

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO  
ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA Y  
GEOGRAFIA**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**



**GEOLOGIA, GEODINAMICA Y SIMULACION DE  
FLUJOS EN LAS CIUDADES DE URUBAMBA Y  
OLLANTAYTAMBO**

Tesis presentada por

**Br. PATRICIO ALONSO  
VALDERRAMA MURILLO**

Para optar al título profesional de  
INGENIERO GEOLOGO

CUSCO -PERU  
2006

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis más sinceros agradecimientos al Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET), por permitir realizar mi tesis, al Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA:GCA) por facilitarme el uso y la capacitación en el software FLO-2D. Al Doctor José Machare, Director Ejecutivo de INGGEMMET por brindarme las facilidades del caso y acogerme en la institución.

Al Doctor Víctor Carlotto, Director Geocientífico de INGGEMMET, por impartirme conocimientos durante mi formación universitaria, quien me asesoró durante la realización del trabajo y me brindó los datos del estudio de Ciudades Sostenibles.

Al Magíster José Cárdenas, por el asesoramiento de la tesis, por darse el tiempo para revisarla, corregirla y por ser un gran amigo.

Al Ingeniero Eddie Mercado, por el asesoramiento de la tesis.

Al Ingeniero Lionel Fidel, Director de Geología Ambiental de INGGEMMET por el apoyo para la culminación de la tesis.

A la Señorita. Yahayda Loaiza, por todo el apoyo en los trámites administrativos, por su compañía y por su amor.

A mis amigos de siempre Marco Gervasi, Marla Álvarez, Carolina Silva, Elisvan Lauro, Martín Oviedo, Ronald Concha y al Círculo de Estudios GEMA por estar siempre presentes, cuando necesite su apoyo.

A mi hermana Beatriz, por ser la alegría de mi vida.

A mi papá Helard  
por ser la persona  
que más admiro en  
este mundo.

A mi MADRE quien  
es la causa de mi  
existir y de mi  
constante  
superación.

# ÍNDICE

Pág.

## RESUMEN

### CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN	02
1.2. UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	02
1.3. ACCESIBILIDAD	05
1.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS	05
1.5. PROBLEMÁTICA	06
1.6. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	07
1.7. OBJETIVOS	07
1.7.1. OBJETIVO GENERAL	07
1.7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	07
1.8. HIPÓTESIS	08
1.9. METODOLOGÍA DE TRABAJO.	08
1.9.1. ETAPA DE PREPARACIÓN	08
1.9.2. ETAPA DE CAMPO	08
1.9.3. ETAPA DE GABINETE	08
1.10. TRABAJOS ANTERIORES	08

### CAPÍTULO II MARCO GEOLÓGICO

2.1. GEOMORFOLOGÍA	11
2.1.1. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	11
2.1.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL	11
2.2. GEOLOGÍA	17
2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	22

### CAPÍTULO III CARACTERIZACIÓN DE QUEBRADAS, FLUJOS, Y ASPECTOS HIDROLÓGICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. CARACTERIZACIÓN DE QUEBRADAS	24
3.1.1. DEFINICIÓN	24
3.1.2. FORMACIÓN DE QUEBRADAS	25
3.1.3. FLUJO	26
3.1.4. TIPO DE FLUJO QUE DISCURREN POR UN QUEBRADA	26
3.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL TIPO DE FLUJO	27
3.3. ASPECTOS HIDROLÓGICOS	28
3.3.1. HIDRÁULICA DE LOS FLUJOS DE DETRITOS	28
3.4. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	28
3.4.1. CONCEPTOS BÁSICOS	29
3.4.2. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CIUDAD DE URUBAMBA	29
3.4.3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CIUDAD DE OLLANTAYTAMBO	34
3.4.4. ADECUACIÓN DE LOS HIDROGRAMAS DE FLUJO.	37

## **CAPÍTULO IV      MODELO DE SIMULACIÓN FLO 2D**

4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FLO-2D	41
4.1.1. LÓGICA DEL FLO-2D	41
4.2. APLICACIÓN DEL MODELO FLO 2D.	42
4.2.1. SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE FLO 2D	42
4.2.2. SIMULACIÓN DEL FLO 2D EN LAS CIUDADES DE URUBAMBA Y OLLANTAYTAMBO	47
4.2.3. UTILIZACIÓN DEL POST PROCESOR (MAPPER) EN EL FLO 2D	52

## **CAPÍTULO V      RESULTADOS DE LA MODELACIÓN FLO 2D PARA LAS                           CIUDADES DE URUBAMBA Y OLLANTAYTAMBO**

5.1. INTRODUCCIÓN	63
5.2. PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN	63
5.3. RESULTADOS PARA LA CIUDAD DE URUBAMBA	63
5.3.1. QUEBRADA CHICÓN	64
5.3.2. QUEBRADA PUMAHUANCA (TR = 100 años)	68
5.3.3. QUEBRADA PUMAHUANCA (TR = 50 años)	72
5.4. RESULTADOS PARA LA CIUDAD DE OLLANTAYTAMBO	76
5.4.1. QUEBRADA PATACANCHA (TR = 50 años)	76
5.4.2. QUEBRADA PATACANCHA (TR = 100 años)	80

## **CAPÍTULO VI      ZONIFICACIÓN DE PELIGROS**

6.1. INTRODUCCIÓN	85
6.2. MAPAS DE PELIGROS GENERADOS PARA EL PROYECTO CIUDADES SOSTENIBLES	85
6.2.1. ZONA DE PELIGRO MUY ALTO	85
6.2.2. ZONA DE PELIGRO ALTO	85
6.2.3. ZONA DE PELIGRO MEDIO	85
6.2.4. ZONA DE PELIGRO MEDIO A BAJO	88
6.3. MAPAS DE PELIGROS GENERADOS CON EL FLO 2D Y SU INTERPRETACIÓN	88
6.3.1. ZONA DE PELIGRO MUY ALTO	88
6.3.2. ZONA DE PELIGRO ALTO A MEDIO	95
6.3.3. ZONA DE PELIGRO MEDIO A BAJO	95
6.3.4. ZONA DE PELIGRO BAJO	95
6.4. COMPARACIÓN DE MAPAS DE PELIGROS	95
6.4.1. CIUDAD DE URUBAMBA	95
6.4.2. CIUDAD DE OLLANTAYTAMBO	101
6.5. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	103

## **CAPÍTULO VII      CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

7.1. CONCLUSIONES	106
7.2. RECOMENDACIONES	107

## **BIBLIOGRAFÍA ANEXOS**

## RESUMEN

Las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, ubicadas en el Valle Sagrado de los Incas, están emplazadas en conos aluviales antiguos, vestigio de la gran actividad aluviónica que sufre la zona. En épocas de alta pluviosidad, que van del mes de diciembre a marzo, la posibilidad de que ocurra un aluvión o huayco aumenta, poniendo en riesgo la vida de miles de personas, terrenos de cultivo y vías de comunicación muy importantes para la región. Por lo tanto, es importante contar con mapas de peligros que puedan servir para prevenir los desastres y para el desarrollo de planes de ordenamiento territorial y de expansión urbana. En este trabajo se ha construido el mapas de peligros de las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo utilizando el software FLO 2D que simula diferentes tipos de flujos como huaycos o aluviones.

Para la utilización del software se ha usado parámetros físicos como la topografía, forma del cauce, cantidad de material acumulado en el cauce, etc.; así como parámetros hidrológicos incluyendo las precipitaciones máximas, coeficiente de Manning, hidrogramas de caudal líquido, etc. Esto ha permitido generar mediante el MAPPER, mapas de elevaciones del terreno, de velocidades del flujo, de alturas del flujo y mapas de peligros en diversas presentaciones tanto en polígonos, vectores y celdas coloreadas.

Para la ciudad de Urubamba se ha generado tres simulaciones ya que en esta ciudad confluyen dos quebradas. Para la quebrada de Pumahuanca se realizaron dos simulaciones con caudales de  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $420 \text{ m}^3/\text{s}$  y para la quebrada Chicón una sola simulación con un caudal de  $260 \text{ m}^3/\text{s}$ , considerando periodos de retorno de 100 y 50 años.

Para la ciudad de Ollantaytambo, se ha generado dos simulaciones de la quebrada Patacancha con caudales de  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ , igualmente considerando periodos de retorno de 100 y 50 años.

Los mapas de peligros generados con el FLO 2D han zonificado las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo con áreas de peligro muy alto, alto-medio y bajo. Estos han sido comparados con los mapas de peligros geológicos-climáticos del proyecto de Ciudades Sostenibles. Los resultados de la comparación entre estos mapas elaborados por distintas técnicas muestran que en general son bastantes similares, solo con pequeñas diferencias. Por lo tanto, el software FLO 2D es una herramienta importante para la elaboración de mapas de peligros por aluviones que se ha probado con éxito en las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo.

