

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA APARICION Y  
CRECIMIENTO DE CAPAS CONVECTIVAS EN SISTEMAS DOBLE DIFUSIVOS:  
INFORME DE AVANCE

V. Passamai, D. Saravia<sup>1</sup>, V. Javj,  
N. Salvo, G. Lesino<sup>2</sup> y T. Newell<sup>3</sup>.  
INENCO-Universidad Nacional de Salta. B. Aires 177. 4400 Salta.

## Resumen

El mantenimiento de las pozas solares requiere el conocimiento de las condiciones de aparición y crecimiento de las capas convectivas intermedias que se producen en la zona de gradiente.

Para ello se realizaron un conjunto de experiencias en las que en un sistema inicialmente isoterma y con un gradiente de concentración salina, con una zona débil desde el punto de vista de la estabilidad hidrodinámica, se somete a calentamiento en la parte inferior para crear un gradiente térmico desestabilizante y se sigue la evolución temporal de las variables involucradas.

En este trabajo se describe el material y método empleado para la determinación y seguimiento de los gradientes térmicos y de salinidad, así como los resultados parciales obtenidos a partir de la medición de temperaturas, densidades y concentraciones a lo largo de la poza. También se presentan algunos resultados obtenidos de la visualización por distintos métodos.

## Introducción

Se ha observado que, dentro de la zona de gradiente, se producen subcapas convectivas que tienden a destruirlo con el tiempo por lo que es necesario realizar operaciones de mantenimiento.

Una imagen sencilla de la evolución de esta desestabilización se puede lograr en el laboratorio mediante el armado de una poza a pequeña escala donde se ha creado una zona intermedia en el gradiente que resulta débil desde el punto de vista de su estabilidad hidrodinámica frente al calentamiento desde el fondo.

Si se tiene inicialmente un gradiente salino isoterma, con una zona débil, desde el momento en que comienza el calentamiento en el fondo, se inicia la formación de un perfil térmico que varía con la profundidad y el tiempo de la manera indicada aproximadamente por la Fig 1.

Desde el punto de vista estático, para evitar que el fluido del fondo comience a convectar por el aumento de temperatura, expansión y consecuente disminución de su densidad, como se muestra en la Fig. 2 que se corresponde con la variación supuesta para la temperatura en la anterior, será necesario que la densidad sea decreciente de abajo hacia arriba. Un caso límite ("marginal") se indica en el punto 1 de la curva, donde existe una tangente vertical. Por ejemplo, entre los puntos 2 y 3 de la misma gráfica existe una franca desestabilización por cuanto  $D_3 > D_2$ . La condición de estabilidad estática es:

$$dD(z)/dz > 0 \quad (1)$$

1 Becario del CONICET, 2 SAPIU-CONICET, 3 Universidad de Illinois.

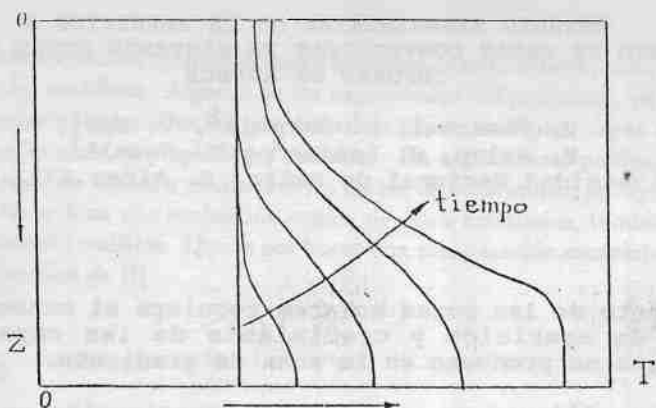


Fig. 1: Evolución temporal de temperatura.

