

## MODELO DE PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE COLECTORES SOLARES PLÁSTICOS PARA CALENTAMIENTO DE SUSTRATOS EN INVERNADEROS #

A. Iriarte<sup>2</sup>, S. Bistoni, L. Saravia<sup>1,2</sup>  
INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa  
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca, Argentina. iriarte@plab.unca.edu.ar

**RESUMEN** - La incorporación de colectores solares de plástico, asociados con los canteros dentro de un invernadero rustificado, permiten reducir costos de calentamiento en la producción de plantines de árboles frutales. Los colectores consisten en bolsas de polietileno donde el agua que cae por gravedad circula por canales construido en forma de zig - zag. El modelo matemático desarrollado, usando la analogía térmica - eléctrica, es aplicado a un grupo de bolsas que constituyen un colector solar en el interior de un invernadero; se analizan tres posibles configuraciones. La validación del modelo muestra una desviación promedio diaria de la temperatura del agua a la salida del colector Norte de 0,2 °C, con un error relativo promedio del 0,7 %, para tres días consecutivos de simulación. Los resultados de la simulación del colector permiten determinar la eficiencia instantánea para diferentes condiciones de radiación, temperatura ambiente interior y exterior al invernadero. Se han obtenido las ecuaciones características para el colector según su ubicación y configuración.

**Palabras clave:** calentamiento, sustratos, simulación, solar

### INTRODUCCIÓN

El principal inconveniente que presentan los viveros de producción de plantines que utilizan invernaderos de simple cobertura es el riesgo de heladas durante la noche, porque la cubierta no resulta suficiente para evitar las bajas temperaturas en su interior. Sin embargo, la radiación solar que llega al interior de un invernadero durante el día aportaría energía suficiente para las necesidades de calefacción nocturna del mismo, si esta fuera adecuadamente colectada y acumulada. En este sentido, se propone la utilización de un sistema constituido por un colector solar, sin cubierta, ubicado verticalmente en el interior del invernadero y de tal forma que no dificulte la fotosíntesis de las plantas. Su función consiste en captar la energía solar directa y difusa y el exceso de energía térmica del invernadero durante el día, para acumularla como agua caliente y devolverla durante la noche cuando el cultivo la requiera.

Iriarte *et al.* (1981) iniciaron el desarrollo de un intercambiador de calor agua - aire con superficie plástica de bajo espesor, con el propósito de evitar la corrosión y lograr bajo costo de fabricación y mantenimiento. Los primeros ensayos se realizaron utilizando una solución salina caliente de una poza solar para el secado de productos agrícolas y calefacción auxiliar de un invernadero (Iriarte *et al.* 1981, Lesino *et al.*, 1983). Modificaciones posteriores (Saravia *et al.*, 1992, Iriarte *et al.*, 1993) lograron un sistema que cumplía con la doble función: *colector - intercambiador* durante las horas diurnas e *intercambiador* durante las nocturnas.

En el presente trabajo se realiza un análisis teórico - experimental del colector y del modelo de simulación para la evaluación de su performance y la influencia del ambiente interior del invernadero. Se muestran los resultados obtenidos de la simulación numérica del modelo térmico - eléctrico, las ecuaciones características en tres dimensiones para tres configuraciones del colector plástico en el interior del invernadero.

### COLECTORES SOLARES DE PLASTICO EN UN INVERNADERO

El colector solar de plástico es una parte fundamental del sistema de calentamiento de los canteros para los plantines de árboles frutales dentro de un invernadero rustificado. Está construido con bolsas tipo tubo de plástico polietileno L.D.T., transparentes y negros. Tiene un ancho útil de 0,50 m y una longitud de 1,8 m. Sobre las bolsas se han construido conductos horizontales mediante soldaduras, de tal forma que cuando están en posición vertical el agua que ingresa por la parte superior, cae por gravedad y circula dentro de la misma por el canal construido en forma de zig - zag.

Los colectores solares transparentes y negros (sector Norte) y los negros (sector Sur) están instalados en el interior de un invernadero rustificado, figura 1. La disposición de los mismos permite utilizar la cobertura del invernadero como la cubierta anterior o la cobertura posterior, según corresponda.

