

GEODINÁMICA Y SIMULACIÓN DEL FLUJOS FLO-2D EN LA QUEBRADA SAPHY – CUSCO

Martin Oviedo^{1,3}, Víctor Carlotto^{1,2}, José Cárdenas¹, Dana Gutierrez⁴ & Igor Astete¹

¹Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco - UNSAAC martinoviedo@hotmail.com

²INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, vcarlotto@ingemmet.gob.pe

³Centro Guaman Poma de Ayala, Jr. Retiro 346 Urb. Tahuantinsuyo, Cusco

⁴Universidad Nacional San Agustín de Arequipa - UNSA, Av Independencia s/n, Arequipa.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Cusco, capital arqueológica de Sudamérica y Patrimonio Cultural de la Humanidad ha tenido diversos periodos en su historia. La ciudad en la época inca estaba ocupada principalmente por palacios y residencias reservadas a la alta sociedad. La ciudad está emplazada en el valle del río Huatanay y atravesada por varias quebradas incluyendo la quebrada Saphy. Los incas sabían de los desastres naturales que podrían afectar la ciudad, particularmente las inundaciones y los deslizamientos, por lo que idearon sistemas hidráulicos y obras de protección de alta técnica. Posteriormente, tanto en la época colonial, la republicana como la actual, se descuidaron las obras de protección, no se realizaron nuevas obras teniendo en cuenta que, en general, la ciudad crecía tanto en población como en superficie. En la actualidad este sistema de protección ha desaparecido casi por completo, no solamente perdiéndose parte del patrimonio, sino dejando desprotegida la ciudad. Por el contrario, se han construido obras como el Campamento Municipal sobre la margen derecha del río Saphy que atentan contra la seguridad física de la ciudad y particularmente del Centro Histórico.

A partir de los estudios de geología, geodinámica externa, hidrología, estabilidad de taludes, y la construcción de mapas de peligros se identificó a la quebrada Saphy como una de las de mayor peligro en el valle de Huatanay. Sin embargo, los mapas de peligros particularmente relacionados a aluviones fueron realizados sólo a partir de evidencias geológicas y antecedentes históricos. El presente trabajo es un complemento importante, realizado a partir de la simulación de flujos utilizando el programa FLO-2D. Esto permitió determinar mapas de peligros de mejor calidad y construidos para diferentes escenarios que afectarían el centro histórico de la ciudad del Cusco.

GEODINÁMICA

La quebrada Saphy se sitúa al noroeste de la ciudad del Cusco y resulta de la confluencia de los ríos Chacán y Muyu Orcco que nacen en las partes altas del Cerro Sencca (Fig. 1), a una altura de 4350 msnm, desde ahí hasta la canalización (3420 msnm) presenta una longitud aproximada de 1.4 km. Cada una de las quebradas Chacán y Muyu Orcco tienen más de 5 km de longitud. La cuenca del río Saphy es estrecha, en forma de “V” con laderas que tienen pendientes fuertes, tiene una superficie de 20.90 km², presenta una longitud de eje de cauce de 9.94 km y una pendiente promedio de 31.26 %. El río Saphy está canalizado en el tramo que atraviesa la ciudad hasta su desembocadura con el río Huatanay (3313 msnm), en una longitud aproximada de 3 km.

La quebrada Saphy presenta una actividad geodinámica activa fuerte, presentando deslizamientos a lo largo de su cause, proporcionando cantidades importantes de sedimentos que pueden transformar las crecidas en huaycos (flujo de detritos) amenazando la ciudad del Cusco. Se tienen registros de obstrucciones naturales por efecto de deslizamientos que provocaron represamientos pequeños como por ejemplo el sucedido el 5 de abril de 1986, como consecuencia del sismo ocurrido ese mismo día, de una magnitud 5.5 en la escala de Richter. Este represamiento fue rápidamente desembalsado, no afectando la seguridad física del centro histórico. Entre las obstrucciones provocadas por el hombre pueden considerarse aquellas construcciones tipo el Campamento Municipal en pleno cauce del río (Foto 1), que felizmente todavía no ha causado desastre alguno.

