

# Análisis de alternativas en un modelo hidráulico para mitigar la socavación producida por el río Chocho

Luis Efrén Ayala Rojas\*, Luis Alberto Botía Morales\*\*, Jhon Reinaldo Jaimes Huérfano\*\*\*, Wílmor Francisco Roncancio Sánchez\*\*\*\*

Fecha de envío: 20 de enero de 2009  
Fecha de aceptación: 1º de marzo de 2010

## RESUMEN

En la presente investigación se estudió el problema de socavación provocado por el río Chocho. Se establecieron diferentes estructuras hidráulicas como alternativa de solución y se ensayaron en un modelo hidráulico reducido, buscando la estructura que mayor energía disipara. Los caudales utilizados fueron los medios y máximos históricos de la zona y se determinó que la estructura idónea es la combinación entre una escollera que reduzca la velocidad del flujo y una protección directa sobre la orilla utilizando bolsacretos.

**Palabras clave:** río Chocho, modelo hidráulico, erosión, estructuras hidráulicas, energía disipada.

## ANALYSIS OF ALTERNATIVES IN AN HYDRAULIC MODEL TO MITIGATE THE EROSION CAUSED BY CHOCHO RIVER

### ABSTRACT

This research study the erosion problem caused by Chocho river. Different hydraulic structures has been established as solution alternatives and it has been analyzed in a reduced hydraulic model, searching the structure with lowest energy values. In the analysis the average historic discharge and the maximum historic discharge was used in the model, founding as the ideal structure a combination of a break water to reduce the flow speed and direct protection on the border using concrete bags.

**Key words:** Chocho river, hydraulic model, erosion, hydraulic structures, dissipated energy.

\* Ingeniero Civil, Universidad de La Salle. Profesor Ingeniería Civil, Universidad de La Salle. Correo electrónico: layalar@unisalle.edu.co

\*\* Ingeniero Civil, Universidad de La Salle. Trabajador Independiente. Correo electrónico: luisbotia@hotmail.com

\*\*\* Ingeniero Civil, Universidad de La Salle. Trabajador Independiente. Correo electrónico: jhonreinaldo@hotmail.com

\*\*\*\* Ingeniero Civil, Universidad de La Salle. Trabajador Independiente. Correo electrónico: wroncans\_08@hotmail.com

## INTRODUCCIÓN

El río Chocho nace en la zona rural del municipio de Silvania, bordea los terrenos pertenecientes al Club El Bosque y continúa su trayecto hacia el municipio de Tibacuy. En dicho río desemboca la quebrada La Jabonera, la cual varias veces al año incrementa su nivel, de tal manera que la velocidad a la cual circula el agua genera fuerzas superiores a las que la orilla puede soportar, dando como resultado un cauce alterno por el cual circula el caudal excesivo que aporta la quebrada.

Los terrenos invadidos por dicho cauce eran utilizados para la práctica de actividades deportivas y sociales. Como consecuencia de la formación de este cauce, el río Chocho divide su cauce en dos y el nuevo cauce genera una erosión permanente de las orillas, la cual ha socavado el suelo de cimentación de una edificación, amenazando la estabilidad de la misma, por lo cual se han puesto en varias locaciones estructuras de protección (gaviones), para evitar que otros terrenos y edificaciones se vean afectados por el fenómeno de socavación. Sin embargo, el problema continúa latente, puesto que todavía es posible la pérdida de terrenos y edificaciones (además de las posibles pérdidas humanas) cada vez que se incrementa el nivel de la quebrada.

Esta investigación se enfocó en la manera de reducir dicho proceso erosivo a través de estructuras hidráulicas. A continuación se presenta el procedimiento realizado para el análisis del comportamiento de diversas estructuras dentro de un modelo hidráulico reducido.

## MARCO CONTEXTUAL

La labor de campo se realizó en el Club El Bosque, ubicado a 65 kilómetros de Bogotá por la vía a Fusagasugá, en el municipio de Silvania y tomando la vía Viotá-Tibacuy, a dos kilómetros y medio de la

carretera Panamericana. En los predios del club se encuentra el río Chocho y allí se realizó el levantamiento topográfico.

La construcción del modelo hidráulico reducido y los ensayos practicados se realizaron en el municipio de Soacha, en las instalaciones de Carrocerías El Progreso.

El municipio de Silvania<sup>1</sup> se encuentra ubicado en la parte media de la hoya hidrográfica del río Sumapáz, en la región sur del departamento de Cundinamarca, entre las coordenadas 972.500 y 990.000 Norte y 957.500 y 977.500 Este, con una extensión de 162,2094 km<sup>2</sup>, perteneciendo a la cuenca hidrográfica del río Chocho o Los Panches.