Para el cálculo y verificación de la condición marginal de estabilidad estática, es cómodo contar con la ecuación de estado del sistema, que exprese  $D$  en función de  $T$  y  $S$ . Dicha expresión, dentro del rango de temperaturas y concentraciones de trabajo, se puede aproximar linealmente por:

$$D = D_0 [1 - a (T - T_0) + b (S - S_0)] \quad (2)$$

donde  $D$  se expresa en  $\text{kg/m}^3$ ,  $T$  en  $^{\circ}\text{C}$  y  $S$  en (kg de sal/kg de solución), con  $D_0$ ,  $S_0$ ,  $T_0$  los valores para el punto donde se centra el desarrollo y  $a$  y  $b$  constantes para cada sal en particular.

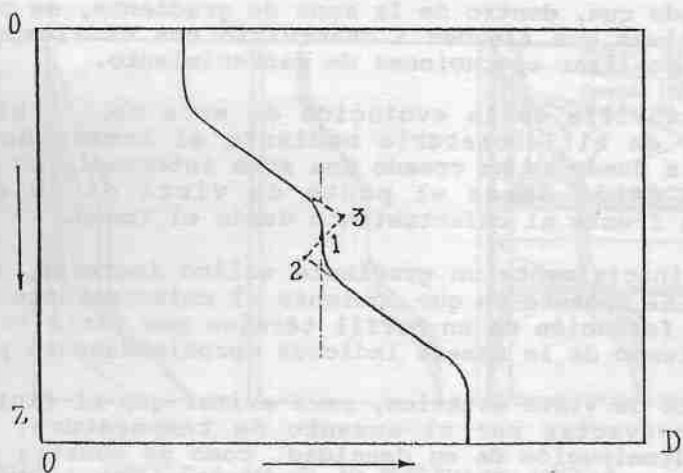


Fig. 2: Evolución temporal de la zona débil del perfil de densidad.

Entonces la condición marginal estática de estabilidad [1,2] resulta:

$$-a \frac{dT}{dz} + b \frac{dS}{dz} = 0, \text{ o sea: } R_p = \frac{b \frac{dS}{dz}}{a \frac{dT}{dz}} = 1 \quad (3)$$

donde  $R_p$ , definido como se indica en (3), se denomina relación o número de estabilidad. La condición se denomina "marginal" porque cualquier pequeña perturbación del sistema debería iniciar el mezclado.

La temperatura debilita la distribución de densidad, mientras que la salinidad provee de la necesaria resistencia gravitacional que evita el mezclado. La condición de estabilidad puede ahora escribirse:

$$\frac{dD}{dz} > 0, \quad b \frac{dS}{dz} > a \frac{dT}{dz}, \quad \text{ó} \quad R_p > 1.$$

Pero el criterio estático no coincide con el de estabilidad dinámica. Desde el punto de vista físico, la afirmación anterior puede comprenderse con el siguiente argumento [1]: como la difusividad térmica es unas cien veces mayor que la salina, si en el entorno de un punto donde  $R_p$  es igual a 1 (para una solución salina con ambos gradientes positivos), un pequeño elemento del fluido se desplaza una corta distancia hacia arriba, en un intervalo de tiempo igualmente pequeño, se encontrará rodeado de fluido que tiene prácticamente la misma densidad, pero más frío y menos concentrado en sal. Debido a la diferencia de difusividades, el elemento de fluido desplazado hacia arriba se enfriará rápidamente sin cambiar demasiado su contenido salino. Por lo tanto, será más denso que su entorno y comenzará a descender ganando más energía cinética que la máxima adquirida al subir. Cuando alcance su posición inicial, la velocidad que trae lo llevará a bajar más allá de la posición de equilibrio, hasta quedar nuevamente en reposo inestable por debajo de aquélla. Entonces volverá a calentarse más, sin perder tanta sal, volviendo a expandirse y a flotar, realizando oscilaciones repetidas de amplitudes cada vez mayores. Esto constituye una inestabilidad oscilatoria denominada sobreestabilidad. A su vez, parte de la energía puede disiparse por viscosidad, por lo que la condición de estabilidad dependerá de las propiedades físicas mencionadas.

Las perturbaciones finitas requieren de un criterio de estabilidad más restrictivo que el predicho por la estabilidad lineal para evitar la ruptura de la zona de gradiente.