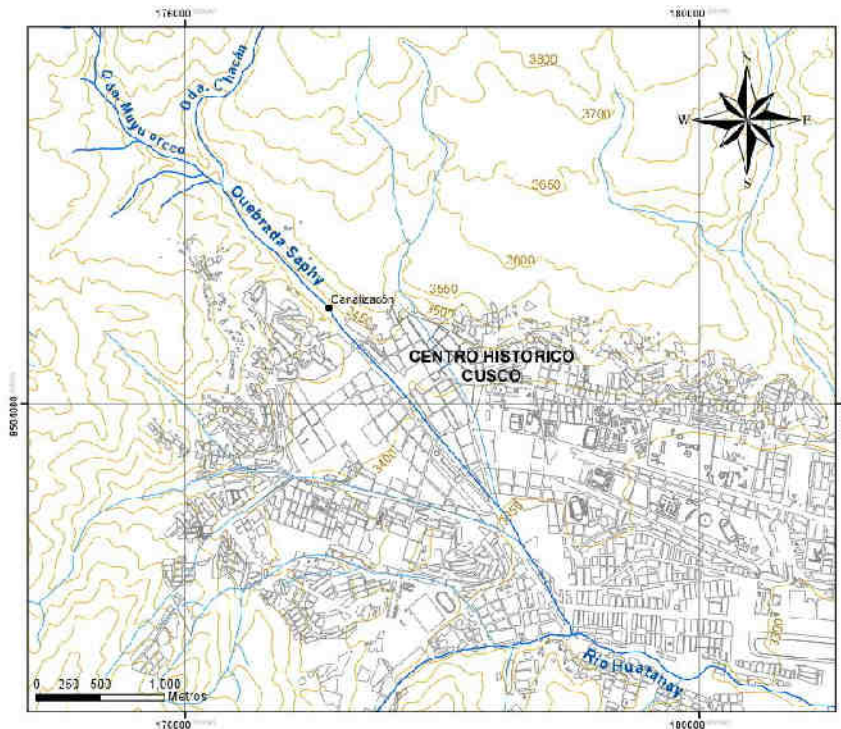


Fig. 1. Ubicación de la zona de estudio

SIMULACIÓN DEL FLUJO HIPERCONCENTRADO EN LA QUEBRADA SAPHY: MODELO FLO-2D

El modelo numérico bidimensional de diferencias finitas FLO-2D permite simular flujos en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas, terrazas y conos aluviales; así como el intercambio de fluido entre los canales y el cono aluvial. Puede modelarse flujo de agua y flujos hiperconcentrados incluyendo avenidas de lodo, flujos de lodo y flujo de detritos (O'Brien, 2000). 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 una serie de factores que son descritos a continuación.

TOPOGRAFÍA

La micro cuenca Saphy tiene una superficie de 20.90 km², presenta una altitud máxima de 4350 msnm, tiene una longitud aproximada de 1.4 km desde la confluencia de los ríos Chacán y Muyu Orcco hasta la canalización (3420 msnm), el río Saphy está canalizado en el tramo que atraviesa la ciudad hasta su desembocadura en el río Huatanay (3313 msnm), en una longitud aproximada de 3 km. Presenta una longitud de eje de cause de 9.94 km, una pendiente promedio de 31.26 %. Se han utilizado mapas topográficos a escala 1:10,000 y un mapa 1:5,000 con curvas de nivel cada 10 m para la quebrada Saphy y 1 m para el Centro Histórico. Ambos mapas son utilizados para la delimitación de la cuenca, el cálculo de los parámetros geomorfológicos y para la modelación.

