que describe el balance de energía sobre una superficie vegetal es:

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

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 la superficie del suelo ( $W/m^2$ );  $S$  es el almacenamiento de energía por cambio de temperatura en el aire y el follaje del cultivo ( $W/m^2$ );  $PH$  es la energía captada en el proceso de fotosíntesis ( $W/m^2$ ); cada uno de estos componente es afectado por diversos factores.

Como su nombre lo indica, la radiación neta es el balance resultante entre la radiación solar incidente y la radiación terrestre emitida, de acuerdo con la siguiente relación.

$$Rn = (1 - \alpha_s)R_{sw} + Rlw - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (2)$$

Donde:  $\alpha$  es el albedo o índice de reflectividad de la superficie a la radiación solar incidente,  $R_{sw}$  es la radiación solar incidente,  $Rlw$  es la radiación (de onda larga) emitida por la atmósfera e incidente sobre la superficie,  $\epsilon_s$  es la emisividad de la superficie,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) y  $T_s$  es la temperatura de la superficie (K). El flujo de calor sensible (H) es función de la diferencia de temperatura entre la superficie y la atmósfera circundante. El flujo de calor latente (LE) se refiere a la tasa de evapotranspiración y es función de la disponibilidad de agua en el suelo y del déficit de presión de vapor de agua de la atmósfera.

La energía captada en el proceso de fotosíntesis (PH) depende de las características de la vegetación presente, grado de cobertura y tipo de plantas (C3, C4, CAM). El almacenamiento de energía depende de los cambios de temperatura del aire y la vegetación presente y es función de la capacidad calorífica del aire y de la vegetación presente.

## ***Medición de los componentes del balance de energía***

### **Método de la relación Bowen.**

Es uno de los métodos más sencillos y prácticos para la estimación del flujo de vapor de la superficie 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). Ibáñez *et al* (1999) indica que este método permite estimar el flujo de vapor de agua con un error del 10 por ciento en todos los cultivo a partir de superficies evaporantes basado con la ecuación de balance de energía (Ec. 3) en la superficie. Asumiendo que la energía consumida en fotosíntesis (PH) y la del flujo de calor en el suelo (G) es despreciable, el balance de energía queda como:

$$Rn = -(LE + H + G) \quad (3)$$

Donde  $Rn$  es la radiación neta ( $Wm^{-2}$ ),  $H$  es el flujo de calor Sensible ( $Wm^{-2}$ ),  $G$  es el flujo del calor en el suelo ( $Wm^{-2}$ ) y  $Le$  es el flujo de calor latente ( $Wm^{-2}$ ).

La densidad del flujo de energía asociado con el flujo latente de la superficie del suelo (LE) está dada por:

$$LE = -\frac{(Rn + G)}{1 + \beta} \quad (4)$$

Donde,  $\beta$  = Relación de Bowen, la relación entre el flujo de calor sensible (H) y el flujo de calor latente (LE). La relación de Bowen es derivada de:

$$\beta = \frac{H}{LE}$$



El valor de 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). Las mediciones de humedad relativa se realizan generalmente a una separación vertical de un metro.

Las ventajas de este método son: 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 la información de las condiciones superficiales ni requiere el conocimiento de la conductancia fisiológica actual o de la capa frontera (Jones, 1992), es muy sencillo de operar (Itier y Brunet, 1996; ashktorab *et al.*, 1994).

Las desventajas son: es muy sensible a los errores en las mediciones de radiación neta y flujo de calor en el suelo; los gradientes de temperatura y humedad específica deben ser suficientemente grandes para poder alcanzar precisiones aceptable, lo que prácticamente excluye usar este método en superficies rugosas y en ecosistemas muy secos donde los gradientes verticales de humedad específica son muy pequeños y difíciles de medir. Otro problema de este método es cuando el valor de la relación de Bowen tiende a un valor de uno ( $\beta \rightarrow 1$ ), por lo cual la ecuación (4) es indeterminada. Está 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).

El proceso de este método consiste en medir el gradiente de humedad específica con un higrómetro de punto de rocío de respuesta rápida, y el gradiente de temperatura se mide con termopares de alambre fino de Chromel constantan. Se deben realizar estas mediciones a una frecuencia de 2 segundos y promedios de 20 y 30 minutos. La radiación neta se mide con un radiómetro neto. Y el flujo de calor en la superficie del suelo se obtiene midiendo el flujo de calor a una profundidad de 8 cm con un plato para flujo de calor y realizando la corrección por cambios de temperatura del suelo sobre el plato (Zermeño, 2001; Anhktorab *et al.*, 1994)

### **Método de correlación de Eddy.**

El método de correlación de Eddy propuesto por Swinbank (1951) 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 con una covarianza entre las fluctuaciones de la concentración de está entidad con las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento (zermeño, 2001; Itier y Brunet, 1996).

El principio del método de la correlación de 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 (típicamente 10 – 20 Hz) y promediando las covarianzas a un periodo suficiente (típicamente 15 – 30 minutos) (Itier y Brunet, 1996). En principio, el método de correlación de Eddy puede ser utilizado para cualquier proceso de transporte (Jones, 1992), pero suele ser utilizado en las mediciones de calor latente (LE), calor sensible (H) y el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Considerando nada más los flujos de LE y H, se pueden expresar para una superficie horizontal homogénea de la siguiente manera (Zermeño, 2001; Prueger *et al.*, 1998):

$$H = \rho_a c_p \overline{w'T'} \quad (6)$$

$$LE = L \rho_a \overline{w'q'} \quad (7)$$

Donde  $\overline{w'T'}$  es la velocidad vertical instantánea del viento (m/s),  $T'$  es la temperatura instantánea del aire (°C),  $\rho_a$  es la densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>),  $c_p$  es la capacidad calorífica del aire (JKg<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>). Las barras horizontales superiores indican un promedio en un intervalo de tiempo y las primas denominan desviaciones de la media.

La técnica de correlación de Eddy requiere un fetch adecuado para una superficie homogénea para que la capa frontera interna de la vegetación esté en equilibrio con la superficie de abajo, de esta manera se asegura una buena interpretación de los flujos. Una guía típicamente usada es la relación 100:1 para la distancia del fetch a la altura de los equipos o sensores (Prueger *et al.*, 1998). La confiabilidad de mediciones por el método de la correlación de Eddy puede ser evaluada por la medición de todos los componentes significantes del balance de energía. Un término llamado la relación de clausura (CR) es usado para indicar la precisión de las mediciones de los flujos en la superficie. CR está dado por:

$$CR = \left[ \frac{(LE + H)}{(Rn + G)} \right] \quad (8)$$

Idealmente, CR debe tener el valor igual a uno (Kizer y Elliott, 1991)

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).

Las desventajas son: el equipo utilizado es muy costoso, delicado y sensible (Zermeño, 2001; Kizer y Elliott, 1991).

**Descripción de la instrumentación del Método de la correlación de Eddy.**

Dado que los remolinos cerca de la superficie son muy pequeños y rápidos, las mediciones se deben hacer a una frecuencia alta para obtener promedios de 15 a 30 minutos (Itier y Brunet, 1996; Zermeño, 2001). El componente instantáneo vertical del viento ( $w'$ ) se mide con un anemómetro sónico unidimensional ó tridimensional; la temperatura instantánea del aire ( $T'$ ) se mide con termopares de alambre fino de chromel-constantan ( $1.27 \mu\text{m}$  de diámetro) y la humedad específica instantánea con un higrómetro de Kriptón de respuesta rápida (Zermeño, 2001).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización y descripción del sitio experimental.

Este trabajo se realizó en el rancho El Padrino, Ejido la Providencia, Saltillo, Coahuila, ubicado al sureste del estado de Coahuila, sobre la carretera federal No 54, con intersección a la carretera General Cepeda, Km. 6. Geográficamente está localización se localiza en las coordenadas:  $25^{\circ} 14' 07''$  latitud norte,  $101^{\circ} 10' 25''$  longitud oeste, con una altitud de 1749 metros sobre el nivel del mar.

