

# MODELACIÓN MORFODINÁMICA DE ESTRUCTURAS SEMI-PERMEABLES UTILIZANDO UN SOLUCIONADOR DE LAS ECUACIONES DE AGUAS SOMERAS

Nicolás Escobar Castañeda, Carlos A. Fuentes Cabrejo, Eduardo Bravo G. y Rafael Ortiz

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá., D.C.

E-mail: nescobar@unal.edu.co, cafuentesc@unal.edu.co, ebravog@unal.edu.co, roortizm@unal.edu.co

## Resumen

Este artículo presenta la metodología utilizada y los resultados alcanzados en la simulación numérica del comportamiento hidrodinámico e hidro-sedimentológico asociado a estructuras semi-permeables mediante un solucionador de las ecuaciones de aguas someras (SWE, por sus siglas en inglés), tomando como caso de ejemplo el manejo del caudal por el brazo Gaviotas del río Arauca, en el departamento de Arauca, Colombia. Las simulaciones se realizaron con el objetivo de representar de la forma más adecuada posible el comportamiento de estructuras conformadas por dos o más filas de pilotes hincados con algún relleno permeable entre las filas, pero considerando a la vez las limitaciones prácticas asociadas al costo computacional.

Se muestran también diferentes formas en las que podría considerarse el relleno de las estructuras y las implicaciones que tendría cada una de ellas dentro del contexto de la simulación, asimismo se introduce brevemente la herramienta utilizada, discutiendo sus ventajas y limitaciones. Finalmente, se presentan algunos resultados que muestran cómo podría utilizarse esta aproximación para realizar comparaciones cuantitativas dentro de un proceso de diseño o para la toma de decisiones.

## Introducción

La modelación numérica adquiere cada vez más importancia dentro del campo de la consultoría y el diseño de diferentes tipos de infraestructura; sin embargo, los retos dentro de esta área son crecientes y lograr representar el comportamiento de estructuras complejas en la práctica es aún una dificultad considerable al hacer uso de las herramientas computacionales. En este artículo se expone un enfoque para tratar de representar en particular el comportamiento de estructuras semi-permeables por medio de una modelación numérica orientada al diseño de una obra fluvial de cierta complejidad.

El tipo de estructura semi-permeable que se pretende representar está compuesto por dos filas de pilotes –que son impermeables en sí mismos– rellenas con llantas usadas, que sirven como disipador de energía a la vez que permiten el paso de cierta cantidad de agua a través de ellas. Las estructuras construidas de esta forma han sido utilizadas en algunas obras como espolones y protecciones de orilla (p. ej. en la bocatoma de Lórica, Córdoba, Colombia, como se muestra en la Figura 1).



Figura 1.- Espolón construido para proteger la bocatoma de Lórica, Córdoba, Colombia.

La adopción de este tipo de soluciones requiere realizar la modelación numérica de manera apropiada. En este artículo se aborda el problema del relleno considerándolo como una alteración en la ecuación de *momentum* mediante una fuerza de arrastre equivalente que, si bien disipa energía, no impide el paso de agua y se considera más adecuado desde el punto de vista morfodinámico que otras alternativas consideradas, como incrementar el coeficiente de Manning, estos atributos se discuten más adelante en el artículo.

## Ecuaciones de gobierno

La hidrodinámica del problema se modeló utilizando las ecuaciones de aguas someras, que se muestran (en forma vectorial) en la expresión [1].

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h\vec{u}) = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial (h\vec{u})}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -g(\nabla h + \nabla z_b) + \nu(\nabla^2 \vec{u}) \pm \vec{S}$$

Donde:

$h$  → es la profundidad de la lámina de agua;

$\vec{u}$  → es el vector de velocidad ( $u, v$ );

$g$  → es la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ );

$z_b$  → es la cota del fondo;

$\nu$  → es la viscosidad, puede incluir un componente turbulento;

$\vec{S}$  → es el vector de fuentes y sumideros ( $S_x, S_y$ ).