HIDROLOGÍA

Para la simulación de flujos de lodo y escombros aplicando el FLO-2D, es necesario conocer las características hidrológicas de la cuenca y su repuesta ante una tormenta específica (escenario). La respuesta a estos fenómenos climáticos se representa en un hidrograma líquido construido en base al Software Lluvias V 1.0 (Centro Guamán Poma de Ayala) y la metodología del Soil Conservation Service (SCS). Con el procedimiento anterior se obtuvo un hidrograma líquido con tiempo o periodo de retorno (TR) de 52 años y un caudal pico de 41.5 m³/s (Luna, 2007).

INFORMACIÓN DE CAMPO Y GABINETE:

GEODINÁMICA

La quebrada de Saphy presenta una geodinámica externa bastante activa que está representada principalmente por deslizamientos (Fotos 1 y 2), erosión por cárcavas, reptaciones, erosión vertical y sobre todo lateral del río. Como consecuencia de los deslizamientos se puede producir represamientos y desembalses violentos que pondrían en riesgo la zona urbana y fundamentalmente parte del Centro Histórico de Cusco. Se ha cartografiado desde la confluencia de las quebradas Chacán y Muyu Orcco hasta el inicio de la canalización identificándose una quincena de deslizamientos, de los cuales resaltan los que presentan actividad, siendo estos los denominados 1A, 2A, 2B, 3A, 3C, 4A y 5 (Fig. 2), los cuales han sido estudiados con detalle incluyendo la mecánica de suelos y el cálculo de estabilidad de taludes (Carlotto et. al 2003; Carlotto et al., 2008 en este congreso).



Foto 1. Campamento Municipal y deslizamiento 1C.



Foto 2. Deslizamiento activo 2A.

GEOLOGIA

Además de las rocas que hacen el substrato de la quebrada Saphy, estas se hallan cubiertas por depósitos coluviales que incluyen las arcillas y gravas coluviales (Foto 3), así como los depósitos aluviales constituidos por gravas arcillosas (Foto 4), y por depósitos fluviales conformados por gravas y arenas sueltas.



Foto 3. Materiales coluviales arcillosos y evaporíticos en el Deslizamiento 4A.



Foto 4. Depósitos aluviales antiguos.

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN

Se fijaron de acuerdo a la experiencia en otros países, donde se han calibrado con cuencas experimentales (O'Brien et al, 2000). Además se han utilizado datos tomados en campo y resultados de laboratorio, particularmente los tipos de depósitos cuaternarios que se involucrarían en el aluvión simulado. Así, los ensayos de mecánica de suelos en muestras arcillosas representativas de los deslizamientos, indican índices plásticos que varían entre $4 < IP < 7$ (Fernández Baca, 2007); que según

Hungr et al. (2001), este tipo de materiales se ubican dentro de la clasificación de flujos de lodo, caracterizado por poseer gran cantidad de arcilla de alta plasticidad. Esta aproximación se obtiene variando el parámetro de la concentración volumétrica de sedimentos (C_v) en los datos de entrada al modelo. Para nuestro caso se ha calibrado un C_v variable de 0.25-0.45%. Otros parámetros son la gravedad específica del sedimento (G_s) de 2.65, la resistencia al flujo laminar (K) que es igual a 2285, la rugosidad “n” de Manning de 0.035 para cauce de la quebrada y 0.02 para las calles pavimentadas del Centro Histórico. Luego se aplicó el modelo bidimensional FLO-2D para la simulación del flujo hiperconcentrado de lodo y detritos.

SIMULACIÓN

Para las simulaciones se ha considerado un tiempo de retorno de 52 años y un caudal pico de $41.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Luna, 2007). El tramo simulado tiene una longitud aproximada de 3.6 km. Sobre el mapa 1:5,000 se generó una malla de 1,925 celdas de $20\text{m} \times 20\text{m}$ cada una, cubriendo la quebrada Saphy y el tramo de canalización (Centro Histórico). Se analizó un tiempo de simulación de 6.88 horas. El volumen total de la creciente simulada es de 0.8 millones de m^3 , de los cuales 0.31 millones de m^3 son agua y 0.49 millones de m^3 corresponden a sedimentos (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportada por el modelo es de $252,000 \text{ m}^2$ (Tabla 1). Se aprecian tirantes máximos de 12.5 m con velocidades de hasta 4.7 m/s en el cauce de la quebrada y tirantes de 1.5 m con velocidades de hasta 1.4 m/s en su paso por las calles de la ciudad de Cusco (Fig. 2 y 3).