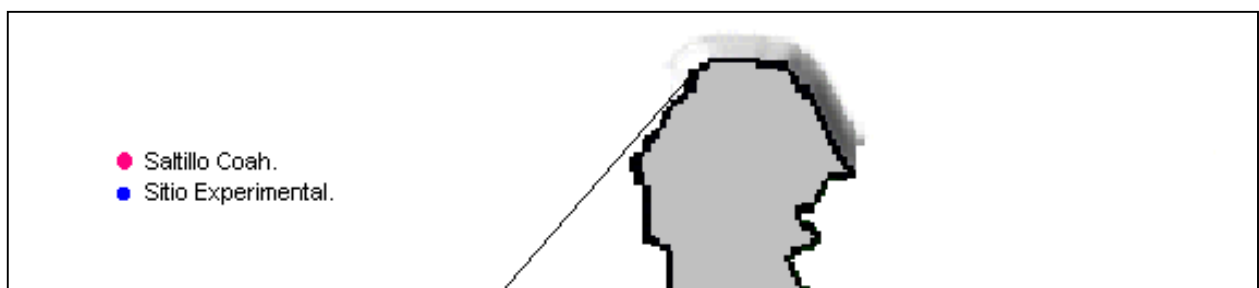


Figura 3.1. Ubicación geográfica del sitio experimental en la república mexicana.

### **Tipo de clima.**

En la región sureste del estado de Coahuila, en donde se desarrollo el experimento, el clima según Köpen modificado por García en 1988 es *BSh*: clima semiárido seco, donde el régimen de lluvias es intermedio, en los meses de julio y septiembre, con una temperatura superior a los 18°C y una precipitación pluvial media anual de 368 mm.

La evaporación promedio mensual es de 178 mm. Los valores máximos se presentan en los meses de abril, mayo y junio con un promedio de 226 mm y los valores mínimos se presentan en los meses fríos de noviembre y diciembre con valores menores de 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, oscilando entre el 80 y 85 por ciento. Los vientos son predominantes del sureste todo el año.

### *Tipo de Suelo*

Los lomeríos y las sierras encontradas a los alrededores del valle provienen de rocas sedimentarias lutita-arenisca, la cual como consecuencia 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 del suelo con fase física petrocálsica. En el cuadro 3.1 se representan los resultados del análisis físico-químico obtenido para este sitio, en un estrato de 0-30 cm. Son suelos que se localizan en zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Este suelo se caracteriza por ser de color claro y pobre en materia orgánica y el subsuelo es rico en arcilla o carbonatos, con baja susceptibilidad a la erosión. 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 de 0-30 cm.

pH (saturación)	8.58
Materia orgánica (%)	3.46
Nitrógeno total (%)	0.17
Potasio Inter. (Kgha <sup>-1</sup> )	-
Fósforo aprov. (Kgha <sup>-1</sup> )	17.1
Carbonatos totales (%)	39.63

% Arcilla	31.6
% Limo	23.6
% Arena	44.88
Textura	Migajón-Arcilloso
C.E. (dS.m <sup>-1</sup> )	0.805
K <sup>+</sup> (Meq.l <sup>-1</sup> )	-
Na <sup>+</sup> ( Meq.l <sup>-1</sup> )	0.54
Ca <sup>+</sup> ( Meq.l <sup>-1</sup> )	4.25
Mg <sup>+</sup> ( Meq.l <sup>-1</sup> )	6.25
Cl <sup>-</sup> ( Meq.l <sup>-1</sup> )	4.9
SO = 4 (Meq.l <sup>-1</sup> )	16.53
CO = 3 (Meq.l <sup>-1</sup> )	1.5
HCO = 3 (Meq.l <sup>-1</sup> )	4.0
D.A.p gr/cc	

### Tipo de vegetación

El tipo de vegetación pertenece a las zonas semiáridas, por lo tanto predominan; i) matorrales (77.84% de la superficie del estado de Coahuila), como son la hojaseñ *Flourensia cernua*, nopal *Opuntia spp*, sotol *Dasyllirion sp*, ocotillo *Fouquieria splendens*, Guajillo *Acacia berlandieri*, y ii) chaparrales (5.52% de la superficie estatal), como son sotol *Dasyllirion sp*, encino *Quercus spp*, lechuguilla *Agave lechuguilla*.

### Establecimiento y manejo del experimento.

El lugar en donde se hicieron la toma de datos para el análisis de la distribución de energía consistió de un ecosistema semiárido conformado por



vegetación espinosa y pasto, con un régimen de precipitación intermedio y con un clima según Köpen modificado por García es *BSh*: clima semiárido seco.

### **Instrumentación y mediciones.**

La ecuación que describe el balance de energía sobre una superficie vegetal, sin considerar los términos menores es:

$$R_n + H + LE + G = 0 \quad (9)$$

Donde  $R_n$  es la radiación neta,  $H$  es el flujo de calor sensible,  $LE$  flujo de calor latente y  $G$  flujo de calor en la superficie del suelo, todos en  $Wm^{-2}$ , esta ecuación indica que la suma de todos los términos considerando sentido y magnitud debe ser igual a cero de acuerdo al principio de la conservación de la energía.

$H$  y  $LE$  se midieron utilizando el enfoque de la covarianza eddy (Verma, 1990; Zermeño-Gonzalez, 2001; Jabulani y Zermeño-González, 2003) de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$H = \rho C_p \overline{w'T'_a} \quad (10)$$

$$LE = L \overline{w'\rho'_v} \quad (11)$$

Donde,  $\overline{w'T'_a}$  es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y temperatura del aire,  $\overline{w'\rho'_v}$  es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la densidad de vapor de agua,  $\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  es la capacidad calorífica del aire ( $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $L$  es el calor de vaporización del agua ( $\text{J kg}^{-1}$ ). Las barras horizontales indican un promedio de 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  $12 \mu\text{m}$  de diámetro para medir la temperatura del aire ( $T_a$ ), la densidad del vapor de agua ( $\rho_v$ ) se midió utilizando un Higrómetro de Kriptón de respuesta rápida (figura 3.2). Todos los sensores se colocaron a una altura de un metro sobre el dosel de la vegetación. 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 de la vegetación.

El flujo del calor en el suelo ( $G$ ), se midió a una profundidad de 8 centímetros por debajo la superficie del 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 centímetros 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 3.2. Elemento de una estación Eddy para medir flujos de calor sensible ( $H$ ) y calor latente ( $LE$ ), en el cual se muestra el 3-d anemómetro sónico, el termopar de alambre fino y el higrómetro de Kriptón de respuesta rápida.

También se midió la radiación solar total incidente ( $R_{sw}$ ) con un silicón de silicón (modelo LI200x, LI-COR, Inc), la velocidad y dirección del viento con una veleta de viento y un anemómetro de 3 tazas (modelo 03101-5 R.M. Young), la humedad relativa (Vaisala, modelo HM45C) y la temperatura de la superficie del sistema suelo vegetación con un termómetro infrarrojo. Estas mediciones también se realizaron a una frecuencia de dos segundos y promedios de 20 minutos, el registro de datos también se realizó con el datalogger modelo CR7X.

La estación de mediciones de la correlación de Eddy y el balance de energía fue establecida dentro de la vegetación semidesértica. 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

### Procesamientos de datos.

Para los episodios en los que el Higrómetro Kriptón no funciono adecuadamente, LE se calculo con el residuo de la ecuación de balance de energía,

$$LE = R_n - (H+G) \quad (12)$$

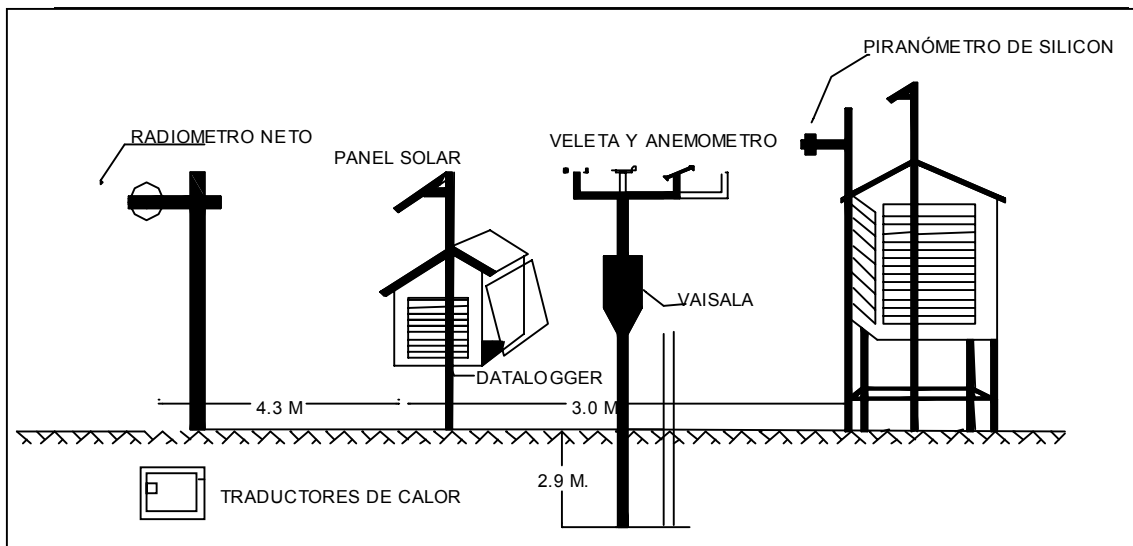


Figura 3.3 Representación esquemática de la distribución de los instrumentos y sensores de medición.