El reconocimiento visual se hizo en agosto de 2007, escogiendo el área del picadero del club como la zona de estudio, que viene siendo afectada por la erosión. Aunque se instalaron gaviones, estos carecían de diseño alguno, porque fueron colocados simplemente recostados sobre la orilla afectada, por lo que posteriormente fallaron por volcamiento en uno de sus extremos, mientras que en el otro están empezando a ser arrastrados por la corriente, lo que pone en peligro la estabilidad de las áreas que debían proteger. Además, usando un GPS, se obtuvieron las siguientes coordenadas geodésicas aproximadas del sitio: longitud: 4°22'33.5", latitud: 74°24'15.0".



**Figura 1. Río Chocho**

<sup>1</sup> La información sobre el municipio de Silvania es un resumen de algunos apartes de su Plan de Ordenamiento Territorial (POT).

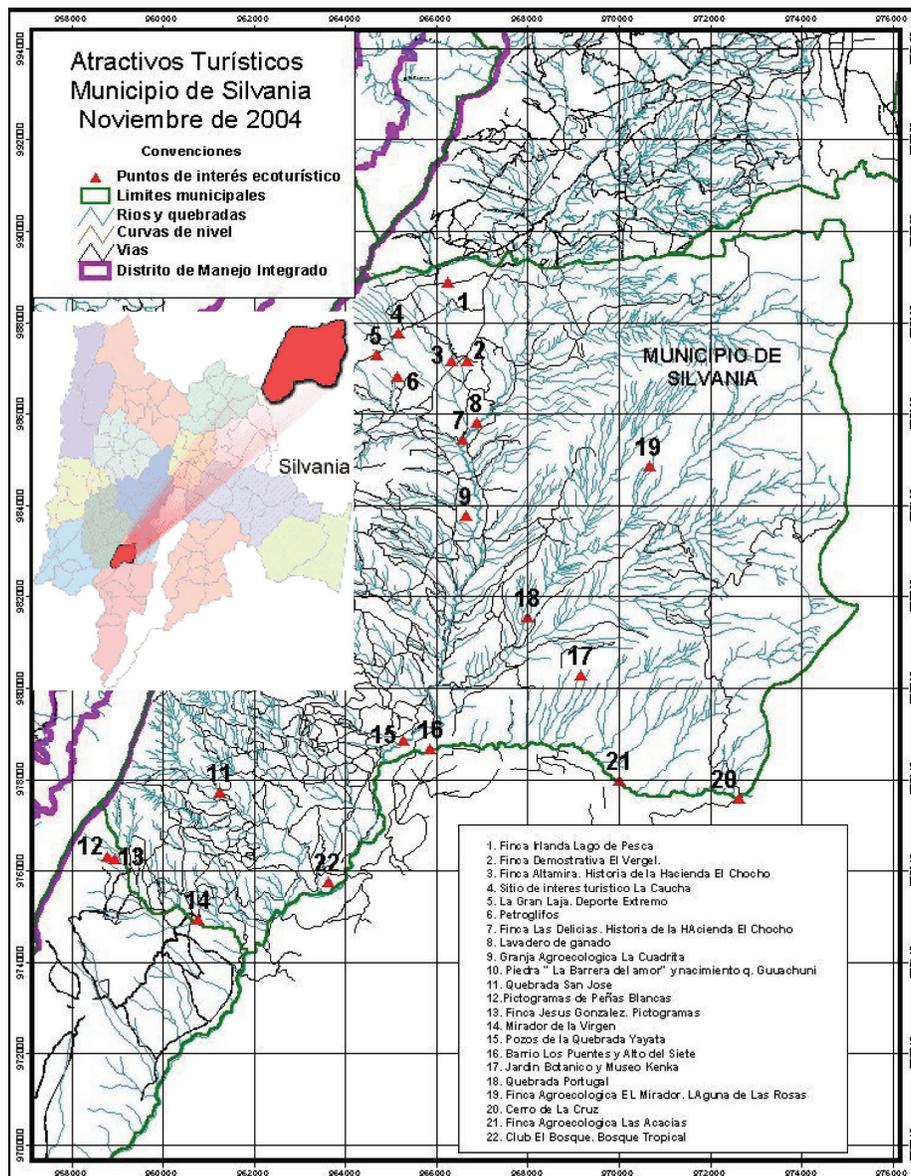


Figura 2. Municipio de Sylvania. Zona afectada

## MODELACIÓN HIDRÁULICA

Geoméricamente, el modelo no es distorsionado, es decir, la escala geométrica es la misma en cualquier eje espacial. Además, el transporte de sedimentos no será considerado debido a los altos costos, la dificultad en la modelación y el enorme tamaño que requiere una modelación de este tipo. Para modelos con las características nombradas anteriormente, se

recomienda una escala lineal de 1:100 a 1:150, escogiendo aquí la de 1:100, considerada la más práctica.

## CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

Se construyó la maqueta a escala sobre tres bases de madera que se atornillaron entre sí usando tornillos metálicos. Posteriormente, estas fueron colocadas de

tal manera que quedaran niveladas horizontalmente, ubicadas en un lugar con el espaciamiento adecuado para la construcción del modelo y la colocación de los equipos necesarios para su correcto funcionamiento.

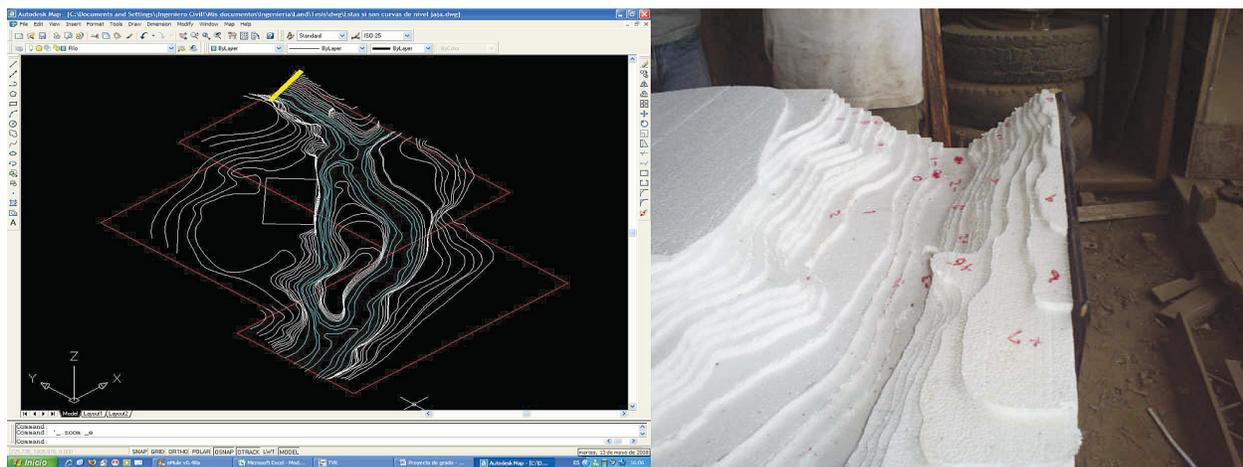
Las bases fueron recubiertas con plástico, para evitar filtraciones que dañaran la madera. Dicho plástico fue adherido a las bases con pegante para mejorar la impermeabilidad y la estabilidad del modelo.



**Figura 3. Elaboración de las bases de madera**

Luego, se reprodujo la geometría del terreno, se imprimió el modelo a escala 1:100 y se calcaron las curvas de nivel correspondientes sobre poliestireno expandido (icopor), recortando cada lámina de tal

manera que represente una curva de nivel, y pegándolas una tras otra, de tal manera que cuando se aplique el recubrimiento el resultado sea una reproducción a escala 1:100 del terreno real.



**Figura 4. Cortes de icopor**

Posteriormente, se aplicó una capa de mortero con el fin de suavizar las curvas de nivel y luego tres capas

de esmalte acrílico, para evitar filtraciones, aplicando las dos primeras con rodillo y la última con pistola.



**Figura 5. Aplicación de mortero y acrílico**

Para el diseño del sistema hidráulico del modelo, se utilizó una motobomba eléctrica Siemens de 5 hp, la cual debía mover el caudal circulante desde un tanque de recogida de aguas a un tanque de almacenamiento, distribuyendo por gravedad dicho caudal de manera controlada hacia las dos entradas de agua del modelo. Para variar el caudal que llega a cada una de las entradas del modelo (dos en total), el tanque de almacenamiento se perforó en su parte inferior, colocando allí dos registros de paso de agua, de una y media y dos pulgadas, respectivamente. Estos registros fueron conectados a sendos sistemas de tuberías, los cuales conducen el agua a piscinas de disipación, con el fin de controlar la velocidad de entrada del agua al modelo. De esta manera, fue posible variar el caudal y la velocidad a la salida del modelo. Para garantizar que los registros suministraran siempre un caudal constante, el tanque de almacenamiento se diseñó para que rebosara su nivel permanentemente, garantizando una cabeza hidráulica constante. Este exceso de agua fue conducido al tanque de recogida de aguas a través de canaletas. El caudal que circula por las canaletas fue controlado a través de un registro de paso de agua conectado en la salida de la bomba, garantizando un caudal suficiente para que la bomba no desocupara el tanque de recogida de aguas, y al mismo tiempo con la precaución de no exceder el caudal máximo que conducen las canaletas de forma segura.

