

FORMACION DE CAPAS CONVECTIVAS EN POZAS SOLARES DE NaCl

J. Mangussi, G. Lesino
Universidad Nacional de Salta
Departamento de Ciencias Exactas
L. Saravia
Universidad Nacional de Salta
Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales

Resumen:

El control de la formación y crecimiento de capas convectivas en el fondo de las pozas solares es el problema técnico de mayor importancia. Un estudio del tema, realizado sobre modelos experimentales, fue objeto de una presentación anterior.

Aquí se describe un nuevo modelo experimental y los métodos utilizados para la medida de temperatura, gradiente de temperatura y densidad, así como la observación de las líneas de flujo en las capas convectivas. Estos métodos se han aplicado al estudio de pozas de NaCl.

Se describen los resultados en relación con los siguientes puntos: a) los gradientes térmicos necesarios para la formación de capas; b) la velocidad de crecimiento de la capa, su balance térmico y la detección de oscilaciones en dicho movimiento; c) las características hidrodinámicas del flujo de la capa convectiva y en especial la producción de oscilaciones espontáneas en los valores de la temperatura en puntos fijos; d) las características de la interfase que determinan el crecimiento de la capa convectiva.

Se describen estos puntos en relación con el desarrollo de métodos de control del crecimiento de la capa.

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Nacional de Energías No Convencionales (SECYT).

Abstract:

The most important technical problem of the solar ponds as collectors of solar energy is the control of formation and growing of convective layers at their bottom. A study of this subject, was carried out with some experimental models and was presented previously.

The new experimental model, the methods used to measure the temperature, the temperature gradient, the density and the observation of flow lines are described.

The results got related to the next points are described: a) the thermal gradients necessary for the formation of layers; b) the velocity of growing of the layer, its thermal balance and the detection of oscillations in this motion; c) the hydrodynamic characteristics of the convective layer flow and specially the production of the spontaneous oscillations in the temperature values at fixed points; d) the characteristics of the interphase that determine the growing of convective layer.

This work has been supported by the Non Convectonal Energy National Plan (SECYT).

1.- Introducción.

La variación de la densidad de la solución con la profundidad en una poza solar muestra dos regiones de características distintas. En una capa superior, la densidad varía linealmente con la profundidad, permitiendo que esta masa se mantenga estable, sirviendo como aislante a la región inferior. En la segunda capa la temperatura y la densidad son prácticamente constantes, teniendo la masa un movimiento convectivo producido por la radiación solar que llega al fondo. En esta capa se realiza la extracción de calor. De su espesor depende la capacidad de acumulación de la poza, pudiendo llegar a varios metros, de acuerdo a su uso. El espesor de la región convectiva puede crecer a expensas de la capa aislante, lo que disminuye la eficiencia del sistema. El control de este crecimiento es uno de los aspectos técnicos de mayor importancia en relación con un funcionamiento correcto de la poza.

Durante el último par de años ha crecido el interés por este tipo de colector y han entrado en funcionamiento varios sistemas, algunos de los cuales se detallan en la Tabla 1. En ellos se utilizan diversas técnicas para el control de la capa convectiva, los cuales tienen un origen experimental, no existiendo aún una explicación detallada del mecanismo físico de crecimiento.

Un primer estudio sobre el tema fue presentado en un trabajo previo (1) que incluía ensayos experimentales en modelos con soluciones de Na_2SO_4 . Se llegaron a detectar algunos fenómenos en la interfase que requerían un modelo con un control más cuidadoso de sus parámetros físicos e instrumentos de mayor sensibilidad para poderlos estudiar con suficiente detalle. En la primera sección se describe el modelo construido y los instrumentos desarrollados para la medida de la temperatura y concentración. Se han realizado medidas en soluciones de NaCl por ser de manejo y control más sencillas que las de Na_2SO_4 (estas requieren el enfriamiento de la superficie a unos 5°C , complicando el funcionamiento del sistema) y por estar diseñándose una poza de tamaño natural que funcionará con dicha sal.

En las secciones que siguen se discutirán los fenómenos físicos de mayor interés que se han encontrado en las medidas realizadas, en relación con el crecimiento de la capa.

2.- Descripción del modelo experimental.

El modelo construido se esquematiza en la figura 1, consiste en un recipiente de $50 \times 50 \text{ cm}^2$ de sección y 60 cm de altura, con paredes de vidrio y fondo de aluminio de 11 mm de espesor, el que contiene la solución con gradiente salino.

Por debajo de la chapa se ha armado una caja de 5 cm de espesor en la que se colocaron 7 calefactores soportados en tubos de cuarzo. Una fuente regulada (Fotovolt tipo 5240) mantiene constante la potencia entregada. Esta disposición junto con la chapa de buen espesor permiten obtener una temperatura muy constante sobre toda la sección del modelo. Un conjunto de baterías puede reemplazar automáticamente a la fuente regulada en caso de cortes de su ministro de energía eléctrica, manteniendo en marcha la experiencia.

La poza está aislada con un espesor equivalente a unos 10 cm de poliestireno expandido en los costados y en el fondo. La aislación de las paredes está montada sobre una estructura metálica que permite un desarme rápido con el fin de realizar observaciones ópticas de la solución a través de las paredes de vidrio.

El modelo está colocado en una pieza termostaticada con un acondicionador, manteniendo la temperatura ambiente con fluctuaciones menores que 3°C.

El perfil de temperatura, en altura dentro del modelo, se registra en forma continua con un sensor que se levanta o se baja a velocidad constante con un motor y un tornillo. La velocidad es de 4,48 cm/minuto. Se han utilizado tres tipos de sensores. El primero de ellos es una termocupla de cobre-constantán, con una sensibilidad de 40 μ V/°C, la que permite obtener un registro general de todo el perfil de temperatura.

Cuando se requiere mayor sensibilidad con el fin de detectar pequeñas variaciones de temperatura, se recurre a un diodo de silicio como sensor utilizando el circuito que se detalla en la figura 2. Un control de cero permite registrar muy pequeñas variaciones alrededor de una temperatura dada, usando el registrador potenciométrico en una escala de mayor sensibilidad. Se ha calibrado al sensor con un voltímetro digital Systrom-Donner de 1 μ V de apreciación y un termostato Lauda de 0,1°C obteniéndose la siguiente relación lineal:

$$T = 323,48 \text{ } ^\circ\text{C} - (482,41 \text{ } ^\circ\text{C/V}) \cdot V$$

con un coeficiente de correlación de 0,9999, donde T está expresada en °C y V en Volt.

El tercer tipo de sensor permite medir gradientes de temperatura con muy buena apreciación. Está construido con dos diodos de silicio BA 127 colocados a una distancia de 3 mm entre sus centros y conectados eléctricamente de acuerdo al circuito de la Figura 3. La constante que relaciona la temperatura y el voltaje tiene ligeras variaciones de un diodo a otro. Si el sensor se coloca a cero en un ambiente a cierta temperatura constante mediante la resistencia variable R_1 , no lo estará a otra temperatura. Mediante la variación de R_1 y R_4 a distintas temperaturas se logra la corrección del cero en todo el rango de trabajo. La Figura 5 muestra la variación del cero con la temperatura en un sensor sin corregir y una vez corregido. La sensibilidad obtenida es de 6 μ V/°C/m.

El perfil de densidad se obtiene por puntos, colocando un buzo a la altura necesaria y midiendo el empuje con una balanza Mettler H 72 con una apreciación de 0,1 mg. El buzo es una barra de vidrio de 2,5 cm de largo y 1 cm³ de volumen, colgado de un hilo muy fino de nylon. La concentración de NaCl se obtiene como función de la densidad y temperatura. Se ha medido esta relación mediante el buzo descrito, verificándose los datos publicados (2). En este trabajo la mencionada función es utilizada para determinar la concentración midiendo densidades y temperaturas.

Ambos sistemas de medidas están colocados sobre un carro que se mue-

ve en dos dimensiones en un plano horizontal, permitiendo realizar las medidas en cualquier punto de la poza.

En la discusión de los resultados obtenidos es fundamental conocer la potencia térmica entregada q_0 (w/m^2) a la solución a través de la capa de aluminio. Ella no es igual a la disipada en las resistencias eléctricas, q_e , debido a las pérdidas térmicas de la caja. Dado que un espesor de 40 cm de solución equivalen desde el punto de vista de aislación térmica a unos 3 cm de poliestireno expandido, las pérdidas son apreciables aunque se tomen precauciones, q_0 dependerá de q_e y de la diferencia de temperatura entre la chapa de aluminio y el ambiente $T_f - T_a$. Con el fin de determinarla se ha planteado un modelo térmico que tiene en cuenta la masa térmica del aluminio M_{Al} , la de las resistencias M_R , así como los coeficientes de pérdida térmica entre el aire de la caja y la chapa U_{Al} , y entre el aire de la caja y el exterior, U_a , según se esquematiza en la Figura 5.

La expresión para q_0 se obtiene a partir de las ecuaciones diferenciales que gobiernan la transmisión de calor no estacionaria. Realizando algunas aproximaciones se obtiene una expresión algebraica de q_0 en que aparecen la función $T_{Al}(\tau)$ y su derivada. El término correspondiente a esta última es una pequeña corrección y refleja el carácter no estacionario del problema, produciendo alguna acumulación de calor en la masa de aluminio.

$$q_0(\tau) = \frac{U_{Al}}{U_{Al} + U_a} q_e - \frac{U_{Al} U_a}{U_{Al} + U_a} (T_f - T_a) + \left(\frac{U_{Al} U_a M_R}{(U_{Al} + U_a)^2} - M_{Al} - \frac{U_{Al} M_R}{U_{Al} + U_a} \right) \frac{dT_f}{d\tau} \quad (I)$$

Los parámetros se han obtenido ajustando los resultados de ensayos particulares. En uno de ellos se retira la solución y se calienta directamente el aluminio, el que se cubre con aislación. En otro se calienta una capa de agua de 4 cm que convecta manteniendo su temperatura uniforme. Los valores obtenidos son:

$$U_{Al} = 0,70 \text{ watt/m}^2, \quad U_a = 0,23 \text{ watt/m}^2, \quad M_R = 6,04 \text{ watt/m}^2 \cdot \text{C}.$$

El acuerdo entre los resultados de los modelos y el de los ensayos se ilustra en la Figura 6.

