

## VALIDACIÓN FÍSICA Y NUMÉRICA DEL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DIRECCIONADORAS DE FLUJO

Jairo Vargas Gómez, Juan Urrea López, Gabriel Rosado Cantillo,  
Javier Valencia Gallego y Lilian Posada García

Universidad Nacional de Colombia.

E-mail: jhvargasg@unal.edu.co, jfurreal@unal.edu.co, garosadoc@unal.edu.co, javivaga@yahoo.es, lposada@unal.edu.co

### Introducción

La dinámica del flujo en canales antropizados y altamente confinados, como los que se encuentran en las zonas urbanas, exige soluciones de ingeniería para controlar procesos de agradación, degradación, inundación, etc., que ofrezcan mantenimiento mínimo. En los tramos sinuosos de canales recubiertos lateralmente con concreto (fondo natural), el flujo de gran velocidad durante las crecientes, se sobre-eleva generando desbordamientos que afectan la infraestructura aledaña al canal. En este trabajo se presenta una solución mediante diques sumergidos direccionadores del flujo para el manejo del problema de desbordamientos en el canal del río Medellín (Colombia), sector de La Macarena.

### Zona de estudio

El río Medellín (o río Aburrá) es el eje del valle de Aburrá (Figura 1) que se encuentra localizado al noroccidente de Colombia; numerosos afluentes drenan sus flancos occidental y oriental (Blanco et al., 2014). Tiene dos controles litológicos conocidos como Ancón sur (K22+000 desde el nacimiento en el municipio de Caldas) y Ancón norte (K55+500 en el municipio de Copacabana), que demarcan un valle estrecho con un canal sinuoso, donde el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) tiene la mayor concentración de población y equipamiento urbano.



Figura 2.- Localización general de la zona de estudio.

En la vecindad de los dos controles geológicos el canal presenta un alineamiento recto. Aguas abajo del Ancón norte el canal vuelve a ser sinuoso para finalmente rectificarse en forma natural antes de su entrega en el río Porce.

Debido al crecimiento urbano del Área Metropolitana del valle de Aburrá y a la construcción de un sistema de transporte masivo “metro de Medellín”, desde mediados del s. XX se ha modificado el patrón de alineamiento del río, pasando de tener

un canal natural sinuoso a un canal artificial casi recto y confinado lateralmente con muros y placas de concreto. Esta rectificación ha generado cambios en el comportamiento hidráulico del río tales como aumento en la pendiente longitudinal, aumento de la velocidad y, por lo tanto, de la capacidad erosiva de la corriente; formación de barras de sedimento que en algunas zonas pueden ocasionar una reducción de hasta un 30% de la capacidad hidráulica del canal.

A pesar de la rectificación, entre los dos controles litológicos existe una leve sinuosidad que obedece al patrón de alineamiento del mismo valle (Figura 1). En la parte interna de las curvas se presenta depositación que restringe la capacidad del canal en zonas bastante urbanizadas como el sector de la Macarena (Figura 2) lo que genera desbordamientos periódicos.

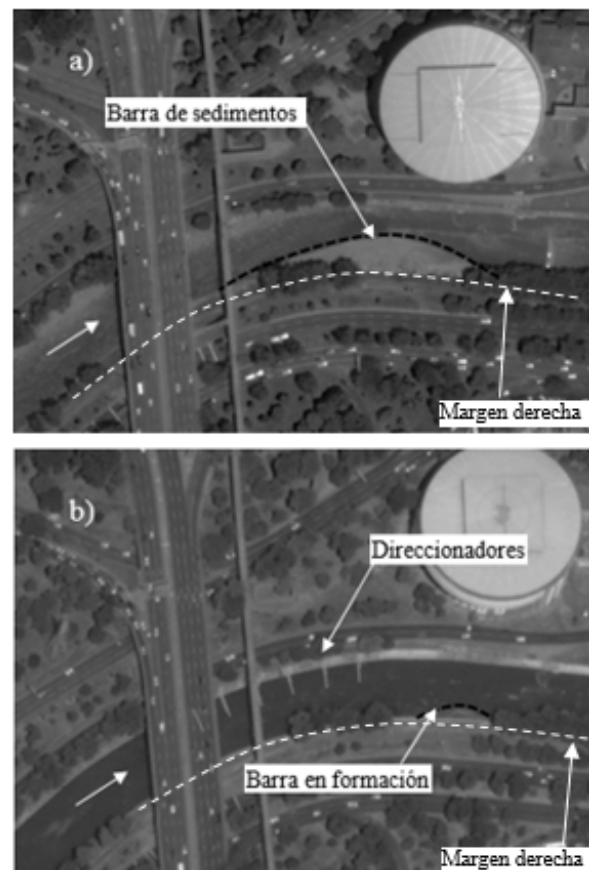


Figura 1.- Canal del río Medellín sector La Macarena. a) Antes de la construcción de los direccionadores (2013), b) Después de la construcción de los direccionadores (2016).

Buscando hacer frente a la problemática de formación de barras, en el sector de la Macarena se construyó en el año 2014 una serie de estructuras direccionadoras de flujo, para alejar las líneas de corriente de la banca externa protegiéndola de la socavación y propiciando la remoción de los sedimentos depositados en la curva interna del canal. En la Figura 2a se muestra una imagen de la barra de sedimentos antes de la construcción de las obras y en la Figura 2b se presenta el mismo sector con los direccionadores construidos y la barra removida.