El caudal máximo histórico es de  $215 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este caudal corresponde al caudal medido aguas abajo de la zona de estudio. Aplicando la semejanza de Froude a escala 1:100, se obtuvo el caudal máximo que circuló por el modelo:

$$Q_m = \frac{Q_p}{\lambda^{\frac{5}{2}}} = \frac{215 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{100^{\frac{5}{2}}} = 0,00215 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2150 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

Caudal que, luego, fue medido a la salida del modelo hidráulico, empleando la relación volumen/tiempo. En las entradas del modelo, el caudal fue variado en cada una de las pruebas. Para no realizar un número excesivo de ensayos, se utilizaron los caudales máximos y medios históricos obtenidos de los registros del IDEAM, para cada una de las estructuras a utilizar. Además, debido a que el modelo posee dos entradas de agua y no se disponía de información para determinar qué porcentaje del caudal total aporta cada entrada, se dispuso que la entrada principal del modelo aportara la mayoría del caudal, ya que el área de su sección transversal es dos veces más grande que la sección transversal de la entrada de la quebrada. Así, la sección principal nunca aportaría menos del 50% del caudal total.

Posteriormente, se realizaron los ensayos con estructuras, utilizando la combinación de porcentajes de aporte de caudal que mostrara las mayores velocidades en la zona afectada para caudales históricos máximo y medio.



**Figura 6. Medición**

Puesto que se desconocía el caudal que fluía por cada uno de los brazos en el modelo, en cada ensayo se grabó un archivo de video para filmar un flotador que fue colocado en una sección específica del brazo principal del río. Reproduciendo el video cuadro por cuadro fue posible determinar el tiempo que tardaba el flotador en recorrer cada una de las abscisas filmadas, calculando así la velocidad en ese punto (ver figura). El video fue grabado a 24 cuadros por segundo, por lo que el tiempo fue medido con una precisión de 0,04167s.



**Figura 7. Flotador utilizado en los ensayos**

Al obtener el caudal en cada brazo y al disponer de los niveles del agua en cada abscisa, fue posible determinar la velocidad en cada punto, utilizando la ecuación de continuidad.

## **ESTRUCTURAS ENSAYADAS**

Para el desarrollo de la investigación, se eligió utilizar bolsacretos como primera alternativa y llantas

usadas como segunda alternativa, ambas a escala 1:100, colocándolas en el modelo de manera individual y también combinando cada una de ellas con una escollera colocada aguas arriba de la estructura.



**Figura 8. Escollera a escala**



**Figura 9. Bolsacretos a escala**



**Figura 10. Llantas a escala**

## ESTUDIOS REALIZADOS

Se realizaron ensayos para determinar el tipo de suelo presente en la zona de estudio.

Según la figura 11, el depósito aluvial es una grava bien gradada (GW) con un porcentaje de material retenido por el tamiz n.º 4 de 71,30%, coeficiente de uniformidad igual a 9,91 y el coeficiente de curvatura igual a 2,05.

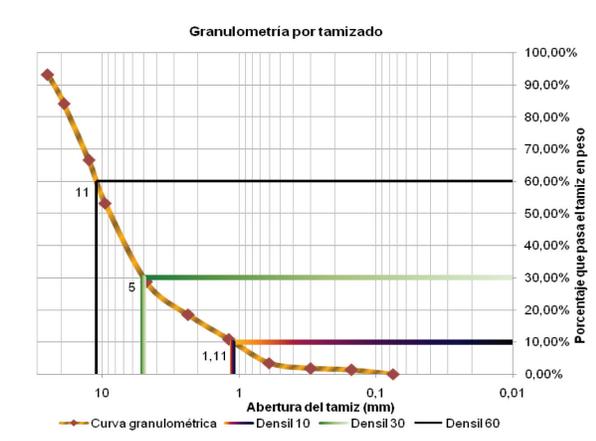


Figura 11. Curva granulométrica

## COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SIN ESTRUCTURAS

Se realizaron ensayos destinados a determinar la velocidad del flujo en la zona afectada sin estructuras de control. Las figuras 12 y 13 muestran los resultados para caudales medio y máximo, respectivamente. Las líneas verticales, las abscisas K0+030 (E) y K0+070 (E), delimitan la zona que sufre de erosión. En la figura 11 se observa que la línea con marcador rombo, la cual representa una aportación de caudal por parte del río del 50%, es la que mayores valores de velocidad representa en el intervalo afectado, seguida por las líneas con marcador cuadrado y triángulo, que representan una aportación de caudal por parte del río del 60 y 70%, respectivamente.

Una situación similar a la de la figura 12 se da al analizar la figura 13. Por lo tanto, los ensayos con estructuras se realizaron utilizando una distribución de caudales del 50% por parte del río y del 50% por parte de la quebrada, para los caudales históricos medio y máximo.