### ANÁLISIS TEORICO

Según la ubicación de la bolsa colectora en el interior del invernadero se pueden considerar tres configuraciones (situaciones)

---

# Parcialmente financiado: UNCa, INTA

<sup>1</sup> INENCO, U.N. Salta

<sup>2</sup> Investigador del CONICET

para su evaluación: a) bolsa con cubierta anterior y cobertura posterior (figura 1, sector Norte); b) bolsa con cubierta anterior y sin cobertura posterior; c) bolsa sin cubierta anterior y con cobertura posterior (figura 1, sector Sur). Los intercambios térmicos de la bolsa colectoras son con respecto a dos temperaturas diferentes, la temperatura del ambiente exterior e interior al invernadero. Si consideramos el caso (a), donde el frente de la bolsa está orientado al norte, tiene como cubierta la cobertura del invernadero y el intercambio de calor es con el ambiente exterior, mientras que la superficie posterior de la bolsa lo tiene con el ambiente interior del invernadero, a través de una cobertura plástica. La energía útil ganada por el colector en esta situación, de acuerdo al balance térmico es:

$$q_u = A_c F_R I_{v,ex}(\tau\alpha) - A_c F_R U_t(T_{w,e} - T_{a,ex}) - A_c F_R U_b(T_{w,e} - T_{a,in}) \quad (1)$$

Esta ecuación puede ser transformada en:

$$q_u = A_c F_R I_{v,ex}(\tau\alpha) - A_c F_R U_L(T_{w,e} - T_{a,ex}) + A_c F_R U_b(T_{a,in} - T_{a,ex}) \quad (2)$$

donde:  $U_L = U_t + U_b$

La eficiencia instantánea es:

$$\eta_i = \frac{q_u}{A_c I_{v,ex}} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{w,e} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}} + F_R U_b \frac{(T_{a,in} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}} \quad (3)$$

La energía útil ganada por el colector es:  $q_u = G C_{p,w} (T_{w,s} - T_{w,e}) \quad (4)$

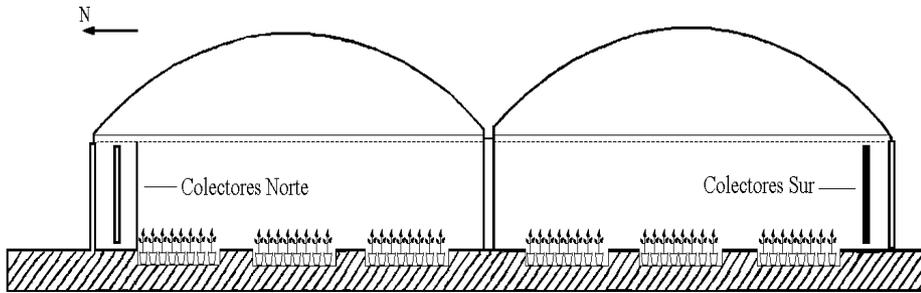


Figura 1. Esquema de un invernadero con los colectores ubicados en su interior

## MODELO DE SIMULACIÓN

- *Colector plástico con cubierta y cobertura, ubicado en el sector Norte*

El colector solar de plástico del sector norte está constituido por una cubierta (c1), la placa o bolsa colectoras (b) y una cobertura (c2) que lo separa del ambiente interior al invernadero, figura 2. La bolsa colectoras se la puede representar como un nodo de un circuito eléctrico donde está concentrada el área de colección, la masa de plástico que constituye el colector y el agua acumulada en los conductos de la misma. A ese nodo llegan un flujo de energía (radiación solar) representada por una fuente de corriente referenciada a tierra y un flujo de masa térmica (entrada de agua). De él sale otro flujo de masa térmica (salida de agua) y flujos de calor a través de resistencias convectivas y radiativas que intercambian calor con el ambiente interior y exterior al invernadero. Con el propósito de mejorar la precisión del cálculo y disponer de un valor intermedio a lo largo del colector, fue dividido en dos partes iguales, de manera tal que cada nodo (N2 y N3) represente la mitad del colector, como se puede ver en el esquema térmico de la figura 2. Estos nodos están unidos entre sí por una fuente de corriente (JMQ3) que produce un flujo de masa térmica entre ellos, ver esquema eléctrico de la figura 2. El agua llega al primer nodo mediante un flujo de masa JMQ4 desde el nodo 32, que representa el reservorio de agua. Sale del colector, nodo N2, mediante un flujo de masa JMQ2 que lo conecta con el nodo 32, donde cierra el circuito.

