



CAMPO CERCANO DE UNA DESCARGA PESADA EN UN FLUJO CRUZADO

LORENA FERNANDEZ Y YARKO NIÑO

División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile, Casilla 228-3, Santiago, Chile

Fono: (56 2) 678 4390, Fax: (56 2) 6894171

lofernan@ing.uchile.cl , ynino@ing.uchile.cl

RESUMEN

Se presentan y discuten los resultados de un estudio experimental sobre la mezcla en el campo cercano de un chorro boyante plano descargado en la superficie de un flujo en un canal abierto. Los experimentos fueron conducidos en un canal con flujo de agua fresca, al que se incorpora una mezcla salina a través de un chorro vertical y uniformemente distribuido en el ancho. Las condiciones experimentales fueron parametrizadas en términos de escalas de longitud y el número de Froude ambiente, F . Se identificaron diferentes regímenes. Un régimen de penacho, caracterizado por un valor de $F < 1$, genera una cuña en el fondo del canal que se extiende hacia aguas arriba de la descarga con diluciones del orden del 60%. Un régimen de chorro, caracterizado por un valor de $F > 1$ moderado, genera una región bien mezclada en toda la profundidad del flujo con diluciones cercanas al 70%. Un régimen dominado por flujo cruzado se caracteriza por valores altos de F y por una región de alta densidad en la superficie que crece linealmente hasta completar la profundidad del flujo, con diluciones alrededor del 50% en esa región. La solución analítica propuesta por Rouse para este régimen difiere de los resultados experimentales del presente estudio, debido a que en su deducción no considera el momentum introducido por la descarga.

ABSTRACT

Results of an experimental study on the near-field mixing characteristics of a plane buoyant-jet discharge on the surface of an open flow are presented and discussed. Salt-water was added through a vertical jet, uniformly distributed in the channel width, to the fresh water flow. The experimental conditions were parameterized in terms of length scales associated to the jet/plume and jet/cross-flow transitions and the ambient Froude number, F . Different regimes were identified. A plume dominant regime with $F < 1$ generates a wedge that intrudes upstream with dilution values close to 60%. A jet dominant regime, characterized by moderate values of $F > 1$, generates a well mixed vertical region covering the whole flow depth with dilution values close to 70%. A cross-flow dominant regime characterized by high values of F , shows a region of high density close to the free surface which increases in size linearly in the downstream direction until it covers the whole flow depth, with dilutions of about 50%. Rouse's analytical solution for the dilution in this case differs from the present observations because his theory does not include the momentum input given by the discharge.



CAMPO CERCANO DE UNA DESCARGA PESADA EN UN FLUJO CRUZADO

1 Introducción

La descarga de residuos líquidos en cuerpos de agua tiene impactos a dos escalas distintas. A una escala local, en la vecindad inmediata de la descarga o campo cercano, se deben tomar precauciones que aseguren que las zonas de altas concentraciones sean restringidas a pequeñas regiones o zonas de dilución. A gran escala o campo lejano, sin embargo, se consideran distancias suficientemente alejadas de la zona de descarga, donde el residuo líquido pueda estar suficientemente mezclado con el flujo ambiente (Jirka et al, 1996).

Políticas de calidad de aguas en Chile, como las impuestas por el Proyecto Definitivo de Norma de Calidad de Aguas para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales, incluye el concepto de zona de dilución: como la región limitada de un cuerpo de agua donde se produce la dilución inicial de una descarga contaminante. La definición de esta zona es un tema que ha presentado cierta controversia, incluso en países desarrollados.

De lo anterior, es importante reconocer, que la distinción entre campo cercano y campo lejano se hace en términos de la hidrodinámica del problema y por lo tanto no está relacionado directamente con definiciones regulatorias de zonas de dilución. Es por ello que se necesita un conocimiento técnico profundo para que las políticas de calidad de aguas puedan ser bien aplicadas.

Una de los posibles casos de interés es la descarga de un chorro boyante (descarga de residuo líquido más pesado o más liviano que el fluido ambiente) dentro de un flujo cruzado ambiente. El comportamiento de un chorro boyante en un medio ambiente estancado es razonablemente bien entendido, sin embargo, esto no es así para descargas boyantes insertas en un flujo cruzado (Akar and Jirka, 1991). Agencias como la EPA (Environmental Protection Agency) se ha encargado de promover sistemas basados en métodos de análisis integral (UPLUME, UOUTPLM, UDKHDEN, entre otros) y modelos de zona de mezcla que se basan en escalas de longitud para clasificar las posibles interacciones de una descarga boyante con el fluido ambiente (CORMIX).