**CAPÍTULO I**  
**ASPECTOS GENERALES**

## 1.1. INTRODUCCIÓN

El Valle del Vilcanota es conocido con el nombre de Valle Sagrado de los Incas y considerado como uno de los más importantes del Perú, no sólo por su hermosura paisajística, sino también por su inmensa riqueza arqueológica y agrícola.

Las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo se ubican en el Valle del Vilcanota llamado también Urubamba. Es conocido por su interés turístico, clima benigno, donde vive una cantidad considerable de población oriunda y foránea que se va incrementando a diario, razón por la cual aumenta la infraestructura y la demanda de servicios. Este hecho debe tomarse en cuenta para la seguridad física de las viviendas, hoteles, restaurantes, colegios e infraestructura de servicios.

Estas ciudades se emplazan sobre antiguos aluviones o huaycos, que son movimientos en masa que han ocurrido históricamente y muy recientemente como el año 1942 que afectó la ciudad de Urubamba. Estos eventos generalmente están relacionados a precipitaciones extraordinarias o a la inestabilidad de macizos de hielo de los nevados.

Por las razones antes expuestas, es necesario tomar medidas de prevención y una de las herramientas es la confección de mapas de peligros obtenidos mediante una metodología de trabajo.

Existen mapas de peligros para las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo realizados por el Instituto Nacional de Defensa Civil dentro del proyecto Ciudades Sostenibles PNUD-INDECI (2004). Uno de los mapas presentados en el estudio anteriormente citado es el de peligro por aluviones. En la presente tesis, mediante la simulación de un flujo de características extraordinarias, se pretende saber como serían afectadas las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo ante un peligro por aluvión de grandes proporciones. Para realizar la simulación se ha trabajado con el programa de simulación de flujos FLO 2D, el cual es utilizado con mucho éxito en Perú a través de los estudios que realiza INGEMMET, así como también en los Estados Unidos y otros países.

## 1.2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo se localizan en el Valle Sagrado de los Incas, en la margen derecha del río Vilcanota, de acuerdo al siguiente detalle (Figuras 1 y 2)

Ciudad:	Urubamba
Altitud:	2850 msnm
Distrito:	Urubamba
Provincia:	Urubamba
Departamento:	Cusco
Coordenada UTM:	Norte: 8'524,000 a 8'540,000 m. Este: 808,000 a 820,000 m.

Ciudad:	Ollantaytambo
Altitud:	2800 msnm
Distrito:	Ollantaytambo
Provincia:	Urubamba

Departamento: Cusco  
Coordenada UTM: Norte 8'547,000 a 8'531,000 m.  
Este 794,000 a 806,000 m.

### **1.3. ACCESIBILIDAD**

La accesibilidad a estas ciudades se realiza desde la ciudad de Cusco, mediante carreteras asfaltadas y vía férrea de acuerdo al siguiente detalle:

A la ciudad de Urubamba se realiza mediante la carretera principal asfaltada Cusco-Pisac-Calca-Urubamba; con un recorrido aproximado de 65 km. También se puede acceder mediante la carretera principal asfaltada Cusco-Chinchero-Urubamba; con un recorrido aproximado de 60 km. El acceso a los diferentes barrios, urbanizaciones, asociaciones, áreas de expansión urbana, que conforman la ciudad de Urubamba y alrededores, se realiza por las calles, avenidas, vías asfaltadas y caminos de herraduras. El acceso hacia las quebradas Chicón y Pumahuanca, se efectúa mediante carreteras rurales secundarias.

El acceso a la ciudad de Ollantaytambo se hace mediante la carretera principal asfaltada Cusco-Pisac-Calca-Urubamba-Ollantaytambo, con un recorrido aproximado de 85 km. También se puede llegar mediante la carretera principal asfaltada Cusco-Chinchero-Urubamba, con un recorrido aproximado de 80 km. El acceso a los diferentes barrios, urbanizaciones, asociaciones, áreas de expansión urbana, etc, que conforman la ciudad de Ollantaytambo y alrededores, es mediante calles, avenidas, vías asfaltadas y caminos de herraduras. Hacia la quebrada Patacancha, se realiza mediante la carretera rural Ollantaytambo-Ocobamba.

### **1.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS**

El área de estudio está marcada por dos estaciones, una de estiaje entre los meses de mayo a noviembre y otra pluvial entre los meses de diciembre a abril.

Según la clasificación de Pulgar Vidal (1987), las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo pertenecen principalmente a la región Quechua y las partes altas a la región Suni y Puna.

En la región Quechua (2300 y 3500 msnm) el clima dominante es templado, con notable diferencia de temperatura entre el día y la noche. La temperatura media anual fluctúa entre 11 y 16 °C; las máximas entre 22 y 29 °C y las mínimas entre 7 y -4 °C durante el invierno, es decir, de mayo a agosto. Las lluvias caen con regularidad durante el verano (diciembre a marzo). La vegetación típica está conformada por: aliso, maíz, calabaza, caigua, tomate, papaya de olor, trigo, árboles frutales, ciruelo, almendro, peral, manzano, membrillo, durazno, etc.

En la región Suni (3500 y 4000 msnm) el clima es seco y frío. La temperatura media anual fluctúa entre 7 y 10 °C, con máximas superiores a 20 °C y mínimas invernales de -1 a -6 °C (mayo-agosto). La precipitación promedio es de 800 mm por año. La vegetación está compuesta por plantas silvestres como el quinal, quishuar, sauco,

cantuta, motuy, carhuacasha, wiñayhuayna, suni y por comestibles como la papa, ño, quinua, cañihua, achis, tarwi, haba, oca y olluco.

En la región Puna (4000 y 4800 msnm), el clima es frígido, con una temperatura media anual superior a 0 °C e inferior a 7 °C. La precipitación fluctúa entre 400 y 100 mm al año. La vegetación está compuesta de pajonales, ocsha, ichu, berro, totora, llacho, los bofedales, arbustos de culli, árboles como la titánica, junco y cunco. Los productos alimenticios son la papa, cebada y maca.

## **1.5. PROBLEMÁTICA**

Las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo presentan un potencial de recursos naturales, paisajístico, agropecuario, arqueológico, cultural e histórico. Esto atrae a una gran cantidad de turistas nacionales y extranjeros la mayor parte del año. Además es el sitio donde habitan más de 27000 personas.

Estas ciudades por su ubicación geográfica están expuestas a diversos fenómenos climáticos, principalmente las precipitaciones pluviales, las cuales se incrementan en los meses de diciembre a marzo. Este incremento de las lluvias genera a veces daños a las viviendas y terrenos de cultivos, pero uno de los mayores riesgos es el aumento en la probabilidad de formación y ocurrencia de aluviones o flujos de detritos.

En las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, la historia geológica nos muestra en los cortes de carreteras realizados por los ríos (Vilcanota, Chicón, Pumahuanca, y Patacancha), y en las faldas de los cerros aledaños, vestigios de depósitos fluviales y especialmente aluviales, sobre los que se emplazan estas ciudades; sin embargo, estos peligros también se muestran en la actualidad con menor recurrencia e intensidad. Por ejemplo, en la ciudad de Urubamba el año 1942 ocurrió un aluvión (flujo de detritos y lodo) que destruyó e inundó viviendas y terrenos de cultivo, felizmente sin ninguna pérdida de vidas humanas.

Para mitigar estos fenómenos geológicos climáticos (aluviones) se realizó obras de prevención como por ejemplo canalización de los cauces, muros de contención, etc., los cuales ahora no son muy adecuados dado el crecimiento desordenado de las ciudades y la falta de mantenimiento de los mismos.

Por otro lado, existe un peligro latente debido a que en la parte superior de estas quebradas se encuentran depósitos morrénicos, material aluvial y coluvial, tanto en las laderas, así como en el cauce de los ríos, los cuales en época de lluvias extraordinarias podrían desencadenar un aluvión de magnitudes considerables.

Pese a la gran cantidad de problemas geodinámicos que presentan las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, existe un solo estudio al detalle sobre peligros de aluviones y ninguno con simulación de flujos.

La presente tesis toma como base el estudio de Mapas de peligros del proyecto Ciudades Sostenibles realizado por Carlotto et al. (2005), y con estos datos se realiza simulaciones de flujos extraordinarios, demostrando la versatilidad del software usado, dado que variándole los parámetros de precipitación y tiempo del caudal, se puede simular casi cualquier tipo de fluido.

## **1.6. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Por la problemática existente en las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, es necesario estudios para la seguridad física de estas. Uno de estos estudios es el realizado por el proyecto de Ciudades Sostenibles (Carlotto et al., 2005), donde se tienen mapas temáticos, como por ejemplo el de peligros por aluviones, siendo necesario comprobar y afinar estos para darles credibilidad y certeza, de ser el caso.

