

# COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE MEZCLA EN MACROESTRUCTURAS MORFOLÓGICAS PRESENTES EN RÍOS CON LECHOS DE GRAVA

Patricio Fuentes-Aguilera<sup>1,2</sup>, Diego Caamaño A.<sup>1</sup> y Hernán Alcayaga S.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

<sup>2</sup>Magíster en Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

<sup>3</sup>Escuela de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad Diego Portales, Santiago, Chile.

E-mail: pfuentes@magister.ucsc.cl, dcaamano@ucsc.cl, hernan.alcayaga@udp.cl

## Introducción

Es común en la práctica que los problemas relacionados con el transporte y destino de sustancias en ríos se resuelvan utilizando un enfoque matemático unidimensional (Botter and Rinaldo, 2003; Schnoor, 1996; Seo y Cheong, 1998; Lanzoni et al., 2018). Lo anterior precisa una correcta estimación del coeficiente de dispersión longitudinal (Sahay, 2010), que corresponde al parámetro que representa la tasa de dispersión del soluto a lo largo del medio fluido. Se conocen varios métodos para calcular este parámetro, basados en experimentos con trazadores o registros de velocidad (Fischer, 1979), y que deben traspasar la complejidad tridimensional del flujo a un valor representativo de la mezcla en la dirección longitudinal.

La gran mayoría de las ecuaciones predictivas del coeficiente de dispersión se expresan en términos de variables cuyos valores son promediados en el tramo de interés (Elder, 1959; Fischer, 1975; Seo y Cheong, 1998; Kashefipour y Falconer, 2002; Zeng y Huai, 2014; y Sahin, 2014), y consecuentemente no consideran el efecto de las variaciones locales producto de los cambios de forma del lecho, por ejemplo, macro formas del tipo pozón-rápido.

El objetivo del presente estudio es identificar el método adecuado para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal en macroestructuras pozón-rápido, comparando métodos empíricos disponibles en la literatura con el método de los momentos. Se definen diferentes escenarios morfológicos sobre los cuales se opera un modelo hidrodinámico y de transporte tridimensional, obteniéndose diferentes campos de concentraciones asociados a variables de forma del lecho, permitiendo la comparación de diferentes métodos empíricos. Se espera que los resultados indiquen el método más representativo de estructuras morfológicas del tipo pozón-rápido para aplicaciones de mezcla unidimensional.

## Métodos

### Batimetría sintética

Se desarrollaron 10 batimetrías sintéticas con base en Brown et al. (2015) y Deutsch y Wang (1996). Estos autores utilizan expresiones matemáticas para generar macroestructuras del tipo pozón-rápido en canales con alineación recta. La altura residual pozón-rápido se define como la diferencia de cotas de fondo entre el pozón y el rápido (Caamaño et al., 2009). En la Figura 1 se aprecia esta característica, junto a las demás unidades morfológicas consideradas en este estudio, como la altura residual ( $\Delta_z$ ), ancho del pozón ( $B_p$ ) profundidad del pozón ( $h_{pL}$ ) y profundidad del rápido ( $h_{rL}$ ).

En la Figura 2 se aprecia el resultado de aplicación del método matemático para la generación de batimetría sintética. Se aprecian dos pozones y dos rápidos. Los pozones son angostos y profundos, mientras que los rápidos son anchos y bajos en profundidad.

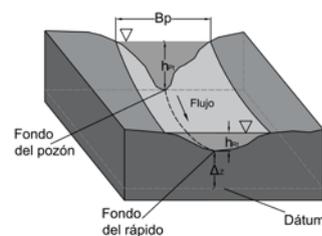


Figura 1.- Morfología tipo de la macroestructura (Caamaño et al., 2009).

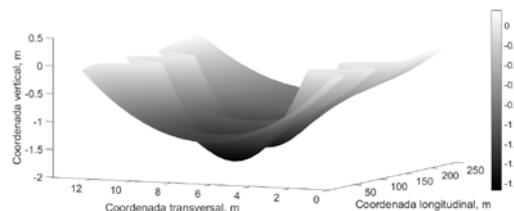


Figura 2.- Batimetría sintética para altura residual  $\Delta_z = 0.494$  m.

