

## Medición de velocidad en un fenómeno de "Salt-Finger"\*

*Carlos Chiang, Josmary Labrador, Eber Orozco y Nelson Falcón\*\**  
*Universidad de Carabobo. FACYT, Dpto de Física. Apdo Postal 129 Avda.  
Bolívar Norte Valencia Edo. Carabobo Venezuela.*

Recibido: 30-11-05 Aceptado: 10-04-06

### Resumen

En los procesos termodinámicos de doble difusividad conocido como Inestabilidad Termohalínica o "Salt Finger", se presentan formaciones de glóbulos convectivo entre las capas de fluidos inestables. Este fenómeno natural tiene aplicaciones en oceanografía, astrofísica, geofísica y en otros campos. Se muestra un dispositivo experimental que permite visualizar y medir el fenómeno de "Salt Finger" de forma efectiva y expedita para la determinación de las velocidades de los glóbulos convectivo en una solución acuosa de violeta de metilo, mediante un sensor fotoeléctrico a distinta temperatura entre los rangos de 0 a 15 Celsius. Los resultados corroboran la aproximación de doble difusión y el modelo convectivo de Rayleigh – Taylor. Se concluye que en fluidos ordinarios la doble difusión de calor y del gradiente de concentración explican satisfactoriamente el proceso convectivo antes del equilibrio termodinámico.

**Palabras clave:** Convección; inestabilidad termohalínica; "Salt Finger".

## Speed measurement in a salt finger phenomenon

### Abstract

In the thermodynamic processes of double diffusion known as Thermohaline Instability or "Salt Finger", it is show globule formation convective between of unstable layers fluids. This natural phenomenon has applications in oceanography, astrophysics, geophysical and other fields. An experimental device that allows to visualize and to measure the phenomenon of "Salt Finger"; in effective and expeditious form; for the determination of the speeds of globules convective in a watery solution of methyl violet, by means of a photoelectric sensor is different temperature between the 15 ranks from 0 from Celsius. The results corroborate the approach of double diffusion and the convective Rayleigh – Taylor model. We conclude that in ordinary fluids the double diffusion of heat and the gradient of concentration satisfactorily explain the convective process before the thermodynamic balance.

**Key words:** Convection; thermohaline Instability; "Salt Finger".

\* Trabajo presentado en el V Congreso de la Sociedad Venezolana de Física, La Universidad del Zulia. Nucleo Punto Fijo - Edo. Falcón, Venezuela, Noviembre 2005.

\*\* Autor para la correspondencia. E-mail: nfalcon@uc.edu.ve

## Introducción

Entre los recientes desarrollos en el campo de la convección se destaca la convección de doble difusividad, la cual estudia fluidos con varios gradientes de difusividades moleculares, incluyendo la distribución de densidad vertical del fluido o "Inestabilidad de Rayleigh Taylor" (1). La Inestabilidad de Rayleigh Taylor, consiste principalmente en un proceso transitorio de convección en capas de fluidos inicialmente estables y con distintas difusividades moleculares. Durante el proceso de mezclado o régimen transitorio; se observan filamentos que descienden desde la capa mas densa y caliente del fluido hacia la capa menos densa y relativamente fría; este proceso culmina en un solo fluido homogéneo, térmicamente y mecánicamente estable.

En la Figura 1 se muestra un proceso de mezclado natural de dos fluidos con distintas propiedades de difusividad molecular, en la imagen central de la Figura 1 se muestra el fenómeno transitorio de filamento de Salt Finger, es decir, a medida que se mezcla una capa de fluido caliente de menor densidad que se encuentra encima de un tanque o reservorio de otro fluido frío de mayor densidad, se forman filamentos que descienden cuando se pierde la sustentación hidrostática (Salt Finger). El fenómeno se observa por qué en el limite de la sustentación hidrostática, antes de mezclarse los fluidos, comienza a descender el filamento en las zonas donde ya deja de existir dicha sustentación, a medida que el filamento desciende pierde calor de forma lateral y el reservorio gana calor llegando a un punto donde el proceso deja de presentarse, ya que alcanza el equilibrio térmicamente y mecánicamente (Figura 1 derecha).

