

MODELO DE LABORATORIO DE UNA POZA SOLAR

por

Bruné L. A., Saravia L. R. y Bekerman C.

Departamento de Ciencias Exactas  
Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177  
4400 Salta  
Argentina

RESUMEN

Un modelo de laboratorio de una poza solar es analizado teórico y experimentalmente. El estudio teórico del estado estacionario y el oscilatorio a largos plazos es analítico y tiene en cuenta las pérdidas laterales de calor en una aproximación en la que se supone que las superficies isotérmicas son planos horizontales. El estudio experimental se realiza en una poza de 1600 cm<sup>2</sup> de superficie y 40 cm. de profundidad. Se obtienen los perfiles de temperatura con y sin extracción de calor en el fondo. El acuerdo con los resultados teóricos es aceptable.

I - 1

## 1.- Introducción.

Las pozas solares, en las que la radiación solar es recogida en el fondo de la poza y la convección en la masa de agua se evita mediante un gradiente de concentración salino, fueron propuestas en el decenio 1950-60 [1,2] .

Se han publicado diversos estudios acerca de su utilización en conjunto con procesos de extracción de sales [3,4] , como /// fuentes de calor para producción de energía eléctrica [5] , o para calentamiento habitacional [6] . Sus principales ventajas radican en el bajo costo de construcción y en la combinación colector-acumulador que su diseño supone.

Varias pozas, con superficies que oscilan entre las decenas y los miles de metros cuadrados, han sido construidas con el propósito de estudiar soluciones para los diversos problemas técnicos que el funcionamiento del sistema produce, tales como el mantenimiento del gradiente salino, duración de los materiales de construcción, extracción del calor, influencia de vientos, crecimiento de productos orgánicos, depósitos de polvo, etc.

Usmanov et. al. [7] han propuesto y experimentado el uso de pozas a escala de laboratorio, iluminadas con luz artificial. // Las ventajas de este enfoque radican en un acortamiento sustancial del período de tiempo necesario para las pruebas, de meses a días, gracias a la posibilidad de utilizar fuentes de iluminación más intensas y períodos porcentuales diarios de iluminación mayores; inversiones sustancialmente menores en la construcción del sistema; y posibilidades de mayor control de las condiciones de radiación bajo las cuales funciona la poza.

Se han propuesto estudios teóricos, tanto analíticos [6,8,9] como computacionales [10] con el fin de determinar los perfiles de temperatura dentro de la poza, ya sea con o sin extracción y en diversas condiciones: estacionarias, oscilatorias provenientes de las variaciones diarias o anuales; o no estacionarias durante la entrada en régimen del sistema. Las soluciones propuestas suponen que las superficies expuestas a la radiación son lo // bastante grandes frente a las superficies laterales, como para / que las pérdidas laterales de calor sean despreciables. En el caso de los modelos de laboratorio la situación se invierte y las pérdidas laterales pueden llegar a ser importantes.

En este trabajo se realiza el estudio teórico y experimental del perfil de temperaturas para el caso en que existen pérdidas laterales. En el análisis teórico se utilizará la hipótesis simplificativa de que las superficies isotérmicas son planas, reduciendo el problema a un caso unidimensional. Esta aproximación / se justifica en el caso de modelos de laboratorio porque las dimensiones transversales son pequeñas, produciéndose caídas de // temperatura chicas a lo largo de un plano horizontal, en comparación con las caídas de temperatura sobre la aislación externa. / El estudio que se realiza es analítico, siguiendo las líneas generales propuestas por Rabi y Nielsen [6], para el caso de una poza sin pérdidas laterales. Las soluciones obtenidas son comparadas con los resultados experimentales, para una poza en la que se ha colocado una aislación térmica lateral moderada. Algunos / de los resultados experimentales fueron objeto de una publicación preliminar [11].

En la sección 2 se plantea la ecuación que gobierna el fenómeno y en las secciones 3 y 4 la solución para los casos estacionario y oscilatorio. En la sección 5 se detalla el modelo de la // laboratorio utilizado y se comparan las medidas experimentales con el cálculo teórico. Finalmente, en la sección 6 se comparan las soluciones obtenidas con las del caso sin pérdidas.

