

MODELADO DE FLUJOS DE LODO USANDO FLO-2D EN LA QUEBRADA PAIHUA: IMPACTO EN LA CIUDAD DE MATUCANA, LIMA

¹Leonardo Castillo N., ²Lionel Fídel S. & ³Lionel E. Jackson Jr.

¹Instituto para la Mitigación de Efectos del Fenómeno de El Niño (IMEFEN-CISMID),
Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú. lcastillonavarro@yahoo.es
²INGEMMET, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima, lfidel@ingemmet.gob.pe,
³Geological Survey of Canada, lijackso@nrcan.gc.ca

INTRODUCCIÓN

La quebrada Paihua (QP), está ubicada en el Km. 76+000 de la Carretera Central, en la provincia de Huarochirí, departamento de Lima. Es una quebrada afluente, por la margen derecha, del río Rímac frente a la ciudad de Matucana (2375 msnm).

En la QP se han reconocido importantes procesos de movimientos en masa activos como deslizamientos, caídas de rocas, flujos de lodo, así como también erosión de laderas; los que por una parte afectan los terrenos de cultivo y por otra aportan gran cantidad de material detrítico a la quebrada, lo que condiciona la ocurrencia de flujos de lodo (huaycos). En caso de una reactivación de los movimientos en masa en la cuenca es muy probable que se generen huaycos de gran magnitud que podrían afectar un sector de Matucana, así como represar total o parcialmente el río Rímac y aumentar el daño sobre ella y otros centros poblados situados aguas arriba y aguas abajo del río. Los estudios realizados en el área nos revelan la existencia de movimientos en masa ocurridos en décadas pasadas, así como eventos “antiguos o prehistóricos” que muestran un record de ocurrencia de deslizamientos, flujos de lodo e inundaciones (Fídel et al, 2006)

En 1878, febrero de 1959 y marzo de 1983, flujos de lodo de gran magnitud, originados en la QP y generados por lluvias excepcionales en la cuenca (fenómeno El Niño), bloquearon el río Rímac desviándolo hacia Matucana. El embalse formado en 1983, permaneció por cuatro días hasta que fue dinamitado para retornar su antiguo cauce. Eventos menores, que no causaron daños a Matucana, ocurrieron en 1941, 1950 y 1985; pero las fechas específicas son inciertas. No existe información confiable de los huaycos antes de 1941 (Fídel et al, 2006).

La estimación de la descarga de los huaycos de la cuenca de la QP, fue simulada usando el Software FLO-2D. Un modelo de elevación digital – MED preparado para este propósito fue empleado como parte del modelo. El producto del modelo, asume los valores de precipitación de 24 horas, para un período de retorno de 100 años como evento detonador.

MODELO FLO-2D: SIMULACIÓN DE FLUJOS DE LODO

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien et al., 1988) simula flujo de fluidos no-newtonianos, como aludes torrenciales en conos de deyección. Permite simular flujos en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas, terrazas y conos de deyección; así como el intercambio de fluido entre los canales y el cono de deyección. Puede modelarse flujo de agua y flujos hiperconcentrados (avenida de lodo, flujo de lodo y flujo de detritos). El modelo considera el fluido homogéneo (una sola fase) de concentración variable; esto significa que internamente no se hace distinción de los tamaños de sedimento.

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. La topografía para la modelación consiste en el detalle del cono de deyección y parte del canal adyacente. El hidrograma líquido calculado por procedimientos hidrológicos normales, es utilizado en la modelación de flujos hiperconcentrados. Finalmente los parámetros reológicos (viscosidad y esfuerzo de cedencia) son estimados de manera indirecta, comparando muestras de la quebrada con muestras tipo.

CARACTERIZACIÓN DE LA QUEBRADA

Caracterización topográfica: La extensión de esta microcuenca es de 15.5 km², con una altitud mínima de 2400 m.s.n.m y una máxima de 4760 m.s.n.m. La longitud de cauce principal es de 7 km. y presenta una pendiente promedio de 39%.

