

ESTANQUES SOLARES PLAYOS PARA CALENTAMIENTO DE AGUA A NIVEL INDUSTRIAL

✻ J.A. Moragues y W. Scheuer
Departamento de Física
Comisión Nacional de Energía Atómica
Av. Libertador 8250 - 1429 Buenos Aires

Resumen

Se describen experimentos en ejecución para calentar, mediante energía solar, el agua necesaria para la extracción de uranio en la planta que la Comisión Nacional de Energía Atómica instalará en su complejo minero-fábrica de Sierra Pintada, Mendoza. El volumen requerido es de 1,5 a 2 millones de litros diarios, a 50-60 C. En días o épocas de escasa insolación se precalentará el volumen total de agua, usando un sistema convencional para alcanzar la temperatura final.

Los estanques en ensayo son bolsas de PVC, de 10 cm de altura, de capa superior transparente y fondo negro, que se llenan completamente. La capa superior evita la evaporación y produce un efecto invernadero primario; se estudia reforzarlo mediante el agregado de una o dos capas transparentes adicionales, a diferentes alturas sobre las bolsas. Debido a que en la zona granzá, se investiga la posibilidad de utilizar para esto chapas plásticas de alto impacto, reforzadas mediante fibras de vidrio.

Se discuten temperaturas alcanzables en diferentes épocas del año y las correspondientes eficiencias. Se analizan problemas encontrados con los materiales utilizados.

I - 2

45 MIEMBRO DE LA CARRERA DEL CONICET

1. Introducción

A fines de 1979 se inició una evaluación de las posibilidades de aprovechar la energía solar para, según la época del año, precalentar o calentar a la temperatura final requerida el agua que se utilizará en una de las etapas de la planta de tratamiento de mineral uranífero a ser instalada por la CNEA en Sierra Pintada, una zona de buena insolación, cercana a la ciudad de San Rafael, Mendoza. Se necesitarán entre 1,5 y 2 millones de litros a 50-60 C, distribuidos con demanda constante a lo largo de las 24 horas diarias. El sistema solar de calentamiento complementará uno convencional a petróleo.

El complejo minero-fabril de Sierra Pintada está destinado a la explotación de la reserva uranífera más significativa del país y se prevé su puesta en marcha hacia fines de 1979. La planta de concentración transformará la materia prima hasta la etapa de U_3O_8 (yellow cake), a razón de 600 toneladas por año de uranio contenido en el mismo.

2. Características del Emplazamiento

El terreno está ubicado en las estribaciones de la precordillera, por lo cual es sumamente ondulado; no obstante, fue posible ubicar un área plana de aproximadamente 10 hectáreas, a 1000 metros de la planta de concentración. Los datos meteorológicos tomados en el lugar son muy escasos, correspondiendo la información disponible principalmente a la estación Rama Caída del INTA y a la del SMN en el aeropuerto de San Rafael, ambas a unos 20 km del emplazamiento previsto para los estanques y con algunos cordones de colinas interpuestos. En lo referente a radiación solar, en estas estaciones sólo se mide heliofanía.

En la zona del yacimiento graniza ocasionalmente, sobre todo en el verano; también se registran nevadas ocasionales. La temperatura media anual es de 15 C, la media estival de 22 C, con días en que la temperatura alcanza hasta 40 C, y la media invernal de 7,5 C. No se dispone de información sobre vientos. Las temperaturas del agua del Arroyo Tigre, del cual se obtendrá el agua a calentar, no son bien conocidas, pero mediciones preliminares indican valores medios de unos 11 C en verano y de unos 4 C en invierno, alrededor de las 9 horas.

Se inició el montaje de instrumental en Sierra Pintada, comenzando por un heliofanógrafo y estando próximos a instalarse un solarímetro, un anemocienógrafo, un termohigrógrafo y un pluviógrafo. Además, se organizó la recolección de información más detallada sobre granizadas y nevadas en el lugar, como también la concerniente a las temperaturas del Arroyo Tigre. Asimismo se iniciaron análisis de las impurezas contenidas en las aguas de éste.