## 2.- Planteo del problema.

La Fig. 1 muestra un esquema del modelo de poza solar. Una / lámpara con reflector parabólico suministra un haz luminoso de / rayos aproximadamente paralelos, que inciden verticalmente sobre la superficie de la poza. La energía incidente por unidad de área en la superficie de la poza,  $H_{(t)}$ , puede variarse cortando la iluminación por tiempos determinados o cambiando la altura entre la superficie de la poza y la lámpara. En el estudio que sigue, se considerará el comportamiento de la poza ante una iluminación estacionaria o una periódica de frecuencia  $\omega$ , por lo que  $H_{(t)}$  se supondrá de la forma:

$$H_{(t)} = H_0 + H_1 \cos(\omega t) \quad (1)$$

Dado que los ensayos tienen una duración típica del orden de las semanas, las frecuencias usuales corresponden a un período de / un día.

El haz incidente es absorbido al penetrar en la solución, // por lo que se tendrá una dependencia de la radiación con la profundidad  $x$  medida a partir de la superficie. La absorción está / determinada por un coeficiente  $\mu$  dependiente de la longitud de / onda de la radiación. A nuestros efectos, será suficiente dividir el rango de longitudes de onda en  $N$  intervalos, identificándolos con una  $i$  que variará entre 1 y  $N$ . En cada uno se supondrá un valor de  $\mu$  constante e igual a  $\mu_i$ , y al porcentaje de radiación en el intervalo  $i$  se le llamará  $\eta_i$ . El haz incidente también sufre una reflexión parcial en la superficie, por lo que sólo se transmitirá un porcentaje  $\mathcal{E}$ . La expresión completa para / la radiación  $H_{(x,t)}$  que llega a la profundidad  $x$  en el tiempo  $t$  será:

$$H_{(x,t)} = \mathcal{E}(H_0 + H_1 \cos(\omega t)) \sum_{i=1}^N \eta_i e^{-\mu_i x} \quad (2)$$

Bajo la acción de la radiación incidente, la solución se calentará. Se admitirá que las isotermas en la solución son superficies planas y horizontales, a pesar de que existan pérdidas laterales. / Sea  $T_{(x,t)}$  la temperatura a profundidad  $x$  y tiempo  $t$ . La descomposición de  $T$  en sus componentes estacionaria y oscilatoria será:

$$T_{(x,t)} = T_0(x) + T_1(x) \cos(\omega t - \delta(x)) \quad (3)$$

admitiéndose la existencia de un desfase  $\delta(x)$  en la componente oscilatoria. Las temperaturas en la superficie y en el fondo se identificarán con subíndices  $s$  y  $f$  respectivamente. La poza está aislada en las paredes, con un material de espesor  $e_p$  y conductividad térmica  $K_p$ . El material aislante del fondo puede ser distinto, teniendo espesor  $e_f$  y conductividad  $K_f$ . Se supondrá que / el aire se encuentra a una temperatura  $T_a$  y que la aislación del fondo se apoya sobre una superficie a temperatura constante  $T_e$ .

La ecuación que gobierna las variaciones de temperatura en / la poza es:

$$c_p \rho A \frac{\partial T}{\partial t} = K_w A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - K_p p \frac{T - T_a}{e_p} - A \frac{\partial H}{\partial x} \quad (4)$$

donde  $A$  es el área de la poza,  $p$  su perímetro y  $c_p$ ,  $\rho$  y  $K_w$  el / calor específico, la densidad y la conductividad térmica de la / solución, supuestas constantes.

Si se define la longitud  $d_0$  como:

$$d_0^2 = \frac{K_w A e_0}{K_p p} \quad (5)$$

la ecuación se puede escribir en la forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{C_0 p}{K_w} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{d_0^2} T = \frac{1}{K_w} \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{d_0^2} T_a \quad (6)$$

En la superficie se supondrá que la temperatura de la solución es conocida y de la forma:

$$T_s(0, t) = T_{0s} + T_{1s} \cos(\omega t - \delta_s) \quad (7)$$

En los modelos de poza la temperatura de la superficie puede estar a varios grados por encima de la temperatura ambiente, debido a que las condiciones de ventilación no son las ideales y el porcentaje de radiación infrarroja en las lámparas usadas es bastante mayor que en el caso del sol. Dado que las condiciones de evaporación que determinan  $T_s$  no se conoce bien, se supondrá que  $T_s$  es conocido y se determinará por vía experimental.