Caracterización hidrológica: La estimación del hidrograma líquido (distribución del caudal de agua a través del tiempo), está en función de la precipitación máxima en 24 horas (P24), el tiempo de retardo y el uso de suelo. Para el cálculo del hidrograma de avenida se empleó la metodología del Soil Conservation Service (SCS), utilizándose tormentas hipotéticas para 24 horas provenientes de investigaciones hidrológicas y trabajos anteriores. Además, se introduce el concepto de precipitación de celda concentrada, como la lluvia puntual que cae localmente sobre una zona específica y producen huaycos. Esta lluvia no es registrada por las estaciones meteorológicas debido a que se trata de un fenómeno local e instantáneo. De la data de P24 para la cuenca del río San Mateo se identifica la precipitación de celda concentrada como la máxima registrada (para un $T_r=100$ años) igual a 90 mm. Por lo tanto, aplicando la metodología de precipitación-escorrentía se obtiene un caudal líquido de 34.3 m³/s para la QP.

Caracterización geológica – geodinámica: La cuenca de la QP puede ser dividida en tres sectores: abanico, cuenca baja y cuenca alta, teniendo en cuenta su morfología, basamento rocoso y depósitos superficiales.

El abanico de la QP tiene un área aproximada de 7,5 hectáreas, una pendiente promedio de 8° y termina en un escarpe entre cinco a seis metros donde es truncado por el río Rímac. La quebrada ha excavado un profundo cañón. Los afloramientos naturales a lo largo de los escarpes revelan que el abanico está compuesto por depósitos masivos de huaycos del tamaño de cantos rodados mezclados con sedimentos fluviales secundarios. Los huaycos prehistóricos cubrieron una gran área del abanico con profundidades entre dos a tres metros. La ausencia de suelos enterrados u otros indicadores de espacios de tiempo entre los eventos sugieren que el abanico es geológicamente activo y que sus materiales han sido formados en los últimos 10,000 años (Fidel et al, 2006)

En la cuenca baja se presentan rocas volcánicas fracturadas y depósitos coluviales. En las áreas adyacentes al cañón se distinguen remanentes erosionados de depósitos antiguos de huaycos, así como depósitos de caídas de roca, derrumbes, etc. Las áreas de deslizamientos más activas ocurren a lo largo del cañón adyacente al poblado de Payhua, a 2,2 Km al Norte y a 1 000 metros por encima de la población de Matucana. Esto es lo que se describe como el “Complejo de Deslizamientos de Payhua” de aproximadamente 16 hectáreas de deslizamientos de rocas y detritos, abanicos de caídas de rocas, derrumbes y deslizamientos, que incluyen antiguos huaycos y partes de abanicos de huaycos activos. Esta área es la mayor contribuyente de sedimentos gruesos y finos al canal de la QP. Estos deslizamientos probablemente bloquearon localmente la quebrada en el pasado y tienen el potencial de formar una laguna temporal si el represamiento es ancho y lo suficientemente rápido para embalsar la quebrada. Además, tres cárcavas activas encima de la población de Paihua, produjeron los huaycos en 1983 (quebrada Munaico). La última causa de la inestabilidad de las laderas de la QP, a lo largo del cañón de aproximadamente 70 m de profundidad, es la reactivación progresiva de partes del complejo de deslizamientos de Paihua (Fidel et al, 2006).

La cuenca superior es escarpada y compuesta por rocas andesíticas, donde andenes agrícolas se extienden hasta las crestas de las colinas. La conservación de estos andenes a través de las laderas escarpadas de sus tributarios muestra que éstas han sido estables durante los últimos 600 a 800 años. Movimientos en masa en la parte superior de la cuenca están confinados a caída de rocas, derrumbes y deslizamientos en roca, quizás detonados por sismos y datados entre 600 a 800 años, estos han removido los andenes pre-hispánicas. La parte superior de la cuenca es cortada por cinco tributarios cuyas laderas son la principal fuente de sedimentos para los flujos de lodo en la cuenca alta y, al menos uno de ellos, fue la fuente de los materiales del huayco de 1959 (Fidel et al, 2006).

Para la estimación del volumen de flujos de lodo depositado en QP, se procedió a comparar las imágenes satelitales y rasgos in-situ; calculando un volumen de 290,000 ± 100,000 m³ (Fidel et al, 2006)

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y SALIDA DEL MODELO

Ensayos de mecánica de suelos en muestras representativas del cono de deyección, indican índices plásticos (IP) de 7%; que según Hungr (2001) se ubican dentro de la clasificación de flujos de lodo. Por lo tanto, comparando con muestras “tipo” provenientes de la literatura (O’Brien & Julien, 1988) se realiza la elección de una muestra representativa Aspen Pit1, caracterizada por poseer gran cantidad de arcilla de alta plasticidad.

