

COMPORTAMIENTO TERMICO Y ENERGETICO DE UN "INVERNADERO RUSTICADERO SOLAR" ¹

A. Iriarte², V. García y S. Bistoni
INENCO, Fac. de Ciencias Agrarias - UNCa.
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca - iriarte@plab.unca.edu.ar

L. Saravia²
INENCO - UNSa. - Salta

C. Matias y L. Tomalino
E.E.A. INTA, Catamarca

RESUMEN - La rusticación de plantines presenta bajo porcentaje de sobrevivencia debido al cambio brusco de hábitat que sufren las estacas recién enraizadas cuando son trasplantadas y a la falta de condiciones ambientales apropiadas, fundamentalmente en lo respecta a temperaturas y humedades edáficas y ambientales. El presente trabajo describe las características de un invernadero rusticadero calefaccionado con energía solar integrado con colectores solares de agua internos al invernadero y un acumulador de calor de piedra. Se analiza el comportamiento de los componentes del mismo desde el punto de vista térmico y energético, destacándose que durante los ensayos las temperaturas radiculares y foliares no disminuyeron por debajo de las condiciones de diseño, temperatura mínima biológica radicular 12 °C y foliar de 5 °C. Desde el punto de vista agronómico los resultados fueron altamente satisfactorios, se obtuvo un gran desarrollo foliar y una sobrevivencia del 100 %.

Palabras Clave: calefacción solar, colectores solares, lecho de piedra, rusticar

INTRODUCCION

El desarrollo de las plantas está determinado no solo por sus caracteres genéticos, que por si constituyen un potencial embrionario, sino por la acción del medio sobre él, que en definitiva definirá las posibilidades de realización de ese potencial. Esto significa que los factores ambientales que rigen la actividad de la planta (luz, temperatura, humedad del ambiente y edáfica, anhídrido carbónico, radiación solar, etc.) deben ser favorables para que el vegetal manifieste en la realidad su potencial productivo que sus caracteres genéticos le fijan.

Cada especie vegetal sea frutal, ornamental u hortícola tiene sus propias condiciones óptimas y mínimas para su crecimiento. Estas están directamente ligadas con las diferentes fases de su desenvolvimiento vegetativo y con la eficiencia de su manejo durante su crecimiento. En ese sentido, se dispone de información de la mayoría de especies principalmente hortícolas y florícola, relacionadas con los niveles térmicos admisible por cada una de ellas, tales como temperaturas mínima letal, mínima biológica, óptima, máxima biológica y de germinación o radicular. Sin embargo, en la etapa de rusticación, en el caso de plantines logrados por enraizamiento de estacas en ambiente controlado, no se dispone de antecedentes sobre los límites térmicos de su estructura foliar y radicular. En esta fase el éxito o fracaso esta ligado a la disponibilidad de nutrientes, principalmente asimilados, ya sean de reservas o proporcionados por las hojas y a las condiciones ambientales dentro del recinto de crianza.

En el presente trabajo se describen las componentes de un invernadero "rusticadero" calefaccionado con energía solar acumulada durante el día en un lecho de piedra y en un acumulador de agua, que durante la noche se utiliza para calentar el invernadero y los canteros donde se encuentran los plantines en macetas respectivamente. Se analiza el funcionamiento térmico y energético del invernadero dentro y fuera de las condiciones de diseño. Se establecen las condiciones ambientales radiculares y foliares de sobrevivencia para plantines de olivo con 60 días de enraizados en una cámara de vegetación.

DESCRIPCION Y ANALISIS DEL RUSTICADERO

Estructura del invernadero: el invernadero para rusticar plantas esta constituido por dos estructuras tipo túnel de hierro de 7,5 m de ancho, 21 m de largo, 2 m de altura en los laterales y 3,5 m de altura máxima. Ambas estructuras, ubicadas una al lado de la otra con sus ejes (Este - Oeste) paralelos, conformando un macrotúnel doble, cubierto por un plástico transparente de larga duración térmica (L.D.T.). En su interior se ha construido una cámara de plástico de 2 m de altura, 20 m de largo y 14,5 m de ancho. Las paredes laterales (Norte y Sur) de la cámara están constituidas por colectores solares de plástico. Dentro de esta cámara, por debajo del techo, se colocó una cortina aluminizada corrediza, tipo media sombra, que permite pasar el 40% de la radiación solar incidente durante las horas de sol para evitar el sobrecalentamiento y por las noches disminuir las pérdidas por radiación infrarroja. Completan la infraestructura las siguientes componentes:

