

# APLICACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO DE FLUJOS DE ESCOMBROS Y LODO EN UNA QUEBRADA EN EL PERÚ

*Bach. Leonardo F. Castillo Navarro*  
*Tesista del IMEFEN-CISMID*

## INTRODUCCION

Los flujos de escombros está compuesto por mezclas de agua, suelo, piedras, bloques, troncos, etc, que se originan en lo alto de las quebradas y se desplazan torrencialmente por el cauce debido a las fuertes pendientes, causando destrozos a su paso. Cuando llegan a zonas de menor pendiente se depositan, formando conos de deyección o abanicos aluviales de gran poder destructivo. En el Perú, a este flujo se le conoce con la palabra quechua HUAYCOS.

Los mecanismos que desatan estos fenómenos pueden ser lluvias intensas o períodos lluviosos prolongados, terremotos, erupciones, factores antrópicos (hechos por el hombre) o una combinación de ellos. Estos fenómenos producen deslizamientos o derrumbes, erosión del lecho o taludes, represamientos temporales para su posterior rotura.

Debido a que el flujo de escombros contiene un alto porcentaje de sólidos, estos son un gran peligro para la población que vive al borde de estas quebradas, y un factor de riesgo para la infraestructura vital (carreteras, acueductos, líneas de transmisión, etc.), siendo necesario difundir la teoría de flujo de escombros para poder señalar medidas de mitigación y control.

Entonces, uno de los pasos a considerar para resolver esta problemática es evaluar la aplicabilidad de los modelos numéricos disponibles en nuestra realidad.

## PROBLEMÁTICA

Para la presente tesis, hemos ubicado a la quebrada Paihua o Llanahualla como la quebrada de mayor riesgo para la ciudad de Matucana (Km 76 de la Carretera Central). Por lo tanto estudiaremos la quebrada mencionada para su posterior modelamiento de flujos de lodo y escombros con el FLO-2D (Modelo Numérico Computacional).

El lugar más crítico de la Quebrada Paihua se encuentra en la desembocadura cuyo eje está en dirección subperpendicular al cauce del río Rímac. Las grandes masas deslizadas en desequilibrio pueden ser reactivadas y producirse derrumbes y otros deslizamientos, dada la presencia de afloramientos de materiales inestables de gran volumen, que se encuentran tanto en el fondo del valle, como en la ladera. Tales

fenómenos de geodinámica externa, al producirse en gran escala de inmediato obstruirían el cauce principal de la quebrada formando pequeñas presas de tierra, que al romperse transportarían los flujos torrenciales formando huaycos y depositándose los sedimentos aluvionales en la parte baja del cono de deyección de la Quebrada Paihua, lo cual represaría el río Rímac, en ese tramo (Ver Figura 1).

A consecuencia de este fenómeno, el río desbordaría y de inmediato ocurriría una inundación a la ciudad de Matucana provocando daños a las viviendas y a la integridad física del hombre. Esta ciudad se encuentra instalada en una terraza aluvial de más bajo nivel que el cauce actual del río Rímac (Ver Figura 2).