### Modelación numérica

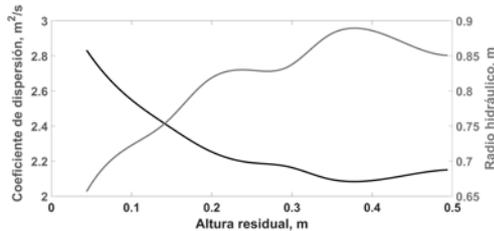
Se utiliza la herramienta numérica Delft3D en su versión de malla flexible. Éste se compone de varios módulos que interactúan entre ellos a través de una interfaz mutua. El módulo FLOW es capaz de simular procesos hidrodinámicos en tres dimensiones, resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes, con el supuesto realizado por Boussinesq para flujo incompresible. El módulo FLOW se acopla con el módulo Water Quality (WQ) que resuelve la ecuación de advección-dispersión tridimensionalmente. La solución se calcula para una grilla no estructurada con elementos rectangulares de dimensiones 0.455m x 0.107 m en la longitudinal y transversal respectivamente. La discretización vertical se realiza mediante 8 capas del tipo sigma (Deltars, 2016). La inyección de sustancia se genera aguas arriba del primer pozón completamente distribuida en la vertical y en la transversal, con el fin de asegurar una mezcla completa e instantánea. Finalmente, el coeficiente de dispersión se estima través del método de los momentos (Fischer et al., 1979).

### Comparación con expresiones empíricas

Muchos autores han desarrollado expresiones empíricas para la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal, entre los que destacan Elder (1959), Fischer (1975), Seo y Cheong (1998), Kashefipour y Falconer (2002), Zeng y Huai (2014) y Sahin (2014). Éstos estiman el coeficiente de dispersión longitudinal sobre la base de variables hidráulicas promediadas para un tramo de río (i.e. profundidad, ancho, velocidad, y velocidad de corte) y consecuentemente no consideran la singularidad morfológica producto de la macro-forma.

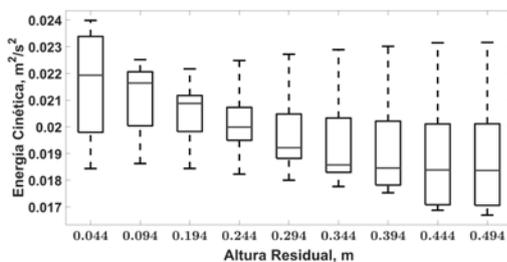
## Resultados y discusión

El resultado de los diferentes escenarios tridimensionales considerados se representa a través de curvas de tiempo-concentración para cada una de las 10 batimetrías sintéticas definidas. En cada uno de ellos se verifica la mezcla completa y la conservación de la masa de las curvas tiempo-concentración. La Figura 3 indica los resultados de la magnitud del coeficiente de dispersión para el rango de formas del fondo estudiadas (i.e. diferentes alturas residuales,  $\Delta_z$ ). Se observa que a medida que aumenta la altura residual, el coeficiente de dispersión disminuye. Sin embargo, para alturas residuales cercanas a 0.4 m, se presenta un punto de inflexión en que el coeficiente de dispersión cambia la tendencia decreciente con la altura residual por una creciente.



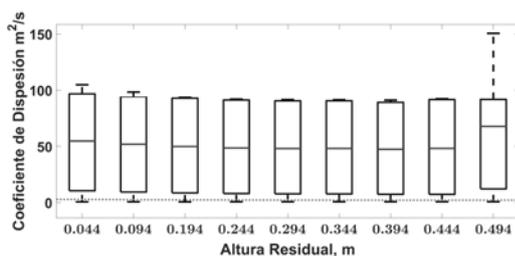
**Figura 3.-** Variación del coeficiente de dispersión (negro) y el radio hidráulico (gris) en la zona más profunda del pozón, con respecto a la altura residual.

La Figura 4 muestra los rangos de variación de la energía cinética turbulenta (TKE) a lo largo del pozón-rápido para cada uno de los escenarios  $\Delta_z$  estudiados. Se observan tendencias de la mediana de TKE similares a las expuestas en la Figura 3. Sugiriendo que niveles altos de turbulencia representados por el modelo matemático están asociados a mayores coeficientes de dispersión y viceversa, reforzando lo descrito en la literatura (Singh y Beck, 2003; Wallis y Manson, 2004; Baek et al., 2006).



**Figura 4.-** Gráficos de caja que representan la variación de la energía cinética turbulenta en cada uno de los casos en estudio.