3. Preselección, Dimensionamiento y Modo de Operación del Sistema

La inversión inicial para cualquier sistema solar de calentamiento que se adopte, resultará significativa con relación al costo del petróleo que el sistema permitirá ahorrar anualmente. Este hecho puede impedir la adopción del sistema solar, aunque la suma de la inversión inicial distribuida sobre la vida útil de la instalación, más los gastos operativos y de mantenimiento, resulte comparable a la correspondiente suma para el sistema convencional. Por ello es necesario elegir un sistema de construcción económica, lo cual es posible en este caso, ya que la temperatura final relativamente baja a la que se desea calentar el agua permite usar dispositivos sin concentración y de escasa sofisticación.

En concordancia con la decisión de un grupo del Lawrence Livermore Laboratory (LLL), de EE.UU. de N.A., que está implementando un proyecto similar⁽¹⁾, optamos por iniciar las experiencias con estanques plásticos playos (Fig. 1). Aún dentro de esta línea, se presentan variantes económicamente importantes, siendo posiblemente la principal el decidir si se selecciona (a) un sistema relativamente costoso cuya durabilidad sea comparable al lapso previsto para la explotación del yacimiento de Sierra Pintada o, en cambio, (b) uno de costo y durabilidad apreciablemente menores, cuyas ventajas básicas sean las de permitir una rápida introducción de la tecnología solar en aplicaciones industriales y poder proceder a la incorporación de mejoras sobre la base de la experiencia ganada, sin por ello aumentar el gasto global a lo largo de la vida útil del complejo.

Para estimar el área que se debe cubrir con estanques, impusimos como condición la de poder calentar durante el trimestre Noviembre-Enero la totalidad del agua necesaria en la planta de concentración a la temperatura final requerida, fijando los valores correspondientes en 1,5 millones de litros y 60 C. Como eficiencia del sistema adoptamos la calculada teóricamente por el grupo del LLL para una región de insolación similar en el hemisferio norte; para estanques con una capa invernadero sobre el colector y temperatura media diurna de 22 C,

la eficiencia es de 55%⁽⁺⁾. Como radiación solar global promedio en el trimestre considerado, se utilizó 634 cal/cm²-día, obtenido a partir de los valores experimentales publicados para las ciudades de Mendoza y San Martín⁽²⁾. Si se supone una temperatura inicial del agua de 13 C, el área a cubrir resulta:

$$A = \frac{V \rho c_p \Delta T}{K_d \eta_d} = \frac{1,5 \cdot 10^9 (\text{cm}^3/\text{día}) \cdot 1 (\text{g}/\text{cm}^3) \cdot 1 (\text{cal}/\text{g}\cdot\text{C}) \cdot 47 (\text{C})}{634 (\text{cal}/\text{cm}^2\text{-día}) \cdot 0,55} = 20.000 \text{ m}^2,$$

donde el significado de los términos del segundo miembro es obvio. Considerando un factor de aprovechamiento del terreno de 60%, se requerirá disponer de un área total de 3,3 hectáreas. La altura del agua en los estanques resulta de 7,5 cm.

Para el resto del año, de los modos posibles para la operación del sistema de estanques de 20.000 m², consideramos dos extremos. En el primero, fijamos como condición calentar el agua a 60 C; en la Tabla 1 consignamos las fracciones del volumen total de agua requerida para las cuales es posible satisfacer esta condición en las diversas épocas del año. En el segundo modo, impusimos como condición la de calentar toda el agua requerida; las temperaturas alcanzables dependerán de la estación. En el rango de temperaturas aquí considerado, el gasto en el sistema convencional de calentamiento es función del salto de temperatura y no de la temperatura inicial del agua, mientras que la eficiencia del sistema solar disminuye al aumentar la diferencia entre T_{H₂O} y T_{amb.}. Consecuentemente, el segundo modo de operación resultará más conveniente, ya que con él se logra una mayor eficiencia global de calentamiento. Las experiencias que se describen a continuación, se programaron suponiendo la adopción de este modo operativo.