Figura 1

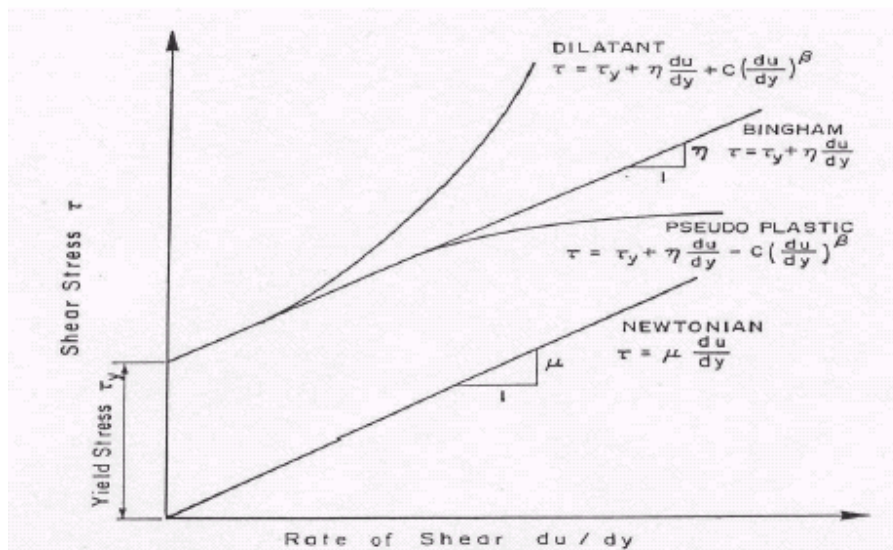


Figura 2

## MODELAMIENTO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS

Antes de proceder al modelamiento, debemos conocer que tipos de fluidos son los flujos de lodo y escombros. Existen dos tipos de fluidos: Newtonianos y los no-Newtonianos. Al hablar sobre flujos no Newtonianos nos referimos a flujos viscosos que requieren cierta fuerza para poder fluir.

La siguiente gráfica, nos va ayudar a entender, las diferentes clases de fluidos no-Newtonianos que existen:



Esfuerzos cortante en función de  $\frac{du}{dy}$  para modelos de deformación del fluido  
Fuente: FLO-2d Manual's User

Por ejemplo el Modelo Numérico BOSS-DAMBRK tiene una opción para modelar flujos de lodo utilizando un fluido tipo Bingham. Otro Modelo Numérico que también modela flujos hiperconcentrados (alta concentración de sedimentos) es el FLO-2D que utiliza fluidos dilatantes.

Antiguamente se han desarrollado modelos de flujos de lodo y escombros, utilizando modelos reológicos para desarrollar su comportamiento. Entre ellos tenemos: El Modelo Dilatante de Bagnold, Modelo Cuadrático de O'Brien & Julie, Modelo viscoso de Coulomb, Modelos de fluido Bingham y Pseudoplásticos, Modelo de Takahashi, etc.

Como herramienta utilizaremos un Modelo Numérico Computacional para la simulación de flujos de lodo y escombros. Este modelo es el FLO-2D versión 2003 (O'Brien & Julien) aplicado en diferentes partes de Bolivia y Venezuela. En el Perú este modelo pertenece al área de Geología Ambiental del INGEMMET.

## MODELO NUMERICO FLO-2D

Como es sabido, el movimiento de un fluido tan complejo como el que forma los aludes torrenciales no puede representarse por medio de los métodos que se aplican comúnmente para fluidos como el agua. Esto se debe a que la alta concentración de materia sólida en los aludes torrenciales hace que estos fluidos se comportan como fluidos no-newtonianos, en los que es necesario que actúe un esfuerzo superior a un esfuerzo crítico dado, para que el fluido se ponga en movimiento. Viceversa, si el esfuerzo actuante es inferior al esfuerzo crítico el fluido se detiene.

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien et al., 1.993) simula flujo de fluidos no-newtonianos, como aludes torrenciales, en conos de deyección. El modelo permite simular flujo en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas y planicies de inundación, así como el intercambio de fluido entre los canales y la planicie de inundación. Puede modelarse flujo de agua, flujo hiperconcentrado de sedimentos, flujo de barro y alud torrencial (flujo de barro). Como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada (líquidos y sólidos), precipitación y propiedades reológicas de la mezcla agua-sedimento.

Es importante recordar que el fenómeno de flujo de barro y escombros es sumamente complejo y un modelo matemático es una sólo aproximación al problema. Por ejemplo, en un alud torrencial real, pueden ocurrir represamientos ocasionados por acumulaciones de troncos y rocas, sobre los cuales se acumula el fluido ocasionando altas presiones que pueden llegar a destruir la presa. El caudal generado por una de estas roturas puede ser varias veces mayor que el caudal pico predicho por un análisis hidrológico convencional de crecientes. Debido a la incertidumbre en cuanto a la ubicación y tiempo en que pueden ocurrir estas presas, el modelo FLO-2D no simula este tipo de fenómenos.

Las ecuaciones que utiliza el modelo FLO-2D son las de continuidad y cantidad de movimiento, integradas en la vertical:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV_x}{\partial x} + \frac{\partial hV_y}{\partial y} = i$$
$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t}$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t}$$

donde:  $h$  es la profundidad del flujo;  $V_x$  y  $V_y$  son las componentes de la velocidad media,  $t$  es el tiempo,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $S_f$  es la pendiente de fricción;  $S_o$  la pendiente del lecho e  $i$  es intensidad de la precipitación.