El fenómeno de Salt Finger fue estudiado, en principio, con miras a su aplicación en el océano en virtud de los gradientes de temperatura y salinidad de allí que también se le conozca como "inestabilidad termohalínica", arquetipo de inestabilidad de doble

difusión (2). En este caso, la inestabilidad se produce porque el calor se difunde mucho más rápido que la sal; pudiendo observarse dos tipos de procesos (2): (i) La formación de filamentos o elementos convectivos estrechos y alargados ("Salt-Finger" o dedos de sal), (ii) La existencia de movimientos oscilatorios conocidos como régimen de "finger" y de difusión simultáneamente.

El fenómeno transitorio de la formación del filamento, se observa en sistemas donde existen gradientes de dos propiedades con diferentes difusividades moleculares, los cuales influyen sobre la distribución de densidad vertical del sistema. Se presenta en los océanos del planeta (3), pero también esta presente en estrellas de una masa solar cuando el hidrogeno se transforma en helio en su interior formando "dedos" o filamentos de carbón (4, 5). En metalurgia: cuando los residuos de minerales se hunden en el tanque de hierro fundido como magma y se mezcla con el hierro en el proceso de manufacturación de acero (6). También se ha referido su aplicación en geofísica, en formaciones basálticos durante el enfriamiento de magma (Basalt fingers) y en el subsuelo de extracción de petróleo (7).

Los estudios realizados por Polzin et al. (8) en el desagüe oceánico del mar Mediterráneo bajo el nombre de NATRE (North Atlantic Trancer Release Experiment) expresan que en la zona es mediadamente favorable para la formación de Salt Finger debido a la turbulencia mixta que interrumpe su formación.

Los experimentos hechos en Salt Finger o convección de doble difusibilidad de sal, han demostrado varias formas o maneras de describir esta fenomenología, basadas en modelos de convección de dos y tres dimensiones realizado el grupo de Stern y Radko (9 y referencias en el). Su verificación requiere contrastarlo con medidas de velocidad de descenso de los filamentos, entre otros observables (1, 9).



Figura 1. Fenómeno de "Salt Finger" visible en agua fresca (menor que 20°C) y Violeta de Metilo a temperatura ambiente. Izquierda: etapa inicial, centro: régimen transitorio (Salt Finger), derecha régimen estacionario (dilución).

## Materiales y Métodos

Para poder determinar la velocidad del filamento era necesario obtener, por medida directa, los intervalos de tiempos ( $\Delta t$ ) y desplazamientos ( $\Delta y$ ) en medio acuoso ( $H_2O$ ). El diseño general consiste en un montaje experimental simple, usando sensores fotoeléctricos (Figura 2).

En experimentos de laboratorio la configuración de azúcar-sal es a menudo usada para controlar la estabilidad de difusividad del soluto y sal para aumentar la difusividad de la temperatura. La reproducción del fenómeno de salt finger en el laboratorio, no es tarea fácil, debido a la dificultad de establecer condiciones de borde sin flujo de calor, en consecuencia, los investigadores utilizan con frecuencia soluciones de sal y azúcar estratificadas con la solución salina en el fondo. Esto también involucra alto grado de dificultad en virtud de la estratificación salina y azucarada y el control de los gradientes de temperatura.

En los experimentos a realizar, se pretende determinar la velocidad con que descienden los filamentos como una función de temperatura y de algunas propiedades moleculares o de difusividad del reservorio térmico a utilizar.

Afortunadamente existen sales de alto peso molecular que podrían facilitar la formación de salt finger incluso a temperatura ambiente, para ello se realizó pruebas con

distintas sustancias de alto peso molecular y con capacidad calorífica superior al agua, para facilitar la formación de salt finger a temperaturas similares a los océanos (0°C-20°C). Lográndose los mejores resultados con Violeta de Metilo en agua fresca (10°-15°C); Figura 1, lo cual constituye una contribución en el estudio de los salt finger, pues permite visualizar el régimen transitorio sin condiciones o requerimientos especiales para la disposición de las capas de soluto y de fluido; usualmente requeridas como condición que evite la vorticidad y permita la visibilidad del fenómeno. Además el color púrpura del violeta de metilo hace innecesario el empleo de film especiales (infrarrojos) para evidenciar la difusividad del soluto; Figura 3.

