

**TALLEX – EXPERIMENTOS DE LABORATORIO EN LA FORMACIÓN DE
OCEANÓGRAFOS Y METEORÓLOGOS
CIRCULACIÓN TERMOHALINA EN EL OCÉANO**

Dernis Mediavilla¹, Laura Ruiz Etcheverry¹, Mariana Carolina Nieva Tamasiunas¹, Moira Luz

Clara Tejedor¹⁻², Diego Moreira¹⁻² y Claudia Gloria Simionato¹⁻²

1 Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA

2 Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET-UBA)[^]

Buenos Aires, Argentina

Resumen

Debido a la escasez de observaciones directas del flujo abisal en el océano, los experimentos de laboratorio y la teoría han sido una guía muy valiosa para deducir los patrones de circulación más probables. Hay dos inferencias importantes que se pueden hacer de las observaciones directas colectadas en el océano. Primero, las aguas densas se forman en la superficie en regiones pequeñas y altamente localizadas del océano en los mares polares. De esta manera, la circulación abisal parece ser inducida por fuentes locales. Pero, por conservación de la masa, por cada partícula de agua que se hunde, otra debe retornar a la superficie. Sin embargo, las distribuciones de propiedades no sugieren que el retorno ocurra concentradamente en una o algunas pocas regiones del océano. Parece razonable suponer, entonces, que ocurre surgencia de modo disperso a la escala de las cuencas compensando el hundimiento. Por otro lado, las observaciones también muestran que el flujo profundo es lento y que las escalas temporales involucradas son muy largas. El océano profundo debe encontrarse, por lo tanto, en balance geostrófico, de viento térmico e hidrostático. En este trabajo se discuten resultados de experimentos de laboratorio llevados a cabo en un tanque de acrílico montado sobre una mesa rotante en el Laboratorio del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), en el marco del Taller de Experimentación en Fluidos Geofísicos (TALLEX). Los experimentos ilustran los principios dinámicos subyacentes en la circulación termohalina de los océanos, la cual se ve forzada por el hundimiento de fluido denso formado en la superficie en altas latitudes. La esfericidad de la Tierra se representa mediante un fondo inclinado. El hundimiento del agua en altas latitudes se representa mediante una fuente de fluido en un rincón del tanque, utilizando tinta como trazador. Se espera que estos

[^] Dirección Postal: CIMA, Ciudad Universitaria, Pabellón II, Piso 2. (C1428EGA) CABA, Argentina.

experimentos constituyan una contribución a la mejora de la calidad de la enseñanza de nuestras ciencias en la FCEN y a la formación de recursos humanos en el área de flujos geofísicos experimentales.

Palabras Clave: *Circulación termohalina, Experimentación en fluidos geofísicos, Flujo abisal.*

**TALLEX – LABORATORY EXPERIMENTS IN THE TRAINING OF PHYSICAL
OCEANOGRAPHERS AND METEOROLOGISTS
THERMOALINE CIRCULATION IN THE OCEAN**

Abstract

Due the few direct observations in the abyssal flow in the ocean, the laboratory experiments and the theory have been an invaluable guide to deduce the most circulations patterns. Two important inferences can be made from the direct observations collected in the ocean. First, the dense water are formed on the surface in small and highly localized regions of the ocean in the polar seas. Thus, the abyssal circulation appears to be induced for local sources. But, for mass conservation, for each water particle that sinks, another must return to the surface. However, the distributions of the properties not suggest that the return occurs concentrated in one or some few regions of the ocean. Its seems reasonable to assume, then, upwelling occurs in a so dispersed to the basin scale compensating subsidence. On the other hand, the observations also shows that the deep flow is slow and the temporal scales involved are very large. The deep ocean must be, hence, in geostrophic, thermal wind and hydrostatic balance. In these work we discuss the results of laboratory experiments conducted in an acrylic tank mounted on a rotating table in the Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO) laboratory, under the Taller de Experimentación en Fluidos Geofísicos (TALLEX). The experiments illustrate the dynamics principles underlying the thermohaline circulation of the oceans, which is forced for the sinking of dense fluid formed in the surface at high latitudes. The sphericity of the Earth is represented by a slopping bottom. The sinking of water in high latitudes is represented by a fluid source in a corner of the tank, using ink as a tracer. It is hoped that these experiments represent a contribution to improving the quality of the teaching of science in our FCEyN and training of human resources in the area of experimental geophysical flows.

Key Words: *Thermohaline circulation, Geophysical flows experiments, Abyssal flow*

1. INTRODUCCIÓN

El esquema de la circulación profunda del océano derivado del Teorema de Taylor-Proudman en la esfera

1.1. La circulación en el interior del océano

Debido a la escasez de observaciones directas del flujo abisal en el océano, los experimentos de laboratorio y la teoría han sido una guía muy valiosa para deducir los patrones de circulación más probables. Hay dos inferencias importantes que se pueden hacer de las observaciones directas colectadas en el océano. Primero, las aguas densas se forman en la superficie en regiones pequeñas y altamente localizadas del océano en los mares polares. De esta manera, la circulación abisal parece ser inducida por fuentes localizadas. Pero, por conservación de masa, por cada partícula de agua que se hunde, otra debe retornar a la superficie. Sin embargo, las distribuciones de propiedades no sugieren que el retorno ocurra concentradamente en una o algunas pocas regiones del océano. Parece razonable suponer, entonces, que ocurre surgencia de modo disperso a la escala de las cuencas compensando el hundimiento, como ilustra la Figura 1.