El día se fraccionó en tres segmentos de tiempo, 8:00-12:00, 12:00-16:00 y 16:00-20:00 hr, y la noche en un solo segmento 21:00-6:00 hr, para calcular los flujos de  $R_n$ ,  $H$ ,  $LR$  y  $G$  integrados ( $MJm^{-2}$ ) a partir de los flujos instantáneos ( $Wm^{-2}$ ) obtenidos con promedios de 20 min, de acuerdo con la siguiente relación.

$$\text{Flujo } (MJm^{-2}) = \frac{1}{2} * 20 \text{ min} * 60 \text{ s/min} * 10^{-6} \text{ MJ/J} \times \int_{t_1}^{t_2} \text{flujo } (Wm^{-2}) dt \quad (13)$$

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

Las mediciones de los componentes del balance de energía sobre una zona semidesértica en el noreste de México se realizaron el día del año 145 (25 de mayo, 2002), al día del año 161 (10 de junio, 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 permite operar en días con lluvia.

### **Componentes del Balance de Energía.**

El comportamiento de los componentes del balance de energía en el transcurso de los 16 días en estudio se discuten únicamente para los días del año 146, 148, 149, 150, 153, 154 y 158, ya que resultados similares se observaron en el resto de los días analizados. El análisis de la distribución de los componentes de los flujos de energía se realizó para días soleados, parcialmente nublados y nublados. El análisis también se realizó en condiciones nocturnas.

### **Componentes del balance de energía durante el día.**

La evaluación de la distribución de los flujos de energía durante el día se realizó de las 8:00 a las 20:00 hr, y el día se fraccionó en tres intervalos de tiempo: 8:00 – 12:00 hr, 12:00 – 16:00 hr y de 16:00 – 20:00 hr.

### **Días soleados.**

El análisis de los componentes del balance de energía para los días soleados correspondió a los días del año (DDA) 150, 153 y 154. Las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 muestran los componentes del balance de energía para los días mencionados.

En el DDA 150, la mayor parte de  $R_n$  se disipa en LE en el primer tercio del día, aproximadamente en igual proporción en LE y H en el segundo tercio del día. Todos los componentes del balance de energía muestran una tendencia creciente durante el primer tercio del día, alcanzando los valores máximos en el segundo tercio y una tendencia decreciente en el tercer tercio.  $R_n$  es el término dominante durante las horas de máxima incidencia de radiación solar ( $R_{sw}$ ).  $G$  es negativo hasta aproximadamente las 8 de la mañana y después de las 19 hr indicando que el flujo de calor es del interior hacia la superficie del suelo.

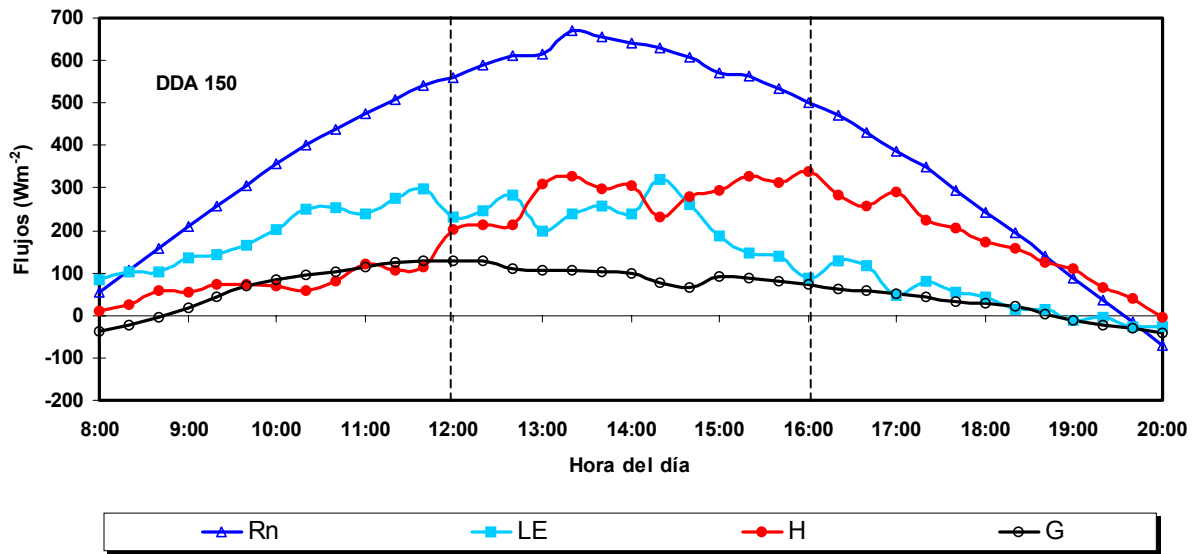


Figura 4.1. Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 150 ( $\text{Wm}^{-2}$ )

En el DDA 153 se observa que la tendencia de los componentes del balance de energía es muy similar a la observada en el DDA 150. Nuevamente se observa que en primer tercio del día la disipación de Rn es ligeramente mayor en LE que en H y G. en el segundo tercio, Rn se disipa en aproximadamente la misma proporción en H y LE y en el tercer tercio la mayor disipación de Rn es en H. También se observa que en las primeras horas del día y las últimas de la tarde, G es negativo, y que Rn es el término dominante durante el segundo tercio del día, que corresponde a las horas de máxima incidencia de Rsw.



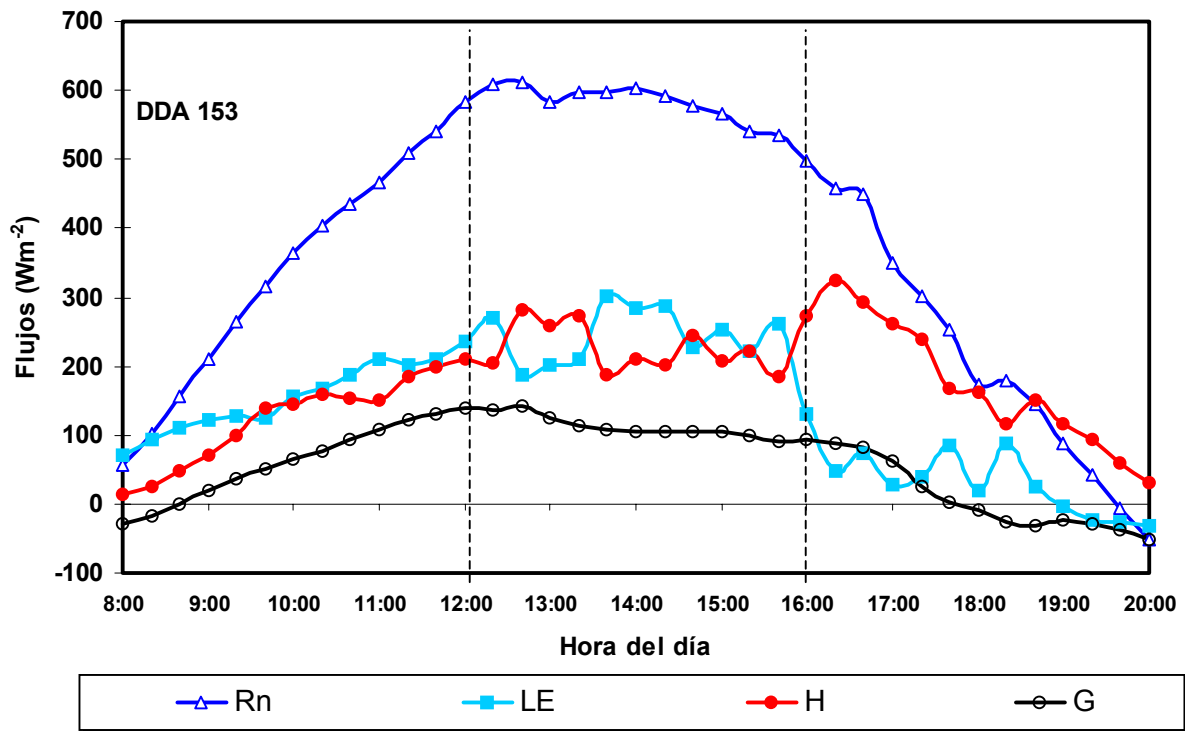


Figura 4.2. Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 153 (Wm<sup>-2</sup>).

