

## MODELACIÓN FÍSICA DE UN CAUCE TORRENCIAL: RÍO LA PAZ, BOLIVIA

Jaime I. Ordóñez <sup>(1)</sup>, José L. Montaña <sup>(2)</sup>, Néstor Funes <sup>(3)</sup>

(1) ESTUDIOS Y ASESORÍAS Ingenieros Consultores, Bogotá, Colombia (2) UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS, La Paz, Bolivia (3) UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS, La Paz, Bolivia  
E-mail: jjordone@etb.net.co - peponizo@hotmail.com - funesnestor@yahoo.com

### Introducción

Se ha construido un modelo físico de fondo móvil, sin distorsión geométrica, del río La Paz, a escala 1:75, con el fin de entender mejor la dinámica del flujo torrencial sobre cauces trenzados, y ayudar en el diseño de estructuras de protección contra las inundaciones en dos pequeñas comunidades de Bolivia, como parte de un programa de control de inundaciones que surge del proyecto del Banco Mundial, para evaluar los efectos del deshielo de los glaciares. El modelo se construyó en el IHH de la Universidad Mayor de San Andrés, en La Paz, y permitió corroborar muchas de las condiciones hidráulicas conocidas de los torrentes de montaña de característica trenzada. Dado que no existe información hidrológica o hidráulica del río en época de avenidas, el modelo ha suministrado información nueva y específica, que permite mejorar el entendimiento de este tipo de ríos y las obras de protección que se construyen.

### Diseño del Modelo

Según la disponibilidad de espacio en el laboratorio del Instituto, se seleccionó una escala longitudinal de 1:75 y una escala vertical similar, que sería automáticamente fijada por la relación entre el caudal líquido y el caudal sólido que se utilizaría; este valor no puede ser calculado explícitamente, dado que depende de la rugosidad compuesta que se desarrolle en el lecho del modelo con el sedimento que se pueda obtener; en último término, sin embargo, dado que la pendiente es superior al 2%, y el flujo será en todos los casos casi-crítico, la profundidad del agua dependerá más de la concentración del caudal, que de la rugosidad del lecho.

Con las escalas geométricas definidas, y el material de arrastre del modelo escogido como arena común, las ecuaciones para los demás parámetros importantes del modelo pueden obtenerse de las ecuaciones principales del flujo por medio de la operación algebraica con escalas, que se hace en la misma forma como se hace con las magnitudes mismas. Los criterios fundamentales de la modelación son dos: primero, no habrá distorsión geométrica del modelo, y segundo, se mantiene el criterio de Froude, o sea que el número de Froude permanece igual en modelo y prototipo para la similitud dinámica.

El largo diseñado fue la distancia entre las estaciones 6 y 24 del levantamiento topográfico, (figura 1); entre las cotas 2723.5 msnm y 2761.1 msnm; con una longitud de 1800 metros en el prototipo y 27 metros en el laboratorio, con trayectos de entrada y salida hasta de 1.5 metros para aquietamiento del agua de entrada y estructuras de terminación y retiro de sedimentos aguas abajo

La instalación de bombeo puede suministrar caudales entre 1 y 20 litros por segundo, y la pendiente promedio del sector es de 2.1%. El ancho del canal es como máximo de 2.5m, y se usó un espesor de sedimentos de 10 cm; además. El material es una mezcla de arena, con un 65% entre 0,10 mm y 0,25mm, y un 35% entre 0,25mm y 0,5mm. Se usaron unos 10 m<sup>3</sup>, con suministro de hasta 0.5 m<sup>3</sup>/hora, y ensayos entre 3 y 4 horas cada uno.

La escala de los sedimentos en el modelo debería ser igual a la escala de longitudes; sin embargo, una distribución de tamaños exactamente igual a la del prototipo es difícil de obtener, y además, hubo dificultades para obtener arenas de grano inferior a 0.5 mm, en cantidades suficientes.

Los sedimentos del río fueron caracterizados mediante 15 muestras tomadas en el lecho del río. La localización de algunos de esos muestreos aparece en la figura 1. Los tamaños recolectados para el laboratorio estuvieron limitados a 1.5" o 37.5 mm, a pesar de que el lecho posee tamaños más grandes. Solo una de las muestras contenía material hasta de 2.5" o 63.5 mm. En el laboratorio, las muestras se separaron en materiales gruesos, (sobre 4.5 mm), y finos, (0.15 mm ≤ D ≤ 4.5mm). En general los materiales más gruesos o gravas, representaban más del 65% del material, en tanto que las gravas más finas y arenas, (< 2mm), representaban cerca del 35%.

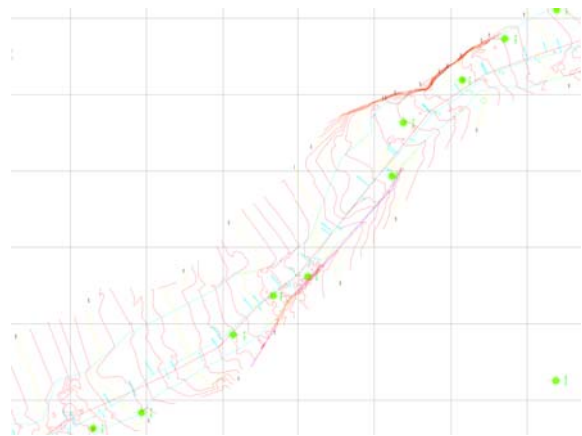


Figura 1. Levantamiento topográfico del sector de estudio

### Construcción y Operación

El modelo se construyó entre Junio y Julio de 2010 en el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la UMSA, y sus características finales se aprecian en la figura 2. El lecho final se obtuvo mediante ensayos con abastecimiento sólido hasta estabilizarlo con pendiente de 2.1%.