Dos años después de la construcción de los direccionadores se evidenció la formación de una nueva barra de sedimentos, a unos diez metros (10 m) del último direccionador. En forma general, se evidencia que los direccionadores han funcionado de manera correcta, ya que el tamaño de la barra actual, es menor y la posición en la cual se encuentra se ha desplazado hacia aguas abajo. En el presente estudio se evaluó mediante un modelo hidrodinámico 2D la necesidad de construir nuevos direccionadores, que complementen el funcionamiento de los existentes y remuevan definitivamente la barra.

## Metodología

Para el diseño de los direccionadores existentes, se utilizó el criterio de (Shields, 1936) para estimar la capacidad del canal en aguas bajas, cuando se requiere remover el sedimento en la parte interna de la curva, con este criterio se determina para el caudal de aguas bajas la profundidad y el ancho necesario en el canal, en la nariz de la estructura (extremo en contacto con la corriente principal); en la cola de la estructura (empotramiento en la banca) se proporciona una mayor elevación con el fin de dirigir el flujo hacia la parte interna del canal aún en épocas de aguas altas (efecto de peralte).

La separación entre las estructuras obedece a criterios empíricos, mientras que la orientación obedece al radio de curvatura del canal y al factor económico. La sobre elevación del flujo en una curva se obtuvo mediante la ecuación 1. El comportamiento hidráulico se simuló a partir del programa HEC-RAS 4.1 (1D).

$$\Delta y = C * \frac{V^2 * B}{g * R_0} \quad [1]$$

En este estudio, se analizó el movimiento del flujo en el plano bidimensional, utilizando el modelo hidrodinámico HEC RAS 5.0.3 (2D), para definir la correcta orientación de las estructuras al igual que la separación de las mismas.

Con la información recolectada en campo con equipos acústicos de medición (ADCP) se obtuvo un campo de velocidades tanto en superficie como en profundidad, por lo que se pudieron determinar los vectores velocidad al pie de las estructuras hidráulicas y en los espacios entre ellas. De esta forma se pudieron comparar los resultados obtenidos con la modelación numérica para la misma configuración del canal y direccionadores y diferentes condiciones hidrológicas.

La velocidad y dirección de las líneas de corriente obtenidas con el modelo numérico son comparadas estadísticamente con las obtenidas en campo, a través de pruebas como el error cuadrático medio (ECM, ecuación 2) y el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>, ecuación 3); con ello se verifica la validez de los modelos en el diseño de este tipo estructuras.

Error cuadrático medio

$$ECM = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \gamma_i)^2}{n} \quad [2]$$

Donde  $n$  es la totalidad de los datos,  $Y_i$  es el valor del modelo en la posición  $i$  y  $\gamma_i$  el valor medido en la misma posición  $i$ .

Coefficiente de determinación R<sup>2</sup>

$$R^2 = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x^2 \sigma_y^2} \quad [3]$$

Donde  $\sigma_{xy}$  es la covarianza de los valores observados  $x$  y los valores predichos  $y$ ,  $\sigma_x$  es la desviación típica de los valores observados  $x$ ; y  $\sigma_y$  es la desviación típica de los valores observados  $y$ .

Dicha comparación, permitió evaluar la bondad de las herramientas 2D en la modelación de estructuras hidráulicas

(direccionadores) y además generar recomendaciones que permitan mejorar el diseño de estas obras en ríos sinuosos.

El software HEC-RAS 5.0.3 en su modelación bidimensional utiliza las ecuaciones denominadas de Saint Venant de energía para aguas poco profundas, estas surgen de la integración en la vertical de las ecuaciones de Navier Stokes; además, como es sabido, el modelo utiliza las ecuaciones de conservación de masa y conservación de momentum en dos direcciones ( $x$ ,  $y$ ), las cuales son discretizadas tanto por la metodología de diferencias finitas como volúmenes finitos (Brunner, 2016).

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de la formación de vórtices horizontales entre los direccionadores de flujo. Las herramientas de modelación 2D permiten realizar análisis sobre el comportamiento del flujo alrededor de estas estructuras y ayudan a la toma de decisiones en su diseño.



Figura 3.- Generación de vórtices entre direccionadores a partir de la modelación numérica (Muestra) (HEC-RAS 5.0.3)

## Conclusiones y recomendaciones

La simulación del flujo del río Medellín en el sector de la Macarena permitió verificar la efectividad de estos direccionadores como estructuras auto-limpiantes, ya que el modelo fue capaz de reproducir de una forma muy aproximada el lavado de los sedimentos en la barra (aún se observa algo de la antigua barra).

El modelo permite concluir que las estructuras fueron insuficientes para completar el barrido de los sedimentos, por lo cual, se simuló el flujo en el canal agregando otros elementos direccionadores para completar ese barrido. Se recomendó la adición de nuevas estructuras cuya orientación se dejó igual que las anteriores, a pesar que el modelo mostró una mayor eficiencia utilizando estructuras inclinadas u orientadas hacia aguas abajo (no perpendiculares como las existentes).

## Agradecimiento

Al grupo de investigación en Hidráulica Fluvial de la Universidad Nacional, sede Medellín, por el apoyo en el trabajo de campo y al área Metropolitana el Valle de Aburrá, autoridad ambiental encargada del manejo del río que viabilizó económicamente la realización del estudio.

## Referencias

- Blanco, M. L., Giraldo, J. E., Pineda, C. A., Valencia, J., & Posada, L. (2014). Recuperación del nivel del lecho del río Medellín mediante estructuras de control de gradiente.
- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS 5.0, River Analysis System Hydraulic Reference Manual.
- Shields, A. (1936). Application of similitary principles and turbulence research to bed-load movement (translation from the German). Pasadena: U.S. Soil Conservation Cooperative Laboratory, California Institute of Technology.