Realizando un análisis de estabilidad lineal se encuentra que para una capa de fluido estratificado en densidad, con una zona local débil, la inestabilidad en el denominado régimen "difusivo" (en el que el componente de difusividad mayor está orientado según una dirección inestable) ocurrirá cuando el número de Rayleigh térmico es mayor que el número de Rayleigh salino multiplicado por una constante relacionada con las propiedades físicas, esto es:

$$R_p > (Pr + Le)/(Pr + 1)$$

Una vez que la región interna del gradiente alcanza la estabilidad crítica, se forma una capa mezclada. El espesor de esta capa se ve afectada por un mecanismo de inestabilidad diferente causado por la interacción de la región mezclada con la zona interna de gradiente. Esto indica que se debe tener cuidado para evitar una ruptura de esta zona interna porque la capa mezclada resultante no tenderá a desaparecer por sí misma y se deberá actuar desde afuera mediante inyecciones o extracciones.

En este trabajo se describen los tareas de laboratorio que se realizaron con tres sales distintas, NaCl, CaCl<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, usadas para armar gradientes salinos en un modelo de poza de laboratorio, con la intención de examinar la dependencia de la ruptura de la zona interna al gradiente con las propiedades de cada solución. El cloruro de calcio y el sulfato de sodio son sales que tienen relaciones similares de sus coeficientes de expansión. La del cloruro de sodio en cambio es algo diferente, mientras que las tres tienen diferentes difusividades. Globalmente, sin embargo, el criterio de estabilidad para la ruptura interna debería ser sensible a los coeficientes de expansión sin depender significativamente de los valores de las difusividades.

### El sistema físico

Las experiencias se realizaron en un recipiente de vidrio transparente, con forma de paralelepípedo rectangular, cuyas dimensiones son 21,5 cm de alto, 19,5 cm de ancho y 30,3 cm de largo y un máximo de capacidad, por lo tanto, de alrededor de 13 litros.

En todos los casos las concentraciones de las capas fueron del 2 % en peso para la superior y del 10 % la inferior, estableciéndose un paso del 1 % para las intermedias. Las capas se armaron de modo que quedara un gradiente salino relativamente débil en la zona de profundidad media del tanque y un gradiente salino fuerte en las regiones ubicadas por arriba y debajo de aquélla. Se dejó que el sistema difundiera naturalmente durante uno o dos días para suavizar el perfil inicial de densidad. La base del recipiente se calentó mediante un termostato que bombea agua a 50 °C a través de un intercambiador de calor plano, sobre el que se coloca, nivelada, la poza. Esto permitió obtener temperaturas en el fondo de alrededor de 42 °C, armándose un gradiente transitorio en la región interna hasta que, al fortalecerse lo suficiente, se logró desestabilizar el interior del fluido. Los gradientes salinos establecidos en las regiones externas se diseñaron lo suficientemente fuertes como para evitar una erosión significativa ocasionada por las inestabilidades que aparecen en la zona mezclada interfásial.

### Valores numéricos

Se usaron para las tres sales los siguientes valores para (2) [1,3]:

	Do b	Do a	Do(aTo-bSo)
Para NaCl:	719,1334	0,3729992	1005,521
Para CaCl <sub>2</sub> :	860,6428	0,3512245	1004,157
Para NaSO <sub>4</sub> :	929,4000	0,3488000	1004,480

La Figura 3 muestra los espesores de las distintas capas y las concentraciones respectivas.

### Procedimiento para medir concentraciones y temperaturas

Los perfiles de salinidad fueron determinados mediante una combinación de mediciones de conductividad eléctrica y densidades. Los de temperatura fueron monitoreados mediante una punta de prueba con un termistor que se desplaza a través de la profundidad y por medio de

un conjunto fijo en cinco posiciones diferentes. El sistema de adquisición de datos fue controlado por una PC con una tarjeta "PCLAB812" que registraba seis canales de temperatura y controlaba el movimiento de la punta a través de un motor paso a paso. Se desarrolló un programa en lenguaje C para realizar las medidas.

