

# EMPLEO DE LISIMETRIA PARA DETERMINAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL BALANCE ENERGÉTICO DE UN INVERNÁCULO CON ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO SOLAR

Mirta A. Quiroga, Luis R. Saravia\*, Ricardo Echazú

INENCO<sup>+</sup>, Universidad Nacional de Salta  
Calle Buenos Aires 177  
4400, Salta, Argentina  
Tel. 54-87-255423, Fax 54-87-255489

## RESUMEN

La evapotranspiración es un proceso de importancia en el balance térmico de los invernáculos, el que resulta de especial interés cuando se estudia el acondicionamiento térmico de los mismos por vía solar. En este trabajo se plantea la utilización de un lisímetro gravimétrico como método experimental para determinar la evapotranspiración de un invernáculo con calentamiento solar, posibilitando la evaluación completa del balance energético del sistema. Las medidas muestran que el consumo energético debido a la evapotranspiración es muy alto, más del 50 % del total de energía recibida. Por otro lado las medidas se emplean en correlaciones entre valores instantáneos de evapotranspiración y las variables climáticas del invernadero, radiación y déficit de saturación. Además se calcula evapotranspiración mediante modelos teóricos como Penman (1948), Priestley Taylor (1972) y Método de la Radiación (1986) apreciándose el grado de aproximación con los valores obtenidos. Se analizan las contribuciones de los distintos procesos de pérdida térmica en el balance del invernáculo.

## INTRODUCCIÓN

Cuantificar el consumo energético del proceso de evapotranspiración, es un elemento importante para el balance térmico integral de los invernáculos. Agronómicamente la determinación de la evapotranspiración constituye un elemento fundamental para el manejo racional del agua y la fertilización.

Existen numerosos métodos teóricos de estimación de la evapotranspiración con fórmulas basadas en parámetros físico climáticos. Para su aplicación es conveniente evaluar su exactitud en las condiciones locales y realizar los ajustes necesarios.

En el presente trabajo, se ha empleado un lisímetro gravimétrico como medidor directo de evapotranspiración, el mismo contiene una masa total de 2200 Kg, registra variaciones de peso de 50 gr., equivalente a 0.03 mm. de agua evaporada y se encuentra ubicado en el centro de un invernadero de 300 m<sup>2</sup> (1). El medidor sigue el proceso en forma horaria y se está empleando para el control automático de la irrigación.

El diseño y los detalles constructivos del aparato, se presentaron en un trabajo anterior (1) Las evaluaciones se realizaron en un primer ciclo sobre un cultivo de pimiento.

El equipo y la metodología aplicados permitieron conocer la cantidad de energía consumida en el proceso de evapotranspiración. Las medidas mostraron que el consumo energético es muy alto, obteniéndose valores superiores al 50 % del total de la energía solar recibida. En forma simultánea con los valores de evapotranspiración se han obtenido medidas para las variables térmicas más importantes del invernáculo, con las que se realizó un balance térmico teniendo en cuenta: Pérdidas convectivas por cubierta, Pérdidas por renovación de aire, Pérdidas latentes por evapotranspiración, Pérdidas por suelo, Ganancia de radiación solar, Extracción o entrega por el colector solar.

\* Investigador del CONICET

+ Instituto del CONICET



Mediante regresiones se establecieron los factores que relacionan la radiación instantánea incidente dentro del invernadero, ( $W/m^2$ ) y el déficit de saturación (kPa), con la evapotranspiración ( $mg/m^2$ ). El cálculo se realizó sobre valores instantáneos, abarcando distintos períodos y estados de crecimiento de los cultivos. Para el caso del cultivo de pimiento se analizaron series de datos para tres períodos distintos, 27 al 30 de setiembre, 26 al 30 de octubre y 18 al 21 de noviembre de 1994;

En las tres series de datos se tuvo en cuenta el desarrollo del cultivo, tomándose datos de índice de área foliar (IAF) (1), y otros parámetros del estado de crecimiento, que permitieron evaluar la homogeneidad de las plantas dentro del aparato y fuera de él y por consiguiente la validez del aparato como medidor de evapotranspiración para todo el invernadero.