El objetivo del estudio experimental reportado en este paper, es contribuir a caracterizar la interacción entre un chorro boyante pesado plano y el flujo de un canal abierto y entregar evidencia experimental para entender la mezcla en el campo cercano de una descarga que posee distinta densidad que el fluido ambiente.

2 Descripción del estudio experimental

Los experimentos fueron realizados en un canal rectangular con paredes de acrílico, de 0.4m de ancho y 9.3m de largo. En el extremo de aguas arriba del canal se tiene una cámara de entrada, que recibe el caudal de agua fresca entregado por una bomba. En el extremo de aguas abajo, se ubica una cámara de desagüe que posee una compuerta de clapeta para el control del nivel del escurrimiento. Una descarga de mezcla salina fue introducida vertical y uniformemente distribuida en todo el ancho del canal, al flujo de agua fresca, a través de una caja rectangular de acrílico de 40x40x390mm posicionada en la superficie del escurrimiento, en una sección localizada



a 5m aproximadamente aguas arriba de la clapeta para asegurar que la capa límite estuviera totalmente desarrollada. La descarga de agua salina fue suministrada en la forma de un chorro plano, creado por una abertura de 1mm en la tapa inferior de la caja de acrílico.

Las tres componentes de velocidad fueron medidas en el campo cercano de la descarga, cubriendo planos verticales de la línea central del canal hasta una distancia de alrededor de 2 a 3 profundidades de escurrimiento, por medio de un sensor de velocidad Doppler acústico ADV con frecuencia de muestreo de 25Hz. Valores medios locales de la densidad del flujo fueron medidos en los mismos puntos de medición de velocidad con el ADV, a través de muestras extraídas directamente del flujo. Se grabaron también imágenes de video del flujo, agregando a la descarga salina permanganato de potasio para ayudar a la visualización y caracterización de los campos de densidad instantáneos.

Se realizó una serie de cinco experimentos diferentes, para distintos caudales de descarga ambiente (agua fresca) y descarga boyante (agua salada), Q_a y Q_0 , respectivamente, profundidad del flujo, H , y diferencia de densidad relativa entre el agua ambiente y la descarga salina, $\phi_0 = (\rho_0 - \rho_a) / \rho_a$, donde ρ_0 denota la densidad de la descarga salina y ρ_a es la densidad del agua ambiente. Las condiciones experimentales son resumidas en la Tabla 1, donde u_* denota la velocidad friccional del flujo de agua fresca. Esta velocidad fue determinada ajustando la distribución de velocidad media obtenida de las mediciones con el ADV al perfil logarítmico, válido para el flujo uniforme en canales.

Tabla 1 Condiciones Experimentales

EXP	Q_0 (l/s)	u_0 (cm/s)	ϕ_0	Q_a (l/s)	u_a (cm/s)	H (cm)	u_* (cm/s)
1	0.075	19.56	0.00114	1.799	1.84	24.39	0.119
2	0.075	19.56	0.00128	0.842	0.84	25.12	0.079
3	0.079	20.57	0.00115	2.999	3.09	24.3	0.155
4	0.083	21.54	0.002	1.144	0.94	30.45	0.075
5	0.109	28.26	0.002	1.324	1.93	17.13	0.137

3 Resultados

Dos escalas de longitud características fueron calculadas de las condiciones experimentales, éstas están asociadas a las transiciones de chorro/penacho y chorro/flujo cruzado. La primera representa la distancia a la que la descarga boyante tiene la transición de un comportamiento de chorro a penacho en un medio ambiente estancado. La segunda representa la distancia a la cual un chorro, en presencia de un flujo cruzado, comienza a ser deflectado (advectado) por el flujo ambiente. La escala de longitud chorro/penacho es definida como: $L_M = m_0 / j_0^{2/3}$, donde $m_0 = u_0 q_0$ es el momentum por unidad de longitud de la descarga boyante, u_0 denota la velocidad media de la descarga, q_0 denota el caudal por unidad de longitud de la descarga, $j_0 = g' q_0$ denota el flujo boyante por unidad de longitud de la descarga y $g_0' = g \phi_0$ es la



gravedad reducida, donde g es la aceleración de gravedad. La escala de longitud chorro/flujo cruzado es definida como: $L_m = m_0 / u_a^2$ donde u_a es la velocidad media del flujo ambiente. Tres parámetros adimensionales pueden ser determinados de estas escalas de longitud: L_M/H , L_m/H y L_M/L_m .