Una de las opciones de poner a prueba estos mapas es mediante el análisis de flujos y una de las maneras es realizar simulaciones de aluviones mediante el uso del software FLO 2D con parámetros de simulación de un evento extraordinario (muy grande). Sin embargo, pueden ser también tratados eventos para periodos de recurrencia de menor magnitud, como por ejemplo, para un menor tiempo de descarga pero un caudal mayor, o con un gran tiempo de descarga con un caudal menor.

Los estudios anteriores y los resultados obtenidos en esta tesis, servirán para mejorar los estudios de seguridad física de las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, facilitando la toma de decisiones con respecto a prevención y ordenamiento territorial de las ciudades, zonificando las mismas según el grado de peligrosidad que obtengan, ya sea de peligro alto, medio o bajo.

Con el conocimiento de este software, se podrá manejar situaciones potencialmente peligrosas para una ciudad, ya que con los parámetros adecuados se puede generar un mapa de peligros por aluvión en cuestión de horas, en comparación con los mapas de peligros geológicos que pueden tomar hasta 6 meses en su elaboración.

En consecuencia, un estudio de simulación de flujos tipo aluviones que puedan afectar ciudades, se justifica plenamente al permitir elaborar mapas de peligros que son importantes para la prevención de desastres y también para la planificación del territorio y muy particularmente para la expansión urbana.

## **1.7. OBJETIVOS**

### **1.7.1. Objetivo General**

El objetivo principal es el de evaluar el grado de peligrosidad por aluviones de las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo.

### **1.7.2. Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Demostrar la utilidad del software FLO 2D versión 2006, para aluviones extraordinarios.
- Crear un mapa de peligros digital a base de la modelación.
- Comparar los mapas de peligros generados digitalmente con los mapas de peligros elaborados en base a criterios geológicos e hidrológicos del Proyecto de Ciudades Sostenibles (Carlotto et al., 2005).

## **1.8. HIPÓTESIS**

Se plantea como hipótesis que las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo son propensas a ser afectadas por aluviones y que además existe una falta de conocimiento respecto a la peligrosidad, por lo tanto, de la planificación del territorio, lo que conlleva a mayores desastres.

Por lo expuesto, se plantea el estudio de los aluviones en las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo a través del software FLO 2D, el cual genera simulaciones de flujos para conocer sus características físicas y mecánicas, así como para generar mapas de peligros.

El software FLO 2D es muy útil para el manejo y tratamiento de aluviones y poder manejar situaciones de emergencia, evaluar zonas de evacuación, mostrar las zonas potenciales por donde pasaría un aluvión, inclusive la altura y velocidad del flujo.

## **1.9. METODOLOGÍA DE TRABAJO.**

La metodología de trabajo se dividió en tres etapas:

### **1.9.1. Etapa de preparación**

En esta etapa se realizó la recolección bibliográfica de los trabajos anteriores, recopilación de mapas tanto impresos como digitales, ubicación de datos hidrográficos, etc.

### **1.9.2. Etapa de campo**

Visitas de campo a la zona de estudio con el fin de reconocer los peligros a que están expuestas las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, así como definir los parámetros hidrológicos y fisiográficos como la cantidad de material acumulado y transportado en el cauce de flujos antiguos.

### **1.9.3. Etapa de gabinete**

En esta etapa se realizó el procesamiento de datos, digitalización de la topografía, creación de hidrogramas y parámetros hidrológicos, simulación de flujos en las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo. También se obtuvo la generación de mapas de peligros con el software FLO 2D. Finalmente, se realizó las comparaciones entre los mapas de peligros obtenidos por Carlotto et al. (2005) y los mapas digitales del software FLO 2D.

## **1.10. TRABAJOS ANTERIORES**

Los trabajos técnicos relacionados a peligros por aluviones en la zona de estudio son escasos, siendo el único estudio al detalle, el estudio: Mapa de Peligros para las ciudades de Urubamba, Ollantaytambo, Calca y Písaq. INDECI – Ciudades Sostenibles, realizado por Carlotto et al. (2005).

En este estudio se identificaron los peligros geológicos que afectan a las ciudades de Písaq, Calca, Urubamba y Ollantaytambo, y además se generaron los mapas geológico, geodinámico, capacidad portante de suelos, clasificación de suelos, zonificación de peligro por aluvión, zonificación de peligro por inundación, zonificación geológica de peligro por inundación del río Vilcanota y zonificación de peligros múltiples. Respecto a la geología regional existen trabajos regionales de Marocco (1978) y mas locales como la geología de los cuadrángulos de Calca y Urubamba realizados por INGEMMET (Carlotto et al., 1996) donde destaca los aspectos estratigráficos, tectónicos y la cartografía a escala 1:100000. Existen también trabajos locales sobre los deslizamientos en Urubamba del Dr. Kalafatovich (1977).

**CAPÍTULO II**  
**MARCO GEOLÓGICO**

## **2.1. GEOMORFOLOGÍA**

### **2.1.1. Geomorfología regional**

La zona de estudio se localiza en la unidad geomorfológica Cordillera Oriental en el borde Sur-Oeste, cerca al límite con el Altiplano; siendo cortada por el río Vilcanota (Marocco, 1978; Carlotto et al., 1996). Su relieve es abrupto por las laderas empinadas y quebradas transversales tanto en la margen derecha e izquierda. Las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo se localizan en la margen derecha del río Vilcanota y en la desembocadura de las quebradas Chicón y Pumahuanca en Urubamba; y Patacancha en Ollantaytambo (Fig. 3).

La Cordillera Oriental se caracteriza por formar una cadena de montañas que sobrepasan los 5000 msnm, mostrando algunos nevados como el Halancoma (5450 msnm), Pumahuanca (5330 msnm), Chicón (5530 msnm). Estas montañas y nevados son nacientes de las quebradas, en cuyas desembocaduras se localizan las ciudades de Ollantaytambo y Urubamba.

### **2.1.2. Geomorfología local**

La unidad geomorfológica más sobresaliente es el correspondiente al valle, que en la región se le denomina Valle Sagrado de los Incas. Éste es considerado como un valle interandino que tiene una dirección preferencial SEE a NOO. Las vertientes son moderadamente suaves a empinadas, en tanto que el piso de valle es amplio, formado por varias terrazas fluviales, las que fueron en algunos casos protegidos por muros de contención y aprovechadas como áreas de cultivo mediante andenes.

#### **2.1.2.1. Urubamba**

En la ciudad de Urubamba y áreas circundantes se pueden diferenciar las siguientes unidades geomorfológicas (Fig. 4).

##### *A) Unidad de laderas*

##### A.1. Laderas de pendiente suave

##### **- Piso de valle de las quebradas Chicón y Pumahuanca**

A esta sub-unidad corresponde la llanura aluvial y fluvial (piso de valle) de las quebradas Chicón y Pumahuanca, donde se ubican la parte baja de deslizamientos y conos aluviales situados perpendicularmente a la quebrada principal. El material depositado está conformado por bloques y gravas en una matriz limo-areno-arcillosa. Sobre el piso de valle y muy especialmente sobre los pequeños conos aluviales y en las riberas de los ríos Chicón y Pumahuanca se sitúan muchos asentamientos humanos y terrenos de cultivos. Los materiales de estos conos, proceden de la parte alta de las quebradas donde afloran principalmente areniscas de la Formación Huancané, areniscas de las formaciones Paucarbamba, Puquín, Quilque-Chilca, areniscas calcáreas y lutitas del Grupo Yuncaypata, areniscas del Grupo San Jerónimo, granitos Permo-Triásicos,

pizarras y volcánicos del Grupo Mitu, y finalmente esquistos de la Formación Paucartambo.

El intemperismo está facilitado por las rocas fracturadas, la presencia de morrenas y/o material fluvio-glaciar, presencia de depósitos coluviales, la activación de deslizamientos debido a las rocas poco cohesivas, y la erosión del río. Todo esto facilita la producción de materia prima para la formación de aluviones y la consiguiente depositación en los conos aluviales mayores de Urubamba, es decir en el Chicón y Pumahuanca.

### **- Conos aluviales Chicón y Pumahuanca**

Los ríos Chicón y Pumahuanca son afluentes del río Vilcanota en su margen derecha. En la desembocadura de estas quebradas, sobre depósitos de varios conos aluviales se emplaza la ciudad de Urubamba, así como las zonas de expansión y terrenos agrícolas.

Esta sub-unidad comprende toda el área del cono aluvial Urubamba (Chicón y Pumahuanca), que se debe a la construcción de varios aluviones procedentes de las quebradas Chicón y Pumahuanca. Está conformado por bloques y gravas en una matriz limo-arena-arcillosa. Es de amplia extensión y poca inclinación. Aquí es donde se asienta la mayor parte de la ciudad de Urubamba y la mayoría de nuevas expansiones urbanas.