## ANTECEDENTES

El invernadero donde se realizaron las experiencias es de tipo macrotúnel, consta de  $400 m^2$ , cuenta con un sistema de calefacción basado en el aprovechamiento y acumulación de la energía solar y se encuentra dividido en dos, con una zona para cultivos de  $300 m^2$  y una cámara que se emplea para el secado de productos agrícolas de  $100 m^2$ . (2) (3)

Se encuentra ubicado a 15 km de la ciudad de Salta, cercano a la localidad de Cerrillos, a  $24^{\circ}5'$  de latitud sur y  $65^{\circ}25'$  de long. oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 1253 m. Las temperaturas mínimas extremas son de  $-8^{\circ}$  las máximas extremas de  $37^{\circ}C$  con precipitaciones de 800 mm y un período libre de heladas de 250 a 275 días.

Con fecha 12/7/94 se implantó un cultivo de pimiento híbrido doble propósito para pimentón y oleoresinas, con una densidad de 25000 pl/ha. En la plantación dentro del lisímetro se reprodujeron las condiciones del resto del invernadero, con la misma densidad de siembra, goteros y marco de plantación

Se utiliza un sistema de captación y control computarizado, ya descrito en trabajos anteriores (2) (3) el sistema capta y registra los valores arrojados por el lisímetro. En base a los valores de pérdida de humedad diarios se realizan los riegos necesarios para mantener el suelo en condiciones óptimas de capacidad de campo.

## OTROS METODOS DE VALORACION

A continuación se describen los tres métodos teóricos de evaluación de la evapotranspiración, cuyos resultados se comparan con los experimentales.

- Penman

El método de Penman (1948) (4) es una estimación de evaporación potencial basada en la ecuación:

$$E_o = (d(d+ps)) (h-G/HV) + (Ps/(d+Ps)) f(V)(ea-ed)$$

Donde:

$E_o$ : Evaporación potencial en mm

$d$ : Pendiente de la curva de saturación de presión de vapor ( $kP/^{\circ}C$ )

$Ps$ : Constante psicrométrica ( $kP/^{\circ}C$ )

$h$ : Radiación neta ( $MJ/m^2$ )

$G$ : Flujo de calor en el suelo ( $Mj/m^2$ )

$HV$ : Calor latente de evaporación

$f(V)$ : Función de velocidad de viento ( $mm/d/kPa$ )

$ea$ : Presión de vapor de saturación a la  $T$  media del aire (kPa)

$ed$ : Presión de vapor a la temperatura media del aire.

Para el cálculo se emplean los datos de latitud en grados, altura sobre el nivel del mar, día del año, albedo, radiación solar, temperatura media del día y de los tres días anteriores, velocidad de viento y humedad.

- Priestley Taylor (1972) (5)

El método provee estimación de la evaporación potencial basándose en la ecuación:

$$E_o = 30.6(h) (d/d+0.68)$$

E<sub>o</sub>: Potencial de evaporación en mm

d: Pendiente de la curva de saturación de presión de vapor (kP/°C)

h: Radiación neta (MJ/m<sup>2</sup>)

Los datos que se ingresaron para el cálculo son los siguientes: Albedo, radiación solar, temperatura media del día.

Método de la Radiación (FAO 1986) (6)

El método calcula la evapotranspiración del cultivo de referencia, que estará representado por la relación

$$E_{To} = a + b \cdot W \cdot R_s$$

Donde:

E<sub>To</sub> es el valor medio de evapotranspiración del cultivo de referencia (Tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 cm de altura, uniforme de crecimiento activo, que cubren totalmente el suelo y está bien provista de agua )

R<sub>s</sub>: es la radiación solar expresada en equivalente de evaporación (mm/día) se calculó en función de la radiación medida e integrada diariamente dentro del invernadero R<sub>a</sub> (MJ/día) y de la temperatura media diaria.

W es un índice de ponderación que depende de la temperatura y de la altitud

a y b son coeficientes.

Los valores de E<sub>To</sub> surgen de gráficos que relacionan los valores de W, R<sub>s</sub>, a, b, con la E<sub>To</sub> para diferentes condiciones de Humedad relativa media.

Coeficientes de cultivo

En los métodos anteriormente descriptos (Penman, Priestley y Taylor, Radiación), hacen una estimación de la demanda evaporativa de la atmósfera o demanda atmosférica de humedad, ara calcular la evapotranspiración del cultivo, se emplearon coeficientes que relacionan el efecto del cultivo específico en sus distintos estados fenológicos; de tal manera que:

$$ETP = E_{To} \cdot K_c$$

Donde:

E<sub>to</sub>: Demanda atmosférica de humedad, calculada por los métodos de Penman (E<sub>o</sub>), Priestley Taylor (E<sub>o</sub>) o de la Radiación (E<sub>o</sub>).