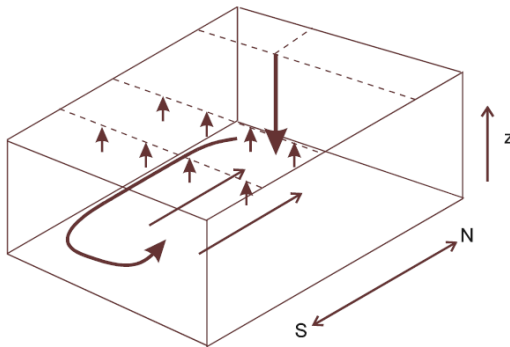


Figura 1: El agua profunda se hunde en una región localizada en latitudes polares (la flecha que apunta hacia abajo en la parte superior de la figura) y ocurre surgencia compensatoria distribuida sobre la cuenca (las flechas pequeñas que apuntan hacia arriba). Adaptada de Marshall y Plumb (2007)

Por otra parte, las observaciones muestran que el flujo profundo es lento y se desarrolla en escalas de tiempo muy largas. Por lo tanto, estará en balance geostrófico, hidrostático y de viento

térmico. La primera pregunta que intentaremos responder, entonces es cómo responde el flujo geostrófico a una velocidad vertical impuesta por pérdida de agua, como sería el caso de la capa profunda, a medida que ésta cede agua a la capa superior, por encima de la termoclina.

Para estudiar el efecto de la velocidad vertical (w) en el interior del océano utilizamos la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles y la aplicamos al flujo interior, por debajo de la termoclina, que suponemos geostrófico. Tomando la divergencia horizontal de las ecuaciones para la velocidad geostrófica (\mathbf{u}_g) obtenemos:

$$\nabla_h \cdot \mathbf{u}_g = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = -\frac{\beta}{f} v_g \quad (1)$$

donde p es la presión, hemos supuesto que la densidad (ρ) es constante, pero donde hemos tenido en cuenta que el parámetro de Coriolis (f) varía con y , notando que $dy = a d\phi$,

$$\beta = \frac{df}{dy} = \frac{1}{a} \frac{df}{d\phi} = \frac{2\Omega}{a} \cos \phi \quad (2)$$

es el gradiente meridional del parámetro de Coriolis. La ecuación (1) expresa que, debido a que f varía con la latitud, el flujo horizontal es divergente. Esta divergencia del flujo horizontal resulta de la modificación del espesor de las columnas de agua dado que la ecuación de continuidad expresa que:

$$\nabla_h \cdot \mathbf{u}_g + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Combinando las ecuaciones (1) y (3) obtenemos:

$$\beta v_g = f \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

que relaciona las corrientes verticales con las horizontales.

En la región de surgencia asociada a la circulación profunda (que podemos suponer que es casi todo el océano) la ecuación (4) debería ser básicamente válida. Integrándola entre el fondo (donde suponemos que la velocidad vertical es nula) y una profundidad intermedia, en la que hay surgencia, obtenemos:

$$\int_{\text{fondo}}^{\text{prof.in}} v dz = \frac{f}{\beta} w_{\text{prof.in}} \begin{cases} > 0 & H.N. \\ < 0 & H.S. \end{cases} \quad (5)$$

dato que al estar ocurriendo surgencia la velocidad vertical es positiva. Por lo tanto la columna de agua en el interior del océano debe moverse siempre hacia el Polo, es decir, hacia la fuente de agua profunda.

1.2. El teorema de Taylor-Proudman en la esfera

Es interesante discutir el significado físico de la ecuación (5). Esta puede ser interpretada de modo simple en términos de las restricciones impuestas por la rotación y la geometría al flujo, es decir, el teorema de Taylor-Proudman en la esfera. La explicación es la que sigue.

Consideremos primero las restricciones del posible movimiento. Si el océano fuera homogéneo, entonces el flujo estacionario, no viscoso, de bajo número de Rossby de este fluido en profundidad debería obedecer al teorema de Taylor-Proudman. Por lo tanto, el vector velocidad no puede cambiar en dirección paralela al eje de rotación y el flujo debe organizarse en columnas paralelas al vector rotación (Ω) como si fuese rígido.