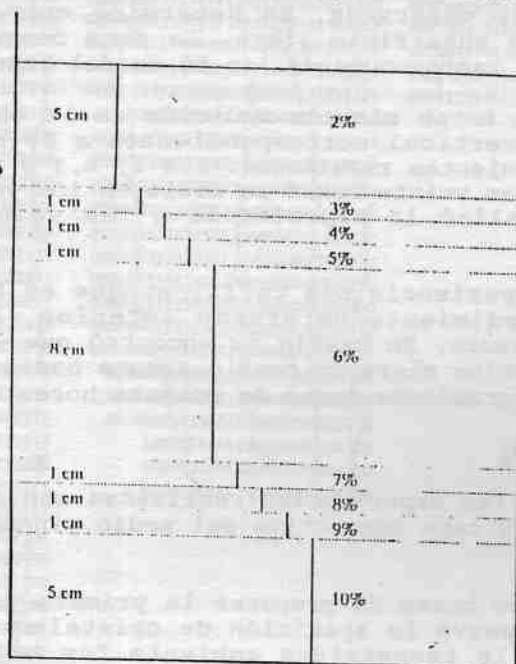


Fig. 3: Capas de la poza.

### Resultados obtenidos

La desestabilización se observó aproximadamente a las cinco horas de calentar. Los resultados muestran que el criterio de estabilidad lineal no es suficientemente restrictivo, siendo la desestabilización un proceso no instantáneo.

La medida cuantitativa de la desestabilización fue basada en la relación de estabilidad local. Este parámetro decreció continuamente en la zona de gradiente hasta manifestarse la desestabilización.

Se realizaron tres experiencias preliminares, dos con NaCl y una con CaCl<sub>2</sub>. De estas se obtuvieron datos de temperatura en cinco puntos de la poza. En las siguientes se pudo montar el sistema automático y obtener perfiles completos de temperatura.

#### a) Pozas de CaCl<sub>2</sub>

Con los datos medidos se evaluaron las diferencias de temperatura a lo largo de la poza y en función del tiempo, habiéndose obtenido valores muy próximos a cero cuando la zona donde se medía era convectiva. Esto se observa en la Figura 4, que muestra perfiles que delimitan las zonas donde la diferencia de temperatura es distinto de cero de la que es cero. Como esta región se va ensanchando a medida que crece la zona convectiva, resulta ser una manera visual elocuente

de la aparición y movimiento de las interfases.

Este fue el primero luego de una serie de intentos anteriores en que se observó claramente la aparición de una interfase de la zona convectiva central, mediante el uso de trazador de permanganato de potasio, a las cinco horas de iniciado el calentamiento. Su posición, al momento de ser observada, se determinó entre los 80 y 110 mm contando desde la superficie libre. La zona convectiva inferior se mantenía mientras tanto ocupando los 50 mm del fondo.

Pasadas dieciséis horas más, la medición de la concentración en los puntos sobre la vertical correspondientes a 20 mm, 90 mm y 145 mm arrojaron los siguientes resultados: 2,8 %, 6,3 % y 9,4 %. Al repetir esta medición a las veinte horas se midieron los valores 2,9 %, 6,2 % y 8,1 %. Se finalizó la experiencia a las veinticuatro horas de iniciada.

En la segunda experiencia con  $\text{CaCl}_2$ , aunque se tomó el cuidado de repetir el procedimiento de armado anterior, no se observó una ruptura del gradiente. En cambio se encontró que las capas convectivas de abajo y arriba migraron continuamente hacia el centro, erosionando la zona de gradiente luego de ochenta horas de calentamiento.

#### b) Pozas de $\text{Na}_2\text{SO}_4$

En la primera de las experiencias realizadas con esta sal se observó la aparición de la capa convectiva del medio, inmediatamente luego de calentar.