Colectores solares y acumulador de agua: las placas de los colectores solares están construidos con bolsas de polietileno (transparente y negro) de 0,50 m de ancho por 1,8 m de largo, soldadas transversalmente de manera tal que el agua que ingre-

¹ Parcialmente financiado por ANCyT, INTA

² Investigador del CONICET

sa por la parte superior, cae por gravedad haciendo un recorrido en forma de zig - zag. Los colectores solares que constituyen la pared Norte de la cámara están formados por una doble pared de plástico de larga duración térmica con protección U.V., en cuyo interior se colocaron las placas de plástico transparentes y negras alternadamente. Esta disposición permite por un lado, usar la pared del invernadero como cubierta del colector solar y el plástico que cierra la cámara como "fondo" del mismo. Por otro lado restringe la entrada de infrarrojo al invernadero a la vez que aumenta la eficiencia de los colectores, disminuyendo su pérdida hacia el interior del mismo. En la pared lateral Sur de la cámara, paralelo a la pared de plástico del invernadero, se instalaron colectores solares de polietileno negro. Estos colectores interceptan la radiación solar, que de otra manera se perdería a través de esta pared y posibilitan el intercambio de calor del ambiente del invernadero al agua, como una forma de contribuir el calentamiento de esta última. En ambos casos, lateral Norte y Sur, constituyen una doble pared lateral para el invernadero y paredes laterales para la cámara. Se instalaron en el lado Norte 22 placas colectoras transparentes (17,6 m²) y 21 negras (16,8 m²) configurando una superficie colectoras de 34,4 m² y del lado Sur 40 negras de 0,8 m² cada una (32 m²). La cantidad total de energía obtenida por los colectores solares para el sector Norte y Sur puede ser calculada por:

$$Q_{co} = C_{pw} \sum_{i=1}^n \left[(A_{c,N} r_{w,N} \Delta T_{wi,N}) + (A_{c,S} r_{w,S} \Delta T_{wi,S}) \right] \Delta t \quad \text{y la eficiencia } \eta = Q_{co} / H_T A_c \quad \text{donde } A_c = A_{c,N} + A_{c,S}$$

Asociado con los colectores solares para la acumulación del agua caliente se ha construido un reservorio de agua bajo tierra en el exterior del invernadero. Este acumulador de agua caliente consiste en una excavación recubierta con una membrana impermeable. En la base del pozo entre la membrana y la tierra se agregó 0,20 m de arena, mientras que en los laterales se colocaron planchas de poliestireno expandido de 0,05 m de espesor como aislante térmico. El reservorio de agua fue recubierto con un plástico negro con el propósito de evitar el ingreso de radiación solar y consecuentemente la proliferación de algas. El volumen útil del reservorio acumulador de agua caliente es de 15 m³. La energía acumulada por el reservorio por unidad de tiempo se puede calcular mediante la siguiente ecuación, obtenida de aplicar en la masa del acumulador la ecuación para determinar la cantidad de calor en diferencias finitas:

$$Q_{ac}(t) = \frac{M_w C_{pw}}{n} \sum_{i=1}^n \left[(T_{w,i}(t) + T_{w,i+1}(t)) / 2 - T_1 \right] \quad \text{y la energía entre } t \text{ y } t + \Delta t \text{ será: } E_{ac} = Q_{ac}(t + \Delta t) - Q_{ac}(t)$$

Canteros calentados: son zanjas de 1 m de ancho por 0,20 m de profundidad construidas a lo largo del eje del invernadero. La base del cantero esta aislada con perlita (lava volcánica), mientras los costados están recubiertos con ladrillos y revoque reforzado. Arriba de la aislación se han instalado un conjunto de tubos de polietileno negro ($\varnothing = 0,0125$ m) ubicados en paralelo y separados 0,05 m entre si. Por el interior de los tubos circula agua caliente que intercambia calor con la base de las macetas que contienen las plantas. Cada cantero dispone de un sistema de humectación y riego ubicado a 0,60 m arriba del mismo, compuesto de aspersores emisores autocompensados con válvulas antigoteo que permiten crear una niebla artificial en forma periódica con intervalos controlados. Esto provoca una nebulización de agua al ambiente que permite mantener un nivel de humedad adecuada y aporta agua a las plantas. De seis canteros existentes solo se han calefaccionado los tres destinados a estacas recién enraizadas.