## Resultados y Discusión

Durante la observación del fenómeno de inestabilidad termohalínica, en el diseño experimental, se observó que el soluto difusivo empleado (Violeta de Metilo) producía filamentos ("dedos de sal") gruesos y delgados, dependiendo del tamaño relativo de los glóbulos que conforman el soluto difusivos en polvo. No es posible evitar previamente que el soluto difusivo se aglomerase sobre la capa acuosa formando filamentos "gruesos" por la unión de varios filamentos "delgados". Así, se pueden caracterizar, para un primer estudio, dos tipos de filamento: Los de nominados "delgados" o individuales con un espesor promedio de hasta 0, 1cm y los

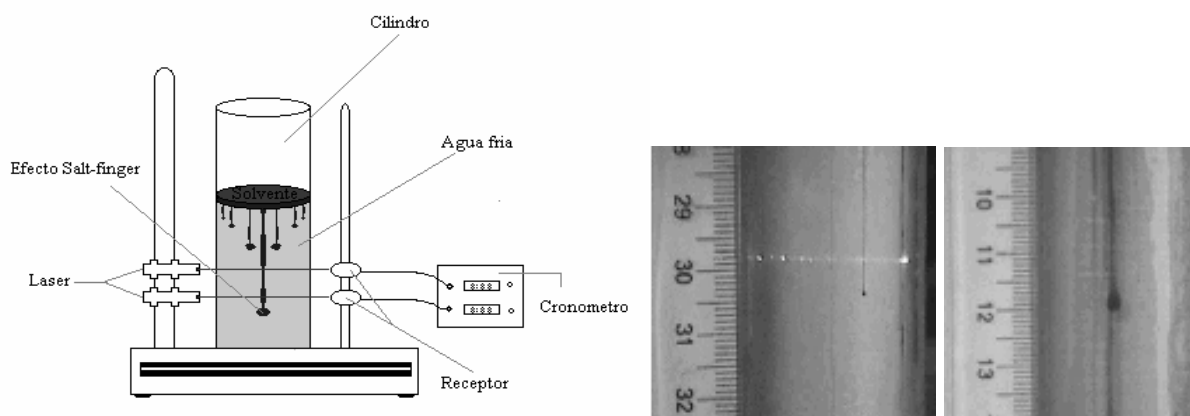


Figura 2. Diseño experimental utilizado para medir la velocidad de los filamentos; a la derecha imágenes fotográficas de los filamentos (“Salt Finger”) descritos en el texto. Obsérvese la formación de filamentos “delgados” y “grosos”.

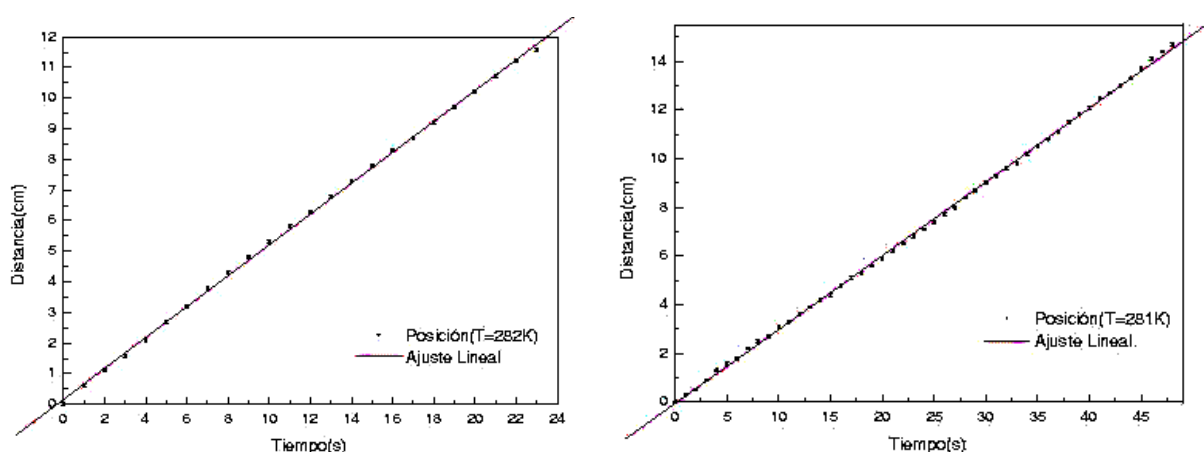


Figura 3. Desplazamiento de los filamentos, “delgados” (izquierda) y “grosos” (derecha).

que resultan de la aglomeración de varias de ellas, denominadas “grosos” con espesores típicos entre 0,1 cm y 0,3 cm (Figura 2). Clasificación que se realizó para verificar que la velocidad de los “dedos” constante e independiente de la sección transversal del filamento.