E<sub>tc</sub>: Evapotranspiración del cultivo (pimiento)

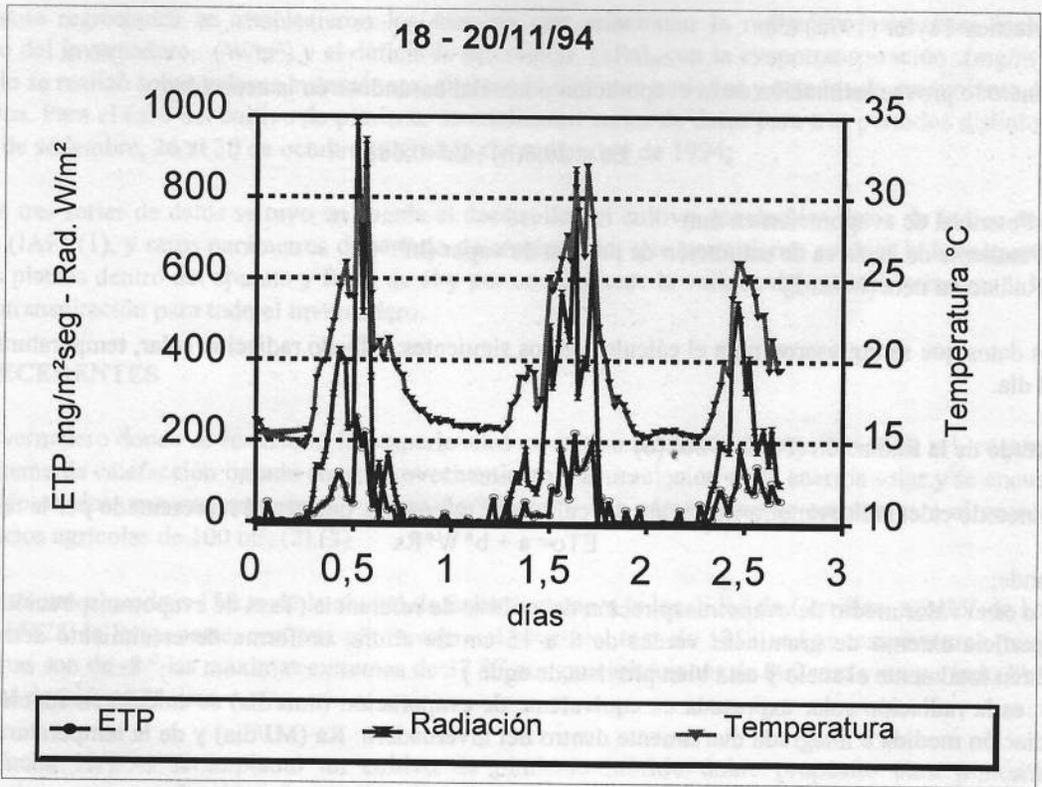
K<sub>c</sub>: Coeficiente de cultivo, recabado de bibliografía. Varía con el estado de desarrollo del cultivo.

## RESULTADOS

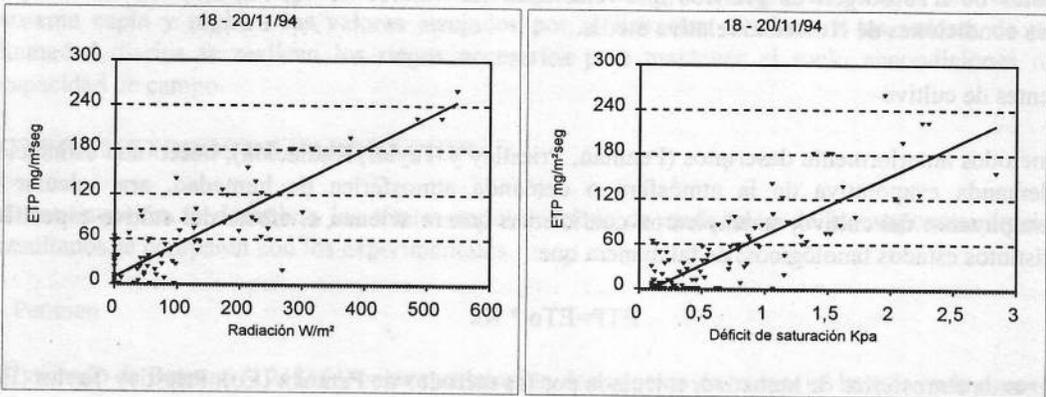
El lisímetro posee buena sensibilidad, es un equipo sólido y de fácil mantenimiento, continúa actualmente en funcionamiento y se está empleando para el control automatizado del riego en el invernadero. Por otra parte su costo de \$ 2200 es comparativamente bajo respecto a aparatos similares construidos en otros países.