4. Descripción de los Estanques Playos Utilizados

Las variantes de estanques playos que hemos ensayado hasta ahora están es-

(+) La eficiencia diaria (η_d) dada en la Ref. 1 se define como el calor total absorbido por el agua del estanque a lo largo de un día para llevar su temperatura al valor máximo, dividido por la integral de la radiación solar global incidente sobre el estanque desde la salida a la puesta del sol,

quematizadas en la Fig. 1. El agua se encuentra dentro de bolsas playas de PVC, lo cual evita su evaporación a medida que se calienta. Fueron construídas (por la firma Plásticos Riga) con una pared transparente y otra negra que actúa como convertidor de la radiación solar en calor; en estos ensayos, están aisladas del terreno mediante polietileno expandido (telgopor). Se prevé, además, un invernadero que podrá: (a) ser solidario con la bolsa, formando a su vez una segunda cavidad llena de aire que lo mantiene, o (b) independiente de la bolsa. Si las bolsas se disponen con la parte convertidora hacia abajo, las pérdidas de su cara exterior son minimizadas y la capa transparente produce efecto invernadero. Si, en cambio, se coloca la pared negra hacia arriba, no sólo se pierde el efecto invernadero, sino que también la cara exterior del convertidor queda directamente expuesta a pérdidas por radiación y convección. En la primera disposición el agua homogeniza su temperatura por circulación convectiva natural, mientras que en la segunda se produce un significativo gradiente de temperaturas entre las capas superior e inferior del agua.

De entre los plásticos transparentes de producción nacional, se prefirió utilizar PVC y no polietileno porque: (a) la temperatura a la cual el polietileno se ablanda y deforma es de sólo 40 C, mientras que el PVC permite alcanzar 80 C sin inconvenientes; (b) la resistencia del polietileno transparente a la acción oxidante de los agentes atmosféricos y al daño producido por la radiación UV es marcadamente menor que la correspondiente del PVC normal; (c) el PVC puede ser formulado especialmente para prolongar su vida útil incorporándole antioxidantes e inhibidores de radiación UV y, además, se lo puede formular con aditivos que lo hagan opaco al infrarrojo cercano; en cambio la formulación normal del polietileno no es modificable para mejorar sus características (por lo cual se le agrega negro de humo para extender su vida útil); (d) en el espesor de $\sim 200 \mu\text{m}$ requerido para dar apropiada resistencia a las bolsas en su tamaño definitivo, el polietileno deja de ser transparente para pasar a traslúcido.

El PVC transparente normal obtenible en plaza tiene una vida útil al aire libre de unos 2 años, lapso tras el cual se hace quebradizo y se opaca. Además, el material es permeable al agua poniéndose blanquecino con la que queda ocluida en él. Este efecto se puede eliminar pintando al PVC con una capa de cloruro de vinilideno polimerizado. A nuestro pedido, la compañía VINISA S.A.I.C. produjo una formulación de PVC con antioxidante e inhibidores de UV; asimismo, incluye aditivos que mejoran las condiciones de transparencia para el espectro visible y de

opacidad para el infrarrojo cercano propias del PVC normal y lo hacen impermeable al agua. Si bien aún no se elaboró lámina de PVC con este compuesto, la mencionada firma informó que los ensayos de laboratorio son satisfactorios y hacen prever una prolongación de la vida útil en un factor 2-3; el valor definitivo de este factor deberá ser confrontado con el incremento de costo del PVC especial en relación al normal, todavía no establecido.

El tipo de invernadero solidario con la bolsa, fue confeccionado con la misma lámina de $200 \mu\text{m}$ de PVC transparente utilizado para las bolsas. El tipo separable se construyó plano, por simplicidad y para permitir una rápida evaluación de la influencia de la altura del invernadero sobre el comportamiento de las bolsas; fue realizado en dos versiones, con lámina de PVC y con chapa plástica rígida de alto impacto.

El área de todas las bolsas en estudio se definió colocándolas dentro de marcos de madera de 84 cm x 127 cm y la altura del agua en su interior se fijó en 10 cm mediante un nivel, con lo cual el contenido es de ~ 100 litros. Se comprobó la repetibilidad del volumen de agua en cada bolsa para varios llenados sucesivos, midiendo efectivamente la cantidad de litros en cada caso; para alturas de 10 cm, la repetibilidad fue mejor que el 0,5 % y para alturas de 5 cm, mejor que el 1 %.