En el DDA 154 se observa en términos generales la misma tendencia de distribución de los componentes del balance de energía que en los DDA anteriormente mencionados. En este día, Rn se disipa mayormente en LE hasta únicamente la mitad del primer tercio del día, después, Rn se disipa mayormente

en aproximadamente la misma proporción en H y Le hasta aproximadamente las 15:00 hr. Después de las 17:00 hr H es componente de mayor disipación de Rn.

LE es la principal forma de disipación de la Rn durante las primeras horas de la mañana, debido a que durante la noche existe un flujo y acumulación de agua hacia el perfil superior del suelo que queda disponible para la evapotranspiración, en este tiempo, la temperatura de la superficie es baja y el flujo de calor sensible (H) es pequeño. A medida que la superficie se calienta, H aumenta y se transforma en término de mayor disipación de la Rn. En el tercer tercio del día, LE es muy pequeño comparado con H debido a que las pequeñas reservas de agua ya se consumieron y la superficie aun se mantiene caliente y H es la mayor disipación de Rn.

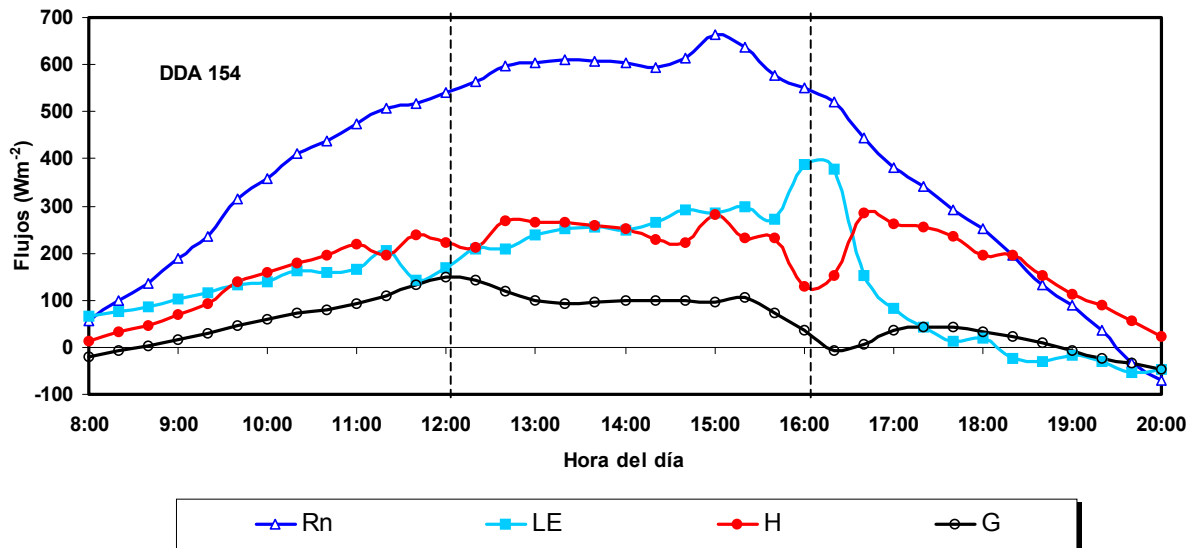


Figura 4.3. Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 154 (Wm<sup>-2</sup>).

## Días parcialmente nublados.

El análisis de los componentes del balance de energía para los días parcialmente nublados correspondió a los DDA 148 y 149. Las figuras 4.4 y 4.5 muestran los componentes del balance de energía para los días mencionados.

En el DDA 148 se observan condiciones de cielo despejado de las 8 a las 13:30 hr durante las cuales la mayor disipación de la  $R_n$  es en LE y en aproximadamente la misma proporción H y G de las 13:30 a las 17:00 hr se tuvo la presencia de nubes que se manifestó por las oscilaciones en  $R_n$ , aquí también la máxima disipación de  $R_n$  es en LE. De las 17:00 a las 20:00 hr se tuvieron condiciones de cielo despejado y  $R_n$  se disipó en aproximadamente la misma proporción en LE y H.

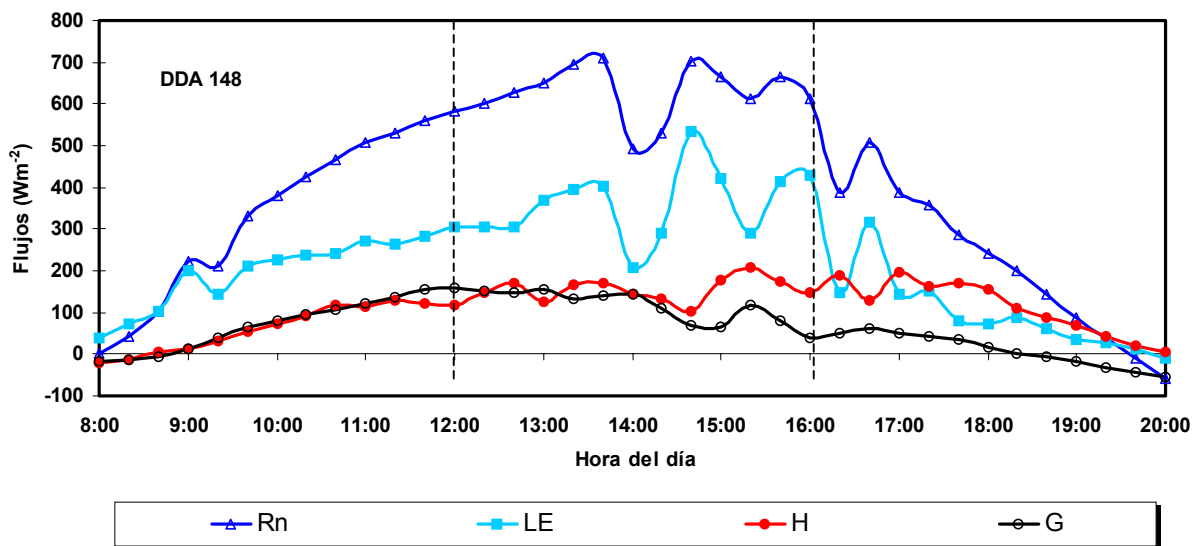


Figura 4.4. Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 148 ( $\text{Wm}^{-2}$ ).

En el DDA 149 se observa que durante el primer tercio del día existen condiciones de cielo despejado en las cuales la mayor disipación de  $R_n$  es en LE y en aproximadamente la misma proporción entre H y G. A partir de las 14:00 hr inicia la presencia de nubes que se mantiene en forma intermitente durante el resto del día, lo cual afecta principalmente a  $R_n$  y LE. H es mayor que LE y G en el tercer tercio del día.