## MEDIDAS

Las figuras representan la evolución de evapotranspiración, radiación y temperatura a 1.5 m de altura en el interior del invernadero, en función del tiempo para la serie de datos correspondientes a los días 18 al 21 de noviembre de 1994.



Las figuras muestran a modo de ejemplo la dispersión respecto a radiación y deficit de saturación, de los datos obtenidos para la serie representada en la figura anterior.



Los valores de evapotranspiración instantánea más altos se obtuvieron para el mes de octubre con registros de hasta  $400 \text{ mg/m}^2\text{seg}$ , siendo de  $275$  y  $280 \text{ mg/m}^2\text{seg}$ , los valores máximos en horas pico, correspondientes a las series de datos de setiembre y noviembre respectivamente.

En todos los casos los valores de  $R^2$  obtenidos para cada una de las variables independientes analizadas separadamente, son inferiores a los obtenidos en análisis de regresión para pares de variables, debido a que la evapotranspiración no presenta una relación individual y única con ninguna de las variables independientes. Los valores de error estándar se reducen también al realizar el análisis de regresión conjunto para las dos variables.

Durante los tres períodos el manejo del cultivo fue similar, en el mes de setiembre se trabajó con cortinas cerradas en forma casi permanente y el sistema de acondicionamiento térmico solar en funcionamiento.

Los registros de índice de área foliar (IAF) correspondientes son  $0.75$  para el mes de setiembre,  $2.2$  en octubre y  $3.03$  en noviembre.

En base a los valores obtenidos por regresión la evapotranspiración instantánea del cultivo de pimiento, para cada uno de los períodos considerados quedaría representada por los siguientes modelos:

Mes de setiembre

Plantas de 33.9 cm en primera floración, IAF=0.75, R<sup>2</sup>=0.79, error standard=30.9(mg)

$$ETP = 0.143651 * Rad + 31.5 - \Delta s. \text{ (mg/m}^2\text{seg)}$$

Mes de Octubre:

Plantas de 92.5 cm., con frutos verdes, IAF=2.2, R<sup>2</sup>=0.79. error standard=32.8 (mg)

$$ETP = 0.160701 * Rad + 50.34 \Delta s. \text{ (mg/m}^2\text{seg)}$$

Mes de noviembre:

Plantas de 111.66 cm. frutos maduros, IAF= 3.03, R<sup>2</sup>=0.71, error standard=26 (mg)

$$ETP = 0.15239 * Rad + 45.66 \Delta s. \text{ (mg/m}^2\text{seg)}$$

Donde:

Rad: es la Radiación incidente dentro del invernadero en w/m<sup>2</sup>

$\Delta s$  : Déficit de Saturación (kPa), calculado en base a temperatura (°C) a 1.5 m de altura dentro del invernadero y humedad relativa (%) dentro del invernadero

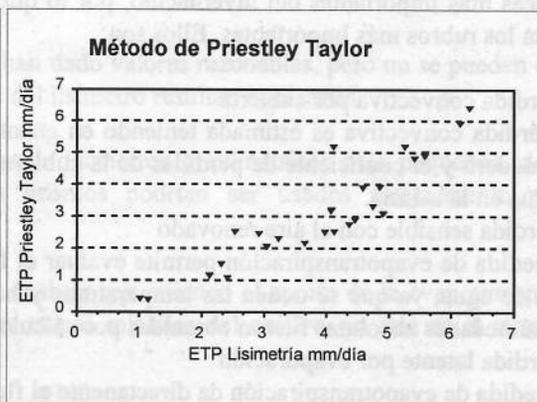
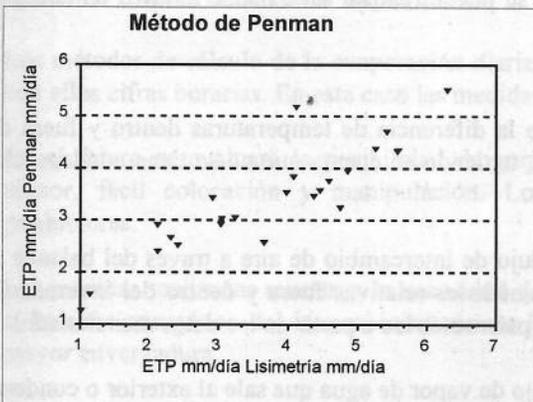
Estas correlaciones dan valores de evapotranspiración instantánea y han sido obtenidas usando datos tomados cada media hora, Aún se encuentra en discusión la posibilidad de que estas correlaciones puedan sustituir a las medidas directas para la planificación de irrigación con altas frecuencias.