En el fondo se supondrá que la radiación incidente se absorbe completamente y que existe una posible extracción por unidad de superficie, de la forma:

$$\mathcal{H}_0(t) = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_1 \cos(\omega t - \delta_{\mathcal{H}_0}) \quad (8)$$

El balance de calor en el fondo será:

$$H(l, t) = K_w \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} + K_f \frac{T - T_a}{e_f} + \mathcal{H}_0(t) \quad (9)$$

donde  $l$  es la profundidad de la poza.

### 3.- El caso estacionario.

En lo que sigue la solución se planteará para un solo término en la suma que define  $H(x, t)$ , sumándose al final, una vez // que se haya obtenido la solución buscada. En el caso estacionario la ecuación se reduce a:

$$\frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2} - \frac{1}{d_0^2} T_0 = - \frac{\mathcal{H}_0 + H_0 p}{K_w} e^{-\mu x} - \frac{1}{d_0^2} T_a \quad (10)$$

Esta es una ecuación de segundo orden a coeficientes constantes y // no homogénea. La solución general es la suma de una función // homogénea  $T_{0h}(x)$  y una no homogénea  $T_{0nh}(x)$  de la forma:

$$T_{0h}(x) = c_1 e^{x/d_0} + c_2 e^{-x/d_0} \quad (11)$$

$$T_{0nh}(x) = B e^{-\mu x} + D \quad (12)$$

Las constantes B y D se determinan por sustitución en la ecuación (10) y las constantes  $c_1$  y  $c_2$  a posteriori, por sustitución en las condiciones de borde (7) y (9). El cálculo algebraico es largo pero no tiene problemas. La solución final puede // descomponerse en tres términos:

$$T_0(x) = T_0^{(1)}(x) + T_0^{(2)}(x) + T_0^{(3)}(x) \quad (13)$$

El primero depende de las temperaturas conocidas  $T_{0s}$ ,  $T_a$  y  $T_e$ . Si llamamos:

$$R(x) = \text{Ch}\left(\frac{l-x}{d_0}\right) + \frac{K_f d_0}{K_w e_f} \text{Sh}\left(\frac{l-x}{d_0}\right) \quad (14)$$

se tiene:

$$T_0^{(1)}(x) = T_a + (T_{0s} - T_a) \frac{R(x)}{R(0)} - \frac{K_f d_0}{K_w e_f} \frac{\text{Sh}(x/d_0)}{R(0)} (T_a - T_e) \quad (15)$$

El segundo depende de la extracción de calor  $\mathcal{H}_0$ :

$$T_0^{(2)}(x) = - \frac{d_0 \mathcal{H}_0}{K_w} \frac{\text{Sh}(x/d_0)}{R(0)} \quad (16)$$

Finalmente, el tercero depende de la radiación incidente  $H_0$ . Si llamamos:

$$N(x) = -R(x) + R(0) e^{-\mu x} + \left( \mu d_0 - \frac{K_f d_0}{K_w e_f} \right) \text{Sh}(x/d_0) e^{-\mu l} \quad (17)$$

se obtiene:

$$T_0^{(3)}(x) = \mathcal{H}_0 \frac{H_0 d_0}{K_w} \left[ \frac{\text{Sh}(x/d_0)}{R(0)} e^{-\mu l} - \frac{\mu}{d_0 \mu^2 - 1/d_0^2} \frac{N(x)}{R(0)} \right] \quad (18)$$

Es de observar que para el caso en que  $\mu = \frac{1}{d_0}$ , la solución no homogénea buscada no es válida, ya que uno de los denominadores en la ecuación (18) se hace infinito. En esas condiciones / debe buscarse una solución de la forma:

$$T_{0nh}(x) = B x e^{-\mu x} + D \quad (19)$$

Ello cambia la forma de la expresión para  $T_0^{(3)}(x)$ , la que ahora será:

$$T_0^{(3)}(x) = \frac{H_0 k}{2 K_w} \left\{ \frac{x}{l} e^{-\mu x} + \frac{\text{Sh}(x/d_0)}{R(0)} e^{-\mu l} \left[ \frac{d_0}{l} + \mu d_0 - \frac{h_0}{p d_0} \right] \right\} \quad (20)$$

En aquellos casos en que  $\mu$  tenga un valor muy cercano a  $\frac{1}{d_0}$ , el uso de la expresión (18) puede dar lugar a errores numéricos importantes, debido a que tendremos numeradores y denominadores / con valores casi nulos. En esas circunstancias convendrá utilizar la ecuación (20).