Tabla 1. Salidas del programa FLO-2D (TR=52 años, $Q_{ip}=41.50 \text{ m}^3/\text{s}$)

Flujo (m^3)	Agua (m^3)	Volumen de Sedimentos (m^3)
Hidrograma de entrada (Inflow)	316534.70	491690.64
Almacenamiento dentro del área de análisis	139915.43	210651.08
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	176633.79	281039.55

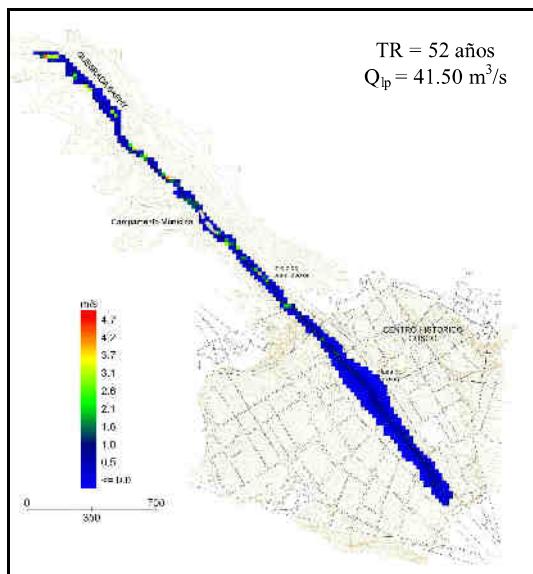


Fig. 2. Velocidades máximas de flujo.

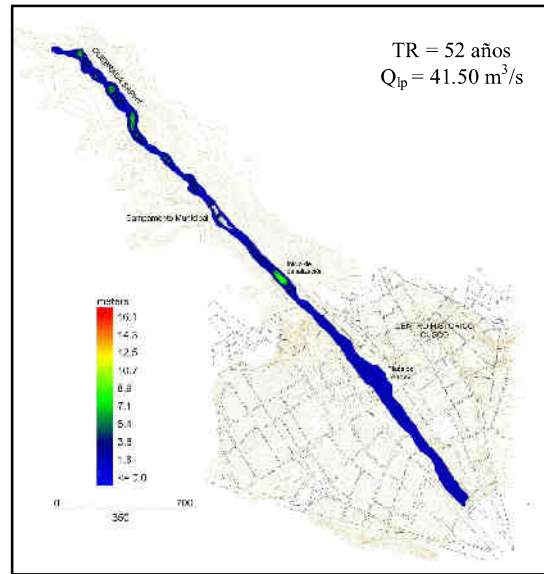


Fig. 3. Profundidades máximas de flujo.

Además del escenario mostrado anteriormente se ha simulado tres escenarios posibles correspondientes a periodos retorno (TR) de 10, 20 y 100 años con caudales pico (Q_{ip}) de $27.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $34.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $69.17 \text{ m}^3/\text{s}$. Todas estas simulaciones indican el alto peligro del Centro Histórico y cada vez mayor cuando mayor es el caudal simulado.

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De los resultados observados para la quebrada Saphy hasta la zona donde comienza la canalización, se aprecia en la parte superior, mayor presencia de tirantes del flujo que van desde los 5 a los 7.4 metros, se observa que el Campamento Municipal se encuentra actuando como un dique ante el paso del flujo. También se observa que el flujo es canalizado por las calles principales de la ciudad, llegando a pasar por la Plaza de Armas, en donde se registran alturas de hasta 0.25 metros. El modelo FLO-2D ha reportado volúmenes de agua iguales a 316,534 m³ de los cuales se presume que es contribuido por la lluvia extraordinaria. También el modelo ha reportado un volumen de sedimentos dentro de la quebrada igual a 210,651 m³ que vendría a ser el material erosionado y trasportando de las márgenes del cause del río, correspondientes a los deslizamientos activos y antiguos.