La solución con gradiente lineal de concentración, con la cual se comienzan las experiencias es construida mediante un sistema concebido originalmente por Oster (3), el que se ilustra en la Figura 7.

Está constituido por dos tanques, uno con solución de concentración máxima y otro con agua, los que están conectados entre sí. La poza se carga a partir del segundo tanque. A medida que el flujo llena la poza, el primer tanque se va trasvasando al segundo. Si se tiene una buena mezcla en éste, lo que en este caso se logra con una bomba de circulación, es inmediato que se

obtiene una variación lineal de la concentración.

3.- El arranque y crecimiento de la capa convectiva

A continuación se darán los resultados obtenidos durante el arranque y crecimiento de la capa convectiva para uno de los casos en que se han realizado medidas con la frecuencia necesaria como para seguir el fenómeno en detalle.

La distribución inicial de densidad se muestra en la Figura 8, habiéndose colocado una solución de 1.095 gr/cm^3 en el fondo, lo que produce en el espesor de 40 cm el orden de gradiente salino que se utiliza en una poza grande.

La poza fue alimentada con una potencia q_e constante la que luego fue subida dos veces para aumentar la velocidad de crecimiento de la capa convectiva. La energía q que llega realmente fue calculada con la expresión (I) y se muestra en la Figura 8a.

A las pocas horas de funcionamiento se forma la capa convectiva. Este arranque temprano ha sido observado en todas las experiencias. El fenómeno es explicable si se tiene en cuenta que al no existir sal en el fondo, el gradiente salino lineal se modifica de inmediato, de manera que el gradiente sea cero en el fondo. Por otro lado, la temperatura en el fondo se eleva de manera de tener un gradiente térmico igual q_0/k_w , donde k es la conductividad térmica de la solución allí. Al tener gradiente nulo la solución en el fondo se comporta aproximadamente como si fuera un fluido homogéneo calentado desde abajo. Es sabido que su inestabilidad se produce cuando el número de Rayleigh para la capa de interés vale alrededor de 1.700 (4). Para un gradiente q_0/k_w ese valor se alcanza en unos pocos minutos. Aunque el razonamiento es cualitativo, ya que las condiciones de borde no son las mismas, indica claramente el origen del fenómeno.

Por tanto es de esperar que en toda poza de este tipo exista una capa convectiva, por lo que el problema térmico de importancia está centrado en el control de su crecimiento.

La situación puede ser distinta en el caso de las pozas saturadas (5).

En las figuras 9 y 10 se muestran algunos de los perfiles de densidad y temperatura medidos a lo largo del ciclo. Se observa la formación de dos capas convectivas, zonas de temperatura y densidad casi constantes, una en la superficie y otra en el fondo, las que crecen con el tiempo hasta terminar con el gradiente lineal. La capa del fondo crece rápidamente al principio, luego más lentamente hasta llegar a su espesor cuasi-constante a los 12 días. En ese momento se incrementó la potencia con lo que se reinició el crecimiento rápido. Cada vez que se sube la potencia, el gradiente de temperatura pasa por un período no lineal.

Con el fin de determinar con cuidado el espesor de la capa como función del tiempo, medidas del gradiente de temperatura cerca de la interfase capa-zona estratificada. Algunos de los resultados se muestran en la Figura 11, indicando como se define el valor del espesor de la capa. Existe alguna pequeña imprecisión debido a que la forma del perfil, como se ve en la Figura 11, cambia periódicamente.

En la Figura 12 se muestra la variación con el tiempo del espesor de la capa y de su temperatura en la parte del ciclo que comienza después de haber incrementado la potencia por primera vez. Se aprecia que ambas magnitudes presentan un aumento periódico, con un período mayor al comienzo, que va disminuyendo hasta que la capa llega a un estado cuasi estacionario. La detección de este comportamiento es de importancia, ya que podría definir el mecanismo físico que gobierna el aumento del espesor de la capa. Esto será discutido con más detalle en la próxima sección. En las publicaciones solo se ha encontrado una mención respecto a posibles oscilaciones (6), habiendo habido una confirmación personal (7) en el sentido de haber detectado algún indicio de comportamiento de este tipo. La mayor parte de los trabajos han sido efectuados en pozas grandes con condiciones variables que no se prestan a la detección de este fenómeno.

La condición cuasi estacionaria que se llega para una potencia dada con un cierto espesor de capa aún no ha sido estudiada en detalle en el modelo, debido a que es necesario efectuar observaciones por períodos prolongados. Los datos recogidos no permiten decidir si la capa mantiene constante su espesor cuando llega a ese punto. Se observan variaciones erráticas que pueden ser debidas a que aún existen pequeños cambios de algunos parámetros, en especial la temperatura ambiente. Cuando la poza se deja enfriar, la capa descendiendo de tamaño y comienza a estratificarse en forma muy lenta. Es de esperar un fenómeno de este tipo, ya que deja de existir la potencia térmica que induce la circulación convectiva que mantiene a la capa.

La capa convectiva es observable ópticamente a través del costado de la poza. Se puede distinguir la interfase por la reflexión de la luz que en ella ocurre. Si se dejan caer cristales de permanganato en el fondo, ellos tienden lentamente a la capa, la que entonces se distingue de la zona estratificada (este fenómeno lleva alrededor de media hora). El cristal en su caída deja una traza vertical de color rojo. En la zona estratificada ella se mantiene en reposo por un tiempo largo. En la zona convectiva se deforma tomando el aspecto de una S, lo que indica el sentido del movimiento convectivo, hacia un lado cerca de la interfase y hacia el otro en el fondo. La deformación es lenta tomando varios segundos. El movimiento de la capa convectiva es del tipo de celdas de Bénard, y no es sencillo tratar de determinar la forma de ellas. Es conocido que a medida que el número de Rayleigh (R_a) en la capa sube, el movimiento pasa a ser turbulento. En la zona intermedia las magnitudes en la capa sufren oscilaciones con períodos dependientes de R_a (8).

En nuestro caso ha sido posible observarlas manteniendo el sensor quieto en la zona de la capa por períodos prolongados, por lo que se piensa que el movimiento se desarrolla en dicho intervalo de valores de R_a .

4.- Análisis del fenómeno de crecimiento de la capa.

Los detalles del fenómeno de crecimiento de la capa convectiva no son bien comprendidos aún. En un trabajo presentado en la 4a. Reunión de Trabajo de Asades (1) se discutió el punto.

Si se estudia la estabilidad de una poza con gradiente de densidad y temperatura se encuentra que ésta se desestabiliza cuando el factor de estabilidad λ :

$$\lambda = \frac{P_r + 1}{P_r + \sigma} \cdot \frac{R_T}{R_S}$$

es mayor que 1. P_r es el número de Prandtl y σ es la relación entre los coeficientes de difusión térmico y salino. R_T , y R_S son los números de Rayleigh definidos como:

$$R_T = \frac{g \alpha \ell^3 \Delta T}{\kappa \nu} , \quad R_S = \frac{g \beta \ell^3 \Delta S}{\kappa \nu}$$

donde ΔT y ΔS son los saltos de temperatura y concentración en la capa de espesor ℓ , κ el coeficiente de difusión térmica, ν la viscosidad cinemática, y g la aceleración de la gravedad. Se definen α y β como:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_S \quad \beta = \frac{1}{\rho} \cdot \left. \frac{\partial \rho}{\partial S} \right|_T$$

donde ρ es la densidad.

Si se aplica este criterio a una poza de NaCl se encuentra que λ vale del orden de 0,01 y la poza se mantendrá estable. Por otro lado, el criterio supone que todo el espesor comenzaría a convectar.

Con el fin de explicar la posibilidad de formación local de capas, es probable que sea necesario efectuar un análisis como el anterior, teniendo en cuenta la variación local de los parámetros físicos como temperatura y concentración, así como la no constancia de los gradientes.

Recientemente (9) se ha efectuado un análisis detallado de tal tipo que permite aplicar el criterio del factor de estabilidad en forma local. Con el se ha logrado estudiar la formación de inestabilidades a profundidades intermedias en una poza de tamaño grande.

La existencia de un fenómeno periódico en el crecimiento de la capa tal se detalla en la sección anterior, hace pensar que esta se produce por desestabilizaciones periódicas de la zona estratificada que se encuentra adyacente a la capa. La concentración y temperatura delante de la capa evolucionarán hasta darse las condiciones en que se produce una desestabilización de cierto espesor. La zona entraría en movimiento y se incorporaría a la capa aumentando su espesor.

Los perfiles de temperatura y concentración se recompondrían y comenzaría nuevamente la evolución hasta llegar a producir otra vez el fenómeno. Con el fin de comprobar experimentalmente las afirmaciones anteriores, se están estudiando en detalle los perfiles de temperatura y concentración en la interfase capa-zona estratificada durante un período de crecimiento de capa.