Los conos se extienden desde la cota aproximada de 2850 msnm que corresponde al límite con el río Vilcanota, hasta las partes bajas de las laderas de los cerros que circundan a la ciudad, predominantemente hacia el norte, hasta la cota promedio de 2900 msnm. Desde el punto de vista urbanístico, esta sub-unidad geomorfológica es importante por que debido a sus grandes extensiones ha permitido el crecimiento de la ciudad de Urubamba.

Es importante mencionar que en la margen izquierda del río Chicón-Tullumayo se encuentran restos arqueológicos incas donde se encuentra el Palacio de Wayna Capac que está conformada por recintos y andenerías que están en actual restauración por parte del Instituto Nacional de Cultura (INC). Este conjunto también se vió afectado por al menos un aluvión.

#### A.2. Laderas de pendiente fuerte

Esta sub-unidad se extiende desde la cota promedio 2900 msnm hasta los vértices de los cerros que rodean la ciudad y cuya altitud sobrepasa los 4000 msnm.

Al Norte de la ciudad de Urubamba el relieve de esta sub-unidad es bastante empinada. A esta unidad también corresponden las laderas de las quebradas Chicón y Pumahuanca, con uso parcial del suelo como terrenos de cultivo y áreas de pastaje. En las laderas abruptas afloran rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas muy fracturadas, sobre las cuales se han desarrollado depósitos coluviales tanto por deslizamientos, derrumbes, así como conos que por la presencia de aguas se vuelven inestables.

Las laderas de esta sub-unidad no son favorables para los asentamientos urbanos por los peligros relacionados a los deslizamientos.

## *B. Unidad de quebradas y ríos*

### B.1. Quebrada Chicón

Esta quebrada tiene una longitud aproximada de 10.17 km. y una pendiente promedio de 16 %. Se inicia por la confluencia de dos quebradas provenientes del nevado Chicón y lagunas glaciares. En su recorrido se pueden reconocer la comunidad de Chicón y sitios como Cancha (Lambranpuquio, Rejaspunco), Buena Vista, el Pino Huilca Esquina, San Isidro, Sancuchayoc.

A lo largo de la quebrada Chicón, se han observado numerosos problemas geodinámicos como deslizamientos antiguos y recientes, cárcavas, conos aluviales, derrumbes y erosión local de las márgenes del río Chicón.

### B.2. Quebrada Pumahuanca

La quebrada Pumahuanca tiene una longitud aproximada de 11.51 km y una pendiente promedio de 14 %. Esta quebrada se inicia en la confluencia de dos quebradas Sutoc y Pumahuanca, que se inician en el nevado del mismo nombre. En su recorrido se pueden reconocer los sitios denominados Jajapunco y Pumahuanca (Ahuanmanca).

A lo largo de la quebrada Pumahuanca se han observado numerosos problemas geodinámicos como deslizamientos antiguos y recientes, cárcavas, conos aluviales, derrumbes y erosión local de sus márgenes.

## *C. Valle del Vilcanota*

El río Vilcanota es el colector principal de la gran cuenca hidrográfica del mismo nombre. Tiene un piso de valle amplio y laderas empinadas donde se observan algunos deslizamientos. Los conos aluviales en donde se sitúa la ciudad de Urubamba han rellenado el cauce del río Vilcanota, así como los depósitos fluviales que han formado un valle amplio y plano correspondiendo a terrazas fluviales con poco desnivel al río.

### **2.1.2.2. Ollantaytambo**

En la ciudad de Ollantaytambo y áreas circundantes, se pueden diferenciar las unidades geomorfológicas de laderas y quebradas-ríos (Fig. 4).

#### *A. Unidad de laderas*

##### A.1. Laderas de pendiente suave

###### **- Cono aluvial Patacancha**

Esta sub-unidad comprende toda el área del cono aluvial Patacancha, que se debe a la construcción de varios aluviones procedentes de la quebrada Patacancha. Está conformado por bloques y gravas en una matriz limo-areno-arcillosa. Es de amplia extensión y baja pendiente, donde se asienta la ciudad de Ollantaytambo y la mayoría de

nuevas expansiones urbanas. Es importante mencionar que gran parte de la ciudad actual de Ollantaytambo se encuentra sobre cimientos incas (margen izquierda del río Patacancha); mientras que, en la margen derecha y parte baja de la ciudad se encuentran recintos y andenería inca.

El cono se extiende desde la cota aproximada de 2800 msnm que corresponde al límite con el río Vilcanota, hasta las partes bajas de las laderas de los cerros que circundan a la ciudad, predominantemente hacia el norte, hasta la cota promedio de 2900 msnm. Desde el punto de vista urbanístico, esta sub-unidad geomorfológica es importante por sus grandes extensiones y suelos relativamente resistentes, los que han permitido el crecimiento de la ciudad de Ollantaytambo.

### **- Piso de valle de la quebrada Patacancha**

El río Patacancha es un afluente del río Vilcanota en su margen derecha. En la desembocadura de esta quebrada, sobre depósitos de conos aluviales se emplaza parte de la ciudad inca y actual de Ollantaytambo.

A esta sub-unidad corresponde la llanura aluvial y fluvial (piso de valle) de la quebrada Patacancha, donde se ubican la parte baja de deslizamientos y conos aluviales situados perpendicularmente a la quebrada principal. Sobre el piso de valle y muy especialmente sobre los pequeños conos aluviales y en las riberas del río Patacancha se sitúan muchos asentamientos humanos, terrenos de cultivos, y humedales entre los principales usos del suelo. Los materiales de este cono, proceden de la parte alta de las quebradas, donde afloran principalmente rocas de edad paleozoica, pertenecientes a las formaciones Ollantaytambo, San José, Sandia, y el Grupo Mitu.

### A.2. Laderas de pendiente pronunciada

Esta sub-unidad se extiende desde la cota promedio mayor a 2900 msnm hasta las cumbres de los cerros que rodean la ciudad y la quebrada Patacancha.

El relieve de esta sub-unidad es bastante empinado, sobre todo la ubicada al norte y oeste de la ciudad. En estas laderas se tienen restos arqueológicos incas donde se aprecian principalmente andenes y restos de construcciones pertenecientes al conjunto arqueológico de Ollantaytambo. En estas laderas afloran rocas metamórficas fracturadas que aunadas a los taludes muy abruptos favorecen a la formación de conos de deyección. Estos se caracterizan por estar formados de bloques y gravas de rocas muy inestables.

Las laderas de esta sub-unidad no son convenientes para los asentamientos urbanos por los peligros que presentan y además en algunos casos por ser zonas arqueológicas intangibles.

A esta sub-unidad también corresponden las laderas de la quebrada Patacancha, donde se han reconocido varios deslizamientos, asentamientos humanos así como terrenos de cultivo y áreas de pastaje. En las laderas afloran rocas metamórficas muy fracturadas con formación de conos de deyección y a veces con formación de depósitos coluviales.

## *B. Unidad de quebradas y ríos*

### B.1. Quebrada Patacancha

Esta quebrada tiene una longitud aproximada de 24 km. y una pendiente promedio de 6.6 %. Se inicia en la confluencia de dos quebradas principales Patacancha y Yuracmayo. La quebrada Patacancha nace a los 5000 msnm donde se presentan lagunas; mientras que, la quebrada Yuracmayo nace en el nevado Halancoma a 5450 msnm. En su recorrido se pueden reconocer los sitios denominados Murispampa, Pallata, Huilloc, Patacancha y Ocororuyoc.

A lo largo de la quebrada Patacancha se han observado numerosos problemas geodinámicos como deslizamientos antiguos y recientes, cárcavas, conos aluviales, derrumbes y erosión local de las márgenes.

## **2.2. GEOLOGÍA**

La geología de la región de Urubamba y Ollantaytambo (Carlotto et al., 1996) está caracterizada por presentar afloramientos de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas (Figuras 5 y 6).

La **Formación Ollantaytambo** (Cámbrico-Ordovícico) está constituida por brechas volcánicas, conglomerados, areniscas y pizarras que afloran en Ollantaytambo. El espesor es de aproximadamente 1000 m. Presentan características mecánicas diversas, pero en general son resistentes a la erosión.

La **Formación Verónica** (Ordovícico basal) es reconocida al norte de Ollantaytambo en la quebrada Yuracmayo. Se trata de conglomerados metamórficos muy resistentes a la erosión y cuyo espesor sobrepasa los 400 m.

La **Formación San José** (Ordovícico medio) aflora igualmente al norte de Ollantaytambo y está conformada por pizarras negras y cuarcitas grises con espesores que pasan los 800 m. Las pizarras son poco resistentes y pueden desarrollar deslizamientos.

La **Formación Sandia** (Ordovícico superior) constituye un nivel guía en la cartografía, ya que su composición principalmente cuarcítica y espesor aproximado de 500 m, permite diferenciarla de las otras unidades Paleozoicas. Son rocas muy resistentes.