MAPA DE PELIGROS

La parte noroeste del Centro Histórico del Cusco se encuentra sobre el cono aluvial antiguo de la quebrada Saphy, siendo este el resultado de la superposición de varios flujos aluviónicos antiguos. En bases a estos antecedentes, el modelo FLO-2D generó un mapa de peligros acorde a los parámetros introducidos a esta simulación, y además contando con la actividad geodinámica que presenta la quebrada. Se han establecido 3 zonas de peligro (Fig. 4).

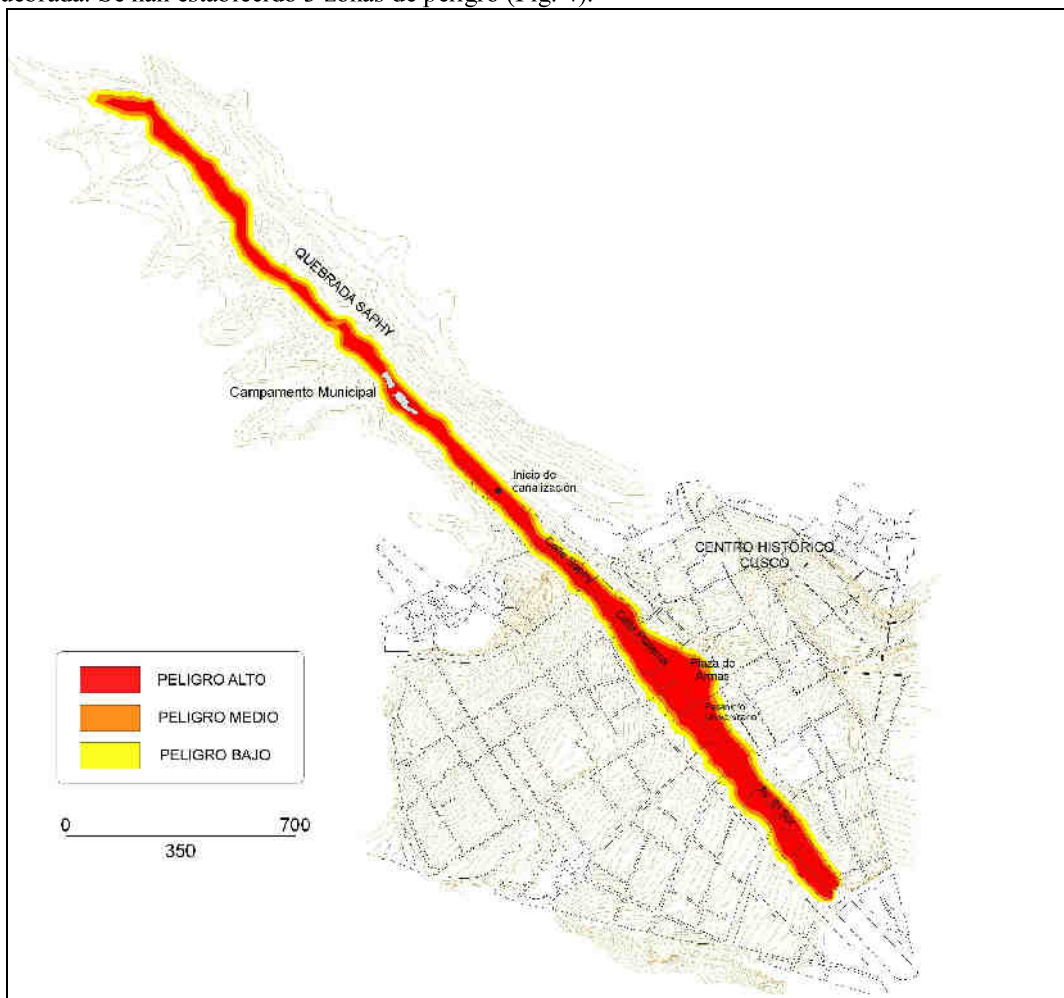


Fig. 4. Mapa de peligros aluviónicos Flo-2D para un TR de 52 años.