Para la etapa de calibración del modelo matemático, se compara el volumen de escombros estimado en campo con el volumen reportado por el modelo. Esta aproximación se obtiene variando el parámetro de la concentración volumétrica de sedimentos (C) en los datos de entrada al modelo. Por otro lado se compara los tirantes del modelo con los rastros o marcas encontradas en la quebrada. Para nuestro caso se ha calibrado un C variable de 0.22-0.35.

Otros parámetros introducidos en el modelo son: la gravedad específica del sedimento (Gs) de 2.65, una resistencia al flujo laminar (K) igual 2285 (empleado en otros estudios de flujos hiperconcentrados), una rugosidad “n” de Manning de 0.17 en el cauce de la quebrada (para cauces de fuerte pendiente), y un manning de 0.040 en la confluencia con el río Rímac.

De los resultados del FLO-2D, se reporta un volumen total de creciente simulada de 1.1 millones de m³, de los cuales 0.45 millones de m³ son agua y 0.62 millones de m³ corresponden a sedimento (Tabla 1) y tirantes máximos en la parte baja de la quebrada según la Figura 1.

Tabla 1. Salidas del programa FLO-2D

Flujo (m ³)	Agua (m ³)	Escombros y/o sedimento (m ³)
Hidrograma de entrada (INFLOW)	452 090	620 989
Almacenamiento dentro del área de análisis	1 798	2 545
Flujo fuera del área de simulación (OUFLOW)	450 292	618 643

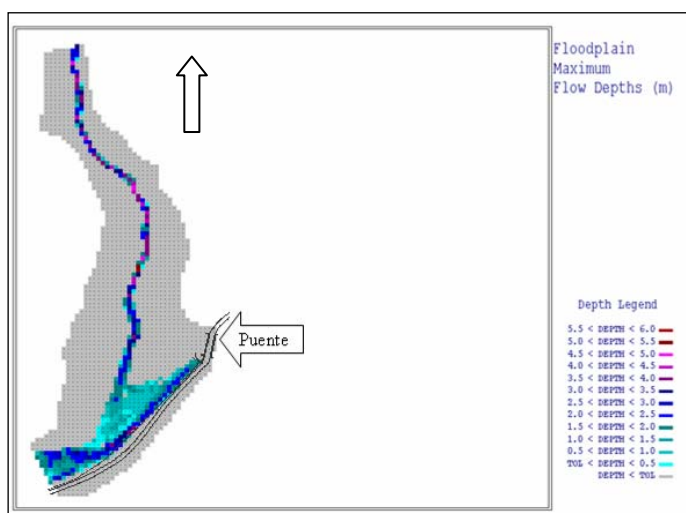


Fig. 1. Alturas del flujo (m) de un tramo de 750 m. en la parte baja de la quebrada Paihua

ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenido los parámetros de ingreso para el modelo, en un tramo de 750 m., se desarrolla la metodología para un tramo de 2.7 km., con una topografía a escala 1:5000. Se analizan dos escenarios: 1) El huayco de la quebrada con un flujo presente en el río Rímac de 27.2 m³/s (caudal estimado del río en el último huayco), y 2) Un análisis simulando para el huayco en la quebrada y con una avenida de 80 m³/s en el río Rímac, con el fin de presentar el fenómeno de desborde e inundación del río por la colmatación ocurrida en el cauce del río por el huayco (Figuras 2 y 3). Se toma en cuenta el encauzamiento actual del río con diques entre 3 y 4 m de altura.

Finalmente de los resultados, se procede a elaborar un mapa preliminar de amenaza para la ciudad de Matucana, en función de la metodología descrita por Basabe et al. (2001), donde el color rojo, significa amenaza alta y el color anaranjado se refiere a una amenaza media (Figura 4).

REFERENCIAS

- Basabe P., Neumann A. & Singer A. (2001). Aporte a la Prevención de Desastres Naturales en Venezuela (PREVENE). Cooperación: Venezuela-Suiza-P.N.U.D. Proyecto VEN/00/005, Caracas.
- Fidel L., Zegarra J., Vilchez M., Castillo, L. & Jackson, L. (2006). Evolution of landslide activity, and the origin of debris flows in the El Niño affected Paihua Creek Basin, Matucana area, Huarochiri, Peru, 1951 – 2004. In Proceedings, International Association for Engineering Geology and the Environment, meeting. Nottingham, United Kingdom. In press
- Hungro O., Evans S., Boris M.J. & Hutchinson J.N. (2001). A Review of the classification of Landslides of the Flow Type. Environmental & Engineering Geoscience, Vol. III, No.3, pp 221-238.
- O'brien, J.S. & Julien P.Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. J. of Hyd. Eng., ASCE, 114(8), pp. 887.