La **Formación San Gabán** (Ordovícico-Silúrico) aflora en la carretera Calca-Amparaes, alcanzando entre 100 y 300 m de espesor. Se trata de pizarras, diamictitas (microbrechas), que en presencia de agua actúan de manera plástica desarrollando deslizamientos.

La **Formación Paucartambo** (Silúrico-Devónico) aflora al norte y sur de Calca. Son secuencias de pizarras y esquistos de 1000 m de espesor, cuyas características mecánicas son malas por lo que frecuentemente desarrollan deslizamientos.

Se llama **Formación Ccatca** (Devónico superior) a una secuencia de pizarras y diamictitas (conglomerados), de 200 m de espesor. Son rocas poco consistentes ya que su matriz arcillosa en contacto con el agua actúa de manera plástica y desarrolla deslizamientos como en Cuyo Chico o en las ruinas incas de Písaq.

El **Grupo Copacabana** (Pérmico inferior) aflora cerca de la ciudad de Písaq donde forma el núcleo del Anticlinal de Vilcanota. Está compuesto principalmente por calizas y lutitas. Tiene un espesor de 600 m. Las calizas son rocas estables, sin embargo, las lutitas no son tan estables.

El **Grupo Mítu** (Pérmico superior-Triásico inferior), aflora en el flanco noreste del valle del Vilcanota y en las vertientes de la Cordillera Oriental, desde Písaq hasta Ollantaytambo. Tiene un espesor de 600 m y está dividido en dos formaciones: Písaq y Pachatusan, conformadas por areniscas y conglomerados y especialmente rocas volcánicas. Estas rocas son bastante duras y estables; sin embargo, cuando están fracturadas son inestables.

La **Formación Huancané** (Cretácico inferior) aflora entre Písaq y Ollantaytambo, Está formada por areniscas cuarzosas bastante porosas y permeables. Estas características las hacen muy buenos acuíferos.

El **Grupo Yuncaypata** (Cretácico medio-superior) se presenta desde Písaq a Ollantaytambo, pero su mejor desarrollo está en Urubamba en la margen izquierda del río Vilcanota. Este grupo de 500 m de espesor ha sido dividido en 4 formaciones: Formación Paucarbamba, Formación Maras, Formación Ayavacas y Formación Puquín, donde la litología es variable desde calizas hasta areniscas. Sin embargo, lo que domina son los yesos y lutitas que son muy desfavorables como fundación a las obras civiles y por desarrollar deslizamientos, como del cerro Yahuarmaqui que el año 1678 represó el río Vilcanota.

Las formaciones **Quilque** y **Chilca** (Paleoceno) forman un sólo conjunto compuesto de lutitas, areniscas y conglomerados de color rojo, con un espesor de 250 m. Afloran en Urubamba, son rocas de baja resistencia e inestables en presencia de agua.

El **Grupo San Jerónimo** (Eoceno medio-Oligoceno inferior) está conformado por las formaciones Kayra (3000 m) y Soncco (1500 m). Estas formaciones se presentan ampliamente al Norte de Urubamba. Están constituidas por areniscas intercaladas con lutitas rojas. Son rocas resistentes a excepción de las lutitas.

Las **rocas ígneas intrusivas** (Permo-Triásicas) se presentan al norte de Ollantaytambo y de Urubamba. Están compuestas por granitos que se hallan fracturados y en parte intemperizados. Esto ha facilitado el trabajo de los glaciares generando morrenas.

Los **Depósitos Morrénicos** (Cuaternarios) se ubican al pie de las montañas y nevados de la Cordillera Oriental. Constituyen acumulaciones de bloques y gravas en una matriz gravo-arenosa. Su comportamiento no es estable en zonas de pendiente fuerte y sólo necesita bastante agua o aludes para formar aluviones.

Los **Depósitos Coluviales** (Cuaternarios) se forman en zonas de ladera. Están conformados por una mezcla de limos y gravas.

Los **Depósitos Fluviales** (Cuaternarios) se presentan en las márgenes del río Vilcanota. Están conformados por bancos de gravas y arenas, formando terrazas. En las diferentes ciudades, las terrazas bajas constituyen zonas vulnerables, ya que durante las avenidas máximas son afectadas por inundaciones.

Los **Depósitos Aluviales** (Cuaternarios) corresponden a los conos aluviales, los que se hallan en la desembocadura de las quebradas principales, adyacentes al Valle Sagrado de los Incas. Están constituidos por bloques y gravas envueltas por una matriz arenarcillosa. Estos abanicos muestran la actividad geodinámica pasada y presente de las quebradas.

Los suelos aluviales sobre los que se han construido las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo son caracterizados en el presente estudio (Carlotto et al., 2005).

En Urubamba se tiene la presencia de hasta tres tipos de suelos en función de sus características geotécnicas:

1. Suelos gruesos, granulares compuestos por gravas tales como GW (Grava bien graduada con arena), gravas GM (Grava limosa con arena), suelos GP-GM (Grava mal graduada con limo y arena) y suelos GW-GM (Grava bien graduada con limo y arena) con presencia de bolonería en algunos casos. Estos suelos se encuentran principalmente en la zona urbana. La capacidad portante de estos suelos fluctúa de 1.50 a 2.00 kg/cm<sup>2</sup>.
2. Suelos finos como SM (Arena limosa con grava) y suelos SM-SC (Arena limo-arcillosa con grava) que se localizan en el sector de Qotohuincho. La capacidad portante de estos suelos varía entre 1.00 y 1.50 kg/cm<sup>2</sup>.
3. Suelos finos como ML de Limo inorgánico arenoso de baja compresibilidad, que se hallan en Palamayo y que tienen valores de capacidad portante que varía de 0.50 a 1.00 kg/cm<sup>2</sup>.

En Ollantaytambo se han encontrado 3 tipos de suelos en función de sus características geotécnicas:

1. Suelos gruesos, granulares compuestos por gravas tales como GP (Grava mal graduada con arena), gravas GM (Grava limosa con arena) y suelos GM-GC (Grava limo arcillosa con arena) con presencia de bolonería en algunos casos. Se localizan en gran parte de la ciudad y su capacidad portante es de 1.50 a 2.00 kg/cm<sup>2</sup>.
2. Suelos finos de tipo CL-ML (Arcilla limo arenosa) reconocidos en el sector Lomadas con capacidades portantes de de 1.00 a 1.50 kg/cm<sup>2</sup>.
3. Suelos finos ML (Limo inorgánico con arena) localizados en el sector Huayronccoyo cuyas capacidades portantes son de 0.50 a 1.00 kg/cm<sup>2</sup>.

Conocida la geología del área de estudio, se puede llegar a la conclusión de que dada la presencia de areniscas, lutitas, pizarras, material cuaternario abundante como son los depósitos morrénicos y aluviales en condiciones de erosión, favorecerían la formación de un aluvión o flujo de detritos en un evento pluvial extraordinario.

### **2.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL**

Morfo-estructuralmente, la zona de estudio corresponde al límite Altiplano-Cordillera Oriental donde un sistema de fallas delimita la Formación Maras, el Grupo Mitu, y el Grupo San Jerónimo (Carlotto et al., 1996). Este sistema de fallas tiene una dirección NO-SE, NE-SW, y E-W. En este sector resalta el cuerpo diapírico de Maras compuesto por yesos y lutitas. Este diapiro parece estar activo pues en su borde norte, es decir el que da al río Vilcanota, desarrolla deslizamientos que se encuentran activos, como el de cerro Yahuarmaqui o los que se aprecian en la pista asfaltada que llega a Urubamba viniendo de Chincheros.

## **CAPÍTULO III**

### **CARACTERIZACIÓN DE QUEBRADAS, FLUJOS, Y ASPECTOS HIDROLÓGICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **3.1. CARACTERIZACIÓN DE QUEBRADAS**

#### **3.1.1. Definición**

Es una forma topográfica de pequeña extensión, producto de ciertos agentes geológicos como el viento o la fuerza de la precipitación y escorrentía en una región de terreno erosionable. Las quebradas tienen como función natural captar el agua que precipita sobre una cuenca y drenarla aguas abajo hasta depositarla al río o al mar.

En una quebrada se reconocen tres zonas:

- Cuenca de recepción
- Cauce de transporte
- Cono de depósito

##### **3.1.1.1. Cuenca de recepción**

Se le denomina también embudo de erosión, debido a que es la zona ancha y más elevada donde se intercepta el agua de lluvias. Los taludes son muy pronunciados provocando que la erosión sea muy activa. En esta zona suelen identificarse una red de canales pequeños, inestables que confluyen aguas abajo.

En la parte superior de la quebrada también se puede encontrar una laguna, pudiendo ser de diferente origen, glaciario, tectónico, por represamiento, etc. En el caso de la ciudad de Urubamba existe una laguna en la parte alta cerca al nevado Chicón. Una caída de bloque del nevado generaría un colapso de la estructura de la laguna, lo que produciría un flujo de detritos que a su vez afectaría directamente a la ciudad.