Caloducto y acumulador de aire caliente: El conducto recolector del aire caliente (caloducto) está ubicado en la parte superior del invernadero y fue construido en chapa metálica de 0,15 x 0,15 m pintada de negro. Dispone de rendijas en la parte superior para aspirar el aire más caliente. El sistema de acumulación de aire caliente es un lecho de piedra, construido por piedra seleccionada, "tipo bola", de 0,035 m de diámetro. Esta formado por dos cuerpos de 6,75 m³ cada uno, con dos conductos laterales (plenos) y uno central por donde ingresa y sale el aire respectivamente. Las paredes laterales y techo han sido aislado térmicamente con placas de poliestireno expandido de 0,10 m y densidad de 15 kg m⁻³. Para evitar la pérdida de aire, todo el conjunto fue recubierto con doble tela plásticas de 200 micrones de espesor. El aire caliente que es succionado por un ventilador de la parte superior del invernadero entre las dos cubiertas, atraviesa cada cuerpo del lecho de piedra y es impulsado hacia el interior del invernadero. Durante la noche el aire de la cámara en el interior del invernadero es reciclado a través del lecho, incorporándose un 10 % de aire de la parte superior mediante el caloducto. El acumulador de piedra esta ubicado en el sector Este en el exterior del invernadero.

La cantidad de energía disponible por el lecho:

$$Q_L(t) = \frac{M_p C_p}{n} \sum_{i=1}^n \left[(T_{p,i}(t) + T_{p,i+1}(t)) / 2 - T_2 \right]$$

La efectividad del caloducto será:

$$\mathcal{E} = (T_{a,sC} - T_{a,eC}) / (T_R - T_{a,eC})$$

Monitoreo: para la medición de los parámetros característicos que permitan definir el comportamiento del invernadero se usaron los sensores que se detallan a continuación. Temperatura: Termopares de cobre - constantan (canteros, macetas y colectores plásticos); Semiconductores LM35 (aire y agua); Termistores de 10 k Ω (estructura metálica, cubiertas de plástico y suelo). Todos los sensores fueron calibrados en un baño termostatzado. Humedad: puntas capacitivas Vaisala. Radiación: Radiómetros Kipp & Zonen, Black & White y LI-COR 200SA. El monitoreo del invernadero se realizó con un sistema analógica/digital NUDAM y dos tarjetas de adquisición de datos Keitley 1600 y PCLab 812 de 16 canales analógicos de entrada y 8 canales digitales de salida, cada una, instaladas en una computadora PC/AT. Un software desarrollado para este fin permite comandar un circuito lógico con relay que controla los contactores de las bombas y el ventilador.

CARACTERÍSTICAS DEL AMBIENTE Y DEMANDA DE ENERGIA

En virtud de la escasez de datos bibliográficos sobre la temperatura mínima biológica de plantines de olivo obtenidos mediante enraizamiento de estacas en cámara de ambiente controlado en su etapa de endurecimiento radicular, se ha considerado prudente realizar los ensayos fijando esa temperatura en 12 °C, en 5 °C la temperatura mínima letal y los niveles de humedad del ambiente interior entre el 60 y 70 %.

A efectos del diseño del invernadero rústico, calentado con energía solar, se ha determinado las condiciones climáticas externas para el cálculo de la demanda de energía mediante el criterio del día típico (Iriarte, 1997). Este método permite determinar el día representativo del período invernal, utilizando la máxima y mínima más probable de mayor incidencia en el proceso biológico de la planta durante dicho período. Se consideran aquellos meses cuya temperatura mínima media sea menor a la temperatura mínima biológica. Del procesamiento y análisis de los datos del Servicio Meteorológico del INTA Caturama de los últimos 20 años y usando el criterio del día típico, se determinó que la temperatura mínima más probable es de 5 °C, la máxima de 19,3 °C y la temperatura media de diseño de 9,3 °C con una duración de 20 horas.

Con el propósito de obtener un funcionamiento eficiente de cada una de las componentes del invernadero se ha desarrollado un software de medición y control que establecen las condiciones de funcionamiento de cada una de ellas, Tabla 1. En esta tabla se detallan los aspectos relevantes de la lógica de control que usa una temperatura de referencia y la hora para la tipificación del día (diurno, nublado y nocturno) y condicionar el funcionamiento de los diferentes componentes del invernadero (Iriarte *et al.*, 1999).