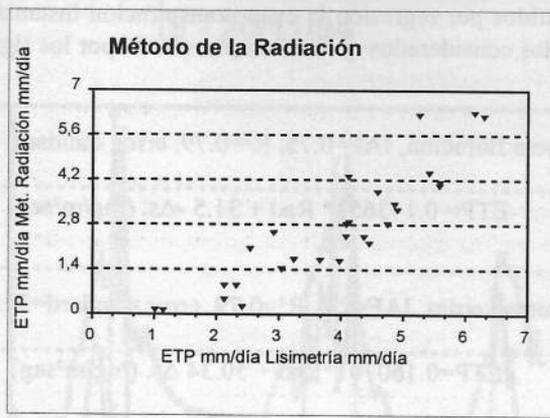
No se han realizado experiencias similares en la zona ni en el país. Resulta destacable la similitud de estos resultados con los valores obtenidos por Jolliet y Bailey (1992) (7) en trabajos con cultivos de tomate, realizados en condiciones de Temperatura, Humedad Viento y Concentración de CO<sub>2</sub> controladas.

## RESULTADOS OBTENIDOS CON OTROS METODOS

Para el análisis comparativo con otros métodos de valoración de evapotranspiración se tomaron los valores medidos por el lisímetro en mm/día y los calculados por los diferentes métodos. Al carecer de valores de velocidad de viento, el cálculo para los métodos basados en fórmulas empíricas se realizó con un valor mínimo y constante de 0.2 m/s.

Las figuras comparan los valores de evapotranspiración calculados por los tres métodos y los medidos por el lisímetro.





En análisis de regresión lineal los valores obtenidos fueron los siguientes:

Método	R <sup>2</sup>	Error Standard (mm)
Penman	0.80	0.06
Priestley Taylor	0.85	0.06
Radiación	0.78	0.13

Los valores obtenidos por los métodos teóricos son razonables, pero debe tenerse en cuenta que ellos son valores medios diarios, mientras que el lisímetro está entregando medidas cada media hora. Esta diferencia es importante en el caso de control de irrigación donde se riega varias veces por día. Por otro lado los datos frecuentes son necesarios para estudiar el balance térmico del invernadero.

## CULTIVO

Valores iniciales comparativos de crecimiento de cultivo se presentaron en un trabajo anterior (1). No se presentaron diferencias significativas en el desarrollo del cultivo dentro y fuera del aparato. Las plantas alcanzaron una altura final promedio de 1.5 m y un área foliar de 3.6, con un aprovechamiento de suelo excepcional para el tipo de cultivo. La cosecha se inició con fecha 15/12/94 y se recolectaron entre 8 y 10 pisos de floración, los frutos tuvieron una longitud media de 15 cm. con peso promedio de 29.21 g.

Desde el punto de vista agrícola el empleo de la lectura diaria de la evapotranspiración, para ordenar la tasa de riego es un adelanto importante, si se considera que en la actualidad el riego se maneja en forma intuitiva derivándose frecuentes problemas por exceso o déficit de agua

## BALANCE ENERGÉTICO

En forma simultánea con los valores de evapotranspiración se han obtenido medidas para las variables térmicas más importantes del invernáculo, por lo que se puede realizar un balance térmico teniendo en cuenta los rubros más importantes. Ellos son:

### a) Pérdida convectiva por cubierta

La pérdida convectiva es estimada teniendo en cuenta la diferencia de temperaturas dentro y fuera del invernadero y el coeficiente de pérdidas de la cubierta, teniendo en cuenta que no se tiene condensación de agua en la misma.

### b) Pérdida sensible con el aire renovado

La medida de evapotranspiración permite evaluar el flujo de intercambio de aire a través del balance de masa de agua, ya que se tienen las temperaturas y humedades relativas fuera y dentro del invernáculo. Las humedades absolutas fueron obtenidas por cálculo psicrométrico a partir de los datos mencionados.