Ahora consideremos qué le sucede a una columna cuando ésta pierde agua. Por continuidad podríamos pensar que el balance de masa podría satisfacerse simplemente mediante un flujo uniforme hacia adentro de las columnas. Sin embargo, aunque esto satisface la restricción de que el flujo sea independiente de la profundidad, no puede sostenerse en estado estacionario. En efecto, si el flujo presenta simetría axial, conservará su momento angular $\Omega r^2 + v_{\theta} r$, donde v_{θ} es la componente azimutal del flujo alrededor de la columna y r es el radio de la columna. Si hay surgencia desde abajo, entonces la columna debe angostarse de modo continuo. Entonces r debe reducirse y a su vez v_{θ} debe cambiar en una magnitud $\delta v_{\theta} = -2\Omega \delta r$ a medida que la columna se angosta en una magnitud δr . Por lo tanto v_{θ} se torna progresivamente mayor en la medida que aumenta el radio. Esto es obviamente inconsistente con nuestro supuesto de flujo estacionario y no parece físicamente consistente.

Para comprender lo que sucede, introduzcamos la restricción geométrica de que el flujo debe moverse en un casquete esférico, como muestra la Figura 2 (en la cual la profundidad del fluido se ha exagerado considerablemente para facilitar la interpretación).

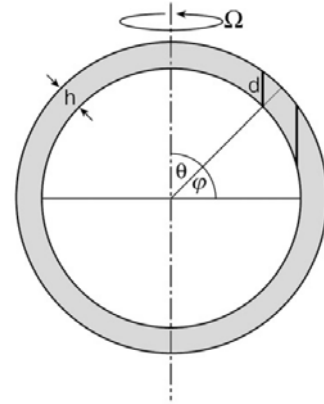


Figura 2: Una ilustración del teorema de Taylor-Proudman en una esfera rotante. Consideramos un casquete esférico de fluido homogéneo de espesor h . Las columnas de Taylor se alinean paralelamente al vector Ω . La latitud es φ y la colatitud, θ . Adaptado de Marshall y Plumb (2007).

Podemos ver que las columnas tienen mayor longitud en la dirección paralela al eje de rotación cerca del Ecuador. Por lo tanto, si la columna pierde fluido por arriba por la sistemática surgencia, puede reducir su altura sin modificar su ancho (lo que no está permitido en estado estacionario) simplemente moviéndose sistemáticamente hacia el Polo en el casquete esférico. La columna debe moverse hacia el Polo a la velocidad requerida para asegurar que la reducción en la altura de la columna debido a la surgencia sea compensada exactamente por una disminución en la altura de la columna en el casquete. Esta es esencialmente la forma en la que la surgencia conduce la circulación profunda en el interior del océano.

¿Cómo se puede cerrar la circulación hacia el polo en el interior? La respuesta es que, al igual que en la circulación de la capa superficial, forzada por el viento, se requiere una corriente de contorno oeste para cerrar el circuito, como se ilustra en la Figura 1. Así, por ejemplo, el flujo hacia el polo en el Atlántico Norte retorna hacia el sur, conjuntamente

con las aguas de la fuente, en una corriente de contorno oeste. Estas consideraciones llevaron a Henry Stommel a su esquema clásico de la circulación abisal ilustrado en la Figura 3, forzado por convección profunda en el Atlántico Norte y el Mar de Weddell.

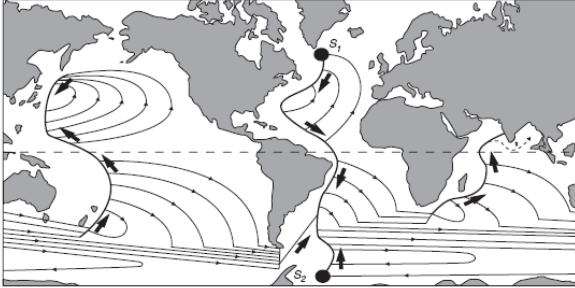


Figura 3: Esquema de la circulación abisal en el océano deducido por Stommel (1958) basado en la consideración de la ecuación (4) y su integral vertical (5). Adaptado de Stewart (2002).

1.3. La corriente de contorno oeste profunda

Henry Stommel hipotetizó la ocurrencia de una corriente de retorno por el oeste y su ocurrencia ha sido confirmada por las observaciones. La pregunta es ¿por qué una corriente de contorno oeste y no una este?

Para responder esta pregunta, reveamos lo que podemos deducir de la aplicación del teorema de Taylor-Proudman. Éste dice que *si el movimiento de un fluido rotante y homogéneo es lo suficientemente lento, estacionario y sin fricción*, entonces las columnas paralelas al eje de rotación no pueden inclinarse ni cambiar su espesor. Así, si se obedece este teorema, el espesor de la columna se preserva cuando ésta se mueve.

Las condiciones en *italica* del párrafo previo se verifican más probablemente en el interior del océano que cerca de los contornos laterales, donde los efectos de la fricción comienzan a jugar un rol, como veremos, permitiendo que las columnas pierdan o ganen masa.