##### **3.1.1.2. Cauce de transporte**

Es la zona de confluencia de red de canales pequeños, donde se forma un canal más angosto de curso estable, y de mayor profundidad. Su función principal es transportar el material erosionado. También puede aportar material del cauce debido a erosión lateral, derrumbes y deslizamientos, dependiendo de las características del suelo o roca.

En esta zona es por donde bajan los flujos, por lo que la posibilidad de ocasionar un represamiento es muy alta, lo cual al presentarse un flujo posterior generaría mayor riesgo.

##### **3.1.1.3. Cono de depósito**

Es la zona de deposición del material erosionado. Se caracteriza por tener menor pendiente y acumular todo el material transportado del resto de la cuenca. Se le denomina también abanico aluvial por la forma que posee y porque el material transportado es de origen aluvional. En caso de que el material transportado tenga un origen glaciario por erosión de morrenas y luego acumulado, se le suele denominar abanico fluvio-glaciario.

### **3.1.2. Formación de quebradas**

Las quebradas son el resultado de la erosión del suelo, principalmente por acción de la precipitación y escorrentía, las cuales en el proceso de desarrollo pasan por cuatro etapas bien definidas.

#### *Primera Etapa*

Aparecen pequeños canales aluviales en la superficie del suelo. Han sido formados por el impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía superficial. A este procedimiento, se le denomina erosión laminar, que nos indica el desplazamiento de los materiales superficiales por acción del agua en movimiento.

Las gotas de lluvia que caen sobre una superficie granular plana, por lo general, producen pequeños hoyos debido al impacto de la gota que desplaza las partículas finas a muchos centímetros del punto de caída inicial.

El proceso de escorrentía superficial se efectúa cuando el suelo absorbe el agua de lluvia completamente y por lo tanto el agua de lluvia es desplazada sobre la superficie del suelo, originando pequeños charcos o aguas de arroyada.

#### *Segunda Etapa*

La quebrada empieza a crecer rápidamente en longitud y en dirección opuesta al flujo del agua, producto de una erosión regresiva.

El concepto de erosión regresiva es el descenso en el fondo como consecuencia de fenómenos de dinámica fluvial o un desequilibrio en sus componentes. La erosión regresiva avanza aguas arriba.

#### *Tercera Etapa*

La quebrada continúa ensanchándose y profundizándose como resultado de la erosión y socavación de las laderas. En esta etapa, la acción regresiva tiende a profundizar el lecho por donde discurrirá el torrente. Se considera a la quebrada en una fase de juventud.

La erosión es muy intensa debido a la velocidad del agua y a los materiales arrastrados. En un posible evento de precipitación extrema, se activará la quebrada, produciéndose los huaycos.

#### *Cuarta Etapa*

La longitud y la sección transversal de la quebrada se estabilizan, es decir, el proceso de erosión del lecho cesa gradualmente.

Los taludes de las riberas de la quebrada se van cubriendo con pasto y maleza. Se considera a la quebrada en su fase de madurez.

### **3.1.3. Flujo**

Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante a un fluido, puede ser rápido o lento, saturado o lento. En principio se origina como otro movimiento, sea un deslizamiento o caída (Varnes, 1978).

Los flujos o comúnmente denominados huaycos, se pueden producir en quebradas medianas (de 2.5 a 50 km<sup>2</sup>) y en quebradas grandes (de 50 a 150 km<sup>2</sup>). Según la diferencia del tamaño de la quebrada y la pendiente se pueden desarrollar diferentes tipos de flujos.

### **3.1.4. Tipo de flujo que discurren por una quebrada**

#### **3.1.4.1. Avenidas de agua**

Flujos con una carga normal de transporte de sedimentos que discurre por el cauce de una quebrada en régimen predominantemente turbulento. La cantidad de sedimento en suspensión es insuficiente para afectar el comportamiento del agua. Las propiedades del fluido Newtoniano gobiernan a éste tipo de flujo.

#### **3.1.4.2. Flujos de lodo**

Los flujos de lodo generalmente consisten de altas concentraciones de partículas finas (limos y arcillas). De acuerdo a experimentos de Wan y Chien (En Castillo, 2006), un fluido se convierte en una mezcla lechosa en una concentración de partículas finas de solamente 90 kg/m<sup>3</sup>. A medida que la concentración de finos aumenta la estructura de los sedimentos se floclula formándose una especie de cohesión de mezcla sedimento-agua. Según Varnes (1958), los flujos de lodo son distinguidos por la presencia de al menos 50 % de arena, limos y arcillas.

Estos flujos son descritos como flujos viscosos y se caracterizan por pulsos intermitentes. La deposición final del flujo viscoso mantiene la estructura dinámica de su movimiento creando filas de islas o dunas que son paralelas a la dirección del flujo, las cuales pueden tener forma de lengua. Durante la sedimentación no ocurre clasificación de los sedimentos y las partículas se mueven como una masa integral. La velocidad de deposición es muy pequeña.

#### **3.1.4.3. Flujos hiperconcentrados**

El flujo hiperconcentrado está formado por una mezcla de partículas gruesas y agua. Predominan las partículas granulares (arenas, gravas, cantos rodados y bloques) por lo tanto la mezcla no tiene cohesión.

Se considera un flujo como hiperconcentrado si la concentración de sedimentos (igual al volumen de sedimentos entre el volumen de sedimentos más agua) varía entre 20 % y 60 % en volumen, valor que corresponde a un peso específico de 2.0 ton/m<sup>3</sup> de la mezcla aproximadamente. Cuando las concentraciones de sólidos son bajas los materiales se concentran en la parte inferior del flujo, pero al aumentar la concentración, las partículas se dispersan a través de todo el flujo. Al aumentar la

concentración de sedimentos se pueden convertir en flujos de detritos, es decir, la dispersión inducida por el cortante entre partículas va aumentando.

Al disminuir la velocidad las partículas se van sedimentando, primero las más gruesas y luego las más finas formando un depósito clasificado de partículas.

#### **3.1.4.4. Flujos de detritos**

En los flujos de detritos los sedimentos controlan totalmente el flujo. El movimiento de los flujos de detritos se puede relacionar generalmente con “flujo turbulento de granos”. El mecanismo de movimiento se produce por transferencia de *momentum* al colisionar las partículas o bloques que se mueven.

Los flujos son no-viscosos y son generalmente flujos turbulentos de dos fases. La fase líquida es un *slurry* consistente en agua y partículas finas y la base propiamente sólida son las partículas gruesas. Aunque los flujos de detritos contienen partículas más gruesas, mayores concentraciones, mayores pesos específicos y menores cantidades de agua, la mecánica en algunos aspectos es similar a los de los flujos hiperconcentrados.

Cuando el cambio en el ancho del cauce es muy fuerte o se presenta una disminución fuerte de la pendiente del cauce, la velocidad disminuye abruptamente y se deposita la mayoría del material sólido, formando abanicos o barras de grandes bloques. Primero se depositan las partículas de mayor tamaño, mientras las partículas finas tratan de recorrer una distancia mayor antes de producirse la sedimentación. Generalmente, los flujos de detritos corren a lo largo de cañones estrechos con fuertes pendientes.

### **3.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL TIPO DE FLUJO**

Los factores que influyen en el tipo de flujo y que ayudan a definir la probabilidad de ocurrencia del flujo son:

#### **3.2.1. Área de la cuenca de recepción**

A mayor área de la cuenca mayor será la cantidad de agua que captará y mayor el volumen del flujo que discurrirá por ella.

#### **3.2.2. Pendiente**

A mayor pendiente en el cauce mayor será la velocidad del flujo y habrá mayor posibilidad de erosión e inestabilidad de la zona.

#### **3.2.3. Clima**

En las zonas donde se produzcan intensas precipitaciones se activará la quebrada y el flujo de detritos será el desenlace.

### 3.2.4. Tipo de suelo o roca

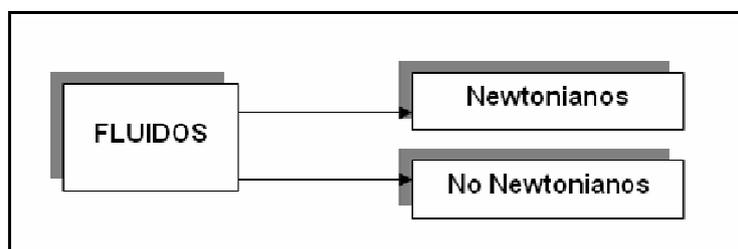
El flujo depende del tipo de suelo o roca, su capacidad para soportar el efecto erosivo, la permeabilidad, y adicionalmente la cobertura vegetal, ya que estos serán aportes para el flujo.