#### 4.- El caso oscilatorio.

En este trabajo no se encarará el estudio de la entrada a / régimen del sistema. En cambio, se considerará a continuación el comportamiento oscilatorio a tiempos largos, que nos permite estudiar las variaciones de temperatura en la poza debidas a variaciones diarias o anuales de radiación.

En el planteo general de la sección 2 se admitió una variación periódica, de la frecuencia  $\omega$ , tanto en la radiación incidente como en la extracción de calor. Ello da lugar a una variación de igual frecuencia en la temperatura  $T$  que se introdujo a través de un módulo  $T_1(x)$  y un desfase  $\delta(x)$ . La ecuación (6) determinará, en conjunto con las condiciones de borde, estas // dos funciones. La determinación de la solución se facilita si / las variaciones temporales se expresan en forma compleja. La // parte oscilatoria de la radiación se dará como  $H_1 e^{i\omega t}$  y la de la temperatura como  $T_1^{(c)}(x) e^{i\omega t}$  donde:

$$T_1^{(c)}(x) = T_1(x) e^{-i\delta(x)} \quad (21)$$

Algo similar se hará con las restantes variables. Al introducir estas expresiones en la ecuación (6), ésta se reduce a:

$$\frac{1}{K_w} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathcal{D} H_1 \sum n_i e^{-\mu_i x} \right) = \frac{d^2 T_1^{(c)}}{dx^2} - \left( \frac{1}{d_0^2} + \frac{i\omega}{\alpha} \right) T_1^{(c)} \quad (22)$$

donde  $\alpha$  es la constante  $\rho \cdot c_p / K_w$ .

Las condiciones de borde tomarán la forma:

$$T_1^{(c)}(0) = T_{1s}^{(c)} \quad (23)$$

$$\mathcal{D} H_1 \sum n_i e^{-\mu_i l} = K_w \left. \frac{dT_1^{(c)}}{dx} \right|_{x=l} + K_f \frac{T_1^{(c)} - T_{e1}^{(c)}}{e_f} + \frac{H_0(c)}{1} \quad (24)$$

Como se puede apreciar por simple inspección, estas expresiones son equivalentes a las del caso estacionario, con la única diferencia de que el coeficiente  $1/d_0^2$  de la ecuación (10), está reemplazado por  $\frac{1}{d_0^2} + \frac{i\omega}{\alpha}$ , lo que dará lugar a componentes imaginarias. Por tanto, las expresiones (15), (16) y (18) para la solución del caso estacionario serán aplicables aquí.

No se intentará separar en forma analítica el módulo  $T_1(x)$  y la fase  $\delta(x)$ , debido a que lo engorroso de las expresiones vuelve más práctico el cálculo numérico en cada caso concreto.

#### 5.- El modelo experimental.

Un modelo de laboratorio como el esquematizado en la Fig. 1 fue construido con el fin de poder comparar los resultados experimentales con el análisis teórico desarrollado en las secciones anteriores.

La poza es de sección cuadrada, de 40 cm. de lado, y su profundidad es también de 40 cm. Se utilizó una solución de NaCl // que se colocó en la poza en 6 capas cuya concentración varió desde 0% en la capa superior hasta 16% para la inferior. La superficie se cubrió con una capa de plástico transparente (mylar) para evitar que se ensuciase el sistema, y reducir en parte las pérdidas por evaporación.

La iluminación fue provista por una lámpara de cuarzo-yodo / de 2000 w de potencia, en combinación con un reflector parabólico. Visto el exceso de radiación infrarroja que daba la lámpara, se colocó un filtro de vidrio que cortaba el infrarrojo muy lejano. Los intervalos de longitud de onda utilizados en el cálculo teórico, el coeficiente de absorción  $\mu$  y el porcentaje de radiación

ción en cada uno de ellos, figuran en la Tabla I. Este espectro es bastante distinto al solar debido a la temperatura relativamente baja de la lámpara, lo que da lugar a una proporción mucho mayor de radiación infrarroja. El nivel total de radiación que llegaba a la superficie de la poza era de 1,55 ly/min. La experiencia se realizó con un ciclo de iluminación en el que la lámpara se mantenía prendida durante 16 horas y apagada en las 8 siguientes.

