



Original

Simulación directa de turbulencia en corrientes de gravedad con efecto Coriolis

J.S. Salinas, M.I. Cantero* y E.A. Dari

Instituto Balseiro, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina

Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 10 de junio de 2014

Aceptado el 5 de octubre de 2014

Palabras clave:

Coriolis

Corrientes de gravedad

Rotación

Simulación directa de turbulencia

RESUMEN

Las corrientes de gravedad son flujos generados por gradientes de presión horizontales resultantes del efecto de la gravedad sobre fluidos de diferente densidad. Cuando ocurren en la naturaleza, estas corrientes tienen un fuerte comportamiento no lineal y presentan un amplio rango de escalas temporales y espaciales. Adicionalmente, la rotación de la Tierra eleva el nivel de complejidad para el estudio de las corrientes de gravedad debido al efecto de la fuerza de Coriolis. En este trabajo se abordó el estudio de las corrientes de gravedad en geometría plana en rotación mediante simulación directa de turbulencia. Las simulaciones realizadas permitieron un análisis detallado de la evolución del flujo, tanto en los parámetros macroscópicos como en la estructura de la turbulencia. Las simulaciones se realizaron mediante un código pseudoespectral que emplea expansiones de Fourier en las dos direcciones horizontales y expansiones de Chebyshev en la dirección vertical. En este trabajo se documentó en detalle el código de cálculo desarrollado y se validó comparando una simulación con observaciones experimentales y predicciones teóricas. Se realizaron dos simulaciones con distintas velocidades de rotación. Se comprobó que dicha rotación restringe el desarrollo de la corriente en la dirección de propagación principal y se observaron oscilaciones en la posición del frente cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de rotación. Además, se observaron estructuras turbulentas de tipo Kelvin-Helmholtz verticales en el frente de la corriente producidas por la rotación del sistema.

© 2014 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Direct numerical simulations of gravity currents with Coriolis effect

ABSTRACT

Gravity currents are flows generated by horizontal pressure gradients resulting from the effect of gravity on fluids of different density. When they occur in nature, gravity currents have a strong nonlinear behavior and have a wide range of temporal and spatial scales. In addition, the rotation of the earth raises the level of complexity of gravity currents due to the effect of the Coriolis force. This work addresses rotating gravity currents in planar geometry by direct numerical simulation (DNS). The simulations allow for a detailed analysis of the flow development, macroscopic parameters of the flow and turbulence structure. Simulations were performed using a pseudospectral code that uses Fourier expansions in the two horizontal directions and Chebyshev expansions in the vertical direction. This work documents in detail the code developed and the validation performed by comparing a simulation with experimental observations and theoretical predictions. This work also reports on two simulations with different rotation speeds. It was found that the flow rotation restricts the development of the current in the propagating direction, and induces oscillations in the front position. The frequency of these oscillations varies linearly with the rotation speed. Finally, this work also reports on Kelvin-Helmholtz-like turbulent structures at the front of the current produced by the rotation of the system.

© 2014 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords:

Gravity currents

Direct numerical simulations

DNS

Coriolis

Rotational flows

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: mcantero@cab.cnea.gov.ar (M.I. Cantero).

1. Introducción

Las corrientes de gravedad (también llamadas corrientes de densidad) son flujos generados por gradientes de presión horizontales resultantes del efecto de la gravedad sobre fluidos de diferente densidad¹. Estos flujos se manifiestan como una corriente horizontal de fluido liviano por encima de un fluido pesado, o como una corriente de fluido pesado debajo de un fluido liviano. Estos fenómenos naturales son importantes en el transporte de masa, cantidad de movimiento y energía; a grandes escalas, que derivan en altos números de Reynolds, son altamente turbulentos y presentan un amplio rango de escalas temporales y espaciales.