Si bien se niveló cuidadosamente el piso que soporta las placas de telgopor, deformaciones y discontinuidades de éstas hacen que las indicaciones de un nivel apoyado en ellas varíen según dónde sea colocado aquel. El error en la determinación de los volúmenes relativos de agua en las diversas bolsas debido a esto, no supera el 3 %.

A fin de tener la misma temperatura inicial en todas las bolsas en experimentación, se las llena simultáneamente desde un distribuidor. En todos los casos, antes de iniciar las experiencias, se limpiaron todas las superficies expuestas. Las temperaturas fueron medidas con un juego de termómetros de exactitud verificada.

5. Resultados experimentales

Las diversas bolsas, todas construídas con el PVC normal obtenible en plaza, recién estuvieron disponibles en Febrero del corriente año. A continuación describiremos las experiencias realizadas con ellas.

A. Si bien el análisis cualitativo hecho al comienzo de la Sección 3 indica la conveniencia de disponer las bolsas con la capa negra hacia abajo, efectuamos experiencias para confirmarlo, operando bolsas en esa disposición y con la capa negra hacia arriba. En la Fig. 2 (a) se muestran las temperaturas alcanzadas a lo largo de un día del mes de Febrero, para el caso de bolsas con invernadero; se observa que el salto de temperatura ΔT es 30 % mayor para la bolsa con la pared superior transparente. Resultados similares se obtuvieron para operación sin invernadero.

B. Se estudió la influencia de la capa invernadero adicional, registrando el comportamiento de bolsas con y sin invernadero. En la Fig. 2 (b) se muestra que, para un día invernal sin viento y una altura de invernadero de 16 cm, ΔT es 21 % mayor para la bolsa con invernadero.

C. Como mencionamos, el PVC normal no es impermeable, lo cual, en las bolsas con invernadero solidario acarrea el inconveniente de que el agua que atraviesa la pared superior de la bolsa, tras evaporarse, se condensa en microgotas sobre la cara interior del invernadero, produciéndose una capa reflectante. Para estudiar la influencia de esta capa, se construyó una bolsa cuya pared superior se impermeabilizó con Saran^(†). Los resultados mostrados en la Fig. 2 (d) son típicos e indican que la capa reflectante sólo produce una disminución relativamente pequeña de ΔT (9 % en este caso).

D. Dado que se preve un ancho de algunos metros para cada estanque, la superficie de los invernaderos no podrá ser plana, pues en ese caso requeriría soportes fuertes para poder resistir el peso del agua de lluvia o de la eventual nieve acumuladas. Una superficie curva resultará económicamente conveniente. Con esa geometría, la distancia entre la bolsa y el invernadero variará a lo ancho del estanque y las pérdidas por conducción-convección podrían depender de la distancia al eje longitudinal del estanque. Experiencias realizadas con invernaderos de techo plano a distintas alturas sobre las bolsas, no mostraron diferencias en ΔT , dentro de los errores experimentales (Fig. 2 (c)). Esto concuerda con los resultados obtenibles a partir de la expresión empírica que vincula al coeficiente de transferencia de calor por convección-conducción h_c con la distancia entre bolsa

(†) Polímero de cloruro de vinilideno, obtenido por gentileza del Dr. J.L. Huguet, Gerente de Desarrollo de la Compañía Ducilo.

o invernadero (Ref. 3). En la Fig. 3 mostramos las curvas que calculamos para las condiciones de nuestro interés. Se observa que, si bien para cualquier época del año a alturas superiores a 2,5 cm las variaciones son pequeñas, la transmisión por convección disminuye al aumentar la altura.

E. Los invernaderos solidarios a bolsas del tamaño previsto para el sistema de Tierra Pintada, presentan el inconveniente de que para la reparación de roturas o pinchaduras producidas en ellos, usualmente será necesario retirar de operación al estanque correspondiente. Asimismo, la detección de pequeños orificios no será fácil, y ello puede conducir al desinflado del invernadero afectado u obligar a la inyección continua de aire en él. Mucho más expeditivo será reemplazar un invernadero separable (o una sección de éste, si es construido apropiadamente por partes yuxtapuestas) que hubiese sufrido daño. En este contexto, el conjunto de curvas (c) y (d) de la Fig. 2, muestra que aun un invernadero solidario tratado con impermeabilizante, no presenta ventajas sobre uno separable.