Componentes	Condición		Horario	Lógica	Tipificación	Observaciones
Colector	Tr>25°C	Tw,s>Tw,e	10-18	Si	diurno	No funciona los días nublados No funciona de noche
Acumulador carga	Tr>25°C	Ta,sC>Ta,sL	10-18	Si	diurno	
Acumulador descarga	Tr<25°C	Ta,in≤12°C	10-18	Si	nublado	
Acumulador descarga	Tr<25°C	Ta,in≤12°C	18-10	Si	nocturno	
Acumulador descarga	Ta,in>Ta,sL	Ta,sL<7°C	18-10	No	nocturno	
Calefacción cantero	Tr<25°C	Tsu,ra≤14°C	10-18	Si	nublado	No funciona durante el día.
Calefacción cantero	Tr<25°C	Tsu,ra≤14°C	18-10	Si	nocturno	

Tabla 1. Especificaciones de la lógica del control

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar el comportamiento del invernadero rústico se han seleccionado, de dos meses de funcionamiento continuo en el período invernal, los días más favorables para mostrar la contribución de cada uno de los elementos que aportan energía y conforman el sistema de aprovechamiento solar asociado. Asimismo, como existen días en que el clima se comporta cerca de los valores extremos propios de esta región, se han considerado algunos de ellos para el análisis comparativo con los que están dentro de lo que se puede considerar el día típico usado para el diseño del invernadero y sus componentes.

La Tabla 2, muestra la distribución vertical de temperatura desde el ambiente exterior hasta 0,50 m por debajo del nivel del suelo, pasando por el ambiente interior, hojas y raíces de los plantines. En misma se han tomado dos días, uno dentro de las previsiones del diseño y el otro totalmente atípico muy alejado de las condiciones establecidas para el día típico. El perfil de temperaturas se detalla para: a) medio día solar (MDS); b) Hora de ocurrencia de la temperatura ambiente exterior máxima (MAX); c) media noche, 23:59 hora local (MN); d) Hora de ocurrencia de la temperatura ambiente exterior mínima (MIN).

temperatura hora	dentro condición de diseño				fuera condición de diseño			
	MDS	MAX	MN	MIN	MDS	MAX	MN	MIN
13:25	16:25	23:59	07:50	13:30	15:21	23:59	08:32	
Ta,ex	18,83	21,07	6,42	2,30	10,57	13,10	0,54	-5,28
Tc,N	40,80	39,85	7,87	6,13	37,28	38,29	3,72	-1,15
Ta,c1-2	35,67	36,93	8,90	5,91	30,13	30,83	3,82	0,00
Ta,in	31,39	30,84	12,56	10,17	24,86	27,35	8,72	3,70
Tho	28,25	29,71	13,17	10,87	25,31	27,93	6,69	1,45
Tsu,ra	18,71	22,03	18,59	15,26	12,69	14,87	14,70	12,18
Tb,mc	21,97	23,33	17,57	15,20	18,41	19,56	13,07	12,34
Ts1	23,12	23,43	16,94	14,33	17,88	20,61	12,55	7,63
Ts2	17,86	17,71	17,91	18,08	15,45	15,34	15,41	15,51

Tabla 2. Distribución vertical de temperatura para dos días.

En el día que las condiciones climáticas están próximas al día típico para una temperatura ambiente exterior mínima de 2,3°C y máxima de 21,1 °C, se advierte que la temperatura de las raíces durante el día no ha bajado de los 14 °C. La temperatura del ambiente interior al invernadero esta dentro de los límites establecidos como valores de la temperatura mínima biológica. Para condiciones externas más extremas (-5,3 °C), fuera de las condiciones de diseño, la temperatura del sustrato debajo de las raíces de los plantones no bajo del límite biológico establecido, sin embargo la temperatura de las hojas (1,5 °C) fue menor en 3,5 °C que la temperatura mínima letal fijada al inicio de la experiencia (5 °C). La temperatura del aire en el interior del invernadero fue de 3,7 °C. Otros datos característicos del comportamiento térmico, para las dos situaciones, se detallan en la Tabla 2.

Para evaluar el funcionamiento de los colectores solares se ha seleccionado un día claro con una radiación máxima sobre superficie vertical de 800 W m⁻² al medio día solar (13:30 hora local), con un aporte diario de energía solar sobre la superficie de los colectores de 714 MJ, una temperatura ambiente exterior mínima de 3,8 °C y máxima de 25,8 °C. Los colectores del

sector norte iniciaron su funcionamiento continuo a partir de las 10:16 horas con un caudal de circulación de agua $0,40 \text{ kg s}^{-1}$ (1.440 kg h^{-1}) durante 7,68 horas, obteniendo 192 MJ y una eficiencia global diaria de 26,9 %, mientras que los del sector sur (negros únicamente) iniciaron su funcionamiento continuo a partir de las 11:39 horas con un caudal de circulación de agua de $0,46 \text{ kg s}^{-1}$ (1.656 kg s^{-1}) durante 5,85 horas, obteniéndose 65 MJ y una eficiencia global diaria de 9,1 %. Esta diferencia se advierte en Fig. 1, donde se representa, por un lado la variación de temperatura de entrada de agua a los colectores y la salida de cada grupo y las eficiencias instantáneas de cada una.