Las pérdidas convectivas entre la bolsa colectoras (nodos N2 y N3) y la cubierta de plástico del lateral norte del invernadero (nodos N7 y N9) están representadas por la corriente que circula a través de las resistencias RV13 y RV16. Es de notar que se ha despreciado el intercambio radiativo entre la bolsa y las cubiertas de plástico, así como la pérdida por radiación infrarroja entre la bolsa y el cielo. El intercambio entre la cubierta y el ambiente exterior se realiza mediante las resistencias convectivas (RV6 y RV3) y las radiativas (RR9 y RR10). Estas últimas son no lineales dependiendo de las temperaturas de las superficies que intercambian calor, siendo su expresión de la siguiente forma:

$$RR = [1/(\epsilon_{c1} \sigma A_{c1} (T_{c1}^4 - T_{sk}^4)/(T_{c1} - T_{a,ex}))] \quad (4)$$

Si hay cobertura posterior en el colector, el intercambio entre ésta y el invernadero se realiza mediante las resistencias convectivas RV2 y RV5 y las radiativas RR7 y RR8. Estas resistencias se calcularon considerando el intercambio radiativo entre

la superficie de la cubierta  $c_2$  ( $\epsilon_1$ ) y una superficie en el interior a la temperatura del invernadero con una emitancia próxima a un cuerpo negro ( $\epsilon_2$ ). La expresiones para las resistencias radiativas son de la forma:

$$RR = [1/(\epsilon_e \sigma A_{c2} (T_{c2}^3 + T_{a,in}^2 T_{c2} + T_{c2} T_{a,in}^2 + T_{a,in}^3))] \quad (5)$$

donde:  $\epsilon_c = (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)^{-1}$ . El valor de  $\epsilon_{c1}$  fue estimado en 0,80, mientras los valores para  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  y  $\epsilon_c$  fueron estimados en 0,80, 0,92 y 0,75, respectivamente.

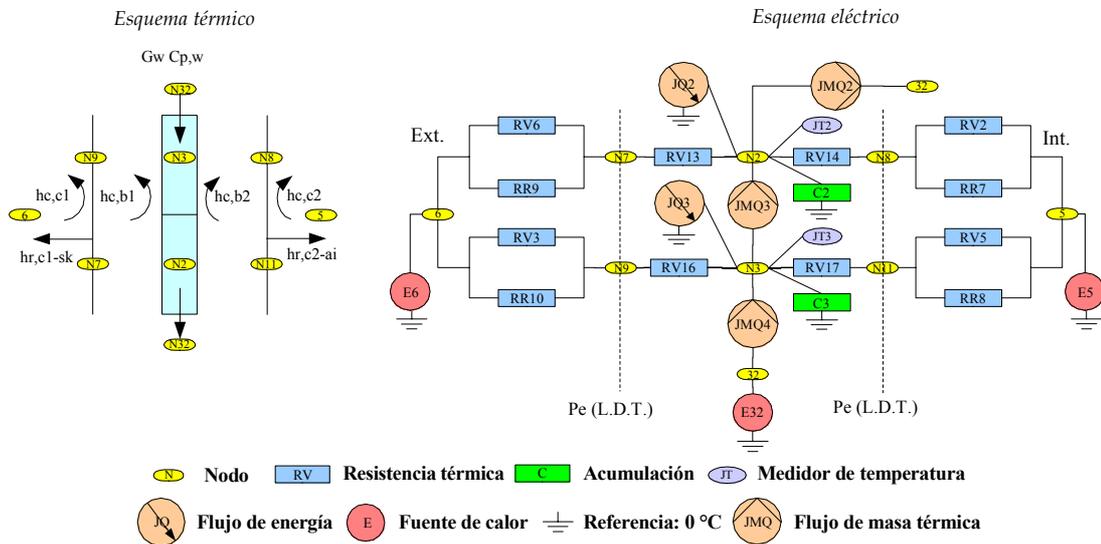


Figura 2. Esquema térmico y eléctrico de un colector plástico con cubierta anterior y cobertura posterior.