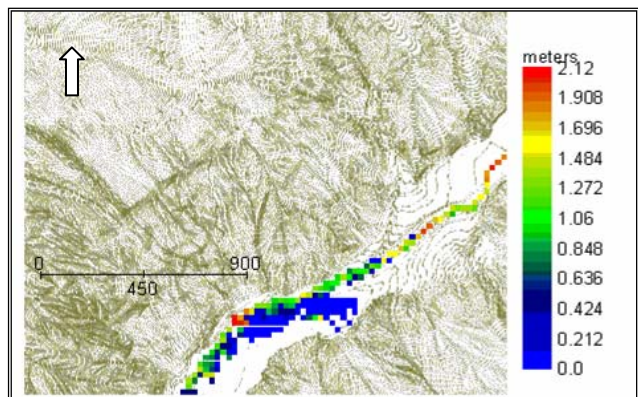
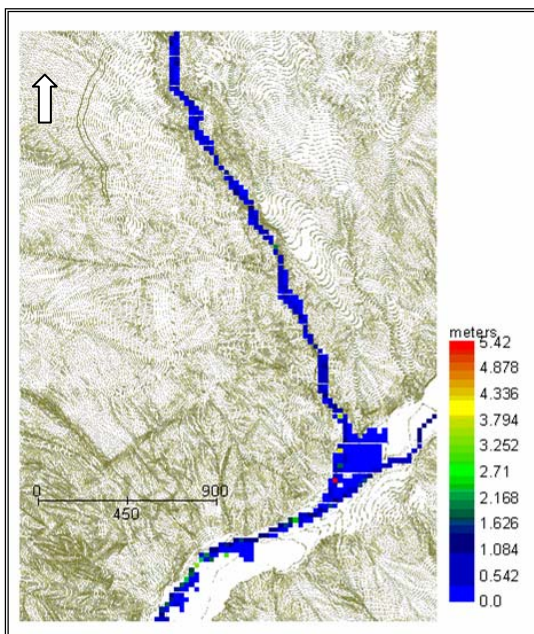


Fig. 2 y 3. Alturas del flujo en metros para los escenarios 1 y 2.

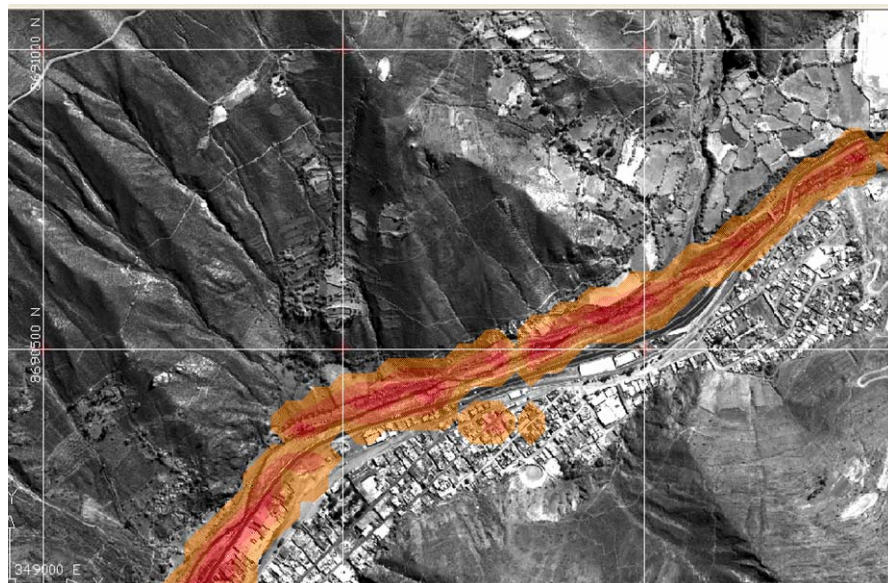


Fig. 4. Mapa de amenaza preliminar para la ciudad de Matucana.
Color rojo: amenaza alta, color naranja: amenaza media.