Consideremos la relación geostrofica con f constante, pero ahora incorporemos una representación simple de la fricción, proporcional a la velocidad:

$$\begin{aligned} -fv &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \epsilon u \\ +fu &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \epsilon v \end{aligned} \quad (6)$$

Ahora derivamos cruzadas las ecuaciones, de modo de eliminar la presión. Obtenemos entonces:

$$f \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\epsilon \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (7)$$

Como, por continuidad, $\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial w}{\partial z}$,

entonces (7) se puede escribir:

$$f \frac{\partial w}{\partial z} = \epsilon \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (8)$$

¿Qué nos dice físicamente la ecuación (8)? Si el flujo no tuviera fricción ($\epsilon = 0$), el miembro derecho de la ecuación es nulo y recuperamos el teorema de Taylor-Proudman:

$$f \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Pero el teorema no se verifica en presencia de fricción, la que permite a las columnas estrecharse o estirarse a una tasa que depende de ϵ y de

$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$. Sabemos que la magnitud

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

es la componente vertical de la

verticidad relativa, que mide la tendencia a rotar de un fluido alrededor de un eje vertical relativo a la Tierra rotante.

Volviendo al problema de las corrientes de contorno, consideremos la corriente de contorno oeste que fluye hacia el sur en el hemisferio norte ilustrada en la Figura 4. Aquí, la verticidad relativa es ciclónica porque la corriente es mayor al oeste

que al este. Por lo tanto $\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} > 0$ lo que,

usando (8) conduce a $\frac{\partial w}{\partial z} > 0$. Esto es

exactamente lo que se requiere para que la corriente se mueva hacia el ecuador, dado que le

permite a la columna ‘estirarse’. De esta manera, del lado oeste, los signos de los miembros derecho e izquierdo de la ecuación (8) son consistentes. Ahora bien, del lado este de la cuenca, la verticidad relativa es anticiclónica, dado que la corriente es menor en el este que en el oeste. Por lo

tanto $\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} < 0$ lo que, usando (8) conduce a

$\frac{\partial w}{\partial z} < 0$. Pero, en este caso, entonces, la columna

se estaría estrechando, lo que sería inconsistente con un movimiento hacia el ecuador.

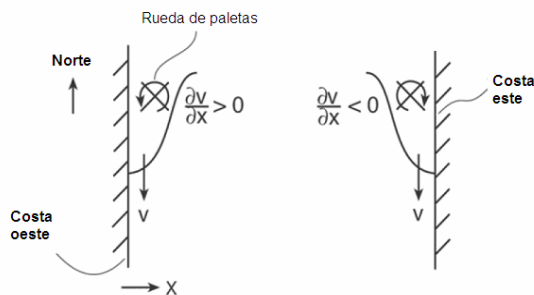


Figura 4: Diagrama esquemático de las corrientes de contorno en el experimento de laboratorio. El balance de masa de las columnas de Taylor moviéndose en las corrientes de contorno en la costa oeste (ya sea hacia el sur, como se muestra en este caso, o hacia el norte) se puede satisfacer. En cambio, el balance en la costa este (ya sea moviéndose hacia el norte o el sur) no puede ser satisfecho. Adaptado de Marshall y Plumb (2007).

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño experimental

Para la reproducción de la circulación profunda en una escala de laboratorio, usamos un tanque de acrílico de 50 x 50 cm de lado, montado sobre una mesa rotante (panel izquierdo de la figura 5). Se utilizó como trazador agua con tinta vegetal azul, la misma descende por gravedad desde un bidón situado fuera del dispositivo y por encima del primer embudo que se encuentra en la parte más alta de la mesa rotante. Desde este primer embudo, el agua descende hasta el segundo embudo fijado a uno de los extremos de la mesa (panel derecho de la figura 5). Para controlar el flujo de entrada se

utilizó un estrangulador de sueros que se encuentra en la manguera que conecta el bidón con el primer embudo. Una cámara digital fue montada solidaria al sistema rotante, mediante la utilización de una nuez y una varilla de hierro con un adaptador de trípode soldado en su extremo.

Para representar la esfericidad terrestre, colocamos un fondo inclinado. Luego, la parte menos profunda del tanque simula la latitud polar, y la más profunda, la ecuatorial (ver explicación en la figura 2, Sección 1.2)

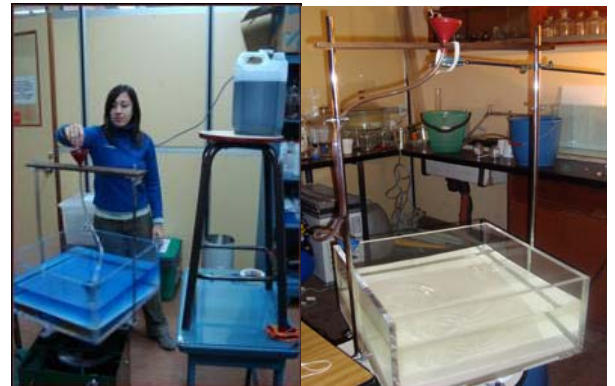


Figura 5: Imagen izquierda, bidón con el agua coloreada y mangueras que lo conectan con la mesa rotante. Imagen derecha, mesa rotante con la cámara de fotos, antes de comenzar el experimento

El tanque de acrílico se llena de agua corriente hasta alcanzar aproximadamente 10 cm de espesor en su parte menos profunda.