Los valores de las escalas de longitud características, sus adimensionales asociados y el número de Froude ambiente, definido como $F = u_a^3 / j_0$, correspondientes a las presentes condiciones experimentales, son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2 Escalas de longitud características y parámetros adimensionales asociados

EXP	L_M (cm)	L_m (cm)	L_M/H	L_m/H	L_M/L_m	F
1	22.4	10.8	0.92	0.44	2.07	2.87
2	20.7	52	0.83	2.07	0.40	0.24
3	23.8	4.3	0.98	0.18	5.60	12.67
4	17.5	50.6	0.58	1.66	0.35	0.20
5	25.2	20.7	1.47	1.21	1.22	1.30

El comportamiento de la descarga boyante y su interacción con el flujo cruzado ambiente en los presentes experimentos permite clasificarlos en tres distintos regímenes del flujo: i) dominado por flujo cruzado, ii) dominado por jet, y iii) dominado por penacho (Fernández and Niño; 2003).

3.1 Régimen dominado por penacho ($F < 1$)

El régimen dominado por penacho se asocia a valores de L_M/H menores a la unidad y a valores grandes de L_M/L_m . Esto significa que la transición chorro/penacho ocurre cerca de la descarga boyante antes de que ocurra la transición chorro/flujo cruzado, y el efecto de la corriente cruzada es débil. Los Experimentos 2 y 4 (Tabla 2) son ejemplos de éste comportamiento. La característica principal de la estructura de densidad de este flujo corresponde a una cuña de sal formada en el fondo del canal que se extiende varias profundidades de flujo aguas arriba de la descarga (Fig. 1b). La velocidad en exceso del flujo, definida como: $u_{exc} = u - u_a$, donde u es la velocidad media del flujo, permite identificar como se distribuye la velocidad de la descarga boyante dentro del flujo ambiente. La velocidad en exceso en la región de la cuña es negativa, lo que indica que la velocidad media del flujo es muy baja y la cuña de sal permanece establemente estratificada (Fig. 1b).

La dilución, definida como $S = \phi_m / \phi$, donde $\phi_m = \phi_0 Q_0 / (Q_0 + Q_a)$ y ϕ es la diferencia de densidad relativa, alcanza en la cuña valores del orden de 60% o menor, no obstante los valores de la dilución en la región aguas abajo de la descarga boyante son algo uniformes y del orden del 80 al 90% (Fig. 2b).



Los mecanismos que controlan una cuña salina son descritos por la teoría del flujo estratificado y se sabe de estudios previos (e.g., Arita y Jirka, 1987; Olivares, 2000) que el criterio para que exista una intrusión de cuña salina es que el número de Froude densimétrico, $F_D = u_a^2 / g_0' H$, sea menor que la unidad. En el caso de un chorro boyante, las diferencias de densidades son reducidas por los efectos de mezcla con el flujo cruzado, de modo que si se asume mezcla completa entre la descarga y el flujo ambiente, la diferencia de densidad relativa inicial es substituida por $g'_m \approx g'_0 / V$ para $Q_0 \ll Q_a$, donde $V = u_a H / q_0$ es la razón entre el caudal ambiente y el caudal de la descarga por unidad de longitud. Por lo tanto, la condición para la existencia de una cuña salina es que el Froude ambiente, $F_D \approx u_a^2 / g'_m H = F$, sea inferior a la unidad (ver Tabla 2).

La longitud de la cuña salina se puede calcular resolviendo las ecuaciones de Schijf and Schonfeld (1953), incorporando el Froude densimétrico obtenido de la mezcla completa entre la descarga boyante y el flujo ambiente y utilizando el coeficiente de fricción interfacial propuesto por Olivares (2000). La Fig. 3 muestra un buen ajuste entre la longitud calculada y observada de la cuña salina (Experimentos 2 y 4) adimensionalizada por la altura del flujo ambiente.

3.2 Régimen dominado por chorro ($F > 1$)

El régimen dominado por chorro se asocia a valores de L_M / H más grandes que la unidad y a valores igualmente grandes de L_M / L_m . Esto significa que la transición de chorro/penacho y chorro/flujo cruzado no ocurre dentro de la profundidad de flujo. El resultado es un chorro plano vertical que impacta directamente el fondo del canal. El Froude ambiente, en este caso, es mayor que 1 y se observa que no se forma una intrusión de cuña salina. Un ejemplo de este comportamiento es dado por el Experimento 5 (Tabla 2).