Las corrientes de gravedad están presentes en la naturaleza en muchas situaciones y, en muchos de los casos de interés, son producidas por pequeñas diferencias de densidad. En la atmósfera, por ejemplo, la mayoría de las ráfagas intensas asociadas con las tormentas son causadas por la llegada de una enorme corriente de gravedad de aire más frío. Muchas veces estas corrientes se pueden identificar por la presencia de partículas de arena y polvo que han sido resuspendidas de la superficie terrestre por los fuertes vientos. Las avalanchas de nieve en las montañas son corrientes de gravedad en las cuales la diferencia de densidad se debe a la suspensión de partículas de nieve en el aire. Debido a los inmensos daños que pueden provocar estos fenómenos, en la actualidad existen centros de investigación dedicados especialmente al estudio de este tipo particular de corrientes de gravedad. Otro ejemplo de corrientes de gravedad es la marea negra. Un derrame de petróleo de un barco produce una corriente de gravedad de este fluido sobre la superficie marítima.

En las últimas décadas se han realizado gran cantidad de trabajos de simulación. Se han llevado a cabo estudios basados en simulaciones numéricas bidimensionales y tridimensionales con el objetivo de explorar la dinámica de las corrientes de gravedad²⁻¹¹. Se han realizado simulaciones tanto en configuraciones planas^{7,12-15} como cilíndricas^{12,13}. Simulaciones tridimensionales de alta resolución fueron realizadas por Cantero et al¹⁶ para corrientes de gravedad cilíndricas, y por Cantero et al¹⁷ para corrientes de gravedad planas.

Trabajos como los de Cenedese y Adduce¹⁸ y Marino et al¹⁹ estudiaron las corrientes de gravedad por medio de experimentos de laboratorio.

Por su parte, los trabajos de Fannelop y Waldman²⁰ y Hoult²¹ estudiaron el comportamiento de corrientes de gravedad mediante modelos teóricos simples. Estos modelos predicen la velocidad del frente durante las fases de hundimiento, inercial y viscosa. En la fase de hundimiento, el frente se mueve a una velocidad prácticamente constante ($u_F \approx cte$). La teoría hidráulica para corrientes de gravedad sin efectos de Coriolis propone $u_F \approx 0,5^{22,23}$. Basándose en experimentos de laboratorio, Huppert y Simpson²⁴ reportaron $u_F \approx 0,45$, y Cantero et al¹², basado en simulaciones directas de turbulencias y resultados experimentales, ha reportado $u_F = 0,45$. Tras la fase de hundimiento, se produce la transición a la fase inercial. El comportamiento asintótico de la corriente en la fase inercial se ha establecido como^{21,24-26}:

$$u_F = \frac{2}{3} \xi_p (h_0 x_0)^{1/3} t^{-1/3}. \tag{1}$$

Aquí, u_F , x_0 y h_0 son la velocidad del frente en la dirección de propagación de la corriente, la altura inicial de la corriente y el largo inicial, respectivamente. La diferencia entre las teorías se encuentra en la constante ξ_p . En nuestro estudio utilizamos el valor $\xi_p = 1,47$ propuesto por Cantero et al¹² en base al análisis de una gran cantidad de datos experimentales.

Realizando el balance entre la fuerza boyante y las fuerzas viscosas a lo largo de la interfaz entre el fluido de la corriente, el fluido ambiente y una superficie rígida horizontal, Huppert²⁷ obtuvo la siguiente solución para la fase viscosa:

$$u_F = \frac{1}{5} \xi_{pHp} h_0^{3/5} x_0^{3/5} Re^{1/5} t^{-4/5}. \tag{2}$$

En este trabajo utilizamos el valor $\xi_{pHp} = 3,2$ propuesto por Cantero et al¹².