Los primeros resultados obtenidos se muestran en la Fig. 13 donde se ven dos perfiles de concentración y tres de gradientes de temperatura medidos

punto por punto en un período de siete horas en el cual se produce el crecimiento de la capa. Ello se aprecia en el gradiente de temperatura cuyo perfil se ha corrido entre las 15 horas y las 21 horas 30 minutos, así como en la concentración cuya dependencia con la distancia muestra una variación brusca del gradiente a las 20 horas 30 minutos. Con el fin de marcar la posición absoluta de los sensores se utiliza como referencia de altura un haz de laser, que figura en las gráficas como haz de referencia.

Sobre la base de estos datos, el factor de estabilidad λ fué calculado a las 17 horas y a las 21 horas como función de la profundidad, mostrándose los resultados en la Figura 14. Se puede apreciar que λ tiene un pico en un valor en la zona donde posteriormente llega la capa, aunque no alcanza a valer 1.

Existen otros hechos experimentales que también indican la existencia de una zona que se desestabiliza. La medida del gradiente punto a punto, debido a oscilaciones en la medida, que son mayores cuando se pasa cerca de la interfase. Tal hecho se ilustra en la Figura 15 donde se ve el registro de gradiente como función del tiempo para distintas profundidades. Al pasar por la zona que coincide con la de máximo λ , las oscilaciones son apreciables, aplacándose rápidamente a ambos lados, tanto en la zona estratificada como en la de la capa. Estas oscilaciones estarían indicando la entrada en movimiento de la región de interés.

La observación óptica directa de las trazas de permanganato muestra la aparición de componentes horizontales de velocidad en la región cuando aún no ha pasado a formar parte de la capa (que se distingue al teñirse).

5.- Conclusiones

En este trabajo se ha puesto en evidencia la existencia de variaciones periódicas en el crecimiento de la capa convectiva del modelo de poza. Se ha interpretado tal fenómeno a través de un mecanismo de desestabilización de la zona estratificada adyacente a la capa, analizándose algunos resultados experimentales que apoyan esta hipótesis.

La clarificación del mecanismo de crecimiento de la capa resulta importante con el fin de analizar y mejorar los métodos que se utilizan en la actualidad para controlar el espesor de la capa en las pozas de tamaño real.

En un futuro inmediato se procurará obtener datos más precisos que permitan comprobar la factibilidad del proceso descrito. Se analizarán los fenómenos de difusión salina y térmica que dan lugar al proceso; se tratará de confirmar lo propuesto desde un punto de vista teórico y se emprenderá un estudio de los procedimientos de control de capa dentro del contexto aquí descrito.

Referencias

- 1 - J. Mangussi, G. Lesino, L. Saravia y A. Ronco, Funcionamiento de un modelo de poza solar con gradiente salino saturado. Actas de la 4a. Reunión de Trabajo de Energía Solar de la ASADES, La Plata (1978).
- 2 - International Critical Tables, vol. 3 pág. 79; vol. 2, pág 327.
- 3 - G. Oster, Density gradients. Scient. Am. 213, 70-75 (1975).
- 4 - J.S. Turner Buoyancy effects in fluids, cap. 7, Cambridge at the University Press (1973).
- 5 - J. Mangussi, L. Saravia, Pozas solares con gradiente salino saturado. Actas de la 3a. Reunión de Trabajo de Energía Solar de la ASADES, Mendoza, pág. 65 (1977).
- 6 - J. Mangussi, G. Lesino, L. Saravia y A. Ronco, Funcionamiento de un modelo de poza solar con gradiente salino saturado, Acta de la 4a. Reunión de Trabajo de Energía Solar de la ASADES, La Plata, pág. 43 (1978).
- 7 - C.E. Nielsen, Non convective Salt Gradient Solar Ponds, (1978), Solar Energy Handbook, ed. Dickinson y Cheremisinoff, Marcel Dekker Inc (1979).
- 8 - C.E. Nielsen, Comunicación privada.
- 9 - P. Bergé, M. Dubois, Etude de la vitesse locale dans L'instabilité convective de Rayleigh - Bénard: les différentes transitions vers la turbulence. Les instabilités hydrodynamiques en convection libre, forcée et mixte. Lectures Notes in Physics, n° 72 (1978).
- 10 - F. Longrando, Tesis (1979), University of New Mexico.

TABLA I

LUGAR	ARSA - (m ²)	FECHA DE TERMIN.	OSO	SAL
Oeste del Mar Muerto Ein Bokek - Israel	7.000	1978	Calefacción y refrigerac. hotel (turbina 5 kw)	
Miamisburg, Ohio-USA	2.000	1978	Calefacción vestuarios (invierno) y pileta (verano)	Na Cl
Sodom, Israel	2.000	1976		Mg Cl ₂
Yavne, Israel	1.500		Genera energía eléctrica (experimental) Turbina 5Kw	
Centre de Recherche So laire-Aquitaine-Francia	1.000		Experimental	
Columbus, Ohio Ohio State University USA	400	en const.	Experimental; agua calien te, lechería	Na Cl
Farm Science Review Ohio State University USA	200	1975	(experimental) secado de grano	Na Cl
Albuquerque, New Mexico USA	175	1975	(experimental) se simuló la extracción de calor para una casa de 185 m ²	Na Cl
Wooster, Ohio USA	155	1975	Calor para un invernadero	Na Cl
Nevada USA		1978	Experimental	Borax Saturada
Des Moines, Iowa USA	60		Demostración	Na Cl

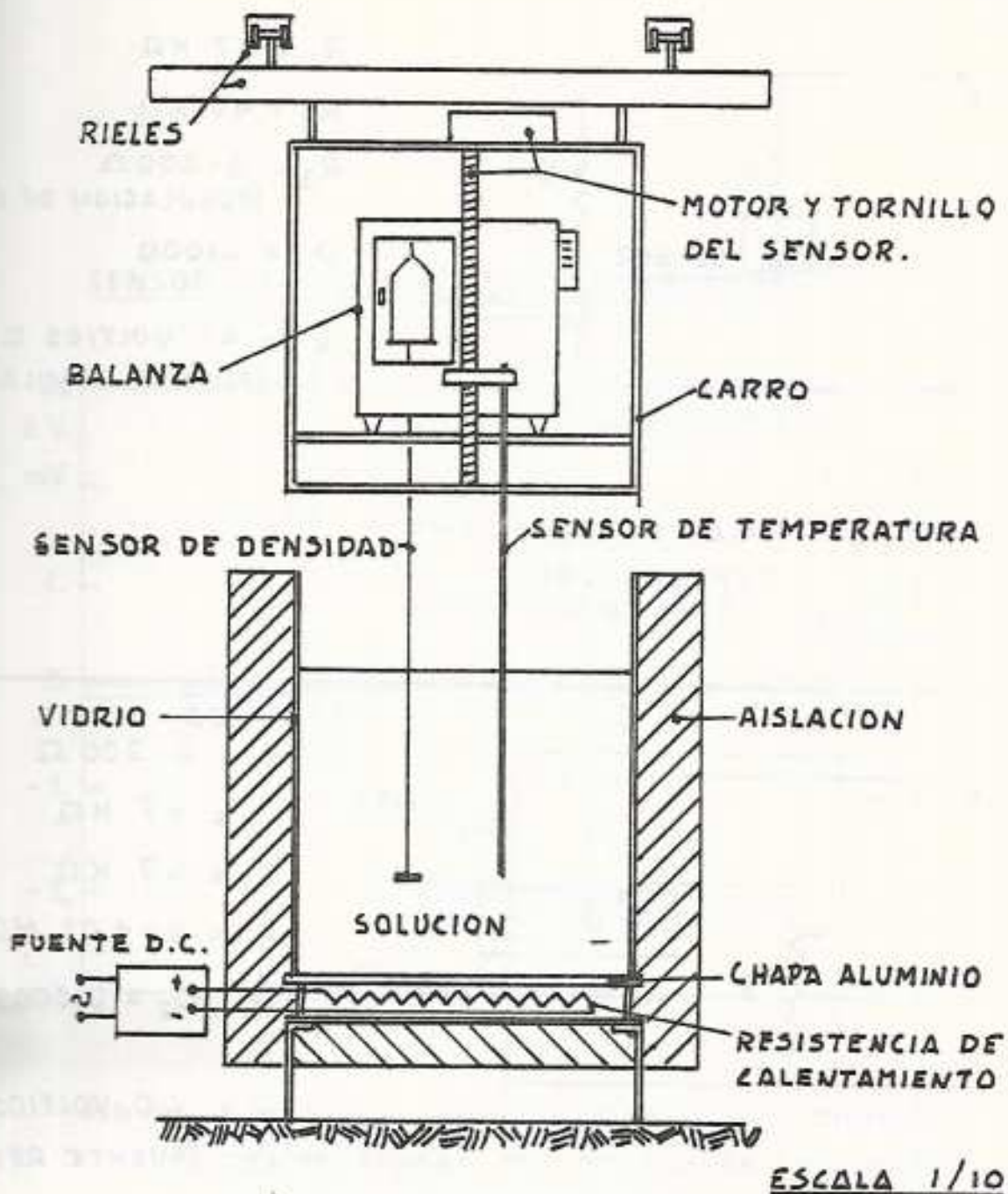
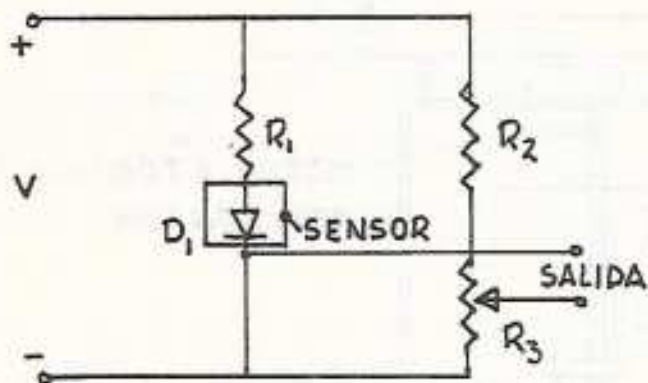
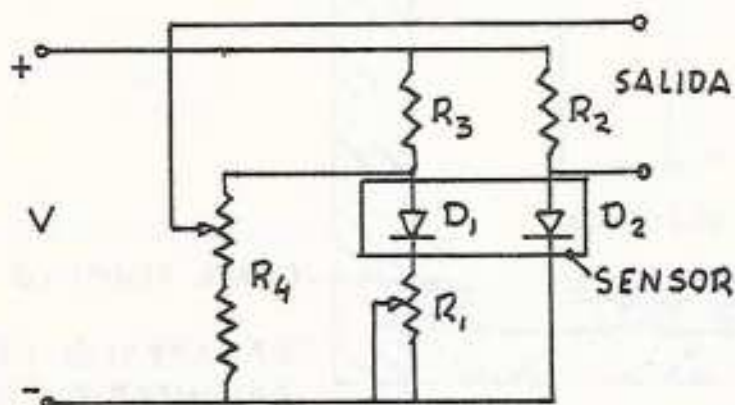


FIG. 1.- ESQUEMA DEL MODELO DE POZA SOLAR Y SUS SENSORES.