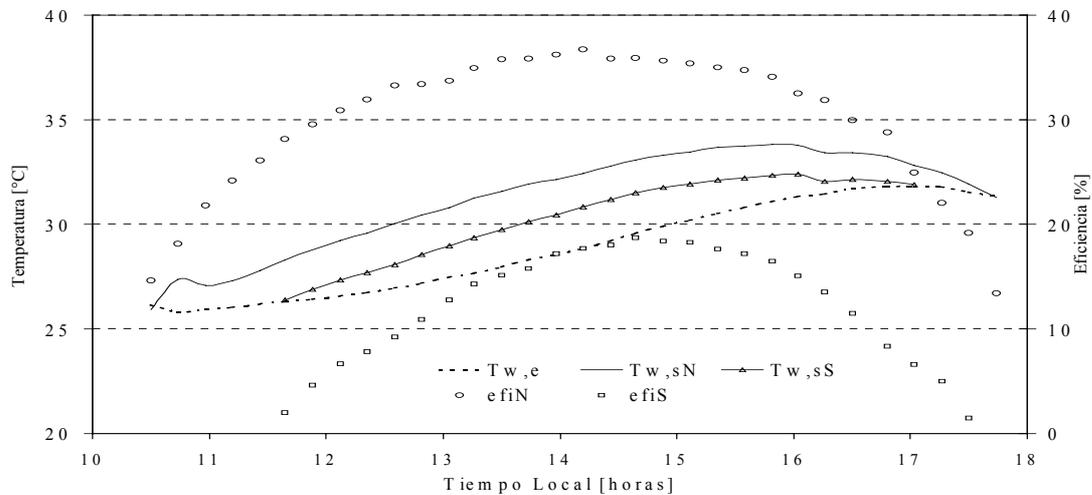


Fig. 1. Variación de temperaturas y eficiencias instantáneas de los colectores Norte y Sur interiores al invernadero

En estas últimas curvas se nota casi constantemente una diferencia promedio de un 18 %. El agua caliente que es reciclada por el depósito de acumulación dispone al inicio del día (10 horas) de 541 MJ, los colectores solares entregan durante el día 257 MJ y al finalizar el mismo el acumulador dispone de 766 MJ, lo que implica una pérdida de energía durante la carga del acumulador de 32 MJ (12,5 %). Durante la noche el acumulador entrega calor a los canteros y pierde calor por su perímetro y cubierta en el orden de 173 MJ, que comparado con lo acumulado durante el día indica un exceso de carga de 9 MJ, en consecuencia el acumulador tiene al día siguiente a las 10 horas 550 MJ. Para estos cálculos se ha tomado como referencia la temperatura definida con límite biológico para la raíz ($12 \text{ }^\circ\text{C}$). El coeficiente global de pérdida promedio para el acumulador durante el periodo nocturno fue de $9,2 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, calculado para varios días sin extracción de calor.

La estimación del aporte térmico diario promedio a las macetas por parte del sistema de intercambio de calor fue de 12 MJ por cantero para días donde la temperatura de las raíces fue menor que $14 \text{ }^\circ\text{C}$, límite estipulado para el funcionamiento del sistema de calentamiento. El coeficiente global promedio de transferencia de calor del sistema de calentamiento con respecto al aire interior al invernadero fue de $2,5 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para un caudal de circulación de agua por el interior de los tubos de intercambio de $0,24 \text{ kg s}^{-1}$ (864 kg s^{-1}) por cantero. La figura 2 muestra la variación de las temperaturas de la raíz, la del agua de entrada al cantero y del suelo sin calefactar en comparación con la temperatura del ambiente exterior al invernadero.