## 3.3. ASPECTOS HIDROLÓGICOS

### 3.3.1. Hidráulica de los flujos de detritos

La hidráulica de los flujos de detritos es el estudio de las avenidas torrenciales en la que el transporte de sólidos es tan grande que las nociones de hidráulica fluvial se desvanecen. La fase sólida influye en el flujo, es decir, no puede separarse el flujo de agua por un lado y el transporte sólido por otro. Por ejemplo, en un flujo de detritos en una quebrada en la costa del Perú, el caudal debido al agua de precipitación era de solamente  $49 \text{ m}^3/\text{s}$ . Después de recorrer 10 km y erosionar el cauce, el flujo alcanzó una descarga máxima de  $490 \text{ m}^3/\text{s}$ , es decir diez veces el flujo inicial. El caudal de lodo alcanzado es mucho mayor que en un flujo de agua sola (“agua limpia”) debido al aporte y transporte sólido. Además la densidad de la mezcla se eleva por encima de la densidad del agua. La densidad que alcanzan los flujos de detritos varía entre  $2100$  y  $2400 \text{ kg/m}^3$ .

#### 3.3.1.1. Tipos de fluidos



*Fig. 7. Clasificación general de los fluidos.*

Un fluido es un líquido que se deforma continuamente por esfuerzos cortantes, es decir, que ofrece pequeña o nula resistencia a las fuerzas tangenciales o cortantes que se le aplican. La capacidad de fluir hace que el fluido sea incapaz de soportar un esfuerzo cortante, por ejemplo voltear un vaso conteniendo de agua.

En términos muy generales a los fluidos que presentan una resistencia muy pequeña o nula a ser deformados, se les conoce como fluidos Newtonianos, en tanto, a los fluidos que presentan mayor resistencia se les llama fluidos No-Newtonianos (Fig. 7).

## 3.4 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

El presente tema ha sido tomado y modificado del proyecto de Ciudades Sostenibles de Urubamba y Ollantaytambo, elaborado por Carlotto et al. (2005).

### **3.4.1. Conceptos básicos**

Para la mejor comprensión de la caracterización hidrológica, a continuación se describe los siguientes conceptos básicos de hidrología.

#### **Hidrología**

Ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente.

#### **Cuenca y subcuenca hidrológica**

Son las áreas de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de recorrido.

#### **Periodo de retorno**

Intervalo de tiempo promedio dentro del cual un evento de magnitud X puede ser igualado o superado, por lo menos una vez en promedio.

#### **Hidrograma**

Representación grafica de la variación del caudal con respecto al tiempo, arregladas en orden cronológico en un lugar dado de la corriente.

#### **Formula de Manning**

Expresión para determinar las pérdidas de energía por fricción. Típicamente asociada con flujo en canales abiertos. De esta expresión se halla en número “n” de Manning.

### **3.4.2. Caracterización hidrológica de la ciudad de Urubamba**

#### **3.4.2.1. Río Vilcanota**

Las aguas del Vilcanota en el tramo de estudio, presentan un régimen torrencial, sobre todo en temporadas de lluvia y de acuerdo a los mapas de peligros los desbordes probablemente alcanzarían áreas urbanizadas en margen derecha del sector denominado La Florida. Aguas abajo en el sector del Centro Vacacional no se han levantado edificaciones. El ancho del cauce varía entre 80 y 95 m, con un caudal máximo de 716.90 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 100 años.

#### **3.4.2.2. Identificación de las subcuencas para la ciudad de Urubamba**

La ciudad de Urubamba se encuentra enmarcada dentro de la cuenca del río Vilcanota. A esta ciudad llegan las aguas de los ríos Chicón y Pumahuanca que forman parte de las subcuencas del mismo nombre. Ambos ríos nacen de los deshielos de los nevados Chicón y Pumahuanca.

En la Figura 8 se observa los límites de la cuenca hidrológica de las quebradas Pumahuanca y Chicón.

#### A. Subcuenca del río Chicón

Esta subcuenca tiene una dirección norte 35° este, y ocupa un área de 37.38 km<sup>2</sup>, siendo su cauce principal el río Chicón. La cuenca tiene una forma alargada y se encuentra rodeada lateralmente por los cerros Sayhua y Tantanmarca. En la cabecera se encuentra el nevado Chicón (5500 msnm). El talweg se presenta con una zona abierta donde se ubica la ciudad de Urubamba, luego la quebrada se estrecha manteniendo una amplitud de 80 a 100 m y una pendiente ligera de 8 %. La superficie presenta una cobertura vegetal de buena densidad, consistente en bosques con especies nativas (k'euñas, chachacomo) y árboles de regular tamaño (cedros, eucaliptos), algunos sembríos de maíz y papa, así como pequeños pastizales.

A partir de los 4000 msnm la pendiente es pronunciada (25 %) y la vegetación consiste en arbustos y plantas nativas de menor tamaño. Encima de los 4500 msnm la cobertura vegetal es pobre y sobre los 5000 msnm tan sólo se aprecia roquedales y farallones con nieve perpetua.

La cuenca del río Chicón, de acuerdo a la clasificación de Holdrige (1967), se encuentra comprendida entre los pisos altitudinales:

Bosque Húmedo Montano Tropical.

Páramo muy Húmedo Sub-Alpino Tropical.

Páramo Pluvial Sub-Alpino Tropical.

#### - Río Chicón

El río Chicón o Tullumayo nace de los deshielos del nevado Chicón y de la laguna Juchuycocha. En su recorrido recibe las aguas de 6 tributarios, 3 de la margen izquierda y 3 de la margen derecha. Atraviesa la ciudad de Urubamba por un tramo canalizado de 700 m de longitud con una sección de 2.20 x 1.60 m, y finalmente, confluye en el río Vilcanota.

Es un tributario de segundo orden con un drenaje pobre y pendiente media del cauce de 16%. El caudal en estiaje, antes de las captaciones para riego y abastecimiento de la ciudad de Urubamba, es de aproximadamente 4.0 m<sup>3</sup>/seg (caudal base). Este volumen es casi en su totalidad captado para proyectos de irrigación y para abastecimiento de la ciudad. El caudal máximo estimado por el método directo es de 22.39 m<sup>3</sup>/seg

#### - Características físicas y geomorfológicas

Punto más alto de la cuenca	: 5 550 msnm
Punto más bajo de la cuenca	: 2 952.46 msnm
Área de la cuenca	: 37.38 km <sup>2</sup>
Perímetro de la cuenca	: 27.80 km
Punto más alto del cauce principal	: 4 630 msnm
Punto más bajo del cauce principal	: 2 945msnm

Longitud de cauce principal	: 10.17 km
Longitud total de las corrientes	: 21.62 km
Pendiente media de la cuenca	: 0.603 = 60.3 %
Pendiente media del cauce principal	: 0.16 = 16 %

### **- Información hidrometeorológica**

Para el presente estudio se ha utilizado información hidrometeorológica de la Estación de Perayoc que pertenece a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. La estación cuenta con pluviómetro y pluviógrafo además de otros instrumentos de termometría, evaporímetros, higrómetro y otros propios de una estación hidrometeorológica. Los registros pluviométricos son de mucha confiabilidad. En este caso se han utilizado datos de tormentas máximas anuales desde el año 1965 al año 1999, los mismos que han sido regionalizados para la zona en estudio.

### **- Zonas de peligro de desbordamiento (Inundación)**

Como se puede deducir de las características de la cuenca, se tiene que una avenida de 50 años de período de retorno no tendrá un volumen suficiente para ocasionar un desbordamiento; sin embargo, una eventual avalancha o un embalse sí constituyen un peligro. En efecto, entre los antecedentes se tiene una avalancha que ocurrió el año 1941, provocado por un alud que originó el desbordamiento de la laguna Juchuycocha. El aluvión producido en aquel evento arrastró rocas de hasta 2 m de tamaño medio y a su paso arrasó sembríos y destruyó algunas viviendas.

Con posteridad al aluvión de 1941, se construyó la canalización que atraviesa la ciudad de Urubamba por la avenida Mariscal Castilla (río Tullumayo) en un tramo de 700 m (sección media rectangular de 3 x 2 m). La capacidad es suficiente para soportar una avenida de 10 años de período de retorno ( $19.5 \text{ m}^3/\text{seg}$ ). En el caso de ocurrir una lluvia de 50 años ( $26.2 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) ya se registrarían ligeros desbordes que podrían alcanzar las calles adyacentes y paralelas a la avenida Mariscal Castilla. El peligro que conlleva una crecida de esta magnitud es que puede arrastrar material aluvial que ocasionalmente provoque represamiento y cuyos efectos tendrían carácter destructivos. Luego a pesar de que en los últimos 50 años no se registró otro evento de gran magnitud, ello no significa que en un momento dado el nivel máximo de aguas sobrepase la sección del canal y que pueda afectar viviendas de la ciudad.

### **- Erosión y transporte de sedimentos**

A lo largo del cauce se aprecia diferentes tipos de comportamiento en cuanto al transporte de sedimentos. Así en la parte alta de la cuenca, vale decir en las faldas del Chicón, el transporte de sedimentos está constituido por material grueso desde 2 pulgadas hasta 0.80 m.