La Figura 3 muestra que la velocidad de los filamentos (“dedos de sal”) es constante e independiente de la sección transversal; con una correlación de Pearson de 0.999 para los rangos de temperatura y despla-

mientos utilizados; en el caso de la doble difusividad del Violeta de Metilo en agua fresca. En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos para las velocidades de los glóbulos en términos de la diferencia de temperatura.

## Conclusiones

Las diluciones de polvo de Violeta de Metilo a temperatura ambiente en agua fresca permiten reproducir el efecto de doble difusión; de calor y masa, y evidenciar el fenó-

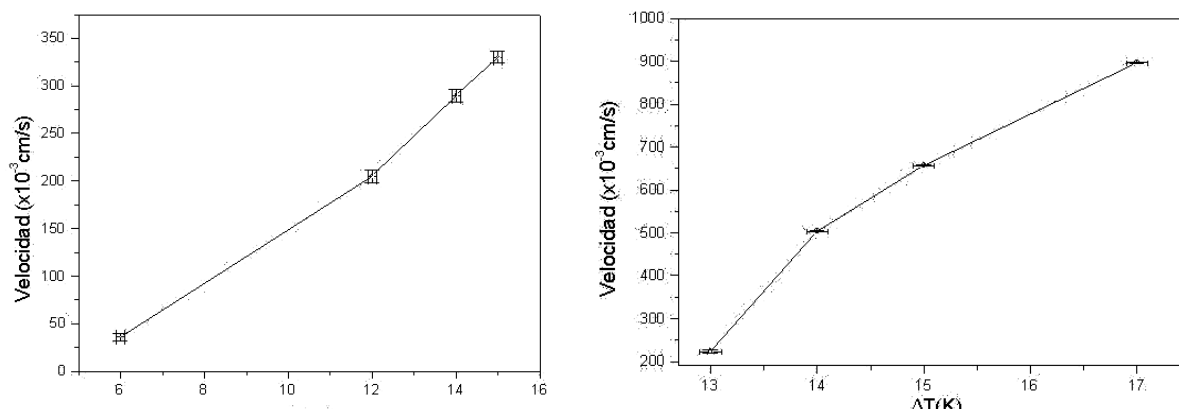


Figura 4. Velocidad de los filamentos, "delgados" (izquierda) y "gruesos" (derecha), en función de la diferencia de temperatura.

meno de "Salt Finger" de forma expedita y sencilla. El fenómeno transitorio de Salt Finger en dichas diluciones solo se presenta en el rango de temperaturas de 273 K a 293 K para el agua y de 293 K a 300 K para el Violeta de Metilo.

El dispositivo Experimental permitió evidenciar que los filamentos ("dedos de sal") descienden con velocidad constante en toda su trayectoria, y en cada caso la velocidad es proporcional a la diferencia de temperatura entre reservorio térmico y soluto difusivo, en concordancia con el modelo de Rayleigh-Taylor (1, 5).

### Referencias Bibliográficas

1. JOU D., CASAS VÁZQUEZ J., LEBON G. *RPPH* 62: 1035J, 1999.
2. ONKEN R., BRAMBILLA E. *JGRC*.108i: PBE250, 2003.
3. STERN M., TERNER, J.S. *Sea Res* 16: 497-511, 1969.
4. GROSSMAN S.A., TAAM R.E. *MNRAS* 283(4): 1165-1178, 1996.
5. HERRERA L., FALCÓN N. *Phys Lett* 201: 33-37, 1995.
6. CHEN F., LU J.W., INT J. *Heat Mass Transfer* 35: 3451, 1992.
7. SARKAR A., Phillips O.M. *Phys Fluids A* 4: 1165-1175, 1992.
8. LOUIS St., LAURENT. *J Phys Ocean* 29:1404-1424, 1999.
9. RADKO T., STERN. M. *J Mar Res* 57: 471-502, 1999.