La aislación colocada fue de poliestireno expandido, con un espesor de 6 cm. Se eligió un espesor más bien pequeño con el fin de apreciar debidamente el efecto de las pérdidas laterales. En el fondo de la poza se colocó una chapa a la que se soldó un caño en forma de serpentín con el fin de realizar la extracción de calor. La cantidad de calor extraído se varió cambiando el flujo de agua en el serpentín. Las temperaturas a distintas alturas y en la superficie de la poza fueron tomadas con termocuplas de cobre-constantán encapsuladas en vidrio.

La Fig. 2 muestra la variación de la temperatura en el fondo de la poza durante los días de entrada a régimen del sistema. Una vez alcanzado el régimen se tomaron los datos para un día y se calcularon los valores medios de la temperatura a distintas alturas así como la amplitud y desfase de la primer armónica correspondiente al ciclo de 24 horas. El mismo cálculo se llevó a cabo para el sistema en régimen con dos extracciones distintas de calor en el fondo. Los resultados para los valores medios se muestran en la Fig. 3, donde se comparan con los resultados teóricos. Estos fueron obtenidos en base a los datos de radiación y aislación térmica utilizados en el experimento y que se detallan en la Tabla I. El único resultado experimental utilizado como parte del cálculo teórico es la temperatura de superficie, cuya evaluación teórica se ve dificultada por el fenómeno de evaporación superficial.

#### 6.- Resultados teóricos.

A continuación se utilizarán las expresiones teóricas obtenidas en la sección 3 con el fin de comparar los perfiles de temperatura en distintas condiciones.

En la Fig. 4 se comparan los perfiles de temperatura para diversas pozas trabajando en idénticas condiciones con la sola excepción de la aislación, donde se han colocado distintos espesores del mismo material.

Las condiciones elegidas son idénticas a las de trabajo del modelo experimental de la sección anterior. La comparación con las temperaturas en una poza sin pérdidas muestra que las caídas de temperatura son significativas, aún para espesores apreciables.

Cuando se diseña una experiencia en el modelo, se intenta reproducir las condiciones de una poza real en la cual las pérdidas son despreciables. En la Fig. 5 se compara el perfil obtenible en una poza sin pérdidas en la que se ha obtenido una temperatura de fondo de 69,1°C con el perfil en una poza con pérdidas (espesor de aislación igual a 6 cm.) que tiene la misma temperatura de fondo. Se ha supuesto que la intensidad luminosa en el modelo fue graduada para obtener igual temperatura de fondo que en la poza real. Como se puede apreciar, las diferencias de temperatura en el perfil son mínimas. En el cálculo correspondiente a la poza real se supuso que el espectro luminoso era el mismo que el del modelo. Aún cuando se use un espectro solar, las diferencias son pequeñas, como se muestra en la Fig. 6.

#### 7.- Conclusiones.

Los resultados experimentales obtenidos muestran que el análisis teórico predice aceptablemente el fenómeno, tanto en los casos con extracción o sin ella. Los resultados teóricos obtenidos tienden a predecir temperaturas algo mayores en el fondo y menores en la superficie. Ello puede deberse a una estimación por defecto del contenido de radiación infrarroja en el espectro de la lámpara.

La comparación entre los resultados teóricos en pozas de laboratorio y en pozas reales muestran que las diferencias en los perfiles de temperatura son pequeñas, permitiendo un análisis experimental en laboratorio de diversos problemas de funcionamiento de una poza. Los resultados teóricos permiten diseñar el modelo con el fin de obtener condiciones específicas de temperatura.

En las experiencias realizadas el exceso de radiación infrarroja de la lámpara usada produjo un aumento de la temperatura / superficial mayor que el aconsejable. Ello puede ser eliminado / mejorando la ventilación o utilizando una lámpara más adecuada.