F. Dado que en la zona de Sierra Pintada graniza y nieva, es necesario proteger los invernaderos contra lo primero y suministrar un sistema de soporte adecuado para lo segundo. Para el granizo es posible cubrir los invernaderos con mallas antigranizo, que se usan en la zona para proteger la vid. Aún no hemos realizado experiencias sobre la disminución de la intensidad de radiación solar provocada por estas mallas. Una alternativa posible es utilizar chapas plásticas translúcidas de poliestar reforzado con fibra de vidrio. Hemos efectuado experiencias preliminares con chapa marca Vetroplast, tipo standard, con la cual observamos una disminución en ΔT del 5-10 %, respecto a invernaderos de PVC.

G. Dado que para estas primeras experiencias no dispusimos de un solarímetro apropiado para medir la radiación global, calculamos eficiencias diarias a partir de los datos de K^+ suministrados por la estación Villa Ortúza del S.M.N., a 6 km de la Sede Central de la CNEA, en cuya azotea se realizaron las mediciones descriptas. Los valores de n_d así obtenidos resultaron elevados (ver, p.ej., Tabla 2, en la cual se los consigna para los conjuntos de curvas (b), (c) y (d) de la Fig. 2.

6. Desarrollos previstos

Se estudiará el efecto de los depósitos decantados sobre el fondo de las bolsas y de la suciedad depositada sobre los invernaderos, lo mismo que el de ma-

llas antigranizo. Por otra parte, se experimentará el PVC especialmente formulado al cual nos referimos en la Sección 4 y se ensayarán invernaderos hechos con chapa de poliestar rígido de mayor transparencia y menos espesor, posiblemente obtenibles en plaza con la calidad requerida. Además, se experimentará con distintos espesores del agua en las bolsas.

Se iniciará el análisis de sistemas de almacenaje para el agua calentada y de métodos apropiados para la preparación del terreno en Sierra Pintada.

De ser posible, en la próxima temporada veraniega se montarán en Sierra Pintada prototipos de estanques de tamaño apreciablemente mayor que el de los utilizados. Para ese entonces se espera disponer de solarímetros apropiados y de un sistema automático de registro de temperaturas basado en el uso de termistores.

Hacia fines de 1975, se efectuaron estimaciones gruesas que indicaron la viabilidad económica del proyecto. Ante la persistente situación de inestabilidad y de desajuste relativo de los precios en el país, no se intentó profundizar en este aspecto. Es de esperar que la evolución de la situación económica permita realizar una evaluación más detallada dentro de poco tiempo, lo cual, por otra parte, se verá facilitado al irse concretando la selección de los materiales a utilizar.

Agradecimientos

La tarea descripta se encaró a iniciativa del Dr. M.B. Crespi, jefe de la Actividad Prospectiva de la CNEA, tras su visita al Lawrence Livermore Laboratory, a quien agradecemos también su constante aliento y apoyo.

Agradecemos la intensa colaboración prestada por el Sr. R. Wainschenker (estudiante de física) y por los miembros de la División Ingeniería del Departamento de Física de la CNEA, en particular, a los técnicos J. Vidallé y J. Cava, al Sr. E. Garay y al Ing. R. Requejo, jefe de la División. Asimismo, estamos reconocidos al Sr. C. Bolaños y al Ing. J. Mónico por desarrollos electrónicos efectuados y al técnico J. Prieto, quien realizó los dibujos.