Para los casos en que se requiera rotación, se debe hacer rotar la mesa hasta alcanzar su estado de equilibrio, de rotación de cuerpo sólido, a fin de que las ondas de gravedad que se generan al encenderse el dispositivo se hayan disipado. Este proceso lleva aproximadamente 15 a 20 minutos.

2.2. Experimentos

Se realizaron tres experimentos diferentes, con el fin no sólo de estudiar la circulación abisal en el océano, sino sus mecanismos forzantes y el efecto de cada uno de los mismos. El primero, haciendo uso del plano inclinado, con rotación, responde a la situación observada en la Naturaleza, donde actúan la rotación y la esfericidad terrestre. El segundo, sin plano inclinado, pero rotante, representa una ‘Tierra cilíndrica’ en la cual se ignora el efecto beta asociado a la esfericidad de la Tierra. El

último con plano inclinado y el sistema sin rotación, tiene por intención observar cuánto se modifica la solución en el caso en que el sistema no rota.

Aplicación de la teoría de Taylor-Proudman al experimento

Lo que debemos notar es que este experimento es un análogo dinámico, pero que no reproduce 'exactamente' lo que ocurre en la naturaleza. En ésta, las columnas de fluido profundo pueden ganar o perder fluido por intercambio con la capa superior. En el caso del experimento, sólo tenemos una capa. Notemos que si se introduce fluido en un tanque de lado de longitud L a una tasa S , entonces la profundidad en el tanque, h , crece a una velocidad dada por:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{S}{L^2} \quad (9)$$

En presencia de rotación, las columnas de fluido en movimiento estacionario, lento y sin fricción deben, por el teorema de Taylor-Proudman, mantener su espesor. Por lo tanto, si la superficie libre se eleva, una columna del interior, debe moverse hacia el extremo más somero del tanque *conservando su altura*. En un tiempo Δt la superficie libre ha aumentado en Δh y, por lo tanto, la velocidad vertical es $w = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{S}{L^2}$ por

(9). Dado que el desplazamiento de la columna debe ajustarse a la geometría de la cuña definida por la superficie libre y el fondo, entonces las velocidades horizontal y vertical deben mantener la

relación $\frac{w}{v} = \frac{dz/dt}{dy/dt} = \frac{dz}{dy} = \alpha$, donde α es la

pendiente del fondo. Por lo tanto, está dada por:

$$v = \frac{w}{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \frac{S}{L^2} \quad (10)$$

que es exactamente análoga a (4). La columna se mueve hacia la parte menos profunda del tanque, es decir, hacia 'el Polo'.

En relación con la analogía entre (10) y (4), vemos

que α juega el rol de $\frac{\beta D}{f} \approx \frac{D}{a}$, dado que

$$\beta \approx \frac{f}{a}, \text{ donde } D \text{ es la profundidad típica del}$$

océano y a es el radio de la Tierra. Es interesante notar que Ω no aparece directamente en las ecuaciones (6) o (7). Sin embargo, la rotación es un ingrediente crucial a través de la imposición de las restricciones de Taylor-Proudman.

Considerando algunos valores típicos, si $S = 20 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$, $\alpha = 0.2$, $L = 50 \text{ cm}$, encontramos que $v = 3,3 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, o sólo 20 cm en 10 minutos. Las corrientes de contorno son mucho más rápidas que esto.

3. RESULTADOS

3.1. Primer experimento: fondo inclinado y tanque rotante.

Se muestra a continuación la secuencia de la evolución del trazador en el primero de los experimentos realizados: simulando la esfericidad terrestre en una tierra rotante. La tinta se libera en el extremo este del lado polar (simulado por ser menos profundo), que comienza a fluir al oeste (Paneles 1, 2 y 3 de la Figura 6). Al alcanzar el extremo occidental del tanque, conforma una corriente de contorno estrecha y rápida, que se desplaza hacia el ecuador (parte más profunda) hasta encontrar la pared del lado profundo del tanque (Paneles 4 y 5 de la Figura 6). Allí comienza a desplazarse al este, retornando el flujo a lo largo de toda la cuenca, compensando el flujo de la corriente de contorno (Paneles 6, 7,8 y 9 de la Figura 6). El experimento ilustra exitosamente los principales rasgos de la circulación abisal en el océano: pese a la presencia de una fuente de masa en el Polo, la circulación en el interior de toda la cuenca es hacia la fuente y es cerrada por la ocurrencia de una corriente de contorno estrecha y relativamente rápida que fluye hacia el Ecuador.