La rotación de la Tierra eleva el nivel de complejidad para el estudio de las corrientes de gravedad debido a que la fuerza de Coriolis modifica drásticamente el desarrollo de la corriente. A diferencia de lo que ocurre con las corrientes de gravedad sin efectos de rotación, en las corrientes rotantes la literatura especializada es mucho más escasa. El trabajo más completo sobre los efectos de rotación en corrientes de gravedad es probablemente el de Hallworth et al²⁸, quienes reportaron resultados experimentales y numéricos (en dos dimensiones) de corrientes de gravedad cilíndricas en sistemas en rotación, focalizándose principalmente en el comportamiento general de las corrientes y en las características cuantitativas macroscópicas de las mismas. No se reportaron trabajos similares para corrientes de gravedad en geometría plana.

En este trabajo se abordó el estudio de las corrientes de gravedad en geometría plana en rotación mediante simulación directa de turbulencia. Las simulaciones se realizaron con un código pseudoespectral que utiliza expansiones de Fourier en las dos direcciones horizontales, y expansiones de Chebyshev en la dirección vertical. El trabajo se focalizó principalmente en documentar de manera detallada el modelo numérico utilizado, y en validarlo mediante la comparación de una simulación tridimensional de una corriente de gravedad sin rotación con datos experimentales. Para el análisis de las corrientes de gravedad bajo los efectos de la rotación se realizaron dos simulaciones tridimensionales con una resolución de 22 millones de puntos de grilla, número de Reynolds $Re = 4.000$, número de Schmidt $Sc = 1$ y parámetros de Coriolis $C = 0,15$ y $C = 0,25$. Este último parámetro se define como la relación entre la fuerza de Coriolis y la inercial. El detalle alcanzado en las simulaciones permitió un análisis detallado de la dinámica del flujo. Además, los valores elegidos para el parámetro de Coriolis fueron los adecuados para visualizar de forma evidente el efecto de la fuerza de Coriolis sobre la corriente. Se presentaron resultados sobre la máxima distancia de propagación del frente, la frecuencia de las oscilaciones del frente, el estado cuasi-estacionario de la corriente y las estructuras turbulentas presentes en el flujo.

2. Modelo matemático

El problema que consideramos se presenta de forma esquemática en la figura 1. Consiste en un dominio rectangular rotando a una velocidad angular constante Ω_z alrededor del eje vertical z que pasa por el centro del dominio. Un fluido pesado de densidad ρ_1 , inicialmente en una región rectangular de dimensiones $2x_0 \times L_y \times H$ (región gris sombreada en la figura 1), se encuentra separado del fluido ambiente de densidad ρ_0 ($\rho_1 > \rho_0$). Los dos fluidos se encuentran inicialmente en co-rotación con el dominio. Al comienzo de la simulación, el fluido más denso se libera produciendo un flujo que se propaga principalmente en la dirección x . Para nuestras simulaciones utilizamos $x_0 = H$.

Se consideran flujos en los que la diferencia de densidad es lo suficientemente pequeña como para que la aproximación de Boussinesq sea válida. Bajo estas circunstancias, las ecuaciones de conservación adimensionales para un fluido newtoniano en régimen incompresible en un sistema de referencia rotante son

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{u}} \cdot \tilde{\nabla} \tilde{\mathbf{u}} = -\tilde{\nabla} \tilde{p} + \frac{1}{Re} \tilde{\nabla}^2 \tilde{\mathbf{u}} + \tilde{\rho} \tilde{\mathbf{g}} + 2\tilde{C} (\tilde{u}_y \hat{\mathbf{x}} - \tilde{u}_x \hat{\mathbf{y}}), \tag{3}$$

$$\tilde{\nabla} \cdot \tilde{\mathbf{u}} = 0, \tag{4}$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{u}} \cdot \tilde{\nabla} \tilde{\rho} = \frac{1}{Re Sc} \tilde{\nabla}^2 \tilde{\rho}. \tag{5}$$

Download English Version:

<https://daneshyari.com/en/article/1727821>

Download Persian Version:

<https://daneshyari.com/article/1727821>

[Daneshyari.com](https://daneshyari.com)