Referencias

- 1) W.C. Dickinson, A.F. Clark, J.A. Day, A.I. Iantuono, R.E. Parsons, D.V. Chakidis, W.G. Gensler, and W.L. Ahlgren; LLL-Sohio Solar Process Heat Project; Report N°1, UCID-16630-74-1 (November, 1974); Report N°2, UCID-16630-2 (May, 1975); Report N°3, UCID-16630-3 (April, 1976).
W.C. Dickinson and R.D. Neifert; "Parametric Performance and Cost Analysis of the Proposed Sohio Solar Process Heat Facility", Informe UCRL-51783 (April, 1975).
- 2) M.C. de Kurlat y R.O. Fernández; "Radiación Solar Global en la Argentina"; Acta Científica N°19, del Observatorio de Física Cósmica, San Miguel (Bs. As.), (1970).
- 3) H. Buchberg, I. Catton, and D.K. Edwards; "Natural Convection in Enclosed Spaces- A Review of Application to Solar Energy Collection"; trabajo presentado en una reunión de la Amer. Soc. Mech. Eng., paper 74-WA/HT-12 (1974).

Tabla 1

Período	K_t a)	T_i b)	η_d c)	v d)	h e)
	($\text{cal}/\text{cm}^2\text{-día}$)	(C)	(%)	(%)	(cm)
Nov.-En.	634	13	55	100	7,5
Febr.-Abr.	463	9	49	60	4,5
Mayo-Julio	252	4	20	12	0,9
Ag.-Oct.	435	-8	52	60	4,5

- a) Radiación solar global promedio del trimestre para las estaciones de Mendoza y San Martín (Ref. 2).
 b) Temperatura inicial del agua.
 c) Eficiencia diaria para temperatura final del agua de 60 C (Ref. 1).
 d) Fracción del volumen total del agua requerido que es calentado a 60 C.
 e) Altura del agua en los estanques, para lograr 60 C.

Tabla 2. Eficiencia Diaria

Curvas de Fig. 2	Mes	K_t a)	$T_{\text{máx.}}$	ΔT b)	η_d
		($\text{cal}/\text{cm}^2\text{-día}$)	(C)	(C)	(%)
(b)	Julio	259	27	18	67
		259	25	16	57
(c-d)	Mayo	212	34	15	66

- a) Radiación solar global suministrada por la estación Villa Ortúza, del S.M.N..
 b) Incremento de temperatura logrado durante el día.

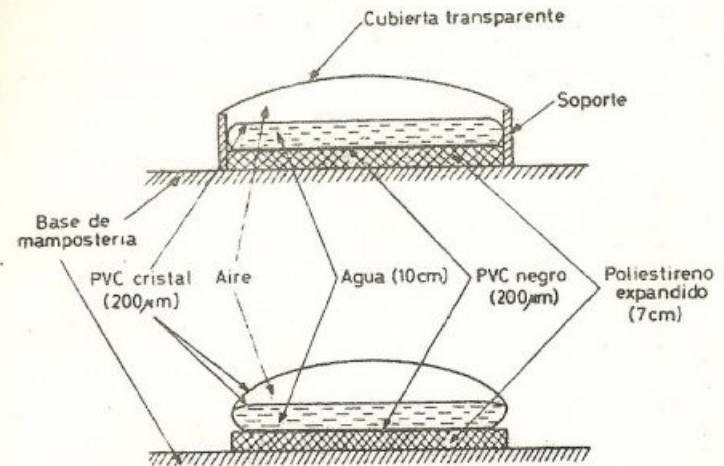


Fig. 1: Esquema de estanques playos

- Fig. 2: Temperatura del agua en función de las horas del día. (a) Comparación del comportamiento de bolsa con capa superior transparente y fondo negro con bolsa con capa superior negra. (b) Comparación del comportamiento de bolsa con y sin invernadero, ambas con fondo negro y capa superior transparente. (c) Comparación del comportamiento de calentadores con invernaderos a diferentes alturas. (d) Comportamiento de calentadores con y sin condensación de agua en la parte interior de los invernaderos.