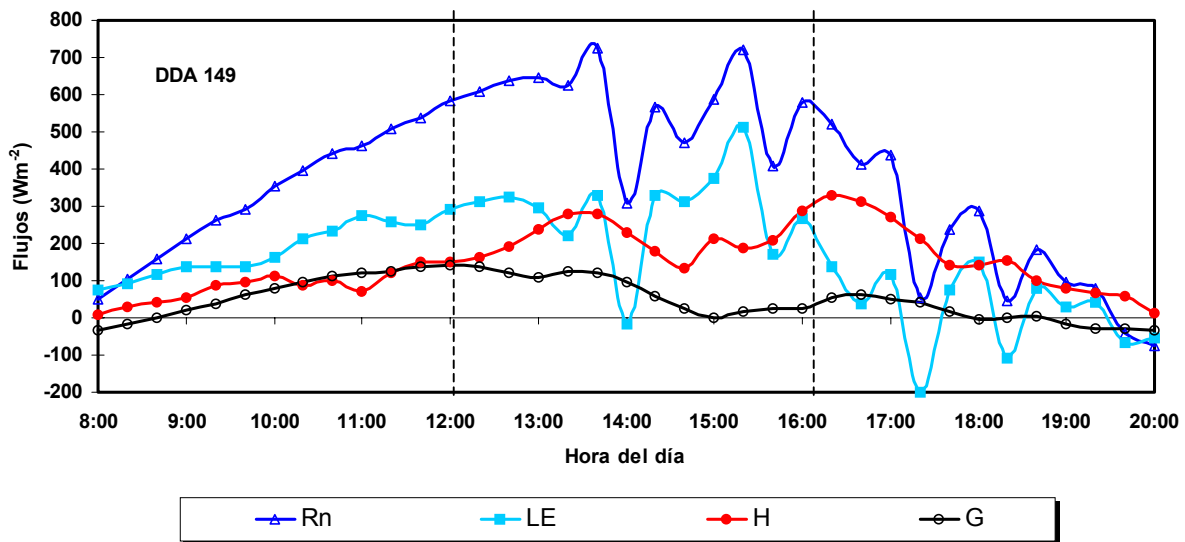


Figura 4.5. Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 149 ( $\text{Wm}^{-2}$ ).

**Días nublados**

Los DDA 146 y 158 fueron nublados. Las Figuras 4.6 y 4.7 muestran el comportamiento de los componentes del balance de energía para los días mencionados.

En el DDA 146 la mayor parte de  $R_n$  se disipa mayormente en LE, seguido de H y G hasta aproximadamente las 14:00 hr, tiempo en el cual inicia la presencia de nubosidad que afecta principalmente la  $R_n$  y LE. En el tercer tercio del día G y H son negativos mientras que LE y H oscilan bruscamente debido a la presencia intermitente de nubosidad.

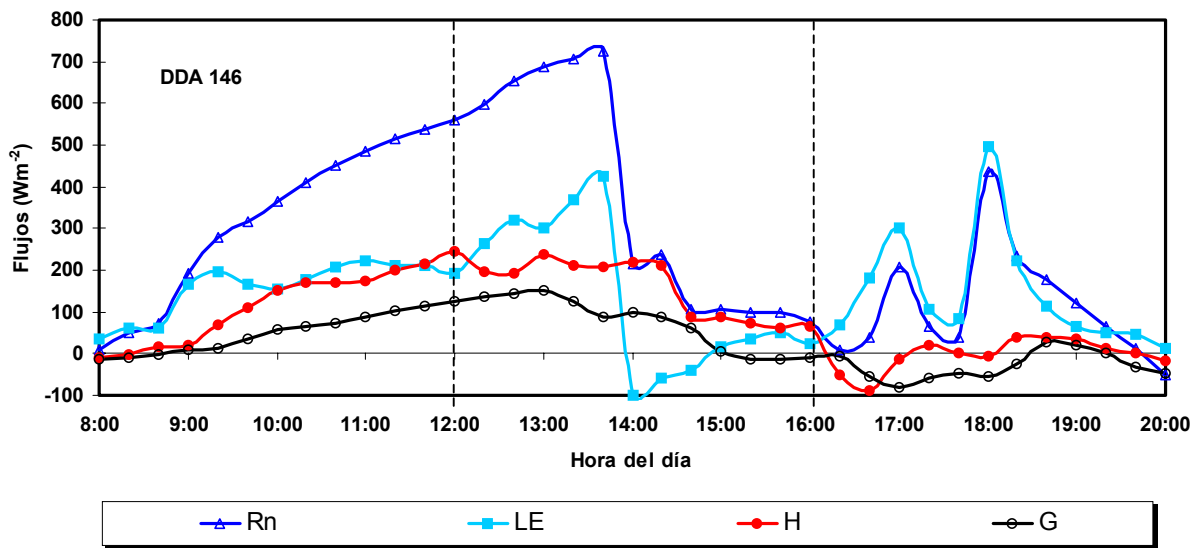


Figura 4.6. Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 146 ( $Wm^{-2}$ )

En el DDA 158 la presencia de nubes inicio también a aproximadamente las 13:30 hr. De las 8 a las 13:30 hr. Rn se disipa en aproximadamente la misma proporción entre LE y H, de las 13:30 a las 15:00 hr se observa una nubosidad intermitente que afecta principalmente el valor de Rn y LE. De las 15:00 a las 20:00 hr la nubosidad es continua, G es cero o negativo indicando que la dirección del flujo de calor es del interior hacia la superficie del suelo, H es muy pequeño y Rn es aproximadamente igual a LE.

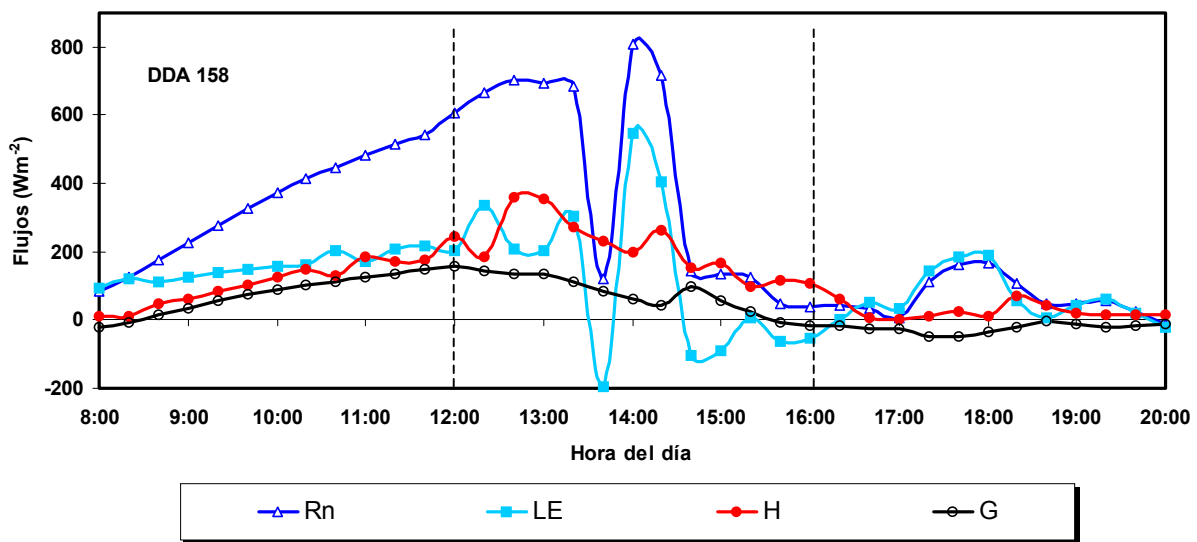


Figura 4.7. Distribución de los componentes del balance de energía observados el DDA 158 ( $Wm^{-2}$ ).

#### Componentes del balance de energía durante la noche.

Las Figura 4.8, 4.9 y 4.10 corresponden a la distribución de los componentes del balance de energía durante la noche (21:00 a 6:00) de los DDA 149-150, 150-151 y 151-152 respectivamente.

Se observan que los patrones de flujos de masa y energía son muy similares en las tres noches evaluadas. De acuerdo con la convención de signos adoptado,  $R_n$  es positiva cuando se dirige hacia la superficie y,  $LE$ ,  $H$  y  $G$  son positivos cuando fluyen desde la superficie. Para las tres noches analizadas,  $R_n$  es el término dominante y más negativo indicando que la superficie pierde energía durante la noche, el segundo término de mayor magnitud negativa es  $G$  indicando que se presenta un flujo de energía (calor) desde el interior hacia la superficie del suelo.  $H$  También es negativo aunque de menor magnitud que  $R_n$  y  $G$ , mostrando que durante la noche la superficie está más fría que el aire circundante y el flujo de calor sensible es desde el aire hacia la superficie.  $LE$  es el término más pequeño de los componentes del balance de energía nocturno, para las tres noches observadas,  $LE$  es aproximadamente cero o ligeramente mayor o menor que cero, correspondiendo a una tasa negligible de evapotranspiración.