$R_1 = 47 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$
 $R_3 = 0-200 \Omega$
 (REGULACION DE CERO)
 $D_1 = \text{DIODO}$
 $V = 40 \text{ VOLTIOS D.C.}$
 (FUENTE REGULADA)

FIG. 2.- CIRCUITO DEL SENSOR DE TEMPERATURA.



$R_1 = 0-200 \Omega$
 $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$
 $R_3 = 47 \text{ k}\Omega$
 $R_4 = 1.-1.02 \text{ M}\Omega$
 $D_1, D_2 = \text{DIODOS}$
 $V = 40 \text{ VOLTIOS D.C.}$
 (FUENTE REGULADA)

FIG. 3.- CIRCUITO DEL SENSOR DE GRADIENTE DE TEMPERATURA.

SENSOR DE GRADIENTE DE TEMPERATURA

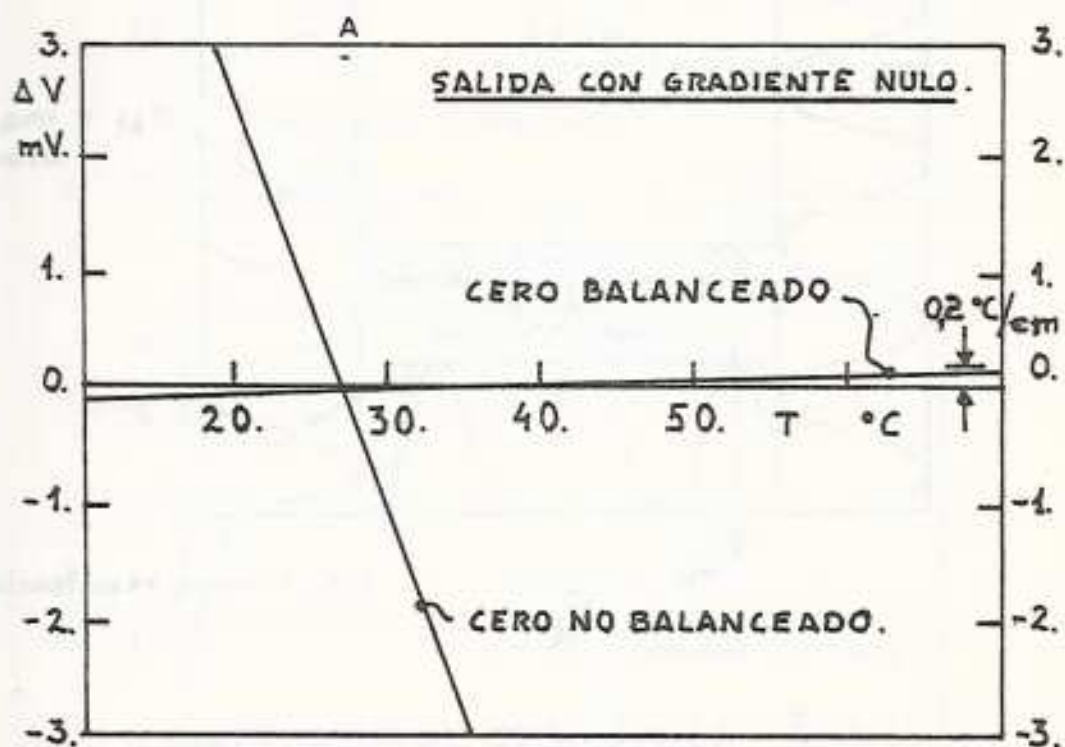


FIG 4.- MUESTRA EL BALANCE DE CERO PARA DISTINTAS TEMPERATURAS DEL SENSOR DE GRADIENTE OBTENIDO POR REGULACION DE LAS DOS RESISTENCIAS.

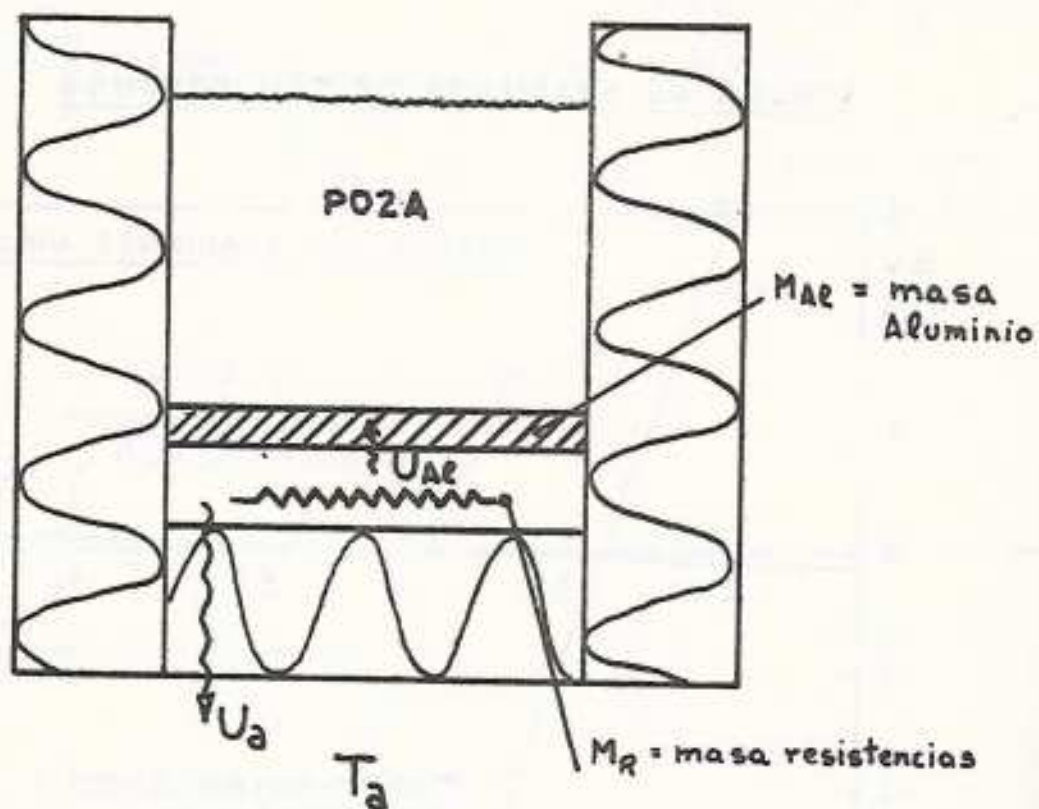


FIG. 5.- ESQUEMA DE LOS PARAMETROS
 QUE DEFINEN EL MODELO TEORICO
 DEL CALENTAMIENTO DE LA POZA.