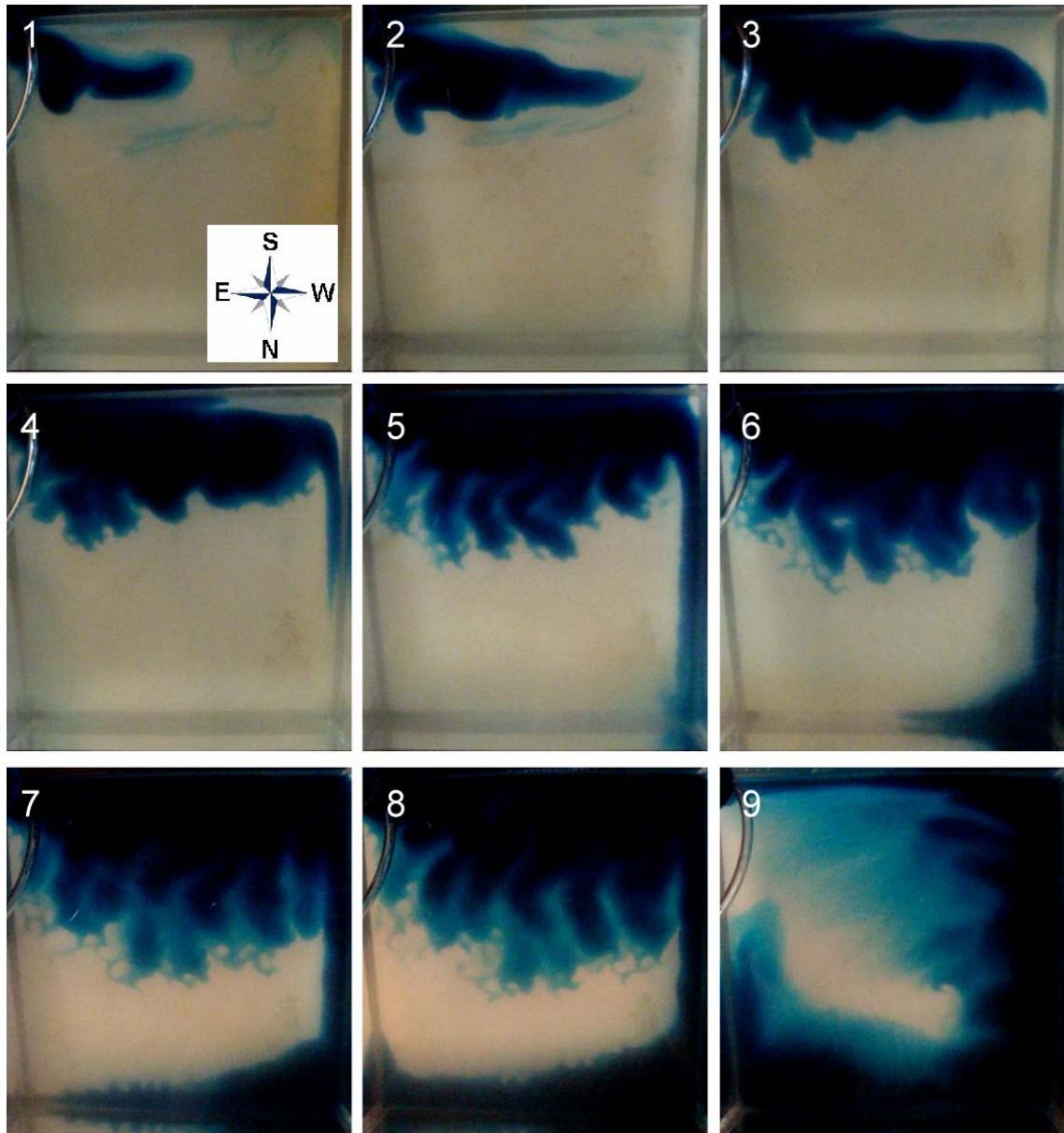


Figura 6: Secuencia del primer experimento: tanque rotante con fondo inclinado (simulando la esfericidad de la Tierra).

En el caso particular del experimento mostrado en la figura 6, del lado oeste del sector polar se introdujo una pequeña elevación del fondo respecto de su lado este. Como se observa, el flujo se mantuvo acorde a lo predicho por la teoría: las columnas de Taylor preservaron la altura, viajando por la zona de igual profundidad y alejándose ligeramente de la pared sur.

3.2. Segundo experimento: tanque rotante sin fondo inclinado.

A continuación se muestran los resultados obtenidos al no simular la esfericidad terrestre mediante la incorporación del fondo inclinado. Es decir, aquí tenemos una tierra que rota pero como si toda ella tuviera una latitud constante ($f=cte$), o si la Tierra fuera cilíndrica. Puede verse que el

fluido se comporta de manera muy diferente al caso anterior, conformando vórtices y sin la formación de la corriente de contorno oeste. La dirección del flujo (que es similar al caso anterior) se debe a que el agua que ingresa por la manguera que conecta el embudo en la esquina izquierda del tanque tiene una velocidad inicial en esa dirección.

Más aún, en este caso el flujo completa el recorrido alrededor del tanque prácticamente cinco minutos más rápido que el caso previo.

Puede concluirse de este experimento que la esfericidad terrestre es esencial en la dinámica de la circulación abisal en la Naturaleza.