En las ecuaciones presentadas en [1] sólo se considera la hidrodinámica del problema, para estimar la evolución del fondo se requieren ecuaciones adicionales que den cuenta del transporte de sedimentos –tanto de fondo como en suspensión– partiendo de la hidrodinámica. Tales ecuaciones permiten calcular el valor de la cota de fondo tras cada paso de tiempo para evaluar nuevamente las ecuaciones dadas en [1]. Este procedimiento tiene un cierto nivel de error asociado, que se reduce si el paso de tiempo utilizado al resolver la hidrodinámica no es muy grande.

Las ecuaciones de transporte de sedimentos que fueron resueltas son: para el transporte de sedimentos en suspensión una ecuación de transporte (advección–difusión) donde se trata la carga de sedimentos como un escalar pasivo y, para los sedimentos de fondo se utilizó una propuesta de Van Rijn (1984) para el cálculo de la carga total de sedimentos de fondo, dicha propuesta incluye ecuaciones para calcular el diámetro adimensional, el número de Shields crítico y una tasa de transporte de fondo. Adicional a esto se utilizaron algunas parametrizaciones para tratar de considerar ciertos efectos que se pierden al utilizar SWE por las simplificaciones realizadas. Las parametrizaciones incluyen, el comportamiento de flujos secundarios y el transporte de sedimentos en zonas de pendientes locales elevadas.

Finalmente, la evolución del fondo se calcula superponiendo los efectos del transporte en suspensión y el transporte de fondo mediante ecuaciones independientes, ambas ecuaciones de evolución del fondo son de la forma dada en [2].

$$A \frac{\partial z_b}{\partial t} + B = 0 \quad [2]$$

Donde  $A$  está relacionado con la porosidad de lecho y  $B$  con la tasa de transporte correspondiente dentro de la 'celda'.

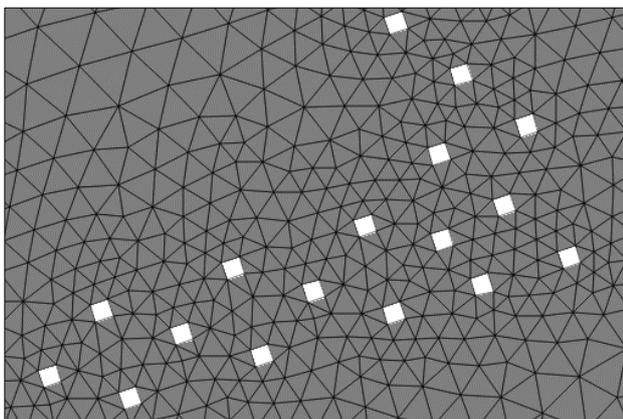
### Inclusión de las estructuras

La geometría de las estructuras se aproximó teniendo en cuenta un componente impermeable, dado por los pilotes que componen la estructura, y un componente permeable, mediante la inclusión de una zona en la que se genera un sumidero de *momentum* por medio de un enfoque derivado de la mecánica de fluidos 'clásica', en este enfoque se genera una fuerza de arrastre que se calcula de acuerdo con la expresión [3].

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \sqrt{u^2 + v^2} C_{dF} A \quad [3]$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido que multiplica la norma de la velocidad,  $C_{dF}$  es el coeficiente de arrastre, dependiente de la geometría y  $A$  es el área vertical proyectada de la estructura. Aunque este enfoque tiene serias limitaciones (como decidir qué valores de coeficiente son representativos y de qué área estamos hablando exactamente, dado que en el enfoque clásico se proyecta el área normal a la velocidad pero en este caso la dirección de la velocidad cambia en cada celda) tiene también grandes ventajas sobre otras opciones como aumentar el coeficiente de Manning para producir más pérdidas, *v. gr.* no induce la generación de esfuerzos cortantes adicionales sobre el lecho, lo que permite representar el fenómeno de mejor forma, separando los efectos de las pérdidas debidas al relleno que en realidad se generan en toda la dimensión vertical del cauce y no inducen cortante adicional sobre el fondo. También se debe notar que en este enfoque la energía disipada es linealmente proporcional a la altura del flujo, al ser mayor el área proyectada de la estructura, este comportamiento no se logra con el tratamiento convencional de términos friccionales debidos a la resistencia del lecho. Se debe aclarar también que una modelación a escalas más finas habría permitido estimar con mayor precisión la disipación de energía generada por la estructura, sin embargo, la escala de interés del proyecto, limitaba la aplicación de modelos de mayor complejidad, dado el costo computacional.