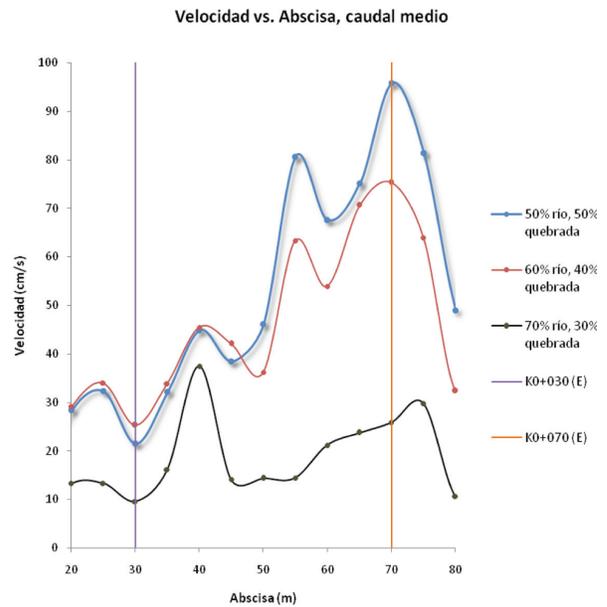


Figura 12. Velocidades en la zona afectada para caudal medio sin estructuras

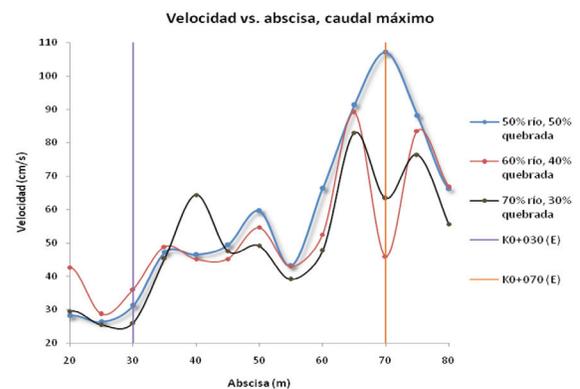


Figura 13. Velocidades en la zona afectada para caudal máximo sin estructuras

## COMPORTAMIENTO DEL FLUJO CON ESTRUCTURAS

Las figuras 13 y 14 muestran la energía del flujo con cada una de las estructuras estudiadas, comparadas con la distribución de caudal escogida anteriormente.

Se puede apreciar que para el caudal medio no se requiere ningún tipo de estructura de protección. Sin embargo, cuando el caudal es máximo, la combinación entre escollera y llanta reciclada es la que brinda una mayor disipación de energía en la zona afectada (entre las abscisas K0+030 (E) y K0+070 (E)) y, por tanto, una mayor protección para dicha orilla.

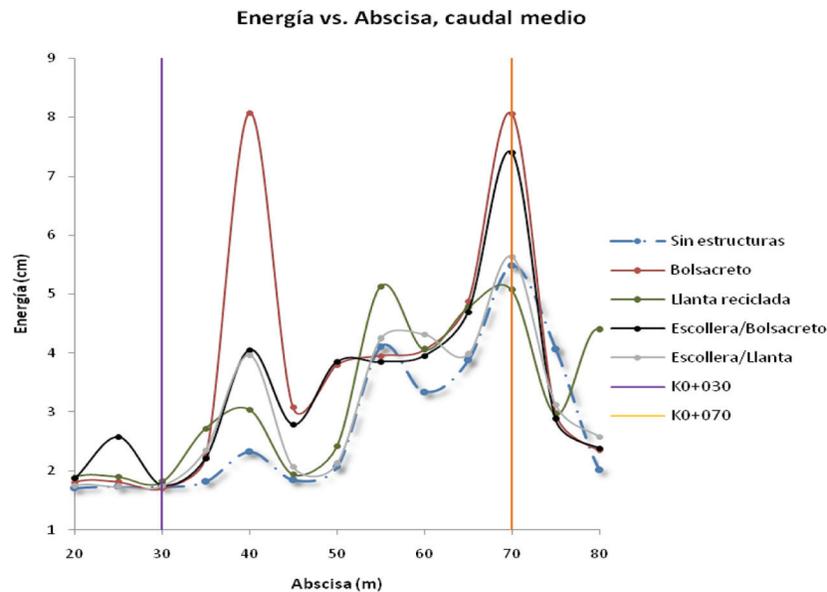
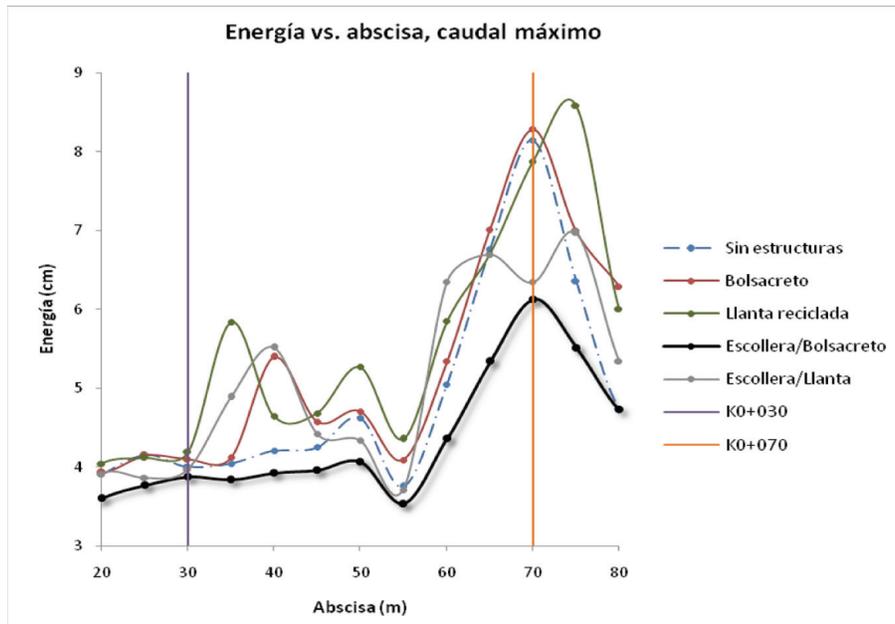