T A B L A I

DATOS DEL ESPECTRO DE LA RADIACION UTILIZADA EN EL  
MODELO EXPERIMENTAL

Intervalos el long. de onda	Coefficientes de absorción
0.2 - 0.6	0.00032
0.6 - 0.75	0.0045
0.75 - 0.90	0.03
0.90 - 1.20	0.35

Bibliografía

- 1.- Tabor, H. - "Solar Development in Israel", Solar Energy, Vol. 1, N° 3, p. 9 (Oct. 1959).
- 2.- Hirschmann, J., Supression of natural convection in open ponds by concentration gradient, Proc. First Int. Symp. Water Desal., Washington, 1955, p. 483.
- 3.- Matz, R. et a ..., The production of salt by means of a Solar Pond, The Chemical eng., p. 81, April 1965.
- 4.- Hirschmann, J., Salt Flats as solar heat collectors for industrial purposes, Solar energy, Vol. 13, p. 83, 1970.
- 5.- Tabor, H., Large area solar collector for power production, Solar Energy, Vol. 7, N° 4, p. 189, 1963.
- 6.- Rabl A. and Nielsen C., Solar Ponds for space Heat. Eng. Solar Energy.
- 7.- Usmanov Yu et al., Heliotechnology, Vol. 4, p. 24, 1971.
- 8.- Weinberger, H., The Physics of the Solar Pond, Solar Energy, Vol. 8, N° 2, p. 45, 1964.
- 9.- Hirschmann, J., Bases teóricas para el diseño de pozas solares con soluciones acuosas de cloruro de magnesio, Conf. L. A. para el estudio de Zonas Áridas, Bs. As., Set. 1963.
- 10.- Bruné L. A. y Saravia L. R., Experimentación con modelo de laboratorio de pozas solares, Primer Congreso de Energía Solar, Bs. As., Abril 1975.

Leyendas de las figuras

- Fig. 1.- Esquema del modelo de una poza solar.
- Fig. 2.- Variación de la temperatura en el fondo de la poza de laboratorio durante los días de entrada a régimen del sistema.
- Fig. 3.- Muestra de perfil de temperatura estacionario experimental para diferentes extracciones de calor en el // fondo. Estos resultados se comparan con el cálculo teórico.
- Fig. 4.- Muestra los perfiles de temperatura para diversas pozas trabajando en idénticas condiciones salvo la aislación térmica.
- Fig. 5.- Se compara el perfil de temperatura en una poza con / pérdidas con el perfil de una sin pérdidas, donde se ha cambiado la radiación incidente de manera que la / temperatura de fondo es la misma.
- Fig. 6.- Se repite el cálculo de la Fig. 5, con el solo cambio del espectro de radiación en la poza real, donde se / utiliza un espectro solar.