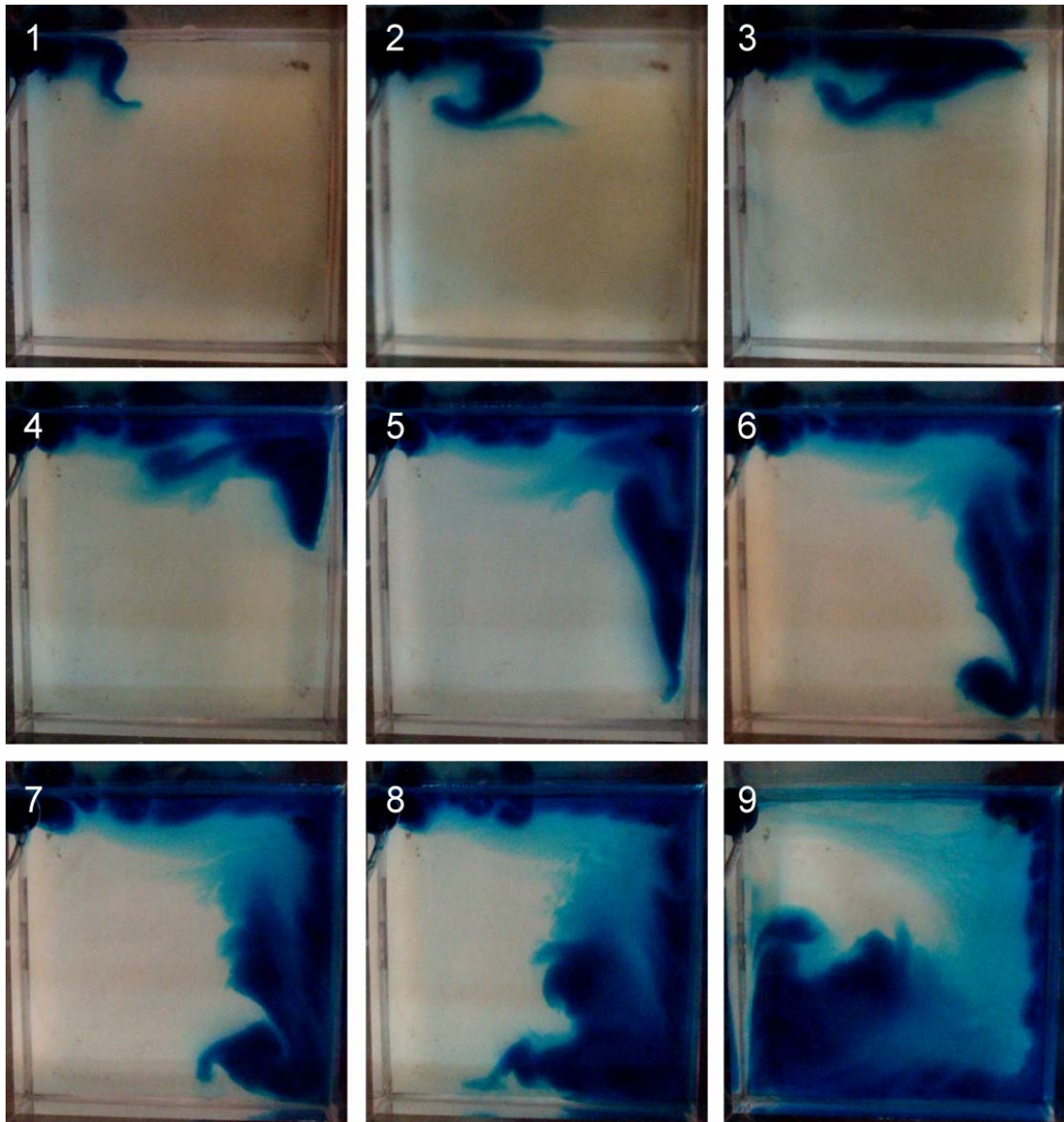


Figura 7: Secuencia del segundo experimento: tanque rotante sin fondo inclinado (sin la esfericidad de la Tierra).

3.3. Tercer experimento: fondo inclinado y sin rotación.

Por último, para apreciar el efecto de la rotación terrestre, se colocó nuevamente un fondo inclinado en el tanque, pero no se lo hizo rotar.

En este caso, como se observa en la figura 8, el flujo no sigue los contornos del tanque, a pesar de la orientación del ingreso del agua. Pueden verse

la formación de vórtices asociados a la mezcla entre el agua coloreada y el agua del tanque. La cobertura total del tanque se alcanza un minuto más tarde que en el caso del segundo experimento, aproximadamente.