Las JQ2 y JQ3 son fuentes de corriente, referidas a tierra, que representan la energía solar absorbida por el colector (bolsa colector) en su mitad superior e inferior respectivamente. El coeficiente de absorción de la placa colector se calcula teniendo en cuenta que la misma está constituida por bolsas transparentes y negras alternadas y una cubierta de plástico transparente de la misma característica que las bolsas transparentes. De esta manera, la cantidad de radiación absorbida por la placa, en el nodo N2 y N3 del circuito, puede considerarse como el promedio de lo que absorbe la bolsa transparente y la negra:

$$JQ2 = JQ3 = [(\tau_c \tau_b \alpha_w + \tau_c \alpha_{bN})/2] I_{v,ex} \quad (6)$$

Se ha considerado  $\tau_c = 0,88$ ;  $\tau_b = 0,88$ ;  $\alpha_w = 0,28$  y  $\alpha_{bN} = 0,80$ . Estos valores fueron obtenidos experimentalmente y son similares a los sugeridos por la bibliografía para el plástico L.D.T. (Godbey *et al*, 1979, Janjai *et al.*, 2000).

La configuración b) es un caso particular del a), se puede simular con este modelo sin los intercambios con la cobertura (c2).

- **Colector plástico sin cubierta y cobertura, ubicado en el Sector Sur**

El colector de plástico del sector sur está constituido por la placa colector (b) y una cubierta (c1) que la separa del ambiente exterior, no dispone de cubierta entre la bolsa colector y el interior del invernadero. La superficie colector se representa de la misma forma que en el caso de los colectores del sector norte, es decir con dos nodos unidos entre sí por una fuente de corriente (flujo de masa). Los intercambios convectivos y radiativos se consideran de la misma forma que el caso anterior, pero considerando las dos superficie de intercambios radiativo como cuerpos negros. El coeficiente de absorción de las bolsas negras, resulta difícil de estimar debido al deterioro sufrido por los plásticos de las cubiertas del invernadero con el paso del tiempo. En este sentido, datos experimentales obtenidos con este tipo de invernadero, permiten estimar que la relación entre la radiación interior y la exterior sobre superficie vertical ( $I_{v,in}/I_{v,ex}$ ) es de 0,20 (Iriarte A., 2001).

### VALIDACIÓN DEL MODELO

Los coeficientes convectivos, conductivos y radiativos, así como los coeficientes de absorción de la radiación solar, que se utilizaron en los programas del SCEPTRE, fueron calculadas teniendo en cuenta las propiedades físicas y térmicas de cada uno de los materiales que se utilizaron para su construcción.

Para realizar el ajuste del modelo a los resultados experimentales obtenidos en los ensayos, se tuvo en cuenta que las condiciones de funcionamiento de una determinada componente del invernadero solar está ligada al resto del mismo y depende de los aportes o reducción de calor de las otras componentes. En este sentido, con el propósito de mantener las contribuciones térmicas de todas las componentes se han incorporado fuentes de tensión con tablas que contienen los datos experimentales y las condiciones que controlaban el funcionamiento del sistema completo. Los ajustes se realizaron con los flujos principales que participan en el proceso de transferencia de calor, interpretando físicamente los resultados en cada caso y teniendo en cuenta que estos ajustes están absorbiendo otros errores de cálculo de menor envergadura.

La evaluación del funcionamiento del modelo de los colectores solares del sector Norte del invernadero, se realizó incorporando en los nodos 5 y N2 del circuito análogo una fuente de tensión en cada uno (figura 2). Estas fuentes tenían sus valores

asignados mediante tablas construidas con los datos experimentales de la temperatura ambiente interior al invernadero y del agua a la entrada de los colectores solares provenientes del acumulador. Es de destacar que al considerarse que el reservorio de agua para la alimentación de los colectores es una fuente de tensión con valores establecidos por tabla, el retorno de agua al mismo nodo, no modifica los valores de temperatura en dicho nodo (32). Los otros datos de entrada que necesita el modelo son la temperatura ambiente exterior y la radiación solar global incidente sobre superficie vertical, los cuales también son asignados mediante tablas. El coeficiente de absorción de la radiación solar incidente en la bolsa colectora, parámetro principal del ajuste de la temperatura del agua a la salida de los colectores solares, fue de 0,41, lo que implica que:

$$JQ_2 = JQ_3 = 0,41 I_{v,ex} \quad (7)$$

La diferencia entre lo estimado y el valor del ajuste fue de 0,05. Esta diferencia se debe a que los plásticos no son nuevos. El deterioro por el UV disminuye la transparencia y por lo tanto, la cantidad de radiación que llega sobre las bolsas colectoras. Para los colectores ubicados en el lateral sur del invernadero, la temperatura del agua a la salida de los colectores se ajusta mediante un coeficiente de absorción de 0,20.