El chorro vertical genera una región bien mezclada que se extiende verticalmente en toda la profundidad del flujo en la zona cercana a la descarga, con diluciones de alrededor del 70% (Fig. 1c y 2c). La estructura del flujo ambiente es perturbada por el chorro, de modo tal que una región de velocidad en exceso negativa (o zona de baja velocidad media) es generada en la superficie del flujo aguas abajo de la descarga, junto con una zona de alta velocidad en exceso cerca del fondo (Fig. 1c). Aguas abajo de la descarga el flujo comienza a presentar estratificación con valores más bajos de S en la zona inferior del canal (cerca del 70%) y valores más altos de S en la superficie libre (cerca del 100%) (Fig. 2c).

3.3 Régimen dominado por flujo cruzado ($F > 1$)

El régimen dominado por flujo cruzado está asociado a bajos valores de L_M / H y grandes valores de L_M / L_m . Esto significa que la transición chorro/flujo cruzado ocurre antes que la transición chorro/penacho y en una región cercana a la superficie y a la descarga. Los Experimentos 1 y 3 (Tabla 2) son ejemplos de este caso. En ellos, la corriente cruzada comienza a ser dominante muy cerca de la descarga boyante y genera una región de altas velocidades negativas en exceso y una región de alta



densidad cerca de la superficie libre, la que crece linealmente hasta completar la altura de escurrimiento en una extensión longitudinal de alrededor de dos profundidades de flujo (Fig 1a). El número de Froude ambiente es bastante mayor a 1, lo que es indicativo de la gran fuerza relativa que posee el flujo cruzado frente al chorro o los efectos boyantes.

La dilución para este caso, es algo baja, con valores inferiores cercanos al 10% en la superficie libre y no mayores que el 50%, en la profundidad media, para una distancia equivalente a $2H$ aguas abajo de la descarga boyante (Fig. 2a).

Los procesos de mezcla de un régimen dominado por flujo cruzado son los que corresponden al proceso de difusión gravitacional desde una fuente en un medio semi-infinito. Este problema fue analizado por Rouse (1947) y la solución para la diferencia relativa local de la densidad en cualquier punto puede ser expresada de la forma siguiente:

$$\phi_g \frac{x F^{1/2}}{u_a^2} = 2.6 \exp\left(-5.4 \frac{y^2}{x^2} F\right) \quad (1)$$

La expresión anterior se obtiene suponiendo que la descarga boyante se comporta como un penacho lineal. El concepto de penacho lineal ha sido introducido en algunos estudios (Roberts, 1979; Cederwall, 1971) y es definido como una fuente de flujo boyante que no posee momentum o caudal inicial. La Fig. 4 contiene una comparación de la expresión analítica de Rouse y datos experimentales de Cederwall y del presente estudio (Experimento 3).

De la Fig. 4 se puede observar que los datos del Experimento 3 se encuentran en otro rango y lejos de la solución analítica de Rouse, no obstante existe una autosimilaridad de los perfiles de densidad relativa. Una explicación a lo anterior es que el análisis de Rouse no considera la incorporación del momentum de la descarga boyante en el flujo ambiente y es evidente que dicho momentum causa un fuerte efecto en el campo de flujo como puede ser observado en la Fig. 5. Del análisis de la estructura de la energía cinética turbulenta en exceso (K_{exc}/u_*^2) con respecto a la del flujo del canal sin descarga, se observa que esta variable mantiene un valor de aproximadamente 11, aun a distancias del orden de $2.5H$ de la descarga.

4 Conclusiones y Comentarios

Los resultados discutidos en este trabajo proporcionan evidencia experimental que contribuye a la comprensión de las posibles interacciones entre un chorro boyante pesado y la corriente cruzada de un canal abierto y su efecto en las características de mezcla en el campo cercano de esta clase de descarga. El comportamiento del flujo se caracteriza en términos de las escalas de longitud asociadas a las transiciones de chorro/penacho y de chorro/flujo cruzado y en base al número de Froude ambiente. Diversos regímenes fueron identificados. Un régimen dominado por penacho se genera cuando $F < 1$ y se caracteriza por una intrusión de cuña salina en el fondo del canal que se extiende aguas arriba de la descarga. En este caso se mantiene una región bien mezclada aguas abajo de la descarga con diluciones sobre el 80%. La longitud de la cuña calculada con el número de Froude densimétrico suponiendo mezcla completa