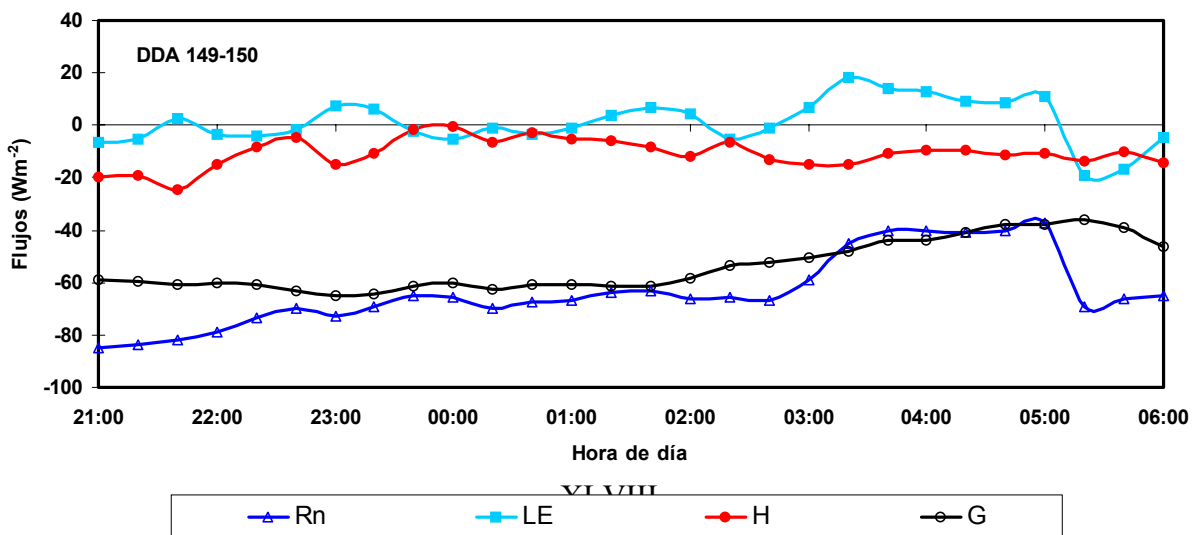


Figura 4.8. Distribución de los componentes del balance de energía observados los DDA 149 a 150 ( $Wm^{-2}$ ).

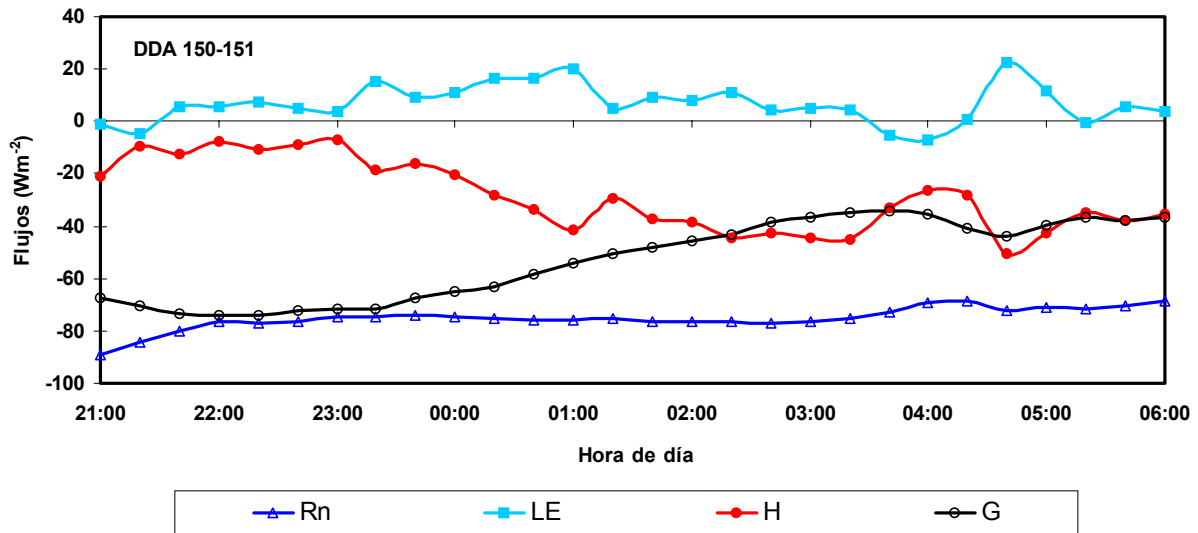


Figura 4.9. Distribución de los componentes del balance de energía observados los DDA 150 al 151 ( $Wm^{-2}$ ).

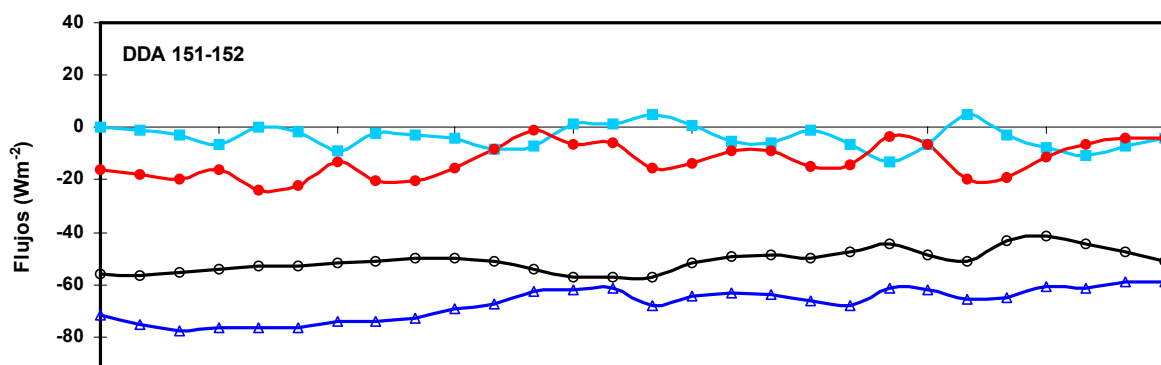




Figura 4.10. Distribución de los componentes del balance de energía observados los DDA 151 a 152 ( $Wm^{-2}$ ).

### **Flujos integrados durante el día en diferentes rangos de tiempo.**

Con el propósito de evaluar la distribución de los flujos de energía a través del día, se integraron los flujos instantáneos ( $Wm^{-2}$ ) en segmentos de 4 hr; 8:00-12:00, 12:00-16:00 y 16:00-20:00 hr para obtener los flujos integrados totales en  $MJm^{-2}$ . Los valores correspondientes para condiciones de cielo despejado (DDA 150, 153 y 154) se muestran en el Cuadro 4.1. Dado que durante el día  $R_n$  es la fuente de energía en la superficie, este es el término dominante durante los tres tercios del día. Se observa que durante el primer tercio del día,  $R_n$  se disipa principalmente en LE, en aproximadamente la misma proporción en LE y H en el segundo tercio del día y principalmente en H en el tercer tercio del día. Esto se debe a que durante la noche el agua de estratos de suelo profundo fluye hacia los estratos superiores y queda disponible para la evapotranspiración del día siguiente, la cual se consume durante los dos primeros tercios del día. En el tercer tercio, la superficie está más seca y caliente lo que resulta en un mayor flujo de

calor sensible. La proporción en la cual  $R_n$  se disipa en  $G$  en los dos primeros tercios del día es aproximadamente igual y decrece marcadamente en el tercer tercio del día.

CUADRO 4.1 Valores integrados de flujo ( $\text{MJm}^{-2}$ ) para diferentes segmentos de tiempo para condiciones de cielo despejado, observados los DDA 150, 153 y 154.

DDA	Hora	Rn	LE	H	G	LE/Rn (%)	H/Rn (%)	G/Rn (%)
150	08:00-12:00	4.88	2.79	1.12	0.96	57.30	23.04	19.66
	12:00-16:00	8.66	3.21	4.06	1.39	37.03	46.92	16.06
	16:00-20:00	3.40	0.59	2.52	0.30	17.27	73.94	8.79
153	08:00-12:00	4.91	2.24	1.78	0.89	45.57	36.28	18.15
	12:00-16:00	8.34	3.46	3.26	1.62	41.52	39.04	19.44
	16:00-20:00	3.31	0.60	2.56	0.15	18.07	77.39	4.54
154	08:00-12:00	4.77	1.92	2.02	0.83	40.25	42.31	17.45
	12:00-16:00	8.66	3.72	3.48	1.45	43.01	40.20	16.79
	16:00-20:00	3.47	0.85	2.48	0.14	24.45	71.59	3.97

Condiciones de cielo parcialmente nublado ocurrieron en los DDA, 148 y 149 (Cuadro 4.2). Para estas condiciones, se observó que  $R_n$  se disipa principalmente en  $LE$  en los tres tercios del día.  $R_n$  se distribuye más uniformemente en  $H$  en los tres tercios del día que para condiciones de cielo despejado y ya no es el mecanismo principal de disipación de  $R_n$  en el tercer tercio del día.  $G$  es ligeramente mayor que cero o negativo en el tercer tercio del día indicando un flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo.