En la figura 3 se muestra la variación de la temperatura del agua a la salida del colector solar Norte obtenidos por la simulación [ Tw,s(S)] en contraste con las obtenidas experimentales [Tw,s(E)] y la radiación solar, en función del tiempo para tres días consecutivos. Del análisis de los datos obtenidos, por ejemplo para el 1er. día, se observa que durante los primeros 4 minutos de funcionamiento (10 horas local) el valor absoluto de la desviación o discrepancia entre los valores experimentales de la temperatura del agua a la salida de colector y los simulados fue de 1,6 °C con un error relativo respecto del valor experimental del 6 %. A las 10,9 horas (6 minutos del inicio) este valor disminuye a 1,4 %, alcanzando a la 12,6 hora local el mínimo error en el ajuste (0,01 %) con una diferencia de 0,004 °C y finalizando el día (18 hora local) con una desviación de 0,6 °C y un error relativo de 2 %. En la misma figura se ha incluido los horarios que el colector no funciona con el propósito de mostrar la calidad del ajuste. En la tabla 1 se detallan las desviaciones (valores absolutos) y los errores relativos promedio para los tres días de ensayo, destacándose que el error promedio del ajuste para los tres días es menor que el 1 %.

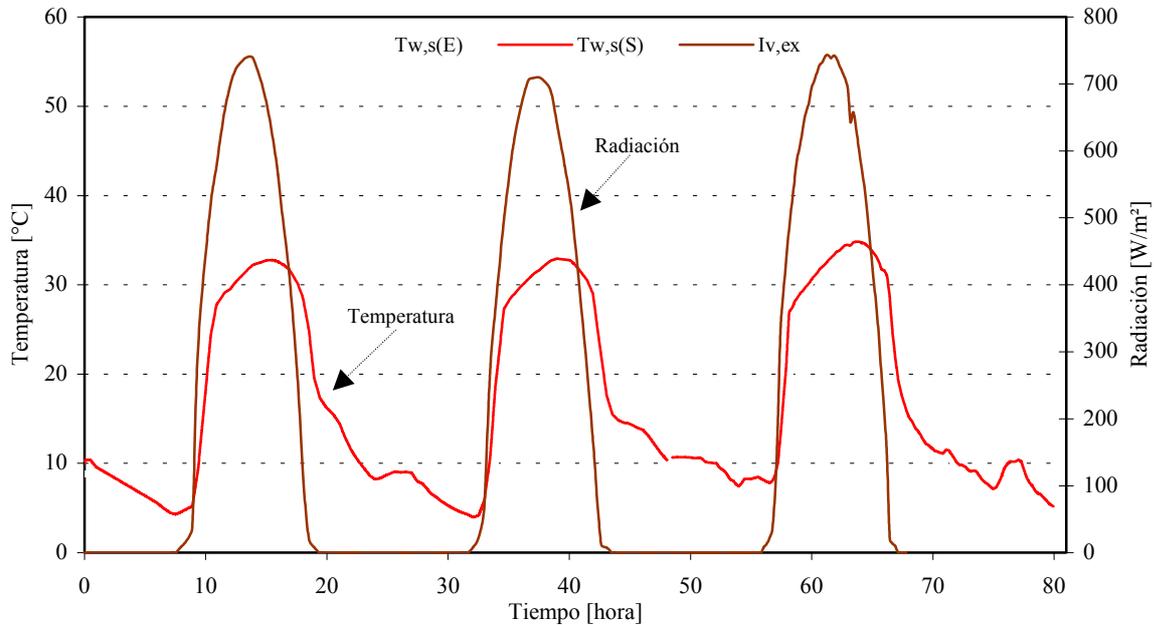


Figura 3. Temperatura de agua a la salida del colector Norte y radiación para tres días consecutivos.