La Figura 5 indica los coeficientes de dispersión estimados utilizando las expresiones empíricas antes mencionadas a lo largo del pozón-rápido. Las soluciones muestran diferencias significativas con los resultados del método de los momentos (que se muestra en línea punteada). Todos los autores sobrestiman el valor del coeficiente de dispersión en hasta en dos órdenes de magnitud en relación al método de los momentos, con excepción de Elder (1959).



**Figura 5.-** Gráficos de caja a partir de los resultados de las expresiones empíricas presentadas en el presente artículo.

## Conclusiones

A partir de los resultados de modelación es posible cuantificar la variación del coeficiente de dispersión para diferentes escenarios de modelación en relación con la macro forma pozón-rápido (i.e. el coeficiente de dispersión es sensible a la altura residual). Los resultados obtenidos de las expresiones empíricas disponibles en la literatura no representan estas variaciones, incurriendo en errores de hasta 2 órdenes de magnitud (Figura 5), siendo la expresión de Fischer (1975) la que mejor se ajusta a los resultados. Por lo tanto, se propone elaborar expresiones a través de análisis dimensional (Buckingham, 1914), que relacionen las características geométricas del pozón-rápido (i.e. altura residual del pozón) con el coeficiente de dispersión. Consecuentemente, la expresión propuesta debe ser validada a través de estudios de trazadores.

## Referencias

- Baek, K. O., Seo I. W. y Jeong S. J.** (2006). "Evaluation of dispersion coefficients in meandering channels from transient tracer tests." *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 1021.
- Botter, G., Rinaldo, A.** (2003). A scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion. *Water Resour. Res.* 39 (10).
- Buckingham, E.** (1914). "On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations". *Physical Review*, 4 (4), pp. 345-376.
- Brown, R., Pasternack, G. y Lin, T.** (2015). "The Topographic Design of River Channels for Form-Process Linkages". *Environmental Management*, 57(4), pp.929-942.
- Caamaño, D., Goodwin, P., Buffington, J., Liou, J. y Daley-Laursen, S.** (2009). "Unifying Criterion for the Velocity Reversal Hypothesis in Gravel-Bed Rivers". *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(1), pp.66-70.
- Deltares** (2016). *Delft3D Flexible Mesh Suite: D-Flow User Manual*. 1st ed. Delft: Deltares.
- Deutsch, C. y Wang, L.** (1996). "Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs". *Mathematical Geology*, 28 (7), pp.857-880.
- Elder, J.** (1959). "The dispersion of a marked fluid in turbulent shear flow". *Journal of Fluid Mechanics*, 5(4), pp.544-560.
- Fischer, H.** (1975) "Discussion of simple method for prediction of dispersion in streams by R.S. McQuivey and T.N. Keifer". *Journal of Environmental Engineering Division ASCE* 101, pp.453-455.
- Fischer, H., List, E., Koh R., Imberger, J. y Brooks, N.** (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic, New York.
- Kashefipour, S. y Falconer, R.** (2002). "Longitudinal dispersion coefficients in natural channels". *Water Research*, 36(6), pp.1596-1608.
- Lanzoni, S., Ferdousi, A., Tambroni, N.** (2018) "River banks and channel axis curvature: Effects on the longitudinal dispersion in alluvial rivers". *Advances in Water Resources*, 113, pp.55-72.
- Sahay, R.** (2010). "Prediction of longitudinal dispersion coefficients in natural rivers using artificial neural network". *Environmental Fluid Mechanics*, 11(3), pp.247-261.
- Sahin, S.** (2014). "An Empirical Approach for Determining Longitudinal Dispersion Coefficients in Rivers". *Environmental Processes*, 1(3), pp.277-285.
- Schnoor, J.L.** (1996). "Environmental modeling. John Wiley", New York.
- Seo, I. y Cheong, T.** (1998). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams". *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(1), 25-32.
- Singh, S. y Beck M** (2003). "Dispersion coefficient of streams from tracer experiment data." *Journal of environmental engineering*, 129, 539.
- Wallis, S. G. y Manson J. R.** (2004). "Methods for predicting dispersion coefficients in rivers." *Water Management*, 157(3), 131-141.
- Zeng, Y. y Huai, W.** (2014). "Estimation of longitudinal dispersion coefficient in rivers". *Journal of Hydro-environment Research*, 8(1), pp.2-8.