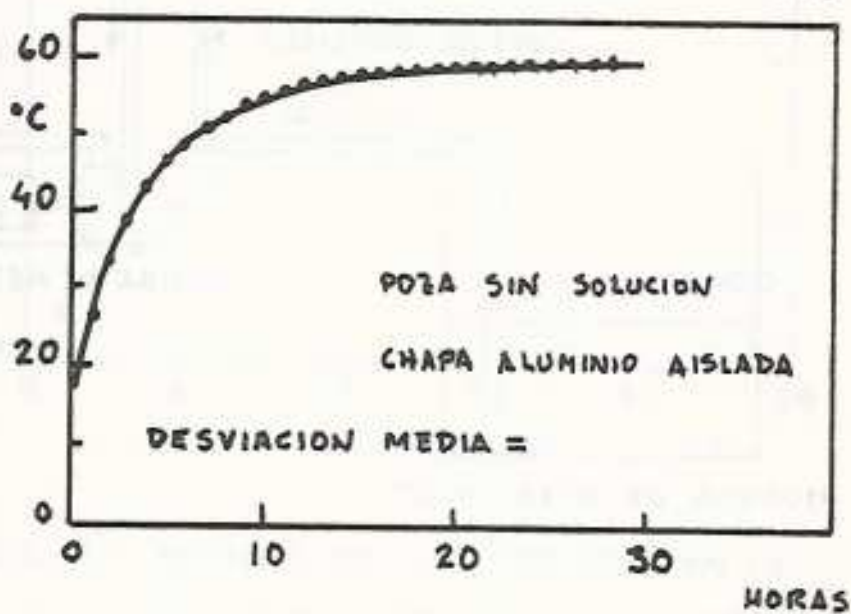
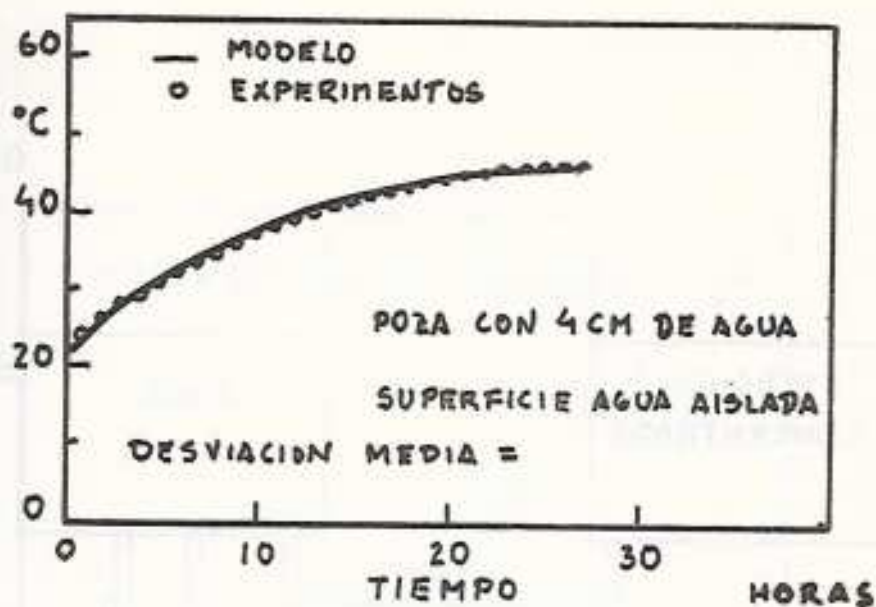


FIG. 6.- COMPROBACION EXPERIMENTAL DEL
 MODELO DE CALENTAMIENTO DE POZA.

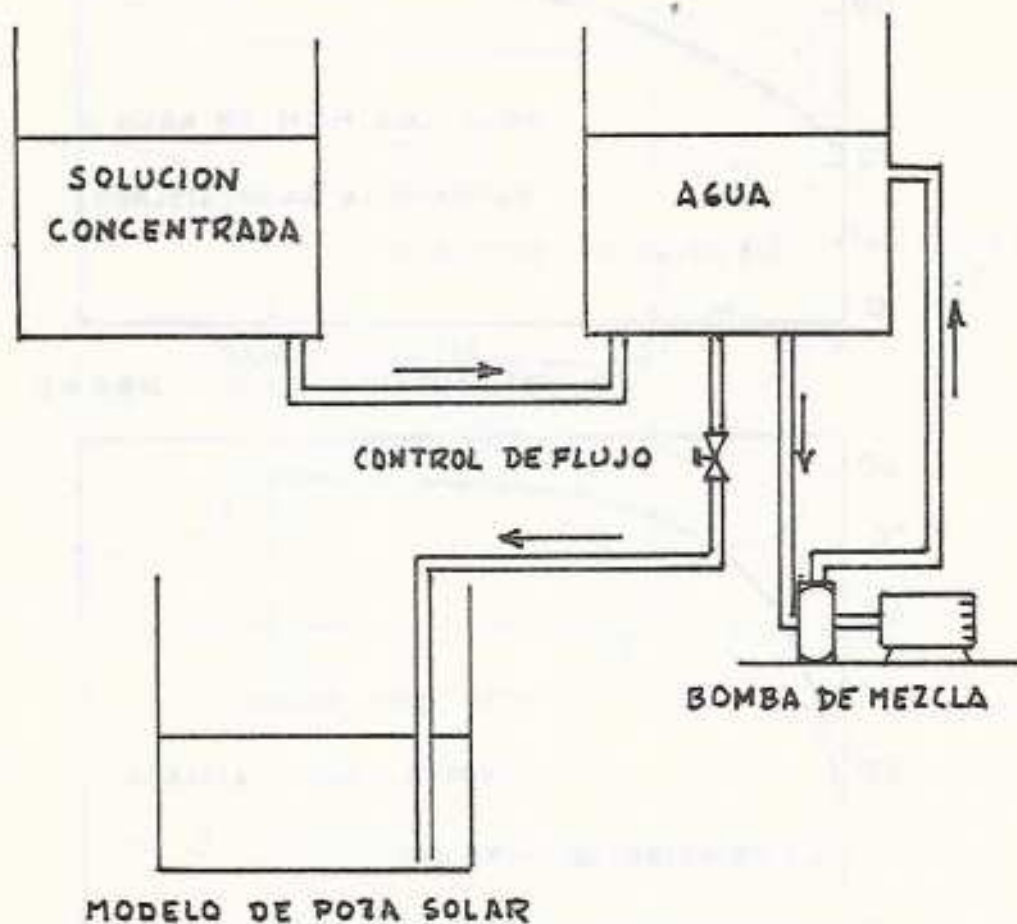


FIG 7 .- SISTEMA DE GENERACION DE UNA SOLUCION CON GRADIENTE LINEAL DE CONCENTRACION.

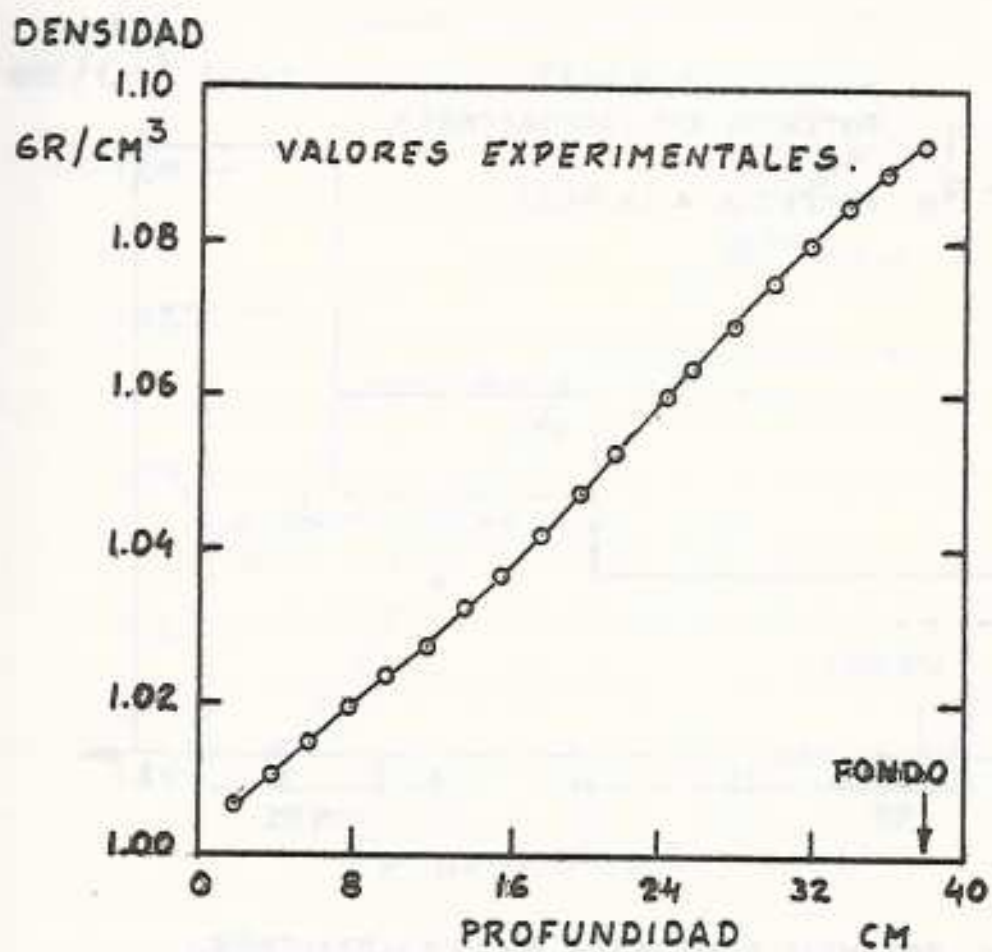


FIG. 8.- MEDIDA DE LA DISTRIBUCION DE DENSIDAD INICIAL EN EL MODELO DE POZA .