CUADRO 4.2 Valores integrados de flujo ( $\text{MJm}^{-2}$ ) para diferentes segmentos de tiempo para condiciones de cielo parcialmente nublado, observados los DDA 148 y 149.

DDA	Hora	Rn	LE	H	G	LE/Rn (%)	H/Rn (%)	G/Rn (%)
148	08:00-12:00	4.89	2.92	0.93	1.04	59.67	19.11	21.21
	12:00-16:00	9.06	5.16	2.21	1.69	56.98	24.37	18.65
	16:00-20:00	3.48	1.62	1.69	0.18	46.45	48.45	5.10
149	8:00-12:00	4.86	2.64	1.24	0.98	54.33	25.42	20.24
	12:00-16:00	8.26	4.14	3.02	1.10	50.13	36.55	13.32
	16:00-20:00	3.07	0.47	2.42	0.18	15.22	78.90	5.88

Los DDA 146 y 158 correspondieron a condiciones de cielo nublado. El Cuadro 4.3 presenta los valores de los flujos de energía para estos días. El DDA 158 mostró una presencia intermitente de nubes durante la mitad del día (Figura 4.7), que resultó en una distribución muy errática e incierta de LE. Sin embargo, la proporción en la cual se distribuye la disipación de Rn en G en los tres tercios del día muestra un patrón similar al de los días despejados y parcialmente nublados. Se observa nuevamente que Rn se disipa principalmente en H en el tercer tercio del día.

CUADRO 4.3. Valores integrados de flujo ( $\text{MJm}^{-2}$ ) para diferentes segmentos de tiempo para condiciones de cielo nublado, observados los DDA 146 y 158.

DDA	Hora	Rn	LE	H	G	LE/Rn (%)	H/Rn (%)	G/Rn (%)
146	08:00-12:00	4.75	2.33	1.70	0.72	49.12	35.77	15.11
	12:00-16:00	5.47	2.04	2.32	1.10	37.25	42.54	20.21
	16:00-20:00	1.70	2.10	0.01	-0.41	123.55	0.42	-23.96
158	8:00-12:00	5.09	2.30	1.64	1.15	45.18	32.24	22.58
	12:00-16:00	6.20	1.96	3.09	1.15	31.57	49.86	18.57
	16:00-20:00	0.98	0.90	0.41	-0.34	92.37	42.20	-34.57

#### Flujos integrados durante la noche

El Cuadro 4.4 muestra los valores integrados de flujo observados en las noches de tres diferentes días del año. El flujo más negativo es Rn indicando una pérdida de energía de la superficie. G muestra valores negativos muy uniformes en las tres noches evaluadas, esto representa un flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo. LE muestra valores muy pequeños sugiriendo que la evapotranspiración nocturna es insignificante. H es negativo en las tres noches analizadas lo que representa un flujo de calor sensible del aire circundante hacia la superficie. También se observa que la relación G/Rn es positiva y de mayor magnitud que las relaciones LE/Rn y H/Rn, esto indica que la energía en la superficie durante la noche son proporcionadas por el flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo.

CUADRO 4.4 .Valores integrados de flujo ( $\text{MJm}^{-2}$ ) para condiciones nocturnas, observados durante las noches de los DDA 149-150, 150-151.y 151-152

DDA	Hora	Rn	LE	H	G	LE/Rn (%)	H/Rn (%)	G/Rn (%)
149-150	21:00-6:00	-2.12	0.04	-0.35	-1.81	-1.68	16.58	85.09
150-151	21:00-6:00	-2.51	0.22	-0.97	-1.77	-8.91	38.72	70.19
151 152	21:00-6:00	-2.25	-0.12	-0.42	-1.71	5.34	18.76	75.89

### CONCLUSIONES.

Para condiciones de cielo despejado, Rn se disipa principalmente en LE en el primer tercio del día (8 – 12 hr), en aproximadamente la misma proporción en LE y H en el segundo tercio del día (12 – 16 hr) y mayormente en H en el tercer tercio del día (16 – 20 hr). Esto se debe a que durante la noche, el agua de estratos de suelo más profundos fluye hacia los estratos superiores y queda disponible para la evapotranspiración del día siguiente, la cual se consume durante los dos primeros tercios del día. En el tercer tercio, la superficie está más

seca resultando en un flujo mayor de calor sensible. La proporción en la cual  $R_n$  se disipa en  $G$  los primeros dos tercios del día es aproximadamente igual y decrece marcadamente en el tercer tercio del día.

Para condiciones de cielo parcialmente nublado se observó que  $R_n$  se disipa principalmente en  $LE$  en los tres tercios del día.  $R_n$  se distribuye más uniformemente en  $H$  en los tres tercios del día que para condiciones de cielo despejado y ya no es el mecanismo principal de disipación de  $R_n$  en el tercer tercio del día.  $G$  es ligeramente mayor que cero o negativo en el tercer tercio del día indicando un flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo

En condiciones de cielo nublado,  $LE$  es también el principal mecanismo de disipación de  $R_n$  en los tres tercios del día.  $G$  es negativo en el tercer tercio del día, indicando nuevamente que el flujo de calor es desde el interior hacia la superficie del suelo.

Durante la noche, el flujo más negativo es  $R_n$  indicando una pérdida de energía de la superficie.  $G$  también muestra valores muy negativos representando un flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo.  $LE$  muestra valores muy pequeños sugiriendo que la evapotranspiración nocturna es insignificante.  $H$  es negativo indicando un flujo de calor sensible del aire circundante hacia la superficie. También se observa que la relación  $G/R_n$  es positiva y de mayor magnitud que las relaciones  $LE/R_n$  y  $H/R_n$ , esto indica que las  $s$  de energía en la

superficie durante la noche son proporcionadas mayormente por el flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo.

## **RESUMEN**

El objetivo de esta investigación fue analizar la distribución diurna y nocturna de los componentes del balance de energía sobre un ecosistema compuesto de matorral desértico, en el Noreste de México. El trabajo se desarrolló del 25 de mayo al 10 de junio de 2002 en el rancho El Padrino, Ejido la Providencia, Saltillo, Coahuila, ubicado al sureste del estado de Coahuila, sobre la carretera federal No 54, con intersección a la carretera General Cepeda, Km. 6. Geográficamente esta localidad se localiza en las coordenadas: 25° 14' 07" latitud

norte, 101° 10' 25" longitud oeste, con una altitud de 1749 metros sobre el nivel del mar.

La ecuación que describe el balance de energía sobre una superficie vegetal sin considera los términos menores se representa como:

$$R_n + LE + H + G = 0$$

Donde:  $R_n$  es radiación neta,  $LE$  es flujo de calor latente,  $H$  es flujo de calor sensible, y  $G$  es flujo de calor en la superficie del suelo, todos en  $Wm^{-2}$ . Esta ecuación establece que la suma de los flujos de energía sobre una superficie considerando magnitud y dirección debe ser igual a cero. Los componentes del balance de energía se midieron independientemente.

$LE$  y  $H$  se midieron utilizando el enfoque de la covarianza eddy, utilizando un 3-D anemómetro sónico, un Higrómetro de Kriptón de respuesta rápida y un termopar de chromel-constantan.  $R_n$  se midió con un radiómetro neto (modelo Q-7.1 Radiation and Energy Balance Systems Inc.),  $G$  se midió con dos transductores de calor enterrados a 80 mm, corrigiendo los valores de flujo por los cambios de temperatura del estrato superior del suelo.

El análisis de la distribución de los flujos de energía se realizó para condiciones de días soleados, parcialmente nublados y nublados, incluyendo el análisis en condiciones nocturnas. La evaluación de la distribución de los flujos de energía durante el día se realizó de las 8:0 a las 20: 00 hr, y el día se fraccionó en



tres intervalos de tiempo: 8:00 – 12:00 hr, 12:00 – 16:00 hr y de 16:00 – 20:00 hr. Y durante la noche de las 21:00 hr a las 6:00 hr del día siguiente.