entre la descarga boyante y el flujo ambiente presenta un buen ajuste con la longitud observada de los experimentos de este estudio. A medida que F crece por sobre la unidad, la cuña salina es barrida por el flujo cruzado. Un régimen dominado por chorro se caracteriza por valores de $F > 1$ pero moderados. En este caso se genera una región bien mezclada en toda la profundidad de escurrimiento con diluciones cercanas al 70%. Un régimen dominado por flujo cruzado se caracteriza por un valor de F bastante mayor que 1 y genera una región de alta densidad cerca de la superficie libre, que crece linealmente hasta cubrir toda la profundidad de flujo con diluciones menores al 50%. La solución analítica de Rouse por difusión gravitacional no se aplicaría a las condiciones experimentales en este caso, porque ella no considera el momentum de la descarga y se pudo observar que la estructura de la energía cinética turbulenta del flujo ambiente es fuertemente afectada por dicho momentum. Por lo anterior, se recomienda la utilización de un modelo numérico del tipo $k-\varepsilon$ para la solución de el problema planteado, capaz de resolver tanto la estructura de la energía cinética turbulenta como los efectos boyantes en la capacidad de mezcla del flujo.

5 Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por Fondecyt a través del Proyecto 1010483 y por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

6 Referencias

Arita, M. and Jirka, G. Two-layer model of saline wedge II: Prediction of mean properties, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, 113(10), pp.1249-1263, 1987.

Akar, P. J. and G. H. Jirka. CORMIX2: An Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Submerged Multiport Discharges. U.S. EPA, Environmental Research Laboratory Athens, GA, EPA/600/3-91/073, 1991.

Cederwall, K., Buoyant slot jets into stagnant or flowing environment. Technical Report KH-R-25, W.M. Keck Lab. Of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, Calif. 1971.

Fernández, L. and Niño, Y. Near-Field mixing of plane buoyant-jet discharge on the surface of open channel flow. International Association of Hydraulic engineering and Research. (XXX IAHR Congress 24-29 August 2003, Thessaloniki, Greece). <http://iahr2003.internet.gr/>.

Jirka, G.H., and Doneker, R.L., and Hinton, S.T. User's manual for CORMIX: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. Office of Science and Technology, U.S. Environmental Protection Agency. 1996.

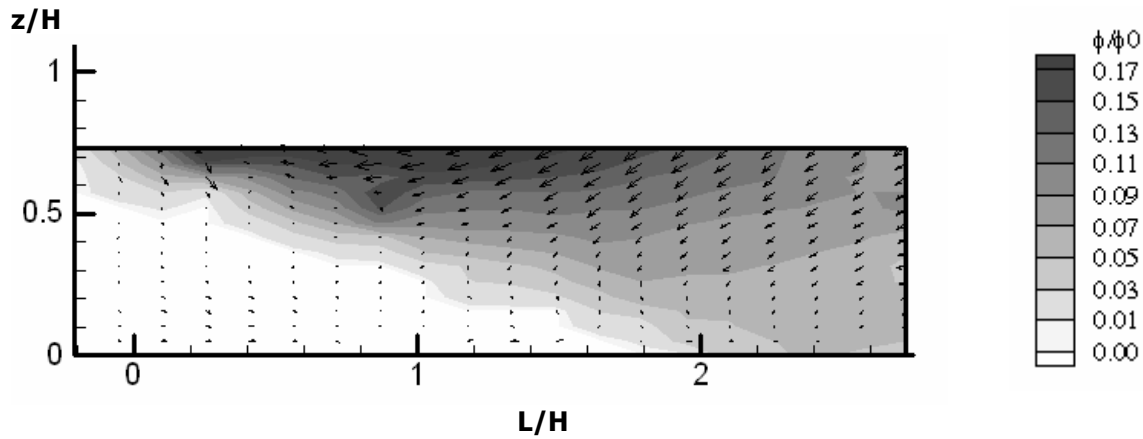
Olivares, Marcelo. Estudio analítico-numérico y experimental de la intrusión salina en estuarios estratificados". Memoria de título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, 2000.

Roberts, P.J.W. Dispersion of buoyant waste water discharge from outfall diffusers of finite length. Technical Report KH-R-35, W.M. Keck Lab. Of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, Calif., 1977.