Ensayos	Colector Norte		Colector Sur	
	$ \Delta\bar{T} $ [°C]	$\bar{E}_r$ [%]	$ \Delta\bar{T} $ [°C]	$\bar{E}_r$ [%]
1er. Día	0,22	0,71	0,63	2,94
2do. Día	0,23	0,77	0,47	1,91
3er. Día	0,18	0,57	0,22	0,80
Promedio	0,21	0,68	0,44	1,88

Tabla 1. Desviación en temperatura y error relativo del ajuste

También se incluyen los datos del ajuste del colector negro, advirtiéndose que la desviación disminuye a medida que la temperatura del ambiente interior del invernadero aumenta. Por ejemplo, para el peor día (1ero.), se observa que durante los primeros 10 minutos de funcionamiento (10,16 horas) el valor absoluto de la desviación entre los valores experimentales y simulados de la temperatura del agua a la salida de colector fue de 2,1 °C con un error relativo respecto del valor experimental del 9,1 %. A las 11 horas (15 minutos del inicio) estos valores disminuyen a 0,87 °C y 3,6 %, alcanzando a las 13,2 hora local el mínimo error en el ajuste (0,04 %) con una diferencia de 0,01 °C y finalizando el día (18 hora local) con una desviación de 0,09 °C y un error relativo de 0,33 %. El error promedio del ajuste para los tres días es menor que el 2 %.

## EFICIENCIA INSTANTÁNEA DEL COLECTOR

La eficiencia instantánea del colector, ecuación (4), depende de la temperatura de entrada del agua, temperatura del ambiente interior y exterior del invernadero y de la radiación solar exterior que incide sobre superficie vertical. Las ecuaciones características del colector en sus diferentes configuraciones, obtenidas de la simulación numérica del modelo, son:

$$a) \quad \eta = 0,3620 - 7,4685 \frac{(T_{w,e} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}} + 3,635 \frac{(T_{a,in} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}} \quad (8)$$

$$b) \quad \eta = 0,34028 - 13,425 \frac{(T_{w,e} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}} + 10,90 \frac{(T_{a,in} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}} \quad (9)$$

$$c) \quad \eta = 0,12253 - 9,875 \frac{(T_{w,e} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}} + 4,265 \frac{(T_{a,in} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}} \quad (10)$$

En la figura 4 se muestra la eficiencia instantánea en función de  $\frac{(T_{w,e} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}}$  y de  $P = \frac{(T_{a,in} - T_{a,ex})}{I_{v,ex}}$  para el caso

(a). En el eje "y" se representa el parámetro  $P$  cuyos valores se detallan en la tabla de la derecha del gráfico.

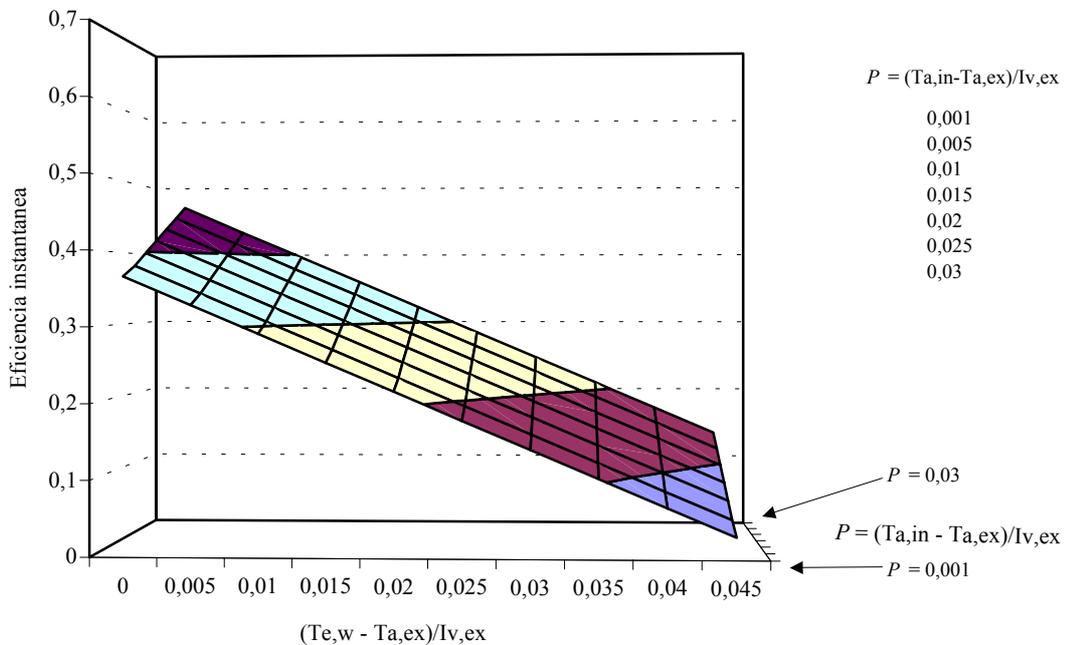


Figura 4. Eficiencia instantánea del colector para diferentes valores del parámetro.