Figura 14. Energía vs. abscisa, caudal medio, todas las estructuras

En la figura 14 se puede observar que los menores valores de energía en la zona afectada (entre las líneas verticales) para caudal medio se presentan cuando no se han colocado estructuras hidráulicas (línea con marcador rombo). Por lo tanto, para caudal medio, no se hace necesario instalar estructura alguna.

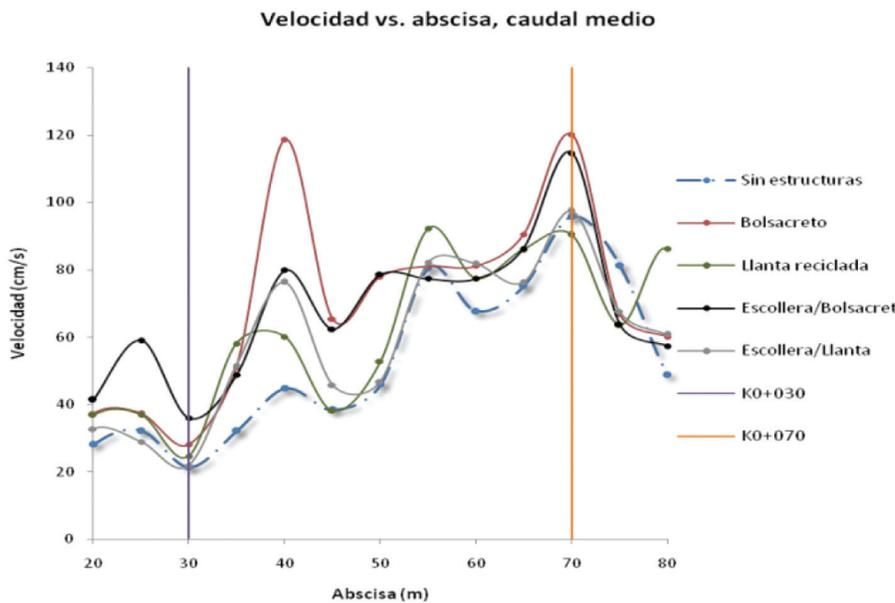
En la figura 15 se puede observar que la estructura que provoca un menor transporte de energía en el flujo es la conformada por la combinación entre escolle-

ra y bolsacretos (línea con marcador X), seguida por la condición sin estructuras (línea con marcador rombo). Esto indica que las demás soluciones propuestas (bolsacreto, llanta reciclada, escollera/llanta reciclada, es decir, las líneas con marcadores cuadrado, triángulo y asterisco, respectivamente) empeoran el problema. Además, es posible observar que, independientemente del tipo de estructura, el punto en donde podrían fallar es la abscisa K0+070 (E), la cual tiene los mayores picos de energía dentro de la zona afectada.



**Figura 15. Energía vs. abscisa, caudal máximo, todas las estructuras**

La figura también indica que al combinar cualquiera de las estructuras con la escollera, la disminución de energía transportada por el flujo es drástica.