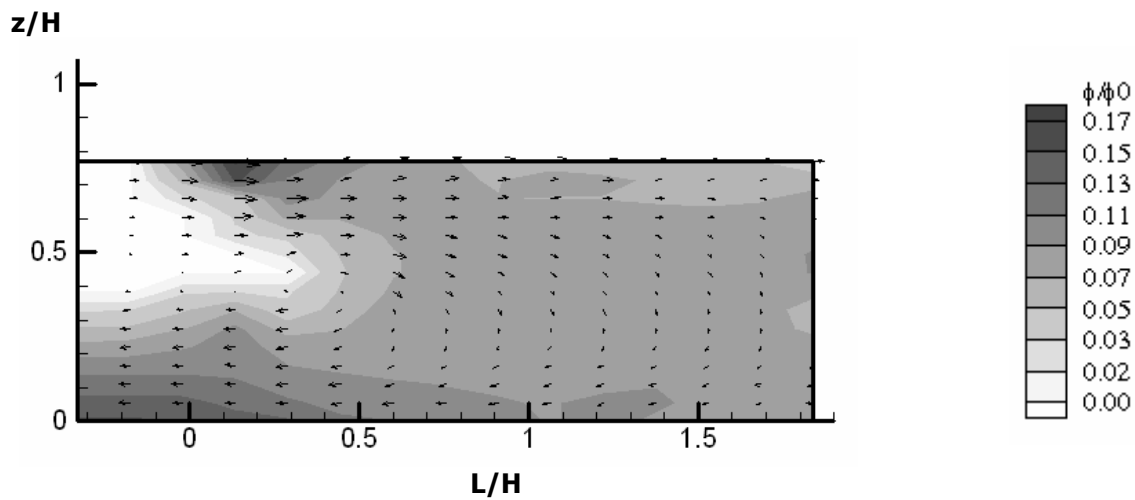
Rouse, H. Gravitational diffusion from a boundary source in two dimensional flow. *Journal of applied mechanics*, American society of mechanical engineers, ppA225-A228, 1947.



a)



b)



c)

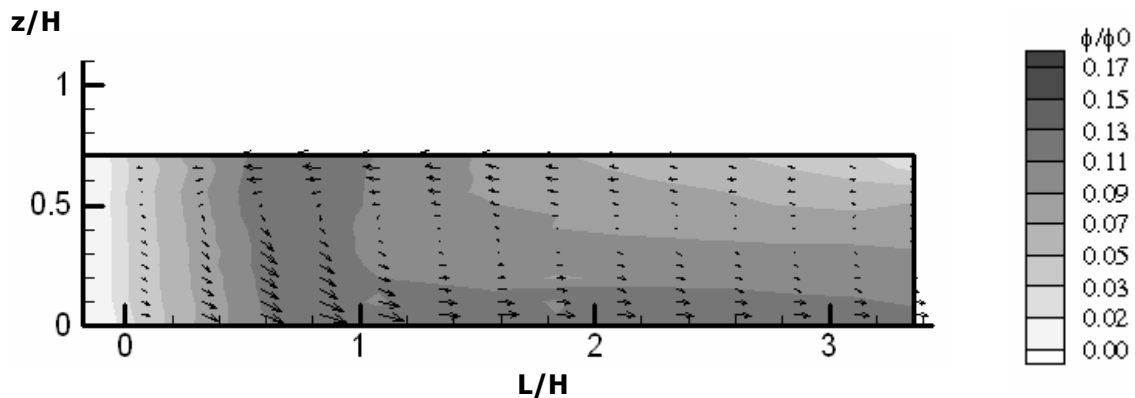
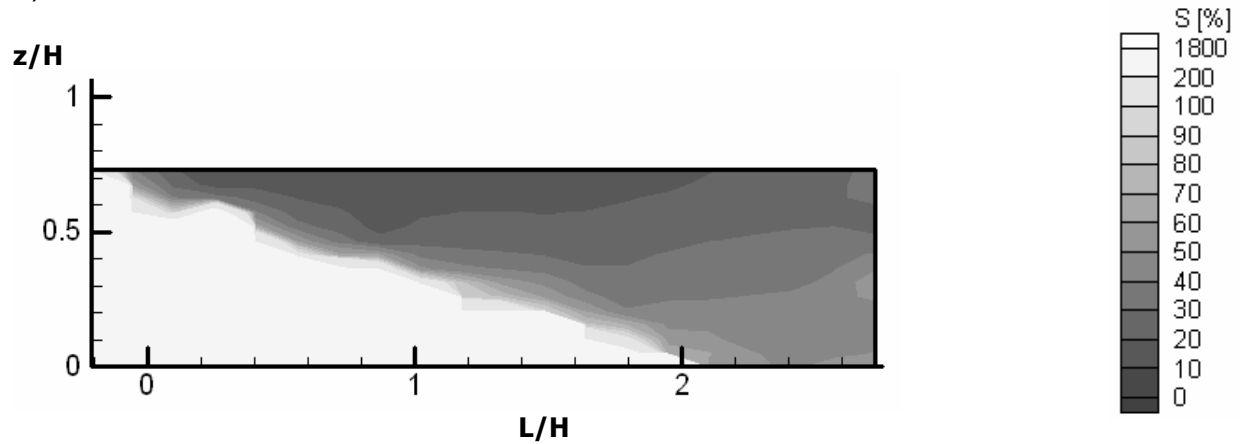