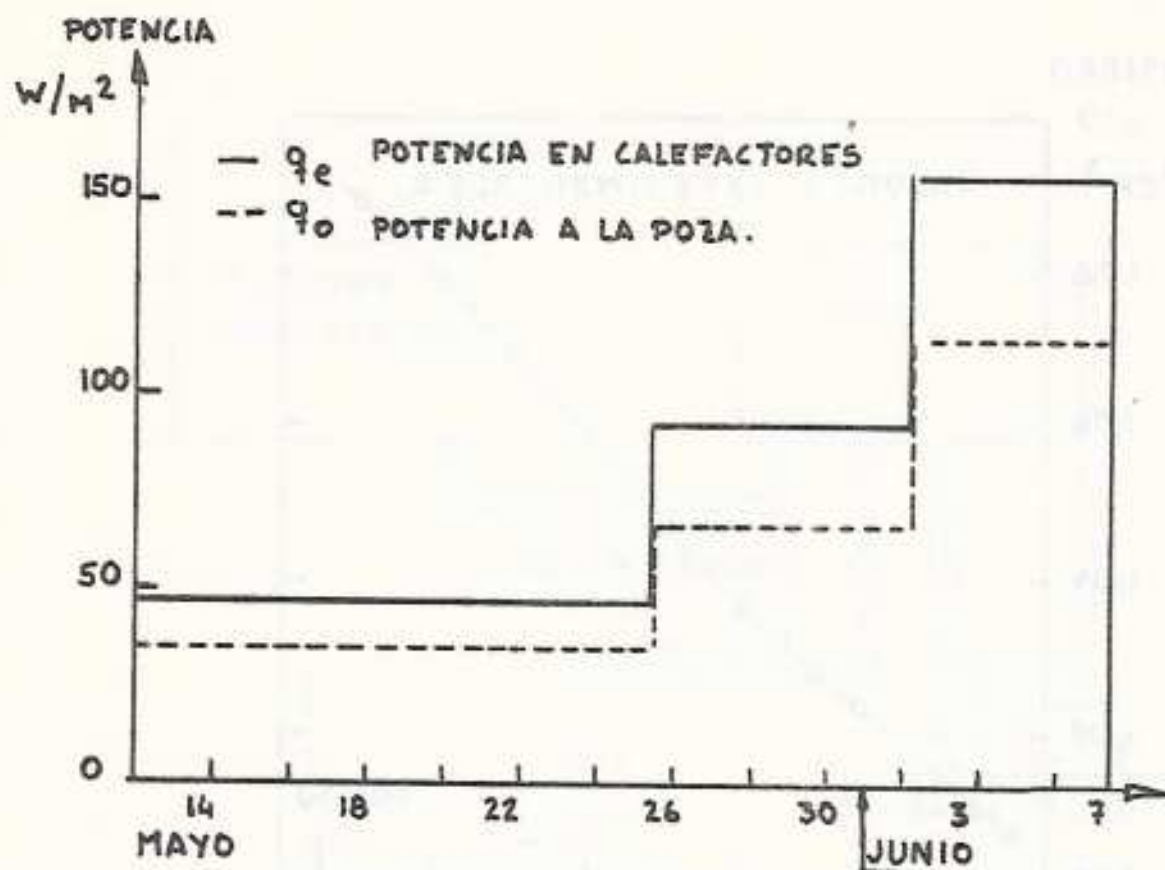
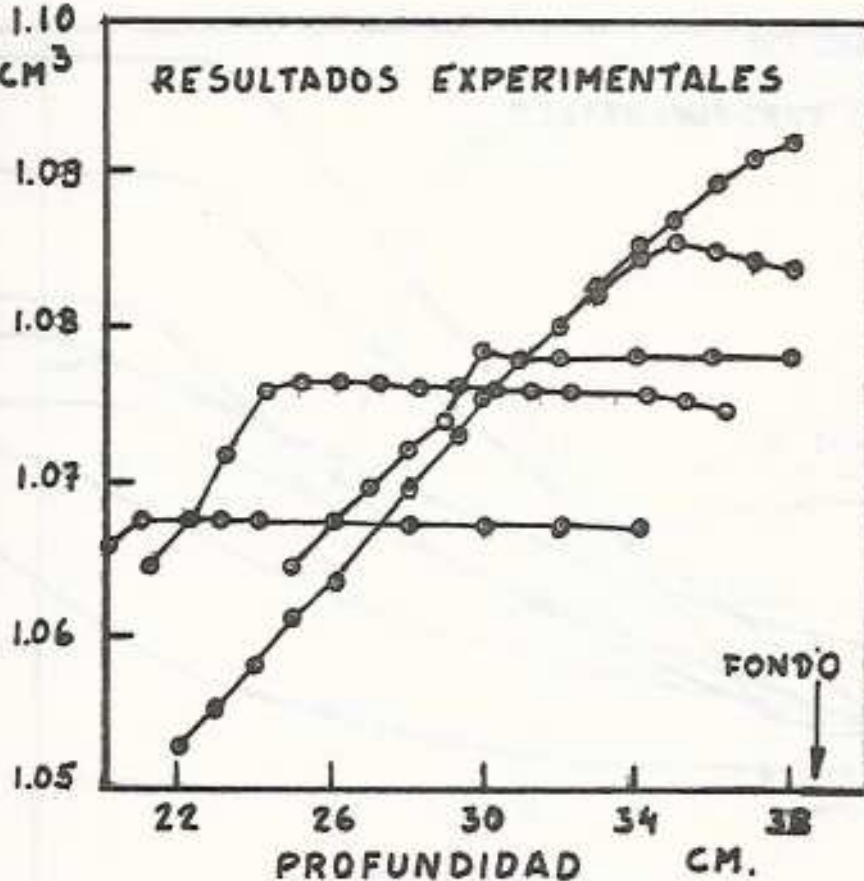


FIG. 8A. POTENCIA ENTREGADA A LOS CALEFACTORES
 Y PORCENTAJE A LA POZA A LO LARGO
 DEL CICLO DE CALENTAMIENTO.

DENSIDAD

1.10
GR/CM³



TIEMPO

00 d. 00 h.

06 d. 06 h.

14 d. 10 h.

19 d. 02 h.

27 d. 00 h.

FIG. 9.- VARIACION CON EL TIEMPO DE LA DENSIDAD EN LA POZA A DISTINTAS PROFUNDIDADES, MOSTRANDO LA FORMACION DE LA CAPA CONVECTIVA.

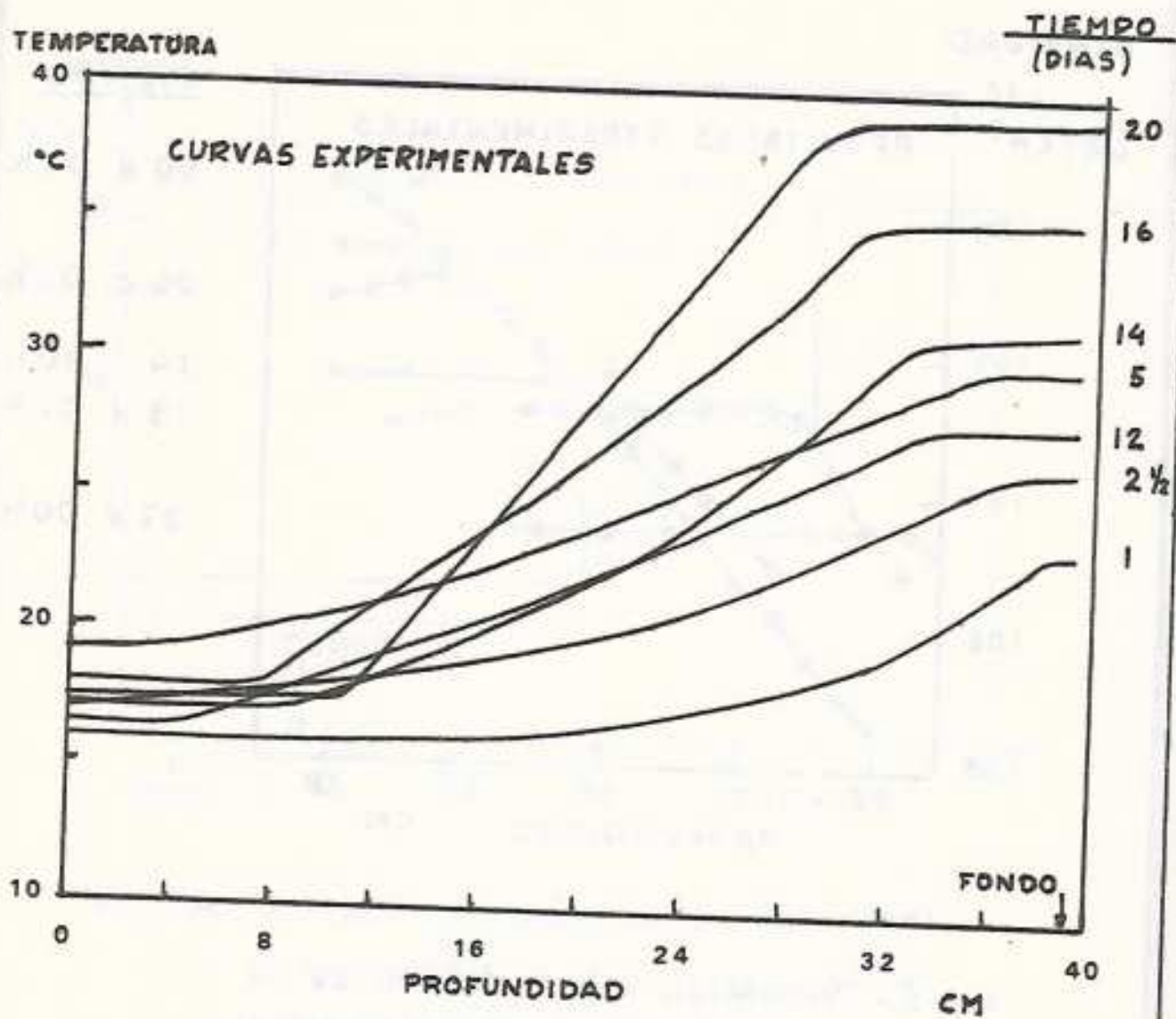


FIG. 10.- VARIACION CON EL TIEMPO DE LA TEMPERATURA EN LA POZA A DISTINTAS PROFUNDIDADES, MOSTRANDO LAS CAPAS CONVECTIVAS EN EL FONDO Y LA SUPERFICIE .-