Una aproximación a la geometría del problema mediante la malla computacional se muestra en la Figura 2, en la que se aprecian los pilotes impermeables pero no se indica el área en planta (que no debe confundirse con el área vertical proyectada) de la malla afectada con la fuerza de arrastre adicional. Dicha área en planta corresponde al espacio existente entre todos los 'pilotes' de la estructura (donde se ubicaría el relleno de llantas usadas).

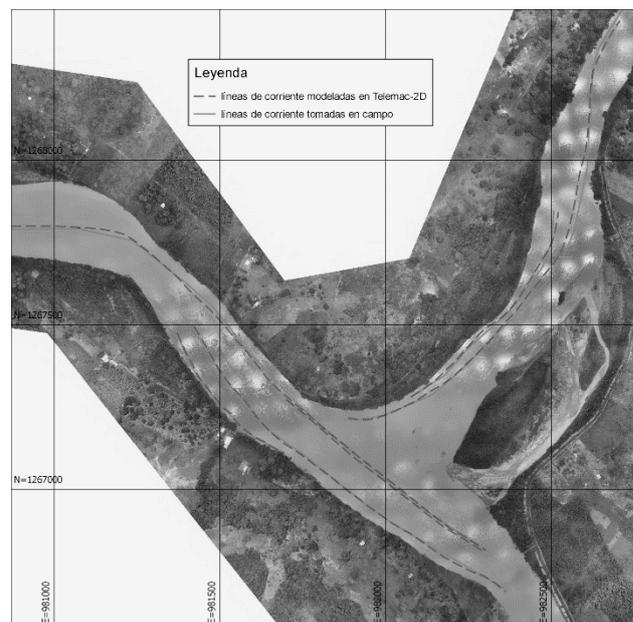


**Figura 2.-** Configuración geométrica del tipo de estructura analizada para el caso de estudio, en blanco los 'pilotes' impermeables.

Se procuró que la geometría utilizada fuera lo más fiel posible a la de la estructura real pero hubo que hacer modificaciones debido a que el costo computacional de las simulaciones con la geometría exacta resultó excesivo; sin embargo, se buscó que la geometría fuera representativa de la estructura planteada.

### Resultados

Tras el proceso de calibración, en el que se ajustaron las pendientes hidráulicas de los tramos, con las obtenidas en campo, se realizaron algunas pruebas para tratar de validar el modelo con la información disponible, lo anterior se realizó comparando las líneas de corriente obtenidas en el modelo con líneas obtenidas de mediciones, se verificó que la distribución de caudales en la difluencia correspondiera con las medidas obtenidas para dos caudales diferentes encontrándose resultados aceptables en ambos casos.



**Figura 2.-** Comparación de las líneas de corriente modeladas con las obtenidas de la medición en campo.

### Conclusiones

Se modeló una estructura relativamente compleja teniendo en cuenta, la naturaleza de esta, en términos del comportamiento esperado en cuanto a disipación de energía sin obstruir el flujo a través de la estructura ni inducir en esfuerzos cortantes adicionales en el lecho.

La modelación morfodinámica de las soluciones planteadas permitió comparar las alternativas concebidas de forma objetiva mediante diferentes criterios (por ejemplo, la variación de la distribución de caudales en el tiempo) e incluso permite saber que alternativa disipa la energía de mejor forma para los propósitos del proyecto.

### Referencias

- Hervouet, J.-M.** (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Nakato, T.** (1990). Tests of Selected Sediment-Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 362-379.
- Van Rijn, L.** (1984). Sediment Transport, part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1431-1456.