A las veinticuatro horas de preparar la primera poza correspondiente a esta sal se observó la aparición de cristales precipitados en el fondo. Dado que la temperatura ambiente fue baja, se llegó a las condiciones de saturación (10 °C y 10 % de concentración).

A partir de esta experiencia no se pudo contar con datos de perfiles de temperatura tomados en forma automática por haber destinado la computadora a otros fines.

A las cuarenta y ocho horas de finalizado el armado se inició el calentamiento y se observó que las cotas de convección de la capa superior e inferior migraron hasta los 95 mm y 160 mm respectivamente, luego de veintitrés horas de calentamiento. En las horas subsiguientes se observó que las interfases se acercaron llegando a estar en los 105 mm y 150 mm a las treinta y tres horas. A las cuarenta y siete horas se observaba una única interfase ubicada en los 130 mm. Por otro lado la superficie libre había descendido un centímetro a causa de la evaporación.

#### c) Visualizaciones con pozas de $\text{NaCl}$

Se realizaron visualizaciones para efectuar el seguimiento de las capas convectivas y de gradiente.

El método más sencillo consiste en la observación directa de las zonas que presentan inhomogeneidades, sin el auxilio de iluminación especial o el uso de trazadores. Se alcanza a ver la aparición de la capa convectiva inferior, sugerida por la presencia de ondulaciones en el seno del líquido. Esto ocurre dentro de los primeros diez minutos siguientes al calentamiento. La aparición de la capa convecti-



va de la zona del medio es más difícil de observar por este método directo, pudiéndose ver la interfase cuando se observa según distintos planos a lo largo de la vertical. La zona convectiva superior puede observarse más dificultosamente que la inferior, sirviendo de guía la presencia de la interfase que aparece como un plano que ofrece diferencias en la refracción.

La observación de la sombra proyectada sobre una pantalla cuando se hace incidir sobre una de las caras del paralelepípedo un haz de luz láser, convenientemente expandido, y que atraviesa el seno del líquido sufriendo poca absorción, resultó ser el método más elocuente para realizar el seguimiento de aparición y crecimiento de las capas convectivas.

Se realizó la filmación de todo el proceso para dos pozas de NaCl armadas en una escala mucho menor que las anteriores. El volumen, de unos  $830 \text{ cm}^3$  a lo largo de 11 cm de alto por 8,5 cm y 8,9 cm de sección, permitió observar los fenómenos de la escala mayor sin ninguna dificultad, con la ventaja de que su armado se puede realizar desgasando la solución y en menos tiempo. La temperatura de la placa calefactora fue de 55,5 C, habiéndose medido una temperatura de fondo de 40,9 °C y superficial de 27,5 °C.

### Conclusiones

Se ha desarrollado un procedimiento de laboratorio para realizar el seguimiento de las capas convectivas que pueden formarse en una poza solar. Esto permite trabajar más ajustadamente con la verificación de los métodos analíticos que simulan la dinámica de una poza, especialmente en lo que respecta a las condiciones de aparición y crecimiento de capas convectivas.

La aparición de la capa convectiva del medio, cuando la poza se diseña con una zona débil, depende del tiempo transcurrido entre la finalización del armado de la poza y el arranque del calentamiento. Si el mismo es demasiado largo como para asegurar un fortalecimiento del gradiente, la ruptura no se llega a observar.

En los tres casos de los que se tienen datos confiables de perfil de temperatura observamos las siguientes situaciones: mantenimiento del gradiente, ruptura del gradiente y no formación del gradiente. Es decir que, variando las condiciones de formación del sistema se consigue generar distintas situaciones de estabilidad. Véase la Figura 4 que muestra la evolución de los perfiles de gradiente de temperatura hora por hora para tres experiencias.

### Referencias

1. Hull, J. R., Nielsen, C. E. y Golding, P.: *Salinity-gradient solar ponds*, CRC Press, 1989, Florida.
2. Zangrando, F.: *Hydrodynamics of salt-gradient solar ponds*, Solar Energy, Vol. 46, No. 6, 1991.
3. Mangussi, J.: *Tesis doctoral*, Salta, 1985.