GRADIENTE DE TEMPERATURA

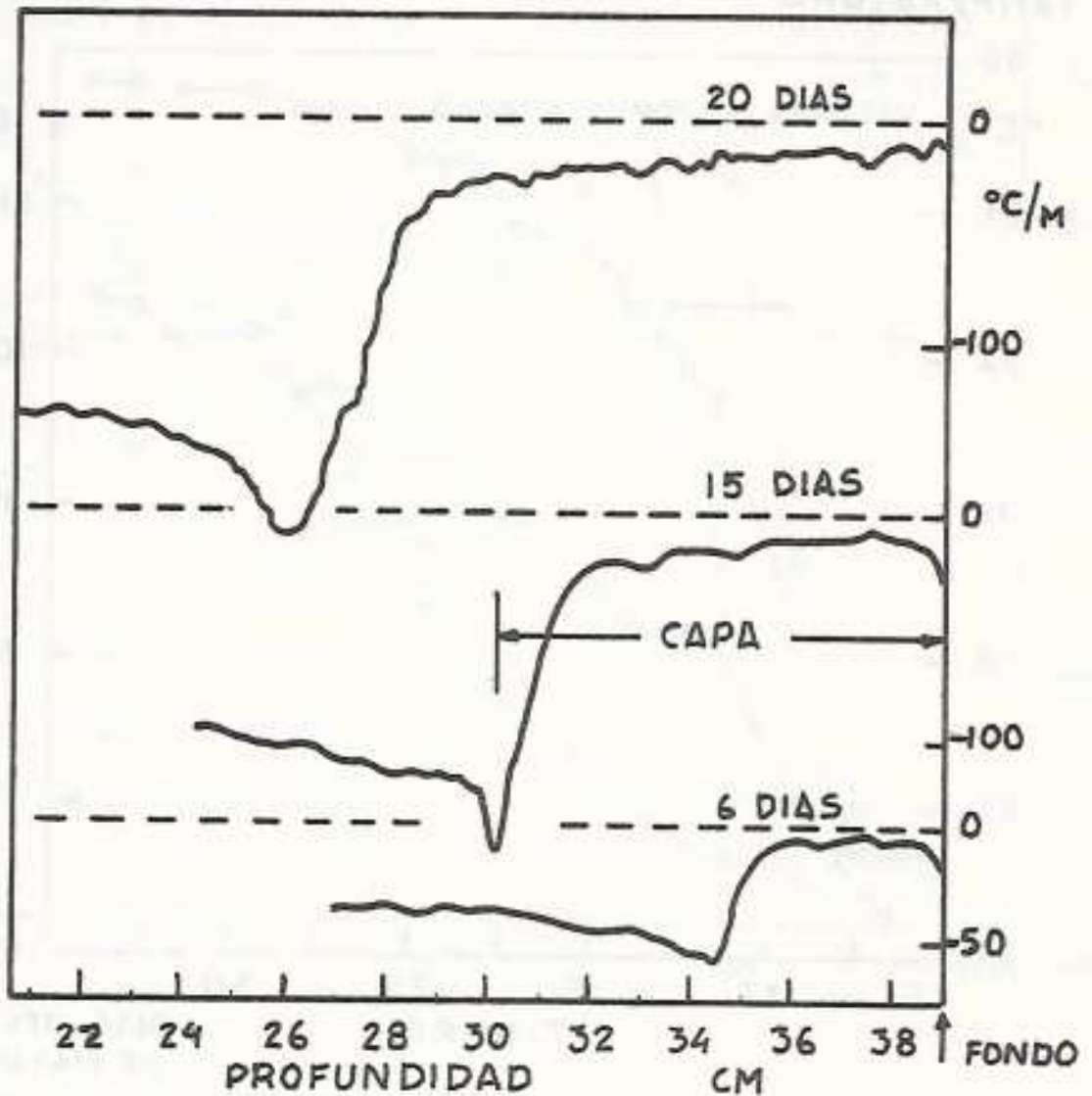


FIG. 11.- GRADIENTE DE TEMPERATURA EN LA ZONA CONVECTIVA PARA VARIOS DIAS .

TEMPERATURA

CAPA

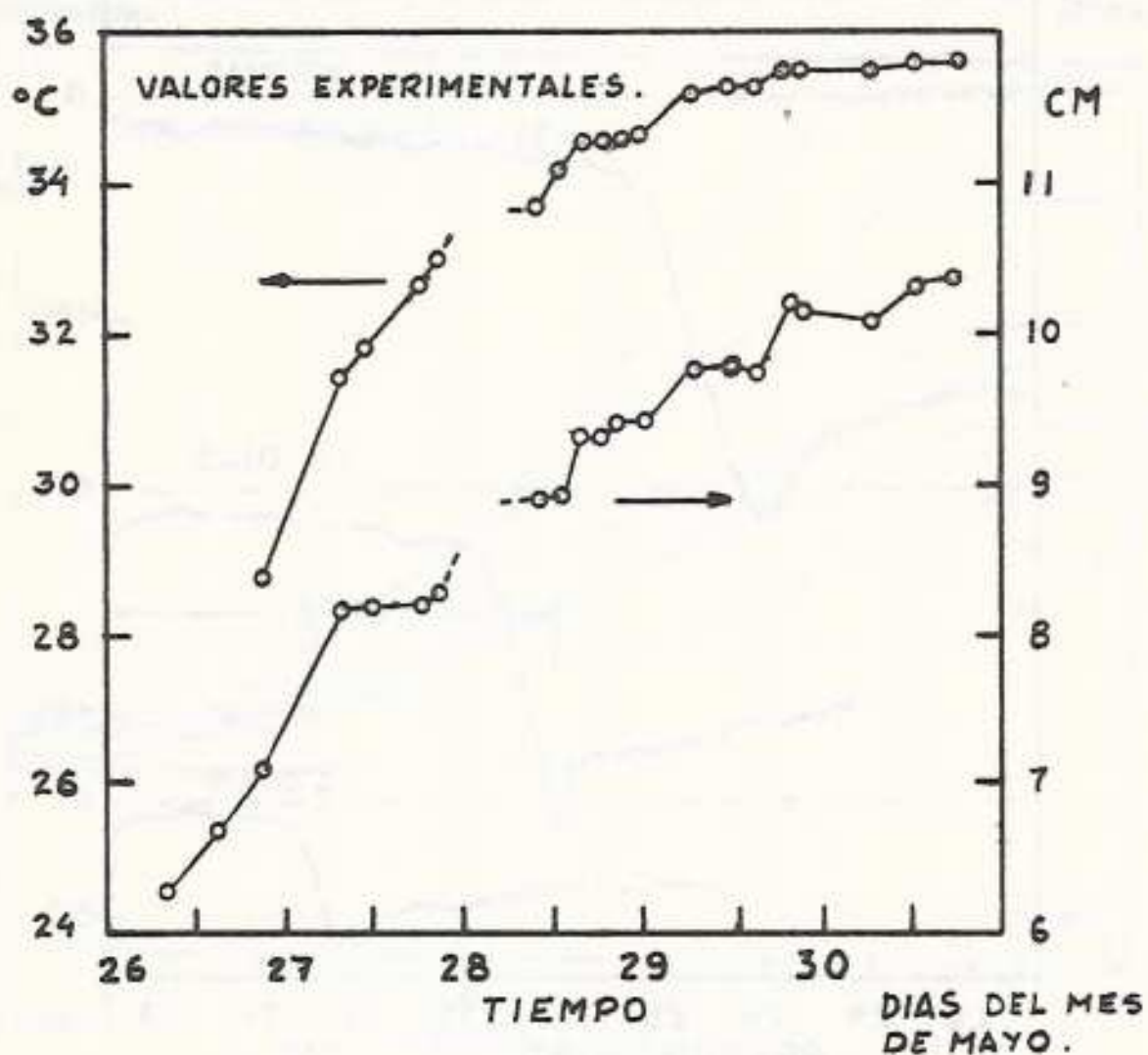


FIG 12.- TEMPERATURA Y TAMAÑO DE LA CAPA CONVECTIVA EN FUNCION DEL TIEMPO.
 EN PUNTEADO : ZONA SIN DATOS.
 LA EXPERIENCIA COMENZO EL DIA 13.-