a) Peligro alto, en caso de ocurrir un flujo de detritos (huayco), las zonas más afectadas serían principalmente el cauce y bordes del río Saphy; el Campamento Municipal, la calle Saphy, calle Plateros, parte de la Plaza de Armas, el Paraninfo Universitario, y toda la Av. El Sol. Estas zonas

quedarían inundadas y afectadas por el flujo, el cual continuaría tu camino hasta desembocar al río Huatanay. En su recorrido por la quebrada Saphy el flujo puede originar nuevos represamientos por la presencia de los deslizamientos activos, los desembalses consiguientes provocarían aluviones mayores.

b) Peligro medio, zonas representadas por las márgenes menos afectadas de la quebrada y la calle Saphy, así como la intersección con otras calles como de la Conquista, Amargura, Tigre, Siete Cuartones; en la Plaza de Armas con la calle del Medio; luego en la Av. El Sol con las calles Almagro, Ayacucho y Puente Rosario, las cuevas sufrirían inundaciones parciales de flujo.

c) Peligro bajo, representado por las zonas que sufrieron poco o casi nada de daños ante el paso del flujo, tales como calles, avenidas e infraestructuras que se encuentren distantes o en cotas superiores al paso del flujo.

Esta simulación abarca la quebrada Saphy, el Centro Histórico y parte de la Av. El Sol, y no hasta la confluencia con el río Huatanay, debido a la falta de datos topográficos a detalle como lo exige el software FLO-2D.

CONCLUSIONES

La utilización del modelo numérico Flo-2D en la quebrada de Saphy y el Centro Histórico de la ciudad de Cusco, nos indica que en todos los escenarios a partir de periodos de retorno de 10 años y hasta 100 años, parte del Centro Histórico presenta un alto peligro ante la ocurrencia de aluviones. Estos aluviones pueden ser mayores debidos a represamientos que puedan ocurrir en la quebrada, tanto por la reactivación de deslizamiento, así como la existencia del Campamento Municipal.

REFERENCIAS

- Carlotto, V; Fernández Baca, C. y Estrada, E. 2008. Geología y estabilidad de taludes para el tratamiento paisajístico de la parte baja de la quebrada Saphy-Cusco, XIII Congreso Latinoamericano de Geología, Lima, p. 6.
- Carlotto, V; Fernández Baca, C. y Casos, G. 2003. Estudio Geológico, Geodinámico, análisis de estabilidad, predicción y riesgos de la quebrada Saphy. Centro Guamán Poma de Ayala - Cusco, p. 48.
- Tintaya, D. 2007. Estudio Geológico y Geodinámico de la cuenca de Saphy. Centro Guamán Poma de Ayala - Cusco, p. 49.
- Luna, C. 2007. Hidrología y Generación de Caudales para la microcuenca de Saphy. Estudio N° 10, Centro Guamán Poma de Ayala, p. 150. Cusco-Perú.
- Fernández Baca, C. 2007. Estudio de mecánica de suelos y dimensionamiento de obras para estabilización, tratamiento, y recuperación de la quebrada Saphy. Centro Guamán Poma de Ayala - Cusco, p. 74.
- Valderrama M., Patricio A. 2006. Geología, Geodinámica y Simulación de flujos en las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo. Tesis, Facultad de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Castillo N., Leonardo F. 2005. Aplicación de un Modelo Numérico de flujos de lodo y escombros en una quebrada en el Perú. Tesis, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Hungr, O.; Evans, S.; Boris, M. y Hutchinson J. 2001. A Review of Classification of Landslides of de Flow Type. Department Earth and Ocean Science, University of British Columbia, Vancouver-Canada, p. 18.
- O'Brien J.S. 2000. FLO-2D User's Manual, Versión 2000.10, Nutrioso, Arizona. Ubicación: <http://www.flo-2d.com>