**Figura 16. Velocidad vs. abscisa, caudal medio, todas las estructuras**

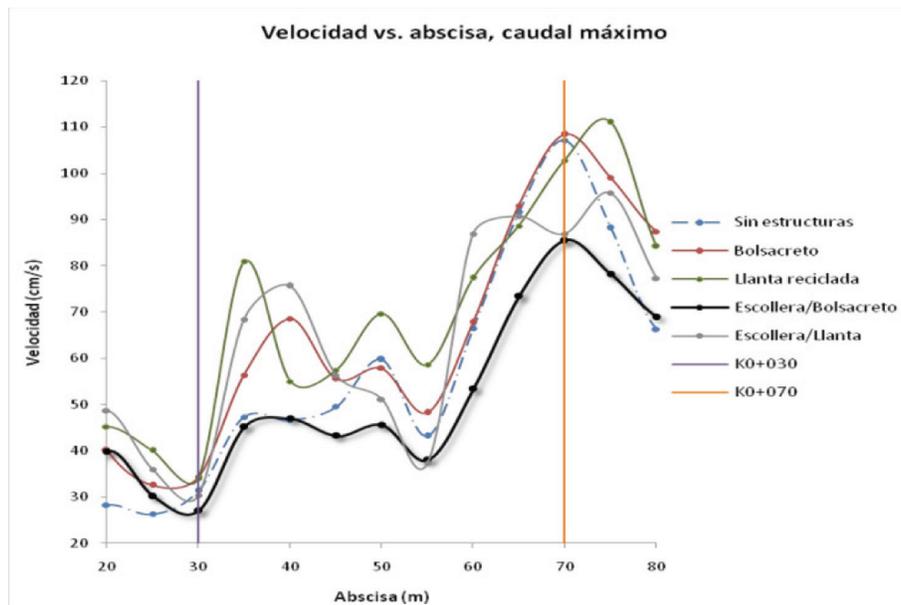


Figura 17. Velocidad vs. abscisa, caudal máximo, todas las estructuras

Las figuras de velocidad para los caudales medio y máximo (figuras 16 y 17, respectivamente) son bastante similares a las respectivas gráficas de energía para caudales medio y máximo (figuras 14 y 15). Se puede observar que los menores valores de energía transportada por el flujo se dan cuando la velocidad del flujo es menor; esto aplica para ambos caudales históricos (medio y máximo).

El tipo de suelo no corre riesgo de ser erosionado a velocidades de arrastre inferiores a  $0,76 \frac{m}{s}$  (gravas finas). Los mayores valores de velocidad registrados en la zona afectada fueron  $118,63 \frac{cm}{s}$  y  $108,36 \frac{cm}{s}$  para caudales históricos medio y máximo, respectivamente. Transformando estos valores a escala real, según los criterios de semejanza de Froude (tabla 1), se obtiene:

$$v_m \times \lambda^{\frac{1}{2}} = v_p \tag{1}$$

$$118,63 \frac{cm}{s} \times 100^{\frac{1}{2}} = 1186,3 \frac{cm}{s} = 11,863 \frac{m}{s} \tag{2}$$

$$108,36 \frac{cm}{s} \times 100^{\frac{1}{2}} = 1083,6 \frac{cm}{s} = 10,836 \frac{m}{s} \tag{3}$$

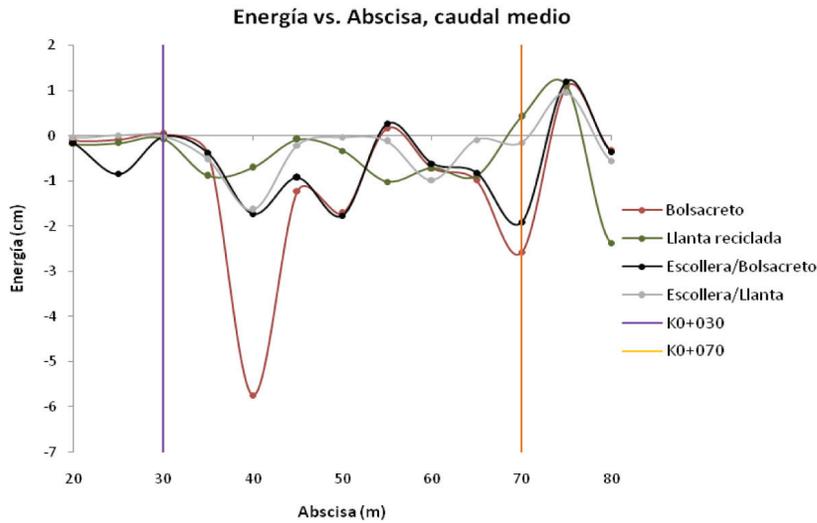
Los anteriores son valores superiores a  $0,76 \frac{m}{s}$ . Por lo tanto, se requiere colocar algún tipo de estructura hidráulica para proteger la orilla afectada.

Tabla 1. Magnitudes derivadas, dimensiones y escalas, criterios de semejanza de Froude

