

NUEVO ENFOQUE ANALÍTICO PARA LA DESCRIPCIÓN DEL MEZCLADO EN FLUJOS CONDUCCIONADOS POR GRAVEDAD

Beatriz M. Marino y Luis P. Thomas

Grupo Flujos Geofísicos y Ambientales, CIFICEN, CONICET-UNCPBA, Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina.
E-mail: bmarino@exa.unicen.edu.ar, lthomas@exa.unicen.edu.ar

Introducción

El interés por el cuidado del ambiente creció en forma significativa durante las últimas décadas, y con él la necesidad de comprender la dinámica de los flujos naturales para propender al manejo y la explotación del recurso hídrico en armonía con la naturaleza. Para simplificar el abordaje fenomenológico de los problemas presentados, en la mayoría de los casos se analizan flujos supuestos estacionarios y no estratificados. Sin embargo, hay situaciones en las que al flujo usualmente presente se le suma una corriente de gravedad (CG), cuya presencia puede afectar las propiedades hidrodinámicas globales. Las CGs son flujos de fluidos conducidos por diferencias de densidad causadas por variaciones de salinidad, temperatura o concentración de partículas suspendidas (Marino y Thomas, 2007). Estos flujos se presentan frecuentemente en una variedad de situaciones naturales y antropogénicas entre las que se encuentran las corrientes de agua salada generadas por los movimientos de las mareas en los estuarios, las corrientes sedimentarias en ríos, canales y lagos, y las aguas cálidas descargadas por las centrales termoeléctricas. Cualquiera sea el problema, la cuantificación del mezclado es de suma importancia, especialmente para controlar la calidad del agua.

Las CGs son mayormente flujos no estacionarios y turbulentos con un significativo ingreso de fluido ambiente. Las consecuencias de tal entrada y la dilución resultante pueden ser importantes. Por ejemplo, muchos contaminantes industriales son descargados en cursos acuáticos con una densidad diferente generando CGs con severas implicancias por los niveles de toxicidad y la extensión de la contaminación. Por tanto, se requiere información sobre la compleja estructura interna de las CGs para entender cómo el mezclado afecta la evolución del flujo (Hacker et al., 1996). A pesar de las aproximaciones basadas en la teoría de aguas-poco-profundas (Landau y Lifshitz, 1987) que describen la evolución de la velocidad del frente y la altura del flujo, ellas no proporcionan información cuantitativa sobre el ingreso del fluido ambiente a la zona frontal durante su propagación. La medida de la dilución de una CG, mediante el mezclado con el fluido ambiente, es un tema aun abierto. En la zona de mezclado se constituye el principal flujo de retorno por encima del fluido que compone la corriente. Así, los contaminantes ascienden por delante del frente y se incorporan a la corriente luego de mezclarse convectivamente desde el flujo de retorno. La recirculación, que favorece la dispersión de los contaminantes, involucra los efectos combinados de la convección y del transporte de materia. Ambos procesos son influenciados por los fuertes gradientes de los flujos superficiales, la rugosidad, la turbulencia, la profundidad del mezclado y las direcciones horizontal y vertical de los flujos presentes. Por su parte, la ocurrencia de CGs también afecta directamente al transporte y deposición de los sedimentos transportados.

En este trabajo proponemos un nuevo enfoque para cuantificar el mezclado generado por el ingreso de fluido ambiente a una CG que se desplaza sobre un lecho rígido. El modelo se centra en la zona frontal, no en el seno de la corriente como es habitual, gracias a que las hipótesis consideradas restan protagonismo a los vórtices causados por la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz sin pérdida significativa de la información relacionada con el mezclado. Se determinan el espesor de la

capa mezclada y la relación entre este, el coeficiente de ingreso E y los números adimensionales relevantes del problema. Se muestra que el mezclado no afecta significativamente el número de Froude densimétrico Fr , y por ende la evolución de la posición del frente es determinada por el balance de momentum o energía en el frente que determina $Fr_f \approx 1$ y, como consecuencia, también el número de Richardson global $Ri_g \approx 1$. Resultados de experimentos de laboratorio validan los hallazgos teóricos.

Modelado analítico

Sea una CG plana generada por la liberación instantánea de un volumen fijo de fluido de densidad ρ_2 en el seno de otro en reposo de densidad $\rho_1 < \rho_2$ sobre una superficie horizontal. Se trabaja en el marco de la teoría de aguas-poco-profundas y en la aproximación de Boussinesq ($\rho_2 - \rho_1 \ll \rho_2$). La variación de presión es hidrostática y, para un flujo plano unidimensional, el movimiento del fluido depende de la coordenada horizontal x y del tiempo t . La Fig. 1 ilustra el volumen de control que contiene la zona frontal de una CG estacionaria en un sistema de referencia cuyo origen se establece en el frente en reposo. Inmediatamente detrás de la zona frontal, la CG se compone de dos capas de fluido: una de altura h_3 y densidad $\rho_1 < \rho_3 < \rho_2$, que yace sobre otra capa de espesor h_2 y densidad uniforme ρ_2 .