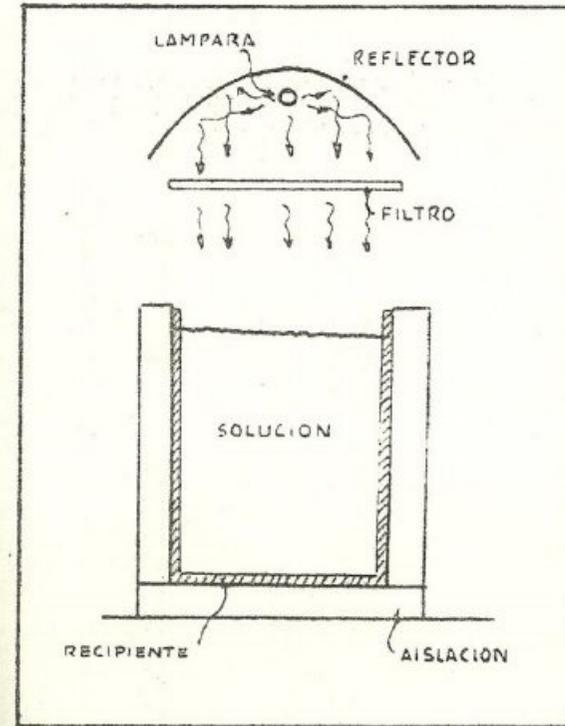


FIG. 1.-

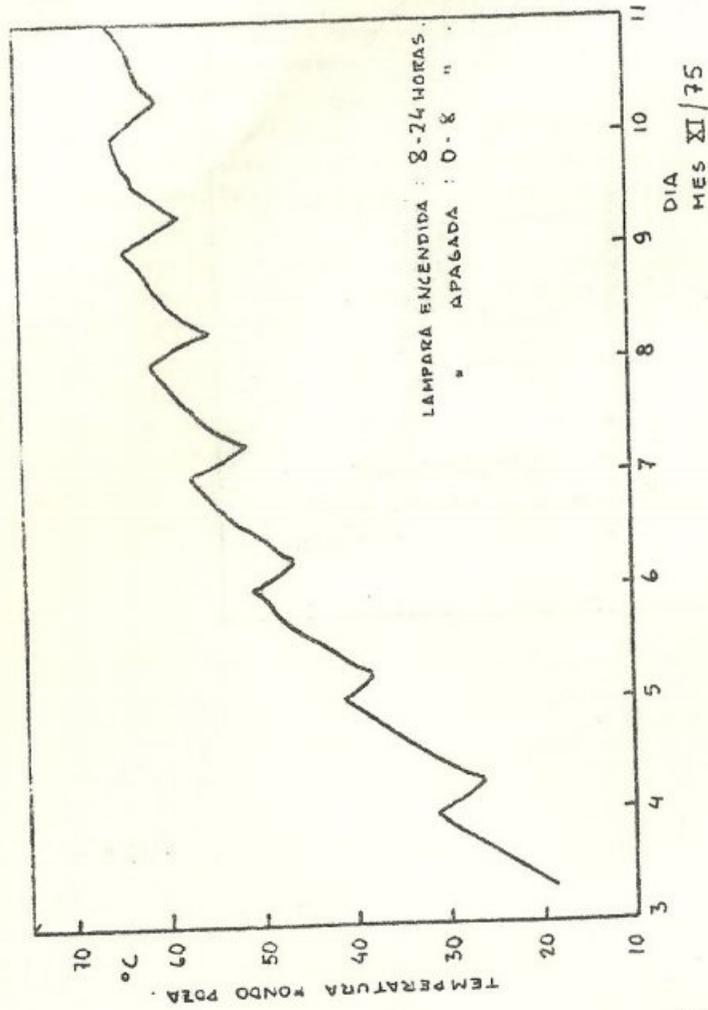


FIG. N° 2.