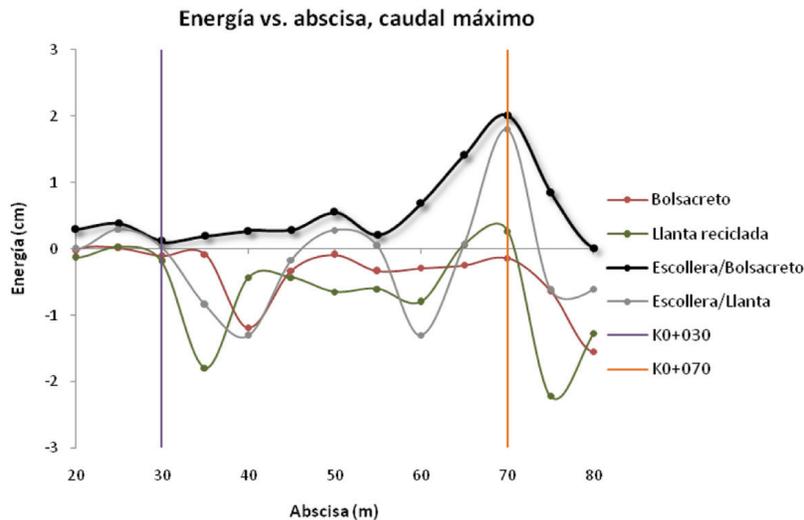
Magnitud derivada	Dimensiones	Criterio de semejanza de Froude
Tiempo	$T$	$\lambda^{1/2}$
Masa	$M$	$\lambda^3$
Velocidad	$L \times T^{-1}$	$\lambda^{1/2}$
Velocidad angular	$T^{-1}$	$\lambda^{-1/2}$
Aceleración	$L \times T^{-2}$	1
Caudal	$L^3 \times T^{-1}$	$\lambda^{5/2}$
Fuerza	$M \times L \times T^{-2}$	$\lambda^3$
Presión	$M \times L^{-1} \times T^{-2}$	$\lambda$

En la figura 17 se mide la disipación de energía respecto de la condición sin estructuras, que es representada por el eje X. Se puede observar que, en la zona afectada, cuando el caudal es el medio histórico, nin-

guna de las estructuras utilizadas en la zona de estudio proporciona la protección adecuada, puesto que la disipación de energía es prácticamente nula. Esto confirma la suposición hecha al analizar la figura 14.



**Figura 18. Energía disipada por estructura vs. abscisa, caudal medio**



**Figura 19. Energía disipada por estructura vs. abscisa, caudal máximo**

En la figura 10 se observa que la única estructura que disipa energía en toda la zona afectada es la conformada por los bolsacretos y la escollera, la cual, además, disipa una gran cantidad de energía en el punto crítico-

co identificado al analizar la figura 15. Por lo tanto, la combinación entre escollera y bolsacreto es, entre las estructuras propuestas, la más adecuada para mitigar el problema de erosión en la zona afectada.

## CONCLUSIONES

Al comparar las estructuras se puede determinar que para las condiciones normales de flujo (caudal medio), al observar la energía disipada, no se requiere de ningún tipo de estructura para proteger la orilla. Sin embargo, si se observa la velocidad de arrastre del suelo en ambos caudales (medio y máximo), se concluye que se requiere una estructura para proteger la orilla.

En condiciones de flujo máximo, la solución más efectiva es la combinación entre escollera y bolsacreto, puesto que es la que mayor energía disipa. Además, las otras alternativas propuestas disipan menos energía que cuando no hay estructuras en el modelo.

En la zona afectada, no se presentan vórtices de ningún tipo al instalar las estructuras, sin embargo, la escollera genera vórtices en su base, lo que podría comprometer

su estabilidad, por lo que se debe colocar en dicha zona un enrocado que evite la socavación de fondo.

Aunque la combinación entre escollera y bolsacreto es la que mayor energía disipa, los valores de energía en la zona afectada para las demás estructuras son similares, por tanto, la solución óptima es aquella que brinde menores velocidades de impacto sobre la orilla.

Se debe prestar especial atención a la abscisa K0+070 (E), ya que es la que mayores valores de energía presenta (para todas las estructuras), siendo este el punto en que la estructura podría fallar.

Los valores de velocidad para caudal máximo con estructuras también son similares, por tanto, la combinación entre escollera y bolsacreto es la que mejor comportamiento presenta para mitigar la erosión generada en la orilla por el río Chocho.

## REFERENCIAS

- Caycedo, M. et ál. "Adecuación e instalación de un modelo hidráulico para el análisis de fondos móviles". Trabajo de grado. Carrera de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. 1989.
- Chow, V. *Hidráulica de los canales abiertos*. México: Diana.
- Galmés, J. 2005. "Diseño innovador de diques con geometrías cilíndricas". Trabajo de grado. Carrera de Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Martín, J. (2003) *Ingeniería de ríos*. México: Alfaomega.
- Montoya, G. et ál. "Modelo para el estudio de la erosión en el K12+005 del río Checua". Trabajo de grado. Carrera de Ingeniería Civil. Universidad de La Salle. 2006.
- Ruiz, R. (2003): "Estructura para la presentación escrita de los informes del Proyecto Integrador". *Asesoría Metodológica. Memorias de la primera asesoría metodológica para la presentación de informes del proyecto integrador* 1. 15.
- Sencial, C. (1972) *Similitud y ensayos en modelos reducidos en hidráulica*. Medellín: Centro de Publicaciones U.N.
- Suárez, J. (2001) *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Tamayo y Tamayo, M. (1995) *El proceso de la investigación científica*. México: Limusa.