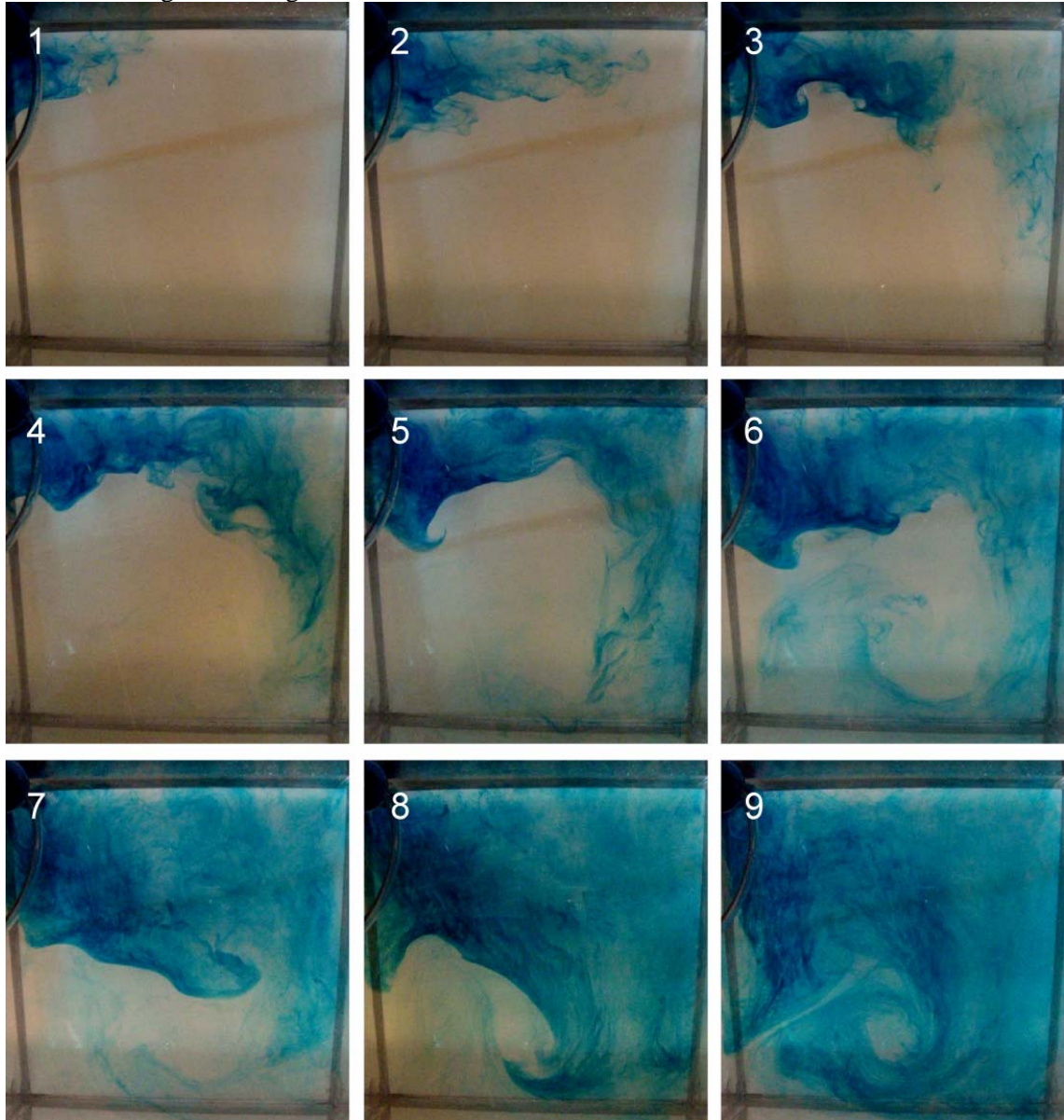


Figura 8: Secuencia del tercer experimento: tanque sin rotación y con fondo inclinado.

4. CONCLUSIONES

Mediante experimentos simples de laboratorio, se pudieron reproducir las características fundamentales de la circulación abisal en el océano: rotación y esfericidad terrestre, presencia de una fuente de masa, circulación masiva hacia la fuente en todo el interior del océano y formación de una corriente de contorno estrecha y relativamente más rápida en el contorno oeste. El experimento ilustra en términos visuales la complicada dinámica subyacente, a través de la utilización de un análogo dinámico. Al modificar las condiciones del experimento, se puso en evidencia cuales son los forzantes esenciales en la formación y el desarrollo de la circulación profunda. Se observa que tanto la esfericidad de la tierra como su rotación son elementos fundamentales en la dinámica del problema.

Estos resultados abren las puertas a una experimentación cuantitativa del fenómeno, dada la correcta reproducción cualitativa aquí presentada.

La experimentación es una herramienta muy valiosa para la enseñanza de dinámica de los fluidos geofísicos, en particular la oceánica, y se espera que estos experimentos constituyan una contribución a la mejora de la calidad de la enseñanza de nuestras ciencias en la FCEN y a la formación de recursos humanos en el área de flujos geofísicos experimentales.

REFERENCIAS

Marshall, John y Alan Plumb, 2007. Circulation of the Atmosphere and Ocean: an introductory text Massachusetts Institute of Technology, 519 pp.

Stewart, Robert, 2002. Introduction to Physical Oceanography, Department of Oceanography, Texas A & M University, 344 pp.

Weather in a tank: Exploiting laboratory experiments in the teaching of meteorology, oceanography and climate, Massachusetts Institute of Technology.

<http://www-paoc.mit.edu/labguide/th.html>

Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, School of Oceanography, University of Washington.

<http://www.ocean.washington.edu/research/gfd/index.html>

Meteorological Laboratory, Meteorologie in München Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität.

http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~robert/meteorologielabor/labor.html#taylor_proudman