Para valores próximos al medio día solar ( $I_{v,ex} = 700 \text{ W m}^{-2}$ ) un aumento del parámetro  $P$  implica un mayor aporte de calor del invernadero al colector, lo que aumenta la eficiencia instantánea del mismo. Este parámetro controla las pérdidas y ganancias de calor entre el colector y el ambiente del invernadero. Una forma de visualizar mejor esta relación es graficando en el plano la eficiencia para un parámetro  $P$  fijo, figura 5 (proyección en el plano). En esta figura se han incluido los tres tipos de colectores analizados. En la misma se observa que para incrementos iguales del parámetro  $P$ , el aumento de eficiencia instantánea no es el mismo y depende de la magnitud del intercambio de calor con el ambiente del invernadero. Así, por ejemplo, un incremento de  $P$  de 0,005 produce un aumento de eficiencia de 0,0182 en el caso a); de 0,0545 en el b) y de 0,0213 en el c). En los casos b) y c) se producen los mayores incrementos al estar en contacto directo las bolsas con el ambiente del invernadero. Sin embargo, a los efectos del diseño hay que tener en cuenta si el aumento del parámetro es posible de acuerdo con la localización, orientación y datos climáticos de la zona de emplazamiento del invernadero.

## CONCLUSIONES

La metodología aplicada para la caracterización física y térmica en sus diferentes configuraciones o situaciones de uso, así como la información generada, permiten disponer de herramientas de diseño muy útil. La validación del modelo muestra una desviación promedio diario de la temperatura del agua a la salida del colector ubicado en el lateral Norte y lateral Sur razonable. Los resultados de la simulación del colector permiten determinar la eficiencia instantánea para diferentes condiciones de radiación, temperatura ambiente interior y exterior al invernadero.

El nivel de confiabilidad durante su funcionamiento, la baja corrosión de los materiales utilizados y su gran versatilidad hacen del colector de plástico un sistema óptimo para su instalación dentro de un invernadero.

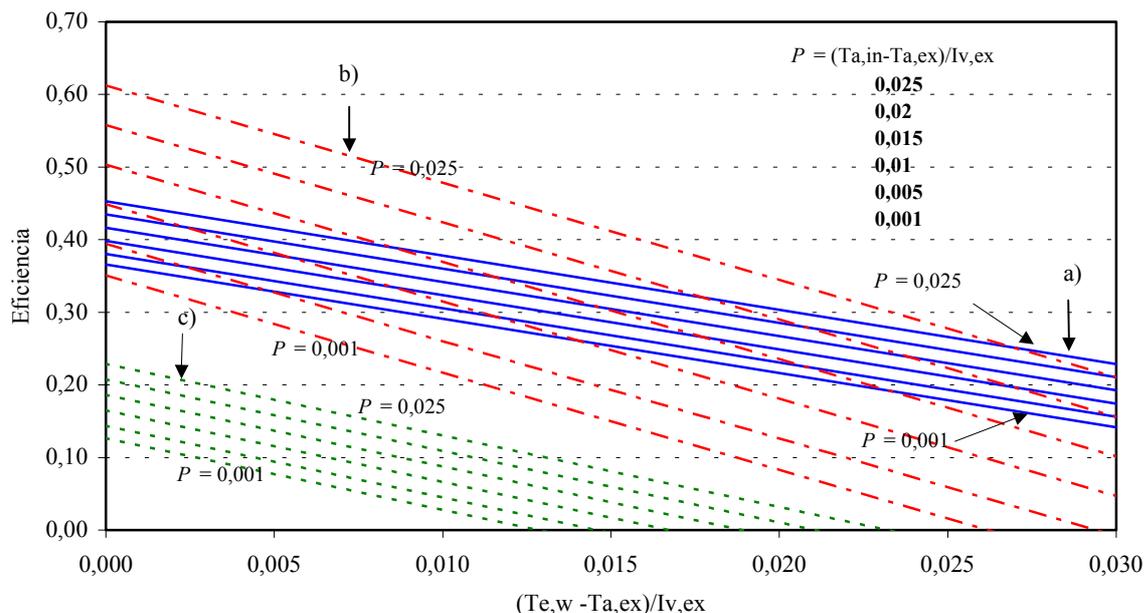


Figura 5. Eficiencia instantánea de los tres colectores para diferentes parámetros.