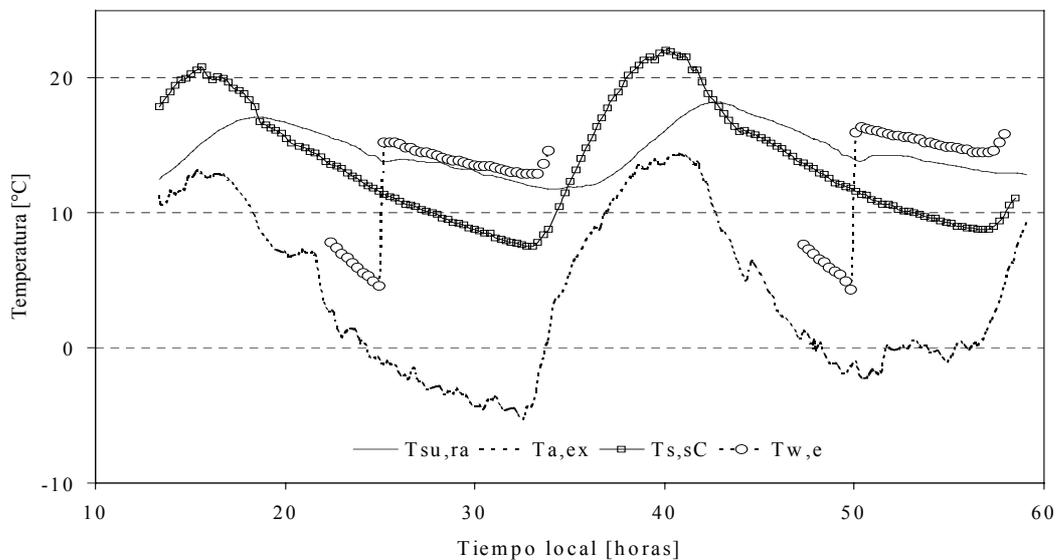


Fig. 2. Temperaturas en los canteros y en el ambiente exterior al invernadero en función del tiempo.

Se advierte que a pesar de que la temperatura fue de $-5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura mínima de las raíces de los plantines dentro de las macetas fue de $12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el suelo no calefaccionado fue de $7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto se advierte también en la tabla 2. Por otro lado en la misma figura se nota el momento de inicio (01:14 horas) y parada (09:53 horas) de la bomba que circula el agua por los canteros. Después de las 10 horas se detiene y reinicia su funcionamiento a al día siguiente a las 02:00 hasta las 09:55 horas del mismo día.

El comportamiento térmico del acumulador de aire caliente se puede observar en la Fig. 3. El día seleccionado para el análisis tiene una temperatura mínima exterior al invernadero de $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ inferior a la temperatura mínima de diseño para el día típico ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y sin embargo la temperatura del aire interior al invernadero se mantiene por encima de los $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, valor fijado como límite mínimo.

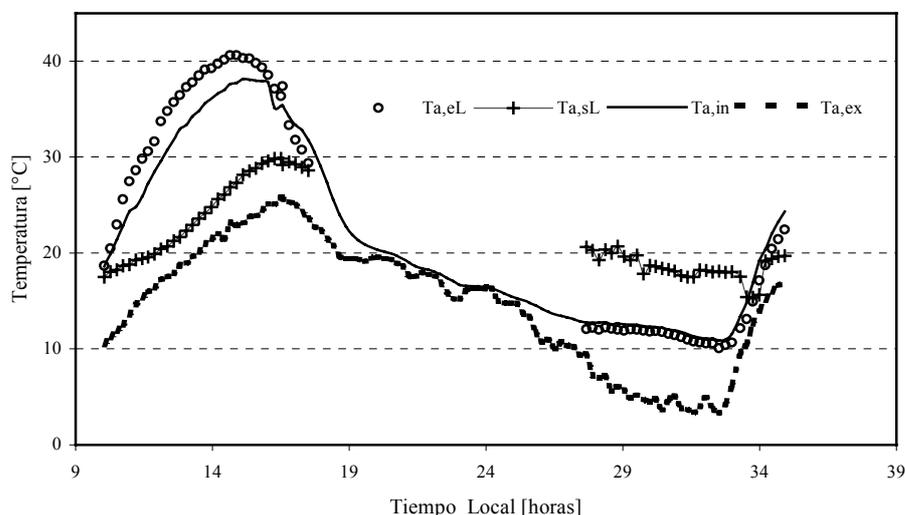


Fig. 3. Variación de las temperaturas del aire a la entrada y salida del acumulador de piedra y de las temperaturas del ambiente interior y exterior al invernadero

En la misma figura se puede observar la variación de la temperatura del aire mientras se produce la carga (10:03 hasta las 17:30 horas) y descarga (03:40 hasta 09:45 horas) del lecho de piedra, así como los valores que alcanza la temperatura del aire a la entrada del lecho proveniente del caloducto (máxima $41\text{ }^{\circ}\text{C}$) ubicado en la parte superior del invernadero entre las dos cubiertas. La descarga nocturna provee de aire con temperaturas comprendidas entre 20.6 y $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. La energía cargada durante el día en lecho de piedra fue de 61 MJ , la extraída durante la noche fue de 34.5 MJ , obteniéndose un exceso de carga en el ciclo completo de 26.5 MJ disponibles para el día siguiente. La efectividad promedio del caloducto durante las horas de carga fue del 36% .