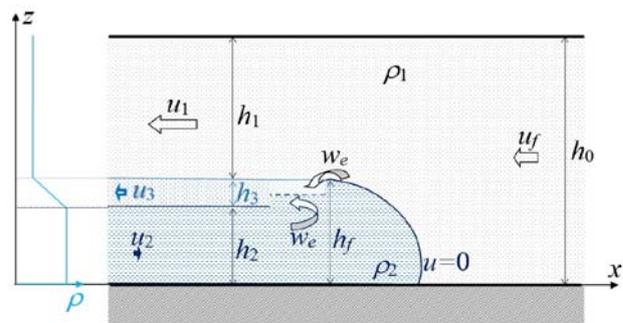


Figure 1.- Esquema de la parte frontal de una CG en un sistema de referencia que se mueve con el frente y definición de las variables empleadas.

El propósito del modelo es determinar las alturas adimensionales:

$$H_1 = \frac{h_1}{h_0}, \quad H_2 = \frac{h_2}{h_0}, \quad H_3 = \frac{h_3}{h_0}$$

y las velocidades adimensionales:

$$U_1 = \frac{u_1}{\sqrt{g'h_0}}, \quad U_2 = \frac{u_2}{\sqrt{g'h_0}}, \quad U_3 = \frac{u_3}{\sqrt{g'h_0}}, \quad U_f = \frac{u_f}{\sqrt{g'h_0}},$$

características del problema planteado, con g' : gravedad reducida. El ingreso del fluido liviano a la CG se produce con velocidad $w_e = E_0 u_f$, donde $E_0 \ll 1$ es una constante empírica encontrada para $H \rightarrow \infty$. Cuando H es finita, el fluido sobre la corriente se desplaza con velocidad $u_1 > u_f$, y entonces la situación equivale a la de una CG que se desplaza con esa velocidad en un fluido de profundidad infinita, de modo que

$$w_e = E_0 u_f = \left(\frac{u_1}{u_f} E_0 \right) u_f = E u_f \quad [1]$$

i.e., el mezclado aumenta un factor u_1/u_f respecto del que habría para $H \rightarrow \infty$.

Para $Ri_g \geq 1$ la hipótesis tradicional por la cual el caudal por unidad de ancho que se incorpora a la corriente es $w_e h_f$ debe modificarse porque h_f no es un parámetro significativo asociado al mezclado, al menos en forma directa. Si la altura característica asociada al mezclado es $h_3 < h_f$, el número adimensional relevante es el número de Richardson local

$$Ri_\ell = \frac{g'_f h_3}{u_f^2 + u_2^2} \quad [2]$$

que debe ser del orden de la unidad.

Por otra parte, la velocidad de la corriente se relaciona con el espesor por medio del número de Froude:

$$Fr_a = \frac{u_f}{\sqrt{g'_f h_a}} = \frac{u_f}{\sqrt{g'_0 h_a|_{eq}}} \quad [3]$$

donde el subíndice “a” indica que la altura h se mide en la parte trasera de la zona frontal ($h_a = h_2 + h_3$), mientras “eq” indica que h_a es la altura equivalente de la CG si no existiese mezclado.

La capa de mezclado de espesor h_3 se compone de los fluidos liviano y denso que se incorporan con tasas similares. Se supone que la densidad varía linealmente entre los valores máximo (ρ_2) y mínimo (ρ_1), resultando la densidad promedio en la capa 3:

$$\rho_3 \approx \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad [4]$$

Bajo estas condiciones se plantea la conservación de la masa y también la del momentum en la dirección x . De este modo queda determinado un sistema de 7 ecuaciones acopladas con 7 incógnitas que se resuelve numéricamente.

Metodología experimental

Los flujos de gravedad se generan en un canal horizontal de sección transversal rectangular de $3.00\text{m} \times 0.20\text{m} \times 0.60\text{m}$ cuyas paredes laterales son de acrílico transparente. El fluido denso (solución salina; ρ_2) se encuentra inicialmente en un compartimento con una compuerta vertical móvil localizada a una distancia $x = x_0$ de uno de los extremos del canal ($x = 0$). El compartimento se llena hasta la misma profundidad h_0 que el resto del canal que contiene agua (ρ_1). El experimento comienza cuando, levantando rápidamente la compuerta, el fluido denso colapsa formando una CG y finaliza cuando la corriente alcanza el extremo opuesto del canal. Varias series de experimentos se realizaron variando la gravedad reducida inicial $g'_0 = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$, x_0 y h_0 .