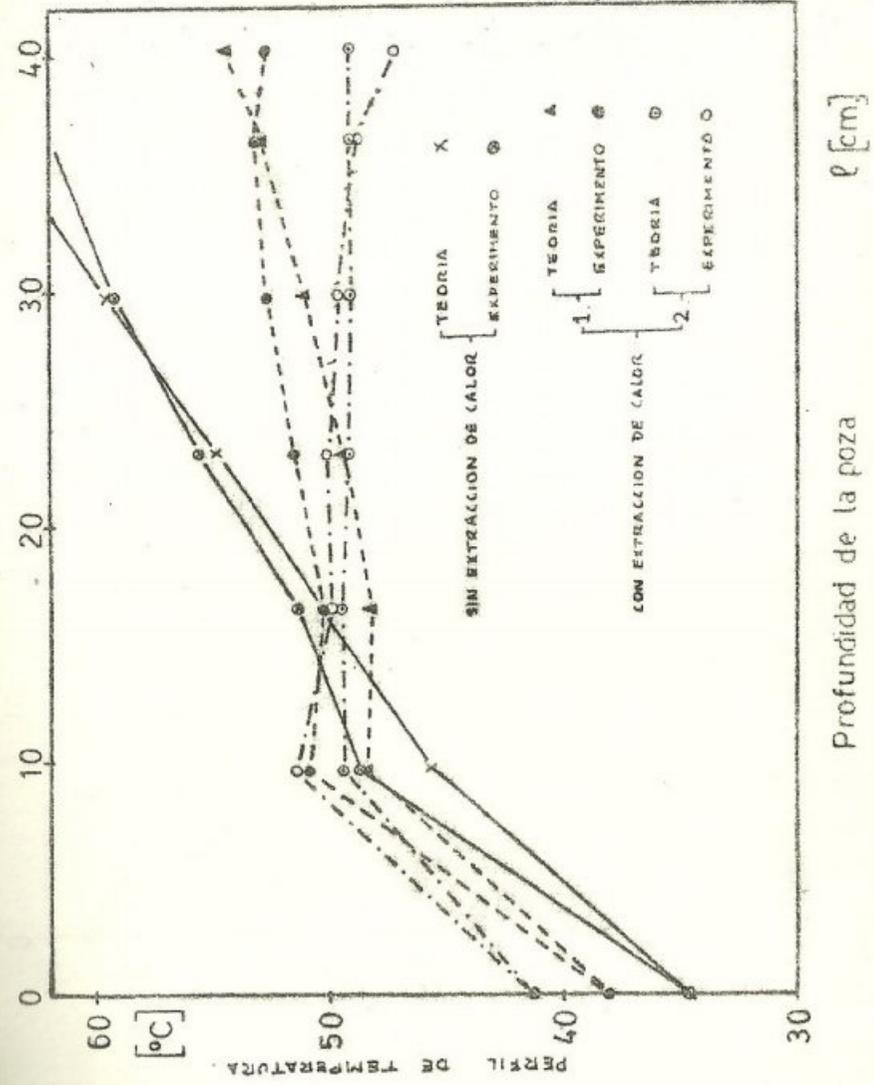


Fig. N° 3

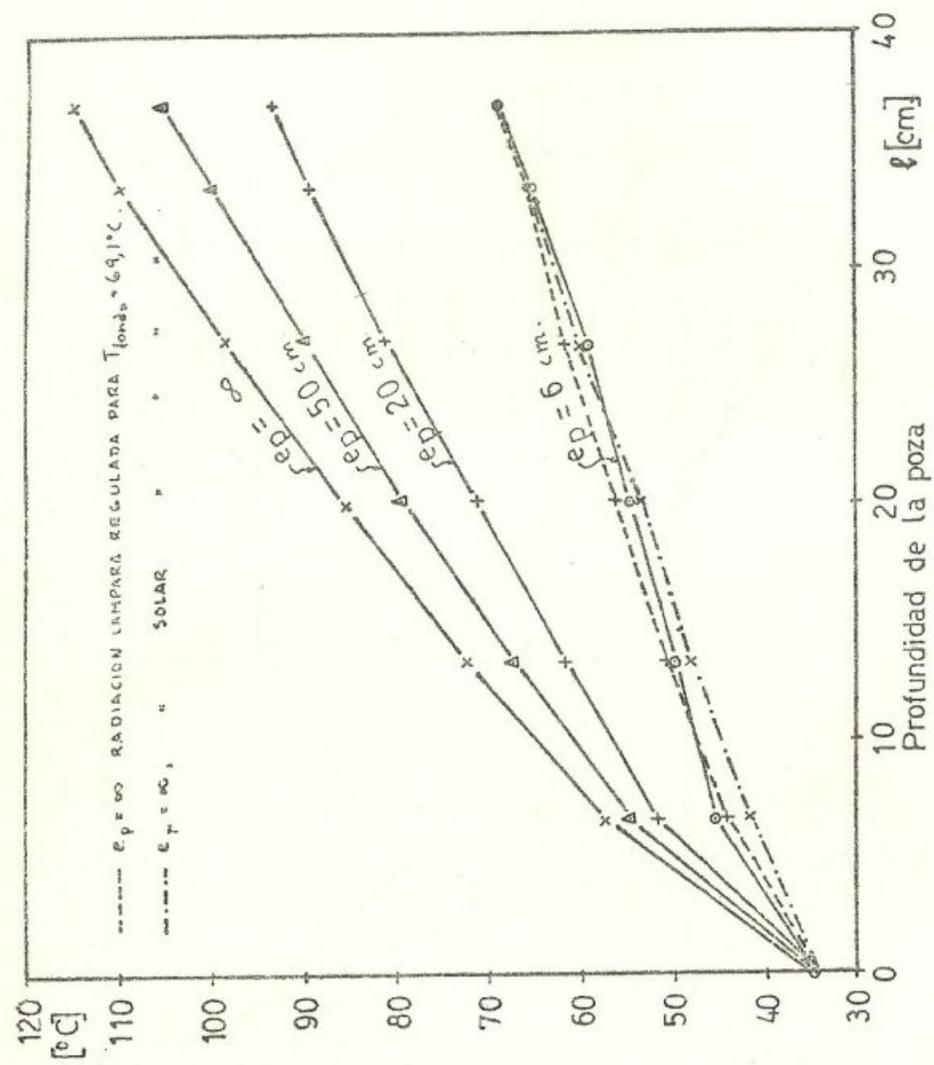


Fig. N° 4,5,6.