En la figura 4 se muestran dos períodos de tres días cada uno donde se puede observar la variación de la temperatura del aire interior del invernadero, la temperatura de la raíz de los plantines dentro de los canteros y del acumulador de agua (primeros tres días) en comparación con la temperatura del ambiente exterior. Los tres primeros días seleccionados tienen valores de temperatura mínima muy por debajo de la temperatura de diseño, mientras que en el otro grupo las temperaturas son próximas al día típico. En este último grupo no se ha graficado la temperatura del acumulador de agua porque no ha sido necesario utilizar el sistema de calentamiento de los canteros al tener las raíces temperaturas mayores que $14\text{ }^{\circ}\text{C}$, debido al aporte de radiación solar y del aire caliente proveniente del lecho de piedra durante la noche. Se advierte que la escala de tiempo en la gráfica entre el final de una serie de datos y el comienzo de la otra no es real, sin embargo se ha respetado el tiempo transcurrido dentro del grupo de días seleccionados.

En la primera serie de datos se puede observar la variación de la pendiente de la curva que representa la temperatura del sustrato a nivel de las raíces como consecuencia del aporte de calor del sistema de calefacción, situación que no se advierte en el segundo grupo. También este tipo de cambio se observa en la curva correspondiente a la temperatura del aire interior al invernadero correspondiéndose con el inicio del funcionamiento del acumulador de piedra. Esta modificación también ocurre en el 2do. grupo de días, debido a que las temperaturas del ambiente interior bajan de $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el último día, el comportamiento del invernadero está dentro de los límites planteados como hipótesis de diseño. Es claro que para los días cuyas temperaturas del ambiente exterior son menores que $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ será necesario aportar calor auxiliar al interior del invernadero.

Las condiciones ambientales mínimas que soportaron los plantones fueron: temperaturas radicular de $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, foliar de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad ambiente interior entre 50 y 70% . El aporte de agua nebulizada al ambiente y al sustrato fue de 2.1 kg s^{-1} durante 10 segundos cada 20 minutos por cantero (16 nebulizadores por cantero). Esto permite fijar, en primera instancia como límite confiable para los plantines recién enraizados, una temperatura mínima biológica radicular de $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ y foliar de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, fijando la temperatura letal foliar menor que $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

CONCLUSIONES

Los componentes del invernadero rústico y el invernadero en su conjunto se han comportado como había sido previsto en el diseño. La incorporación del plástico en la parte posterior de las placas colectoras del sector Norte, que separa a los colec-

tores del aire interior al invernadero, ha provocado un importante aumento en la eficiencia de los mismos, así como en la energía colectada con respecto a configuraciones ensayadas anteriormente. Sin embargo se advierte que es necesario disminuir las pérdidas diurnas de los sistemas acoplados a los colectores (recolección de agua y acumulación).