Los esfuerzos cortantes en flujos de sedimento hiperconcentrados, incluyendo los descritos como flujos de escombros, flujos de lodo e inundaciones de lodo, pueden ser calculados de la suma de cinco componentes de esfuerzos al corte.

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d$$

donde el esfuerzo cortante total  $\tau$  depende del esfuerzo límite cohesivo  $\tau_c$ , el esfuerzo de Mohr-Coulomb  $\tau_{mc}$ , el esfuerzo cortante viscoso  $\tau_v$ , el esfuerzo cortante turbulento  $\tau_t$ , y el esfuerzo cortante turbulento  $\tau_d$ . Cuando escribimos en términos de tasas de deformación ( $dv/dy$ ) el siguiente modelo cuadrático reológico puede ser desarrollado (O'Brien and Julien, 1985):

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{dv}{dy} \right) + C \left( \frac{dv}{dy} \right)^2$$

donde

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$$

y

$$C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2$$

En estas ecuaciones  $\eta$  es la viscosidad dinámica;  $\tau_c$  es el esfuerzo de cedencia cohesivo; los esfuerzos de Mohr Coulomb  $\tau_{mc} = p_s \tan \Phi$  dependen de la presión intergranular  $p_s$  y del ángulo de reposo  $\Phi$  del material;  $C$  denota el coeficiente de esfuerzos cortantes inerciales, el cual depende de la densidad de masa de la mezcla  $\rho_m$ , de la longitud de Prandtl  $l$ , del tamaño del sedimento  $d_s$  y de una función de concentración de sedimentos  $C_v$ .

El modelo usa un esquema centrado de diferencias finitas explícito para la solución de las ecuaciones diferenciales de movimiento. La topografía de la superficie se discretiza en una malla formada por celdas o elementos cuadrados de tamaño uniforme para toda el área de estudio y a cada elemento se le asigna una posición en la malla, una elevación o cota de terreno, un coeficiente de rugosidad ( $n$  de Manning), factores de reducción del flujo que atraviesa la celda para simular bloqueo por edificaciones.

Para una celda y un tiempo dados, se calcula el caudal neto que entra y sale por cada uno de los lados de dicho elemento. El cambio en el volumen resultante se distribuye uniformemente en el área disponible del elemento. Los pasos de tiempo varían según el criterio de estabilidad de Courant, lo que resulta en pasos de tiempo relativamente cortos, (típicamente entre 0.1 y 30 segundos). Esto depende de los hidrogramas de entrada y del tamaño de la malla de cálculo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Arbind Prasad Mainali, Nallamuthu Rajaratnam. 1991. **Hydraulics of Debris Flow. A review**. Department of Civil Engineering. University of Alberta Edmonton, Alberta-Canadá. Ubicación:
2. <http://www.civil.ualberta.ca/water/research/reports/reports.htm>
3. Arancibia Samaniego, Ada L. 1998. **Criterios para el Manejo de Quebradas y su Aplicación en el Diseño de Obras Civiles**. Tesis de Bachiller en Ingeniería Civil, UNILIMA.
4. BOSS International. 1988. **User's Manual BOSS DAMBRK**. Ubicación: <http://www.bossintl.com>
5. De Leon, Alfredo. 1982. **Thesis of Hydraulics of Debris Flow**. UTAH State University.
6. Johnson, A. y Rodine, J. 1984. **Debris Flow**. publicado en: Slope Instability. Editado por D. Brunsten y D.B Prior.
7. J.S O'Brien. 2003. **User's Manual FLO-2D**. Ubicación:
8. <http://www.flo-2d.com>
9. Philippe Coussot. 1997. **Mudflow Rheology and Dynamics**. International Association for Hydraulic Research. Ediciones A.A Balkema-Rotterdam.
10. Ponce, Víctor M. 1989. **Engineering hydrology, principles and practices**. New Jersey, Prentice Hall, 1ra Edición. Ubicación: <http://ponce.sdsu.edu/textbook.html>
11. PREDES. 1987. **Zonificación de riesgo de la ciudad de Matucana**. Biblioteca de PREDES-Lima.
12. PREDES. 1988. **Evaluación de los procesos geodinámicos externos de la Quebrada Paihua**. Biblioteca de PREDES-Lima.