Figura 2. Modelo terminado con estructuras de protección

El abastecimiento sólido es variable, y el cálculo sedimentológico apenas aproximado, por lo cual tasas de abastecimiento obedecen a un proceso de ensayo y error. El cálculo inicial se hizo con el programa BEDLOAD, creado originalmente en la Universidad de California en Berkeley. El programa asume que el flujo es uniforme y, dado que no hay información de campo sobre el flujo en el río, se utilizó el criterio de Ordóñez sobre la concentración del flujo, (3), con base en una sección rectangular de ancho dado y una descarga total uniformemente repartida.

El modelo se operó inicialmente en el IHH con descargas bajas de 0.6 y 1.0 lts/seg. Estas corridas se realizaron durante el ajuste del lecho y para probar el funcionamiento del modelo y los equipos de medición.

En una segunda etapa, se realizaron tres experimentos con caudales altos, repitiendo cada uno varias veces, a fin de ajustar la tasa de abastecimiento sólido, mejorar y complementar las series de mediciones, mejorar los equipos y técnicas de medición, garantizando además la repetibilidad de los resultados. Se utilizaron caudales de 3, 5 and 7 lps en el modelo. En unidades del prototipo, se ensayaron caudales entre 30 mcs y 340 mcs; las máximas concentraciones del flujo variaron entre 5 y 11 metros cúbicos por segundo por metro de ancho, (mcs/m), las velocidades promedio del flujo estuvieron entre 4 y 8.50 m/seg y las profundidades entre 1 y 4 metros.



**Figura 3.** Superficie ondulada del flujo cerca del muro defensivo

## Conclusiones

Dado que no hay conocimiento previos sobre el río La Paz en época de avenidas, medido u observado por personal técnico entrenado en hidráulica, la operación del modelo realmente ha suministrado información nueva y específica, para el entendimiento de este tipo de ríos y su interacción con las obras de protección que se construyen.

Se puede concluir que un modelo con fondo fijo o con fondo móvil pero sin abastecimiento sólido a la corriente, no podría haber reproducido correctamente la dinámica de los flujos de avenida, la forma como la corriente se divide, o la naturaleza ondulada e inestable de la superficie de flujo en la zona de mayor concentración del caudal. Algunas de las características observadas, son :

1. En todos los casos es claro que un canal único de flujo es muy poco común en este tipo de ríos. Aún para los caudales más altos que se utilizaron, el flujo se dividió siempre en dos y a veces hasta 4 canales.
2. La división del flujo no garantiza la uniformidad de la distribución del caudal. La estructura ondulatoria de la superficie a lo largo de ciertas zonas de flujo, (Figura 3), demuestra que allí el caudal por unidad de ancho es mayor que en las de superficie uniforme y estable; las corrientes a lo largo de estas zonas de mayor concentración del flujo son la causa del ataque

más destructivo sobre los muros de defensa, y de los desbordes sobre la estructura.

3. Las condiciones de flujo son “críticas” a lo largo de las corrientes hiperconcentradas, que son los patrones de flujo más importantes en el diseño de las obras de protección. El problema de mayor interés no es, la magnitud del caudal total de la avenida, sino la concentración del flujo en los chorros principales.
4. La altura de las estructuras se debe diseñar de acuerdo con la máxima elevación de las crestas de las ondulaciones, que podrían llegar a ser hasta un 40% mayores que la profundidad “crítica” para el caudal por unidad de ancho del flujo hiperconcentrado.
5. Las fuerzas laterales contra las estructuras deben ser calculadas de acuerdo con el impacto que pueden generar las corrientes a las altas velocidades que se registran en los valles de las ondulaciones, las cuales pueden alcanzar valores hasta el 45% más altos que la velocidad “crítica” del flujo hiperconcentrado.
6. Los factores de seguridad contra el deslizamiento y el volcamiento de las estructuras deben ser calculados como si los flujos atacaran a las estructuras en forma normal al alineamiento, con factores de impacto y de pulsación como las que pueden adicionar los flujos ondulatorios periódicos. Esta observación no se basa en mediciones, pero se puede corroborar con instrumentación adecuada en el modelo.
7. Para casos de flujo torrencial, deben preferirse los muros longitudinales a las estructuras transversales al flujo, como espigones, aún con ángulos bajos con la dirección de la corriente. Los muros deben ser largos y rectos, sin quiebres o discontinuidades que puedan generar ondas transversales al flujo, o deflectorlo parcial y/o totalmente como se observó en el modelo.

## Recomendaciones

Como se puede observar, la modelación física a fondo móvil de este tipo de ríos puede ser de gran ayuda para entender mejor la naturaleza del comportamiento dinámico del flujo y también los tipos de procesos que están involucrados en el ataque de la corriente y el desborde dinámico o trasgresión de los flujos sobre las orillas y terrazas así como contra las obras que se diseñan para su protección. De la misma manera, se pueden probar nuevas formas de protección y mejorar el diseño de aquellas que se han utilizado exitosamente en otras condiciones.

Sin embargo, mucha experimentación adicional es aún necesaria para apreciar completamente las diferencias entre tipos de flujos en Corrientes de alta pendiente y en pendientes moderadas a bajas. En el artículo se incluyen recomendaciones específicas para otros modelos similares de ríos torrenciales.

## Referencias

- Montaño, J.L.** (2008): “Proyecto pp 3 - Adaptación participativa para la construcción de defensivos para las poblaciones de Huayhuasi y el Palomar - propuesta obras hidráulicas”. La Paz, Bolivia.
- Ordóñez, J.I.** (2010): “Flow Regime and the Morphology of Alluvial Channels”. Editorial de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.