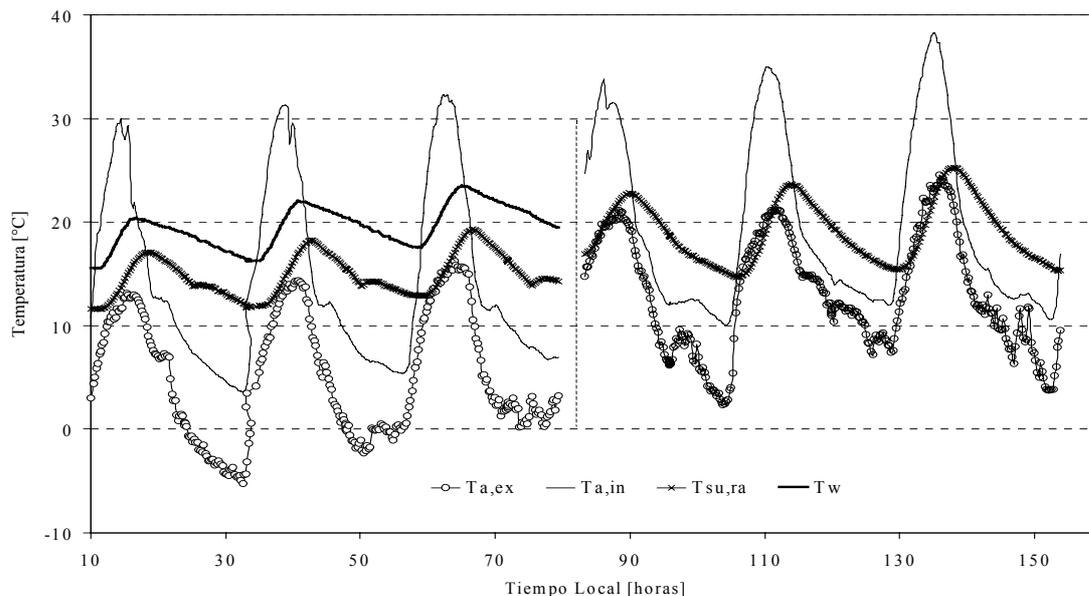


Fig. 4. Temperaturas interiores y exteriores al invernadero rústico en función del tiempo para dos grupos de tres días con características ambientales diferenciadas, dentro y fuera de las condiciones de diseño

En lo que al lecho de piedra se refiere se ha aumentado su capacidad térmica con el agregado de la toma de aire del interior de la cámara de rusticación para la recirculación nocturna. Esto permite mejorar la prestación por un aumento en la energía disponible para el día siguiente, así como para los días cuyas condiciones están muy alejadas del día típico. Desde el punto de vista agronómico los resultados han sido muy satisfactorios en razón de haber logrado un 100% de sobrevivencia y una alta tasa de crecimiento.

NOMENCLATURA

Ac,N	Superficie colectores sector Norte [m ²]	Ta,in	Temperatura del aire interior al invernadero [°C]
Ac,S	Superficie colectores sector Sur [m ²]	Ta,sL	Temperatura del aire a la salida del lecho [°C]
Cp	Calor específico de la piedra [J kg ⁻¹ °C ⁻¹]	Tb,mc	Temperatura bajo maceta calefaccionada [°C]
Cpw	Calor específico constante del agua [J kg ⁻¹ °C ⁻¹]	Tc,N	Temperatura cubierta Norte [°C]
efiN	Eficiencia colectores Norte [%]	Tc1-2	Temperatura del aire entre cubierta 1 y 2 [°C]
efiS	Eficiencia colectores Sur [%]	Tho	Temperatura de hoja [°C]
HT	Radiación total vertical diaria [MJ]	Tr	Temperatura de referencia [°C]
Mw	Masa total de agua en el acumulador [kg]	Ts1	Temperatura del suelo nivel -0,05 m [°C]
Mp	Masa total de piedra en el acumulador [kg]	Ts2	Temperatura del suelo nivel -0,5 m [°C]
\dot{m}_w	Flujo másico de agua por los colectores [kg s ⁻¹]	Ts,sC	Temperatura del sustrato sin calefaccionar [°C]
T1	Temperatura límite biológico radicular (12°C)	Tsu,ra	Temperatura sustrato raíz [°C]
T2	Temperatura límite biológico foliar (7°C)	Tw	Temperatura del agua en el acumulador [°C]
Ta,eC	Temperatura del aire entrada del caloducto [°C]	Tw,eC	Temperatura del agua a la entrada del cantero [°C]
Ta,sC	Temperatura del aire a la salida del caloducto [°C]	Tw,sN	Temperatura del agua salida colector Norte [°C]
Ta,eL	Temperatura del aire entrada lecho [°C]	Tw,sS	Temperatura del agua salida colector Sur [°C]
Ta,ex	Temperatura del aire exterior al invernadero [°C]	t	Tiempo transcurrido [s]

REFERENCIAS

- Iriarte, A. (1997). Calefacción de invernaderos utilizando biomasa residual agrícola. Tesis de Maestría, Universidad Internacional de Andalucía. España.
- Iriarte, A., García V., Saravia L., Matías C., Tomalino L. (1999). Invernadero calefaccionado con energía solar para rusticar plantas de olivo (*olea europaea* L.). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, pp. 02.9-2.12, Vol 3, N° 2.

ABSTRACT - The plants's rustication of rootstocks has low percentage of survival due to the abrupt change of environment when they are transplanted and the lack of appropriate environmental conditions, specially respecting to the temperature and humidity. In this paper the characteristics of a greenhouse for rustication, heated with solar energy, are described. The heating system consists of water solar collectors inside the greenhouse and a packed bed storage. The behavior of the different components is analyzed regarding thermal and energy processes. It is important to note that during the experiences neither root temperature nor leaves temperature decrease below the design conditions: minimum biological root temperature of 12 °C and for the leaves, 5 °C. From the agronomic point of view, the results were very satisfactory, because a great development of leaves and a 100% of survival were obtained.