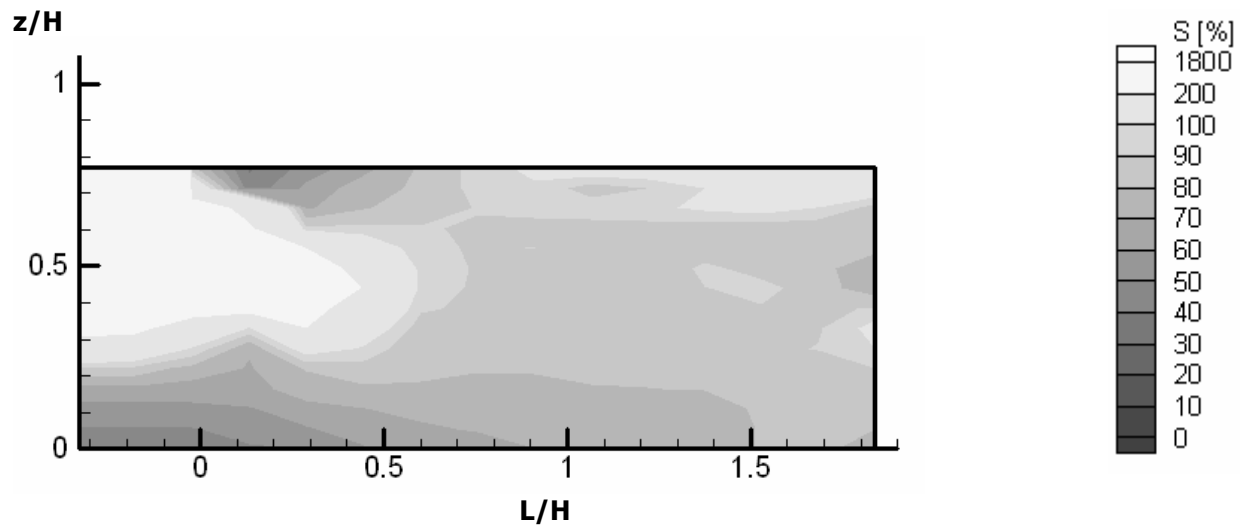
Figura 1 El campo de vectores representa la distribución de velocidad en exceso con respecto a la velocidad uniforme en el canal sin la descarga boyante. Los contornos representan la diferencia de densidad relativa ϕ/ϕ_0 . a) Experimento 3, b) Experimento 4, y c) Experimento 5. (Tablas 1 y 2).



a)



b)



c)

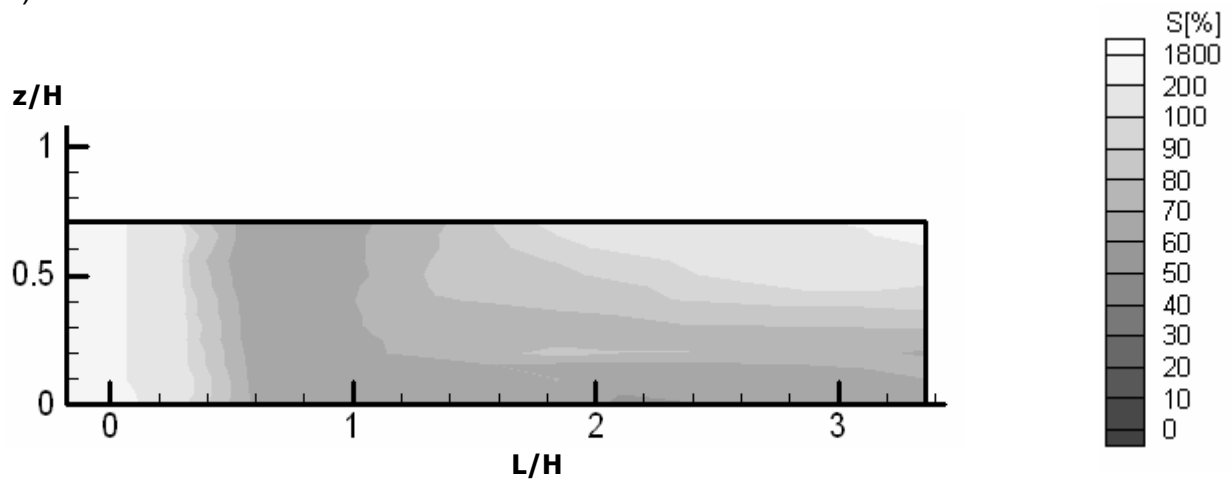


Figura 2 Distribución de la dilución S. a) Experimento 3, b) Experimento 4, y c) Experimento 5. (Tablas 1 y 2).