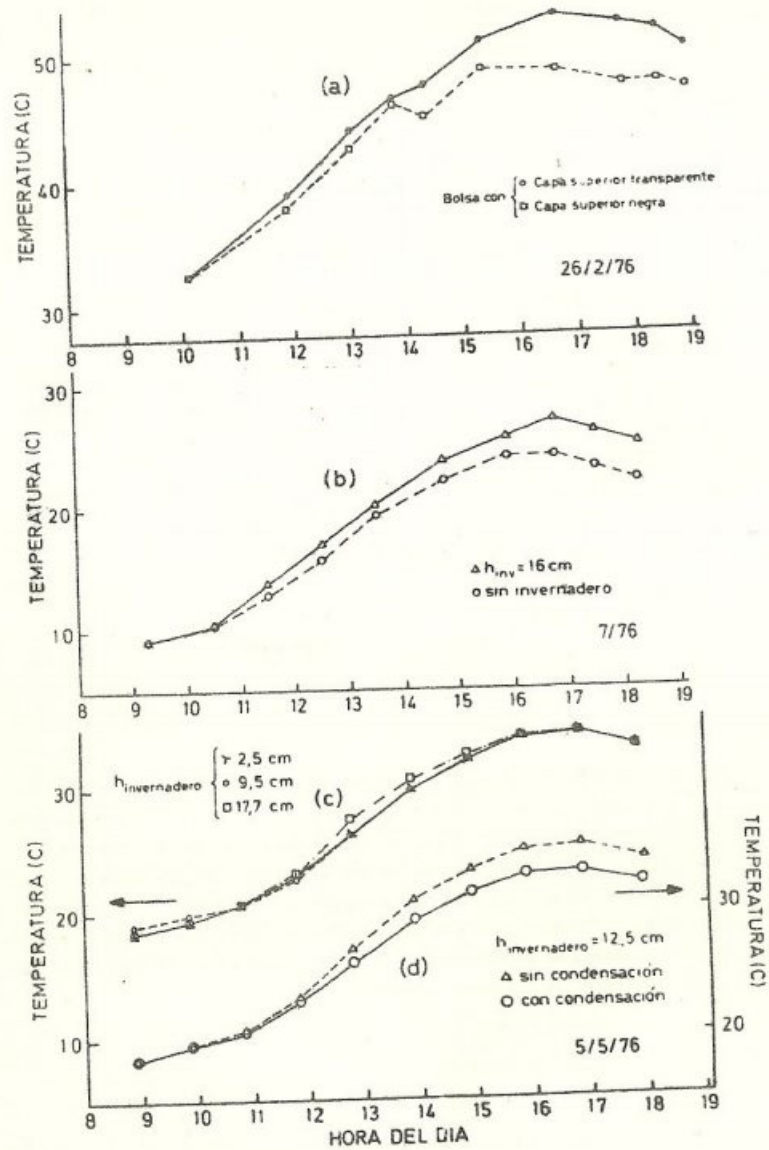


Fig. 2.

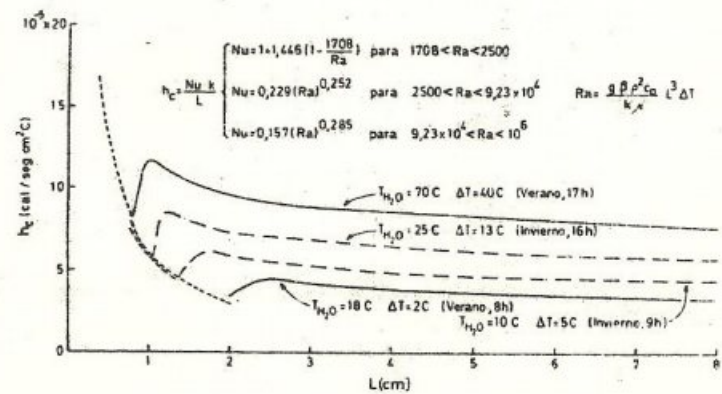


Fig. 3: Coeficiente de transferencia de calor por convección-conducción h_c en función de la altura L del invernadero. Como ejemplo se indican casos extremos de temperaturas del agua y de diferencia ΔT de temperatura respecto a la del invernadero. Las líneas punteadas corresponden a la zona en la que la transferencia de calor se hace sólo por conducción. Los parámetros usados para el cálculo (Ref.3) tienen el siguiente significado: Nu = número de Nusselt; k = conductividad térmica del aire; Ra = número de Rayleigh; g = aceleración de la gravedad; β = coeficiente de expansión volumétrica del aire; ρ = densidad del aire; c_p = calor específico del aire; μ = viscosidad del aire.