Los flujos integrados ( $MJm^{-2}$ ) se obtuvieron integrando los flujos instantáneos ( $Wm^{-2}$ ) promedios de 20 minutos para los diferentes segmentos de tiempo diurnos y nocturnos.

Los resultados de esta investigación muestran que para condiciones de cielo despejado,  $R_n$  se disipa principalmente en LE en el primer tercio del día (8 – 12 hr), en aproximadamente la misma proporción en LE y H en el segundo tercio del día (12 – 16 hr) y mayormente en H en el tercer tercio del día (16 – 20 hr). Esto se debe a que durante la noche, el agua de estratos de suelo más profundos fluye hacia los estratos superiores y queda disponible para la evapotranspiración del día siguiente, la cual se consume durante los dos primeros tercios del día. En el tercer tercio, la superficie está más seca resultando en un flujo mayor de calor sensible. La proporción en la cual  $R_n$  se disipa en G los primeros dos tercios del día es aproximadamente igual y decrece marcadamente en el tercer tercio del día.

Para condiciones de cielo parcialmente nublado se observó que  $R_n$  se disipa principalmente en LE en los tres tercios del día.  $R_n$  se distribuye más uniformemente en H en los tres tercios del día que para condiciones de cielo despejado y ya no es el mecanismo principal de disipación de  $R_n$  en el tercer tercio del día. G es ligeramente mayor que cero o negativo en el tercer tercio del día indicando un flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo

En condiciones de cielo nublado, LE es también el principal mecanismo de disipación de  $R_n$  en los tres tercios del día. G es negativo en el tercer tercio del día, indicando nuevamente que el flujo de calor es desde el interior hacia la superficie del suelo.

Durante la noche, el flujo más negativo es  $R_n$  indicando una pérdida de energía de la superficie, G muestra valores muy negativos representando un flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo, LE muestra valores muy pequeños sugiriendo que la Evapotranspiración nocturna es insignificante y H es negativo indicando un flujo de calor sensible del aire circundante hacia la superficie. También se observa que la relación  $G/R_n$  es positiva y de mayor magnitud que las relaciones  $LE/R_n$  y  $H/R_n$ , esto indica que las pérdidas de energía en la superficie durante la noche son proporcionadas mayormente por el flujo de calor desde el interior hacia la superficie del suelo.

### LITERATURA CITADA

Ashktorab, H., W. O Pruett y K. P. Paw U. 1994. Partitioning of Evapotranspiration using Lysimeter and Micro-Bowen-Ratio System. *J. Irrig. And Drainage Eng.* 120(2):450-464.

Baldocchi. D.D., B.B. Hicks y T.P. Meyers. 1988. Measuring biosphere-atmosphere Exchanges of Biologically Related Gases with Micrometeorology 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. Artículo presentado en: National Water Conference on Status and Future Directions of Water research in Sri Lanka, Colombo, November 4 – 6, 1998. (pl-9).

Briones Oscar. 1994. Origen de los desiertos mexicanos. Ciencia. 45, 263-279

Comisión Nacional del Agua (CNA).2003. "Programa Hidráulico Regional 2002-2006". Región XII península de Yucatán. P(127 – 128)

Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA). 1970. Decreto de creación de la Comisión de las Zonas Áridas. Diario Oficial de la Federación 5 de Dic. 1970. México. p(33-34).

\_\_\_\_\_ 1994. Plan de Acción para combatir la desertificación en México (SEDESOL), Saltillo Coahuila, México.

COTECOCA, 1973. Coeficientes de Agostadero de la República Mexicana. SARH.

Daubenmire R. F. 1990. Ecología Vegetal. Limusa. México. p(193-254)

Elizondo René Martínez y Contreras Mauricio Aguilera. 1996. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo. México. P(29, 165-250).

Ibáñez M. Y Caselles V.1999. Evapotranspiración estimada a partir de la temperatura radiativa: 1 Método aerodinámico y de la razón de Bowen radiativa. Revista de teledetección. 11: 1 – 5

INEGI. 2002. Carta de regiones fásusticas y ecosistemas principales de la república mexicana.

INEGI. 2002. Carta de Uso del Suelo y Vegetación de Coahuila de Zaragoza 1:250,000 y 1:1,000,000

- Itier, B. E. Y. Brunet. 1996. Recent Developments and Present Trends in Evapotranspiration and Irrigation scheduling, Proc. Of the International Conference, 1996, San Antonio Texas, USA. (p1-20).
- Jones, H.G. 1992. Plants and Microclimate (A Quantitative Approach to Environmental Physiology). Secon Edition, Cambridge university Press. United Kingdom.
- Kizer, M.A. y R.L. Elliott. 1991. Eddy Correlation Systems for Measuring Evapotranspiration. Transactions of ASAE 34(2): 387-392.
- Ludwid J. A. & Whitford W. G. 1981. Short-term. Water and energy flow in arid ecosystems. Ed. By D. W. Goodall and R. A. Perry. Cambridge university Press. USA. p(272-300)
- Maldonado J. Lorenzo. 1983. Simposio "Caracterización, uso actual y potencial de los recursos agrícolas de las zonas áridas y semiáridas de México". Editorial del Colegio de Postgraduados de Chapingo. Edo. De México. México. p(91-97).
- Mosiño Alemán Pedro A. 1983. Simposio "Caracterización, uso actual y potencial de los recursos agrícolas de las zonas áridas y semiáridas de México". Editorial del Colegio de Postgraduados de Chapingo. Edo. De México. México. p(35-66).
- Ortiz S. M. Y Ortiz J. 1984. Suelos dominantes en la República Mexicana. Universidad autónoma de Chapingo. México. p(46-48).
- Prueger, J.H.; T.j. Sauer y J.L. Hatfiel. 1998. Turbulence Flux Estimates of Sensible and Latent Heat Near Shelterbelts During Low wind Condition. Transactions of ASAE 4(6): 1643-1650.
- Rdzedowski J., F. 1978. Vegetación de México. Limusa. México. p(432).
- Rosenberg, N.J., B.L. Blad, S.B. Verma. 1983. Microclimate : The Biological Enviroment, 2<sup>nd</sup> edition. John Wisley & Sons. U.S.A. p(209 – 287).

Saldivar, F.A. 1991. Ecosistemas del zacate buffel en Tamaulipas. Aprovechamiento integral del zacate buffel. Simposium Internacional. SOMMAP.

Secretaria de desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). 1986. Estados del Medio Ambiente en México. México. p(79).

Shreve F. E. 1951. Vegetation of the Sonora Desert. Carn Institut wash publ. 1-1992 p. Washington D. C.

Suárez de Castro Fernando. 1979. "Expansión de la frontera agrícola en las regiones áridas y semiáridas de America Latina" Simposio internazionale sulla Integrazione della ricerca perla valorizzazione delle risorse biologiche delle Zone aride e semiaride dell'America Letina. Istituto Italo-latino. Americano Roma. 1-5 Ottbre 1979. p(65).

Sutton David B. 1995. Fundamentos de Ecología. Limusa, Noriega editores. México. p(47-104).

Swinbank, w.C. 1951. The Measurement of Vertical Transfer of Heat and Water vapor by Eddies in the Lower Atmosphere. J. Meteorol. 8: 135-145.

Torres Ruiz Edmundo. 1995. Agrometereología. Trillas. UAAAN. México. p(35-66)

UNAM/Instituto de Geografía. 1990. atlas Nacional de México. Vol. I, II, III. UNAM. México.

Verma S.B. 1990. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. *Remote Sensing Reviews* Vol. 5(10 99-115)

Villa, S. A. 1981. Los desiertos de México. in: General Technical Report WO-28 Arid Land Resourse Inventories: Developing Cost-Efficient Methods. An International Workshop November 30-December 6, 1980. La Paz, México. 18-20.

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.

Zermeño Gonzáles, 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 Palacio, Durango, México. (p 53-57).

Jabulani J. y Zermeño-G. 2003. Ajuste de la evapotranspiración a equilibrio para las condiciones áridas del norte de México en el maíz.

## PAGINAS WEB CONSULTADAS.

- <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2001/ene-feb/ene-feb-01.html>
- <http://www.ugm.org.mx/pdf/geos01-3/MICRO01-3.pdf>
- [http://www.uacj.mx/ICB/Carreras/Biologia/el\\_desierto.htm](http://www.uacj.mx/ICB/Carreras/Biologia/el_desierto.htm)
- <http://www.inegi.gob.mx/geo/default.asp>