Un panel lateral de iluminación ubicado detrás de una pantalla difusora y a lo largo del canal provee un fondo luminoso uniforme. Una video cámara JAI CVM4+MCL, colocada a una distancia fija de 6 m del canal, permite obtener las imágenes digitalizadas en tiempo real usando el software *DigiFlow* (Dalziel, 2016). La medición de la posición del frente $x_f(t)$ y las alturas h_f y h_a se realizan directamente sobre las imágenes capturadas. A partir de ellas, se determinan las magnitudes derivadas (e.g. velocidad, Fr , Ri_ℓ). Mediciones de la intensidad de la luz en cada pixel permiten obtener la distribución bidimensional de densidad $\rho(x, z, t)$ de cada imagen.

Para determinar el entrainment E y las variables de interés, de los experimentos se determina h_3 como:

$$h_3 = h_a - h_a|_{eq} \quad [5]$$

Notar que h_3 es la diferencia entre la altura de la CG atrás de la

zona frontal medida h_a y la altura equivalente que tendría el flujo si no existiese mezclado $h_a|_{eq}$. Esta última se determina para cada posición x integrando verticalmente la distribución de densidad instantánea:

$$h_a|_{eq}(x, t) = \int_0^H \frac{\rho(x, z, t) - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} dz \quad [6]$$

Resultados

Los resultados del modelo analítico indican que $h_3 = 0.6h_a$, lo cual es corroborado experimentalmente como se observa en la Fig. 2. El número de Froude y la velocidad del frente ($Fr = 0.6$, $U_f = 0.4$) también concuerdan razonablemente con los resultados experimentales, aunque las respectivas figuras no se presentan aquí por cuestiones de brevedad. Por otra parte, los balances de masa y momentum en la zona frontal y las hipótesis planteadas proporcionan información sobre el mezclado que hasta ahora no había sido reportada. Así, para el ingreso del fluido menos denso a la CG resulta $E \approx 0.4$. Por su parte, la velocidad del fluido denso U_2 dentro de la corriente no es constante como se suponía hasta ahora, sino que crece paulatinamente con $H_a = h_a/h_0$ desde $U_2 \approx 0.2$ para flujos de gravedad que se desplazan en un medio infinito ($H_a \approx 0$). Esto tiene su explicación en el hecho por el que, a medida que la CG abarca una proporción mayor de la profundidad del canal, U_1 es más grande por conservación de la masa, generando así un mezclado más intenso.

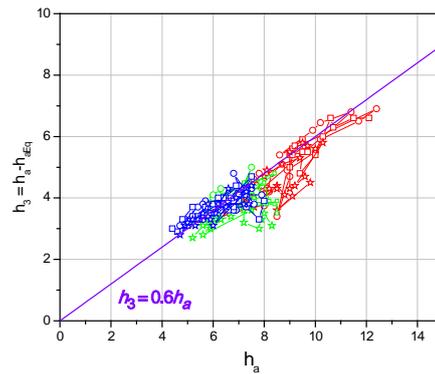


Figura 2.- Espesor de la capa de mezclado en función de la profundidad de la CG detrás de la zona frontal.

Conclusiones

Se implementó un modelo teórico que permite cuantificar el mezclado generado detrás del frente de una CG y correlacionarlo con otros parámetros característicos del flujo. Esto representa un avance en la comprensión de una fenomenología que aun en el presente genera discrepancias. Se encuentra un buen acuerdo entre resultados teóricos y experimentales para $0.25 < Ri_\ell < 1$, en concordancia con la teoría de las inestabilidades generadas entre dos capas de fluido que se mueven a distintas velocidades. Otros puntos de interés serán analizados y discutidos en el trabajo extenso.

Referencias

- Dalziel, S.B. (2016). *DigiFlow User Guide*. <http://www.damtp.cam.ac.uk/lab/digiflow/>
- Hacker, J., P.F. Linden y S.B. Dalziel (1996). *Mixing in lock-release gravity currents*. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 24, 183-195.
- Landau, L.D. y E.M. Lifshitz (1987). *Course of Theoretical Physics*, Volume 6: Fluid Mechanics, 2nd edition, Pergamon Press.
- Marino, B.M. y L.P. Thomas (2007). *Corrientes de gravedad*. Independencia Gráfica y Editora, Tandil.