### c) Pérdida latente por evaporación

La medida de evapotranspiración da directamente el flujo de vapor de agua que sale al exterior o condensa en la cubierta.

d) Pérdida por el suelo es obtenida por la temperatura a distintas profundidades.

e) Ganancia de radiación solar

Está determinada por la medida de radiación sobre superficie horizontal, multiplicada por el coeficiente de transmisión de la cubierta.

f) Extracción o entrega con el colector solar

Se obtiene midiendo las temperaturas de entrada y salida de los mismos. así como el flujo de agua.

La tabla siguiente muestra para dos días con diferentes niveles de radiación, la evapotranspiración medida, el consumo energético que representa y su relación porcentual con la radiación total recibida. En ambos casos el consumo del proceso supera el 50% del total de energía recibida en el interior del invernadero.

Día	1-9-94	8-11-94
Energ. solar (MJ)	1333	9565
Evapo. (mm)	1	6.3
Energ. Evap (MJ)	855	5410
Porcentaje (%)	64	56

A continuación la Tabla muestra dos ejemplos de balances, a mediodía y al caer la tarde del mismo día, considerando los rubros listados anteriormente. El cierre del balance es razonable, teniendo en cuenta que los errores en este tipo de estimación son grandes. El intercambio de aire a mediodía es bastante mayor que al caer la tarde, 4.5 Kg/s, frente a 1 Kg/s.

Día	27 set	27 set
Hora	13.00	18.00
Pérdida por cubierta (vatios)	107	26
Pérd. calor sensible aire interc. (vatios)	149	10
Pérdida evaporación (vatios)	513	44
Pérdida suelo (vatios)	40	9
Extracción colector (vatios)	63	0
Suma (vatios)	872	89
Radiación entrante (vatios)	780	55

## CONCLUSIONES

Se ha mostrado la utilidad del lisímetro como instrumento de medidas, el aparato ha sido capaz de entregar datos de interés en su doble rol: para estimar la importancia de las pérdidas de agua evaporada dentro del balance térmico y como herramienta para el control de la irrigación.

En la actualidad el aparato se emplea para control automatizado del riego en el invernáculo. Para ello se agregó al programa de medidas y control una rutina que controla el funcionamiento de la bomba de riego en función de las lecturas del aparato. En los primeros ensayos la cantidad evapotranspirada que marca el aparato se distribuye en cuatro riegos diarios.

Los métodos de cálculo de la evaporación diaria han dado valores razonables, pero no se pueden estimar con ellos cifras horarias. En este caso las medidas del lisímetro resultan necesarias.

En el futuro se evaluará la posibilidad de construir lisímetros gravimétricos más pequeños, de costo menor, fácil colocación y manipulación. Los mismos podrían ser usados directamente por los productores.

Las medidas realizadas muestran la necesidad de evaluar con cuidado el aporte de la evapotranspiración al balance energético del invernáculo, aún en las etapas iniciales del cultivo, ya que es el término de mayor envergadura.

## REFERENCIAS

- (1) Quiroga M., Saravia L., Echazú R. Diseño y primeros ensayos de lisímetro gravimétrico para medidas de evapotranspiración en invernaderos. Presentado en la 17° Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar. Rosario 11 al 14 de octubre de 1994.
- (2) Saravia L., Echazú R., Cadena C., Quiroga M., Diseño y construcción de un sistema integrado invernadero - secador con calentamiento combinado solar - biomasa. Presentado en la 16° Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar. La Plata 30 de noviembre 11 3 de diciembre de 1993.
- (3) Saravia L., Echazú R., Condorí M., Quiroga M., Cabanillas C., Ensayos de un sistema combinado solar biomasa para calentamiento de invernaderos. Presentado en la 17° Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar. Rosario 11 al 14 de octubre de 1994.
- (4) Penman H.L. (1948) Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. London, Ser. A., 193:120 - 145
- (5) Priestley C.H.B. and Taylor, R.J. (1972) on the assesment of surface heat flux and evaporation using scale parameters. Monthly Weather rev., 100.81 - 92.
- (6) Doorenbos J. Pruitt (1986). Las necesidades de agua de los cultivos - Estudios FAO - Riego y Drenaje. Roma.
- (7) Jolliet O, Bailey B.J., The effect of Climate on Tomato Transpiration in Greenhouses: Measurements and Models Comparison. Agricultural and Forest Meteorology, 58, Amsterdam (1992).