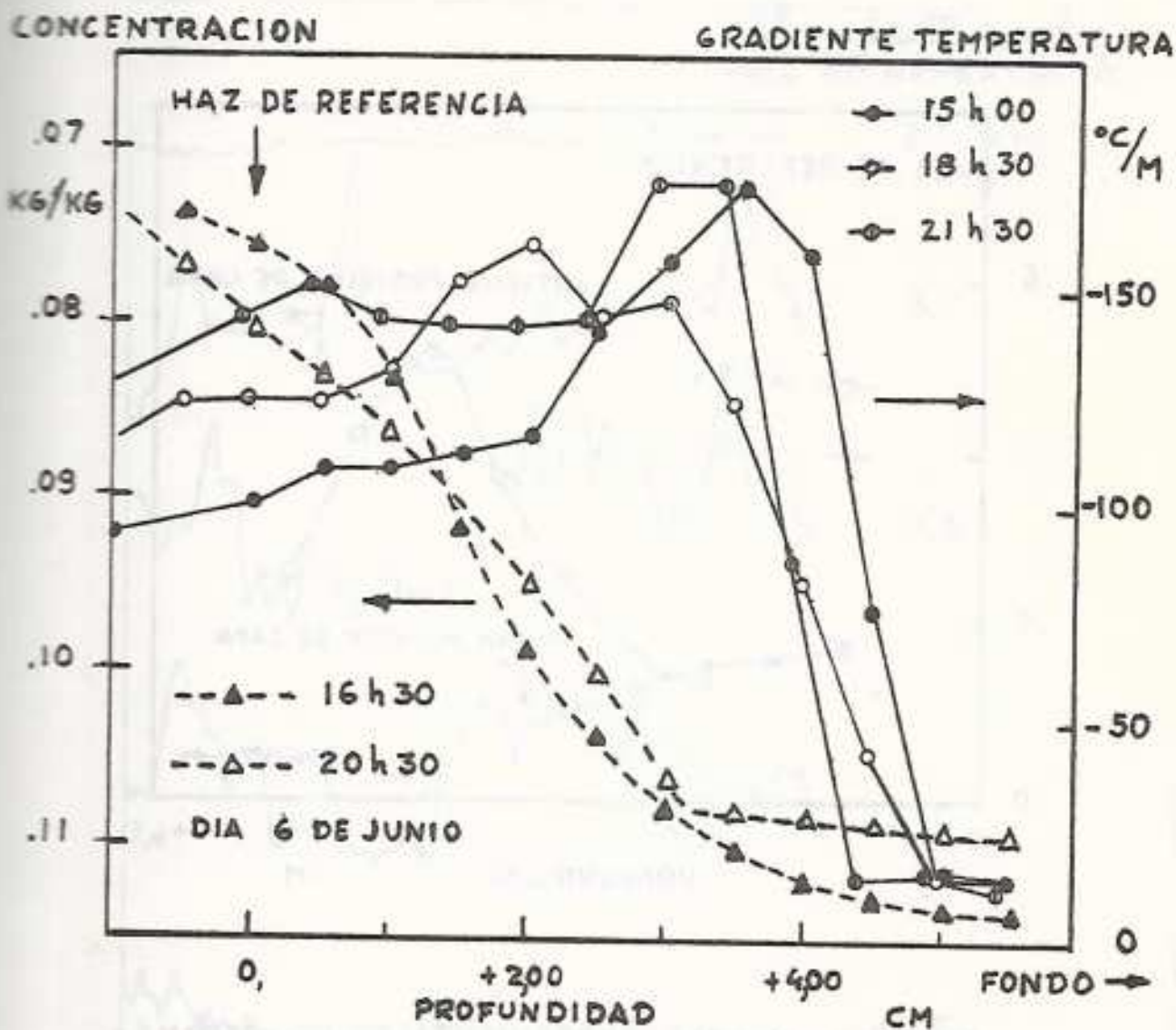


FIG. 13.- CONCENTRACION Y GRADIENTE DE TEMPERATURA EN EL BORDE LA CAPA, DURANTE EL PERIODO CON CRECIMIENTO RAPIDO DE LA CAPA.

$$\lambda = \frac{PR+1}{PR+\sigma} \cdot \frac{RT}{R_s}$$

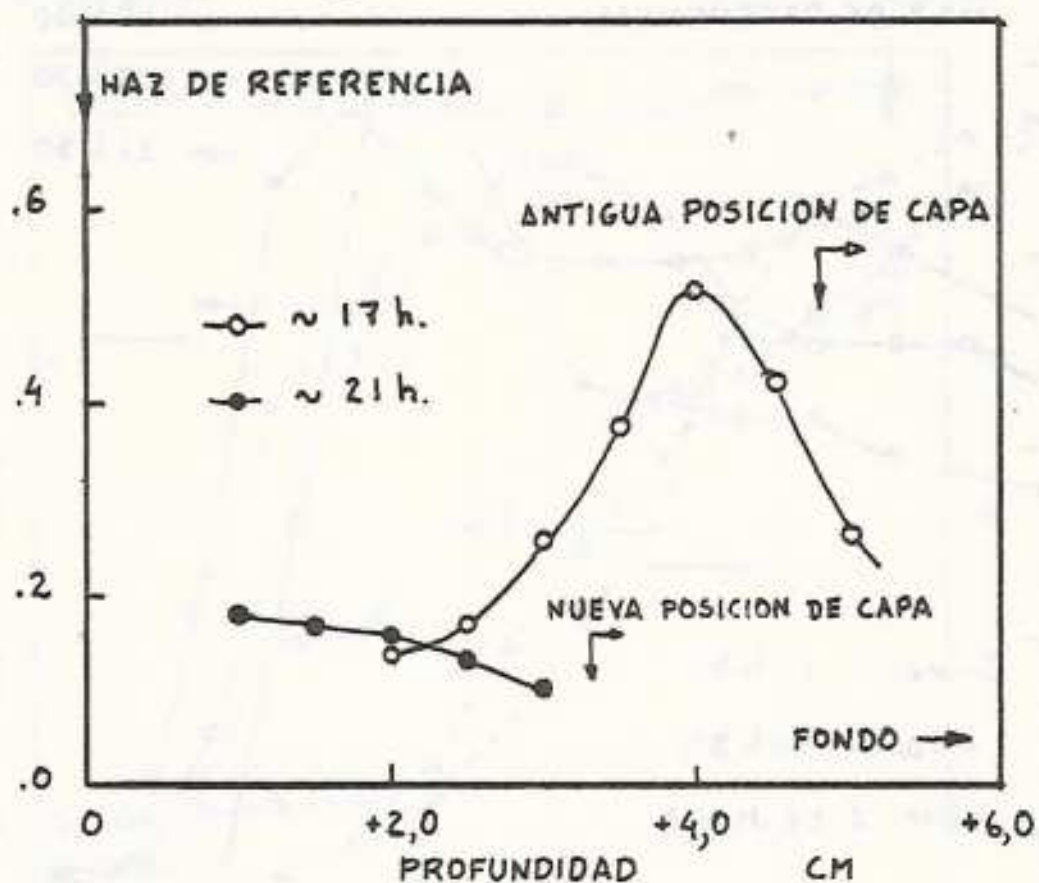


FIG. 14.- VALORES EXPERIMENTALES DEL PARAMETRO DE ESTABILIDAD λ EN DOS INSTANTES, UNO PREVIO Y OTRO POSTERIOR, AL ENSANCHAMIENTO DE LA CAPA.

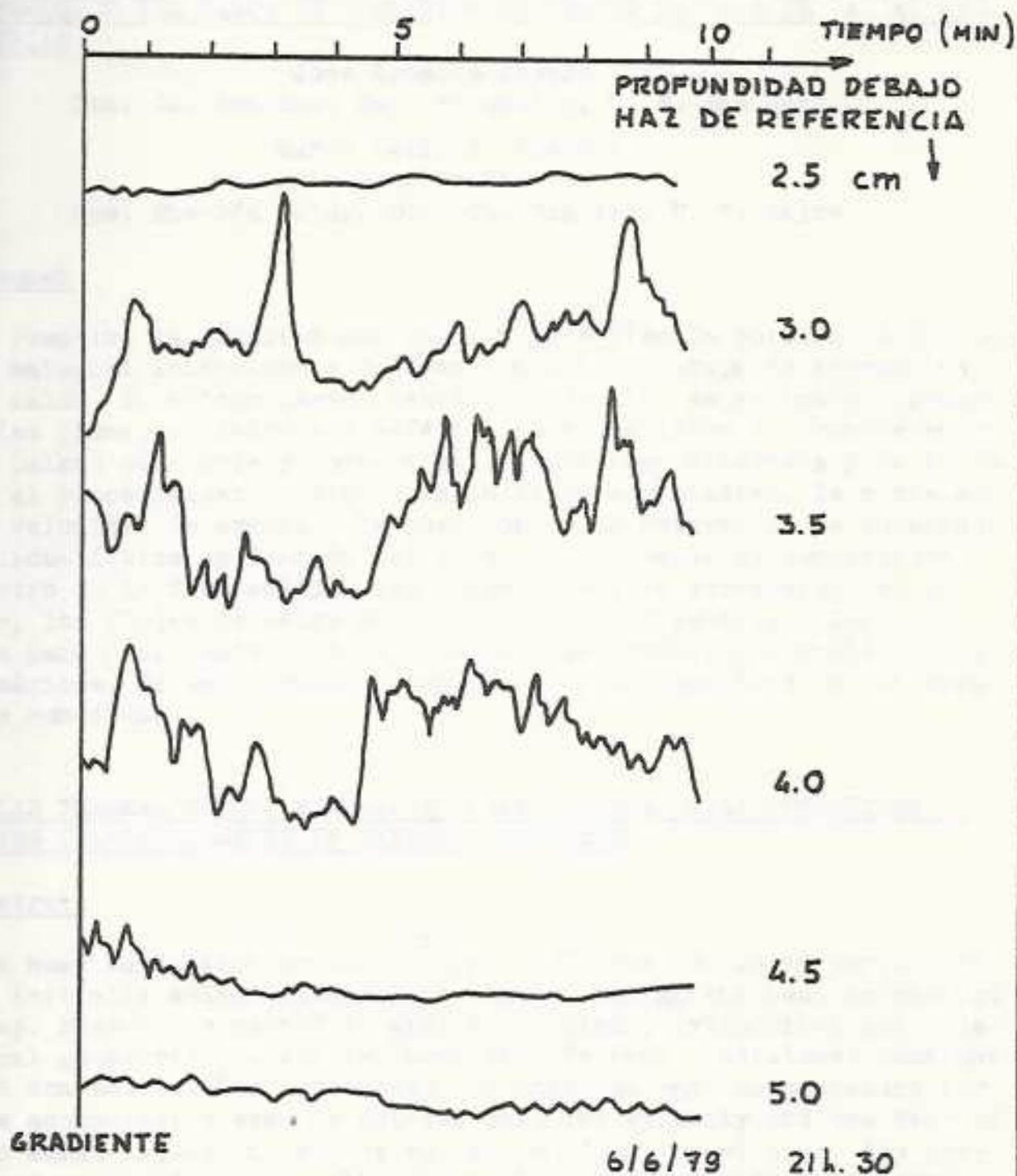


FIG. 15 .- VARIACION DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA CON EL TIEMPO A DISTINTAS PROFUNDIDADES ALREDEDOR DE LA CAPA CONVECTIVA.