## NOMENCLATURA

Ac: cubierta del colector [m <sup>2</sup> ]	T <sub>w,s</sub> : temperatura de salida del agua [°C]
A <sub>c1</sub> : superficie de la cubierta 1 del colector [m <sup>2</sup> ]	T <sub>w,e</sub> : temperatura de entrada del agua [°C]
A <sub>c2</sub> : superficie de la cubierta 2 del colector [m <sup>2</sup> ]	T <sub>sk</sub> : temperatura de cielo [K]
C <sub>p,w</sub> : calor específico de agua a presión cte. [J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]	I <sub>v,ex</sub> : radiación incidente sobre superficie vertical exterior al invernadero [W m <sup>-2</sup> ]
G: flujo másico de agua [kg s <sup>-1</sup> ]	(τα): producto transmitancia absorvancia
FR: factor de remoción del colector	τ <sub>c</sub> : transmitancia de la cubierta del colector
Ut: Coeficiente global de pérdida bolsa-exterior [W m <sup>2</sup> °C <sup>-1</sup> ]	τ <sub>b</sub> : transmitancia de la bolsa
Ub: Coeficiente global de pérdida bolsa-interior [W m <sup>2</sup> °C <sup>-1</sup> ]	α <sub>w</sub> : absorvancia del agua
T <sub>c1</sub> : temperatura de la cubierta 1 del colector [K]	α <sub>bN</sub> : absorvancia de la bolsa negra
T <sub>c2</sub> : temperatura de la cubierta 2 del colector [K]	ε <sub>c1</sub> : emitancia de la cubierta 1 del colector
T <sub>a,in</sub> : temperatura ambiente interior del invernadero [K] o [°C]	σ: constante de Stefan - Boltzman
T <sub>a,ex</sub> : temperatura ambiente exterior [K] o [°C]	

## REFERENCIAS

- Godbey L, Bond T. y Torning H. (1979). Transmission of solar and Long – Wave length Energy by materials used as covers for solar collectors and greenhouses. Transactions of the ASAE, pág. 1137 – 1144.
- Janjai S., Esper A. y Muhlbauer W. (2000). Modeling the performance of a large area plastic solar collector. Renewable Energy 21, pág. 363 - 376.
- Lesino G., Saravia L., Castro P. L. y Blasco D. (1983). Construcción y monitoreo de un invernáculo y local adyacente con calefacción auxiliar por poza solar. Acta 8va. Reunión de ASADES, La Pampa, pág. 9-16.
- Iriarte A., Luna D. y Saravia L. (1981). Desarrollo de intercambiadores agua-aire para su uso en secadero solar. Acta 7ma. Reunión de ASADES Rosario, pág. 30 - 34.
- Iriarte A., Biagi S. y Saravia L. (1993). Caracterización de un intercambiador de calor para calefacción de invernaderos". Acta 16va. Reunión ASADES La Plata, pág. 461 - 466, Tomo I.
- Iriarte A. (2001). Acondicionamiento término solar de invernaderos para la producción agrícola intensiva. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta.
- Saravia L., Echazú R., Cadena C. y Cabanillas C. L. (1992). Calentamiento solar de invernaderos en la Provincia de Salta. Actas 15va. Reunión Nacional de ASADES, Tomo I, pág. 371 - 375.

**ABSTRACT** - In the production of fruit trees, plastic solar collectors inside a greenhouse associated with heated beds, allow to reduce heating costs. This type of collector consists of a plastic bag made of two polyethylene films, soldered in such a way that the water, introduced at the top of the bag, falls by gravity following a zig-zag path. A mathematical model was developed for simulating the performance of a group of plastic solar collectors in three different configurations. It was based on the thermal- electric analogy. The validation of the model for the exit water temperature from north collectors showed an average deviation of 0,2 °C with an average relative error of 0,7 %. From the simulation it is possible to determine the instantaneous efficiency for different radiation and inside and outside ambient temperatures. Characteristic collectors' equations are obtained according its location and configuration.