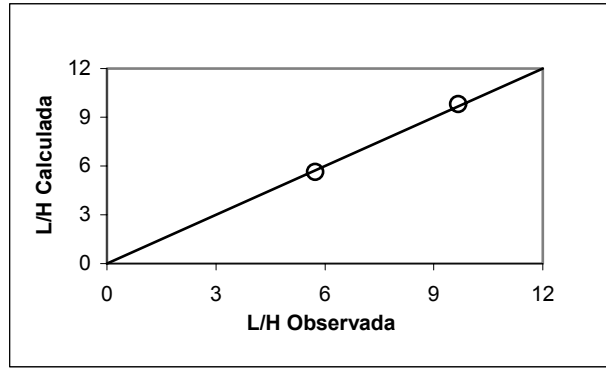


Figura 3 Comparación de la longitud de la cuña salina observada y calculada.

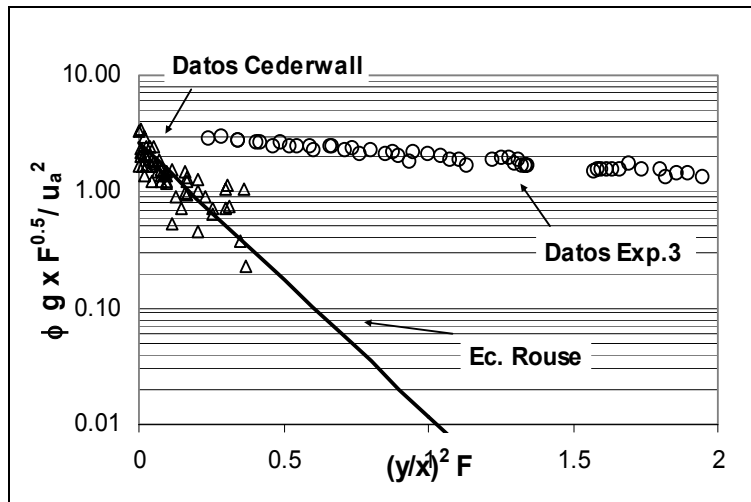


Figura 4 Comparación de la solución analítica de Rouse (1947) con datos experimentales de Cederwall (1971) y del presente estudio.

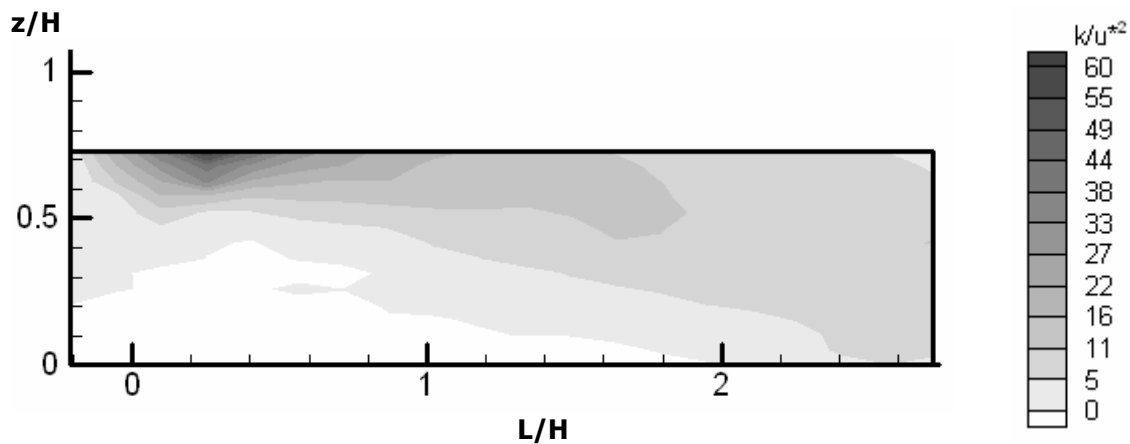


Figura 5 Estructura de la energía cinética turbulenta en exceso con respecto a la energía cinética turbulenta del canal sin descarga, adimensionalizada por la velocidad friccional del flujo sin descarga. Experimento 3 (Tablas 1 y 2).