En el tramo de río inmediatamente aguas abajo, se aprecia material grueso (aprox. 2 pulgadas de diámetro medio) y muy poca erosión.

En el tramo canalizado de la ciudad se observa la presencia de piedras con tamaños máximos de 50 cm.

**- Cálculo de gasto por el Método Directo****Fórmula de Manning**

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

Donde: Q = Caudal máximo, m<sup>3</sup>/seg.  
 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> = Áreas hidráulicas, m<sup>2</sup>.  
 A = Área hidráulica promedio, m<sup>2</sup>.  
 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> = Radios hidráulicos, m.  
 R = Radio hidráulico promedio, m.  
 S = Pendiente, m/m.  
 n = Coeficiente de rugosidad de Manning.

Para la presente sección se tiene:

$$\begin{array}{ll} A_1 = 4.65 \text{ m}^2 & A_2 = 5.69 \text{ m}^2 \\ P_1 = 6.22 \text{ m} & P_2 = 6.64 \text{ m} \\ S = 0.076 \% & n = 0.055 \end{array}$$

$$A = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad A = \frac{4.65 + 5.69}{2} = 5.17$$

$$R_1 = \frac{A_1}{P_1} \quad R_1 = \frac{4.65 \text{ m}^2}{6.22 \text{ m}} = 0.748 \text{ m}$$

$$R_2 = \frac{5.69 \text{ m}^2}{6.64 \text{ m}} = 0.857$$

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad R = \frac{0.748 + 0.857}{2} = 0.803 \text{ m}$$

$$Q = \frac{1}{0.055} 5.17 \times 0.803^{\frac{2}{3}} \times 0.076^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 22.39 \text{ m}^3/\text{seg}$$

**B. Subcuenca del río Pumahuanca****B.1. Río Pumahuanca**

Es un tributario de segundo orden con un drenaje pobre. La pendiente del cauce es de 14%, y el caudal en estiaje es de 8.0 m<sup>3</sup>/seg (caudal base). Gran parte de este volumen es captado para irrigar parcelas (maizales) que se extienden en la parte baja y media a lo largo de su recorrido. El caudal máximo estimado por el método directo es de 29.39 m<sup>3</sup>/seg.

El río Pumahuanca nace de los deshielos de los nevados Capacsaya y Pumahuanca, así como de las lagunas Aruraycocha. Se forma por la confluencia de dos ríos, uno que viene por la quebrada de Sutoc y otro que viene por la quebrada de Pacchaspata.

**- Características físicas y geomorfológicas**

Punto más alto de la cuenca	: 5 200 msnm
Punto más bajo de la cuenca	: 2 940 msnm
Área de la cuenca	: 45.94 km <sup>2</sup>
Perímetro de la cuenca	: 32.46 km.
Punto más alto del cauce principal	: 4 580 msnm
Punto más bajo del cauce principal	: 2 940 msnm
Longitud de cauce principal	: 11.51 km
Longitud total de las corrientes	: 21.69 km
Pendiente media de la cuenca	: 0.603 = 60.3 %
Pendiente media del cauce principal	: 0.14= 14 %

**- Zonas de peligro de desbordamiento**

Durante las temporadas de estiaje el río presenta un régimen torrencial con un gasto de 4 m<sup>3</sup>/seg aproximadamente. De acuerdo a las estimaciones efectuadas, el gasto máximo podría alcanzar hasta los 22.75 m<sup>3</sup>/seg, en el caso de producirse una lluvia con un período de retorno de 10 años y 27.6 m<sup>3</sup>/seg en caso de producirse una lluvia de 50 años de período de retorno. Para este último caso, como no se cuenta con una canalización, un volumen de agua puede rebasar el cauce y provocar inundaciones en las parcelas por donde atraviesa el río.

**3.4.3. Caracterización hidrológica de la ciudad de Ollantaytambo****3.4.3.1. Río Vilcanota**

En este sector el río Vilcanota, ya denominado río Urubamba, incrementa apreciablemente su caudal. El cauce se va estrechando y las profundidades se incrementan. Así se tiene anchos que van entre 35 y 45 m. Los caudales máximos asumidos son similares a los de Urubamba, con un caudal máximo de 716.90 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 100 años.

El sector ubicado aguas arriba del puente, en su margen izquierda, es una faja expuesta a inundaciones y que alcanzan las viviendas de un asentamiento nuevo. En la margen derecha se tiene parcelas de maíz que cuentan con muros de defensa que no están en buenas condiciones y que pueden fácilmente ser rebasados durante las crecidas máximas.

**3.4.3.2. Identificación de la subcuenca**

Desde el punto de vista de la hidrología, se tiene que la ciudad de Ollantaytambo se encuentra enmarcada dentro de la cuenca del río Vilcanota, siendo parte de la subcuenca del río Patacancha. Este río nace en las lagunas de Chalhuancacocha a 4600 msnm y tiene una longitud de 24.6 km, recibiendo el aporte de 22 afluentes. Las aguas del río Patacancha desembocan en el río Vilcanota.

En la figura 9 se observa los límites de la cuenca hidrológica de la quebrada Patacancha.

### A. Subcuenca del río Patacancha

La subcuenca del Patacancha tiene una dirección norte  $42^\circ$  Este y abarca un área de  $144.7 \text{ km}^2$ , siendo su cauce principal el río Patacancha. La cuenca tiene una forma bastante alargada (factor de forma 0.36). La pendiente media de la cuenca es de 0.54. En la cabecera se encuentran las lagunas de Chalhuancacocha. El talweg es estrecho y sus áreas presentan una cobertura vegetal de poca densidad, consistente en especies nativas y pequeños arbustos.

La cuenca del río Patacancha de acuerdo a la clasificación de Holdrige (1967), se encuentra comprendida entre los pisos altitudinales:

Bosque Húmedo Montano Tropical.  
Páramo muy Húmedo Sub-Alpino Tropical.  
Páramo Pluvial Sub-Alpino Tropical

#### A.1. Río Patacancha

El río Patacancha es un tributario de segundo orden con una densidad de drenaje de 0.658. La pendiente media del cauce es de 6.6%. El caudal en estiaje es de  $5.0 \text{ m}^3/\text{seg}$  (caudal base).

El río Patacancha en su tramo final atraviesa la ciudad de Ollantaytambo por un tramo encauzado con una sección de  $5.5 \times 3.80 \text{ m}$  y finalmente confluye en el río Vilcanota.

#### - Características físicas y geomorfológicas – Cuenca del Río Patacancha

Punto más alto de la cuenca	: 5 367 msnm
Punto más bajo de la cuenca	: 2 827 msnm
Área de la cuenca	: $144.72 \text{ km}^2$
Perímetro de la cuenca	: 53 189.08 m
Punto más alto del cauce principal	: 4 512.14 msnm
Punto más bajo del cauce principal	: 2 827 msnm
Longitud de cauce principal	: 24.65 km
Longitud total de las corrientes	: 95.19 km
Pendiente media de la cuenca	: $0.5456 = 54.6 \%$
Pendiente media del cauce principal	: $0.0656 = 6.6 \%$

#### - Cálculo del caudal por el Método Directo

Coefficiente de rugosidad de Manning (n)	: 0.055
Área promedio (A)	: $15.03 \text{ m}^2$
Pendiente media (S)	: $3.62 \% = 0.0362 \text{ m/m}$
Caudal Máximo (Q)	: $65.99 \text{ m}^3/\text{seg}$

#### - Información hidrometeorológica

Como en los casos anteriores, se ha utilizado información hidrometeorológica de la Estación de Perayoc, que pertenece a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del

Cusco. Aquí se han utilizado datos de tormentas máximas anuales desde el año 1965 al año 1999, los mismos que han sido regionalizados para la zona en estudio.

#### **- Zonas de peligro de desbordamiento**

De acuerdo a las estimaciones de caudales máximos una eventual ocurrencia de los mismos pueden ocasionar desbordamientos y consiguientes inundaciones en áreas adyacentes del tramo canalizado que atraviesa la ciudad (sección media rectangular de 5.5 x 3.8 m). A pesar de que no existen antecedentes recientes de hechos de esta naturaleza, ello no garantiza que el nivel máximo de aguas sobrepase la sección del canal y que pueda afectar algunos sectores de la ciudad.

El tamaño considerable de esta cuenca (144.7 km<sup>2</sup>) nos da una idea de la magnitud de las avenidas que pueden ocurrir y, no obstante tener canalizados los tramos de río que atraviesan la ciudad, el peligro es latente. Por ello ya en tiempo de los Incas se levantaron defensas ribereñas para proteger los sembríos y a la población civil. En este caso el tamaño considerable de la cuenca puede concentrar un volumen de escorrentía que supere fácilmente la capacidad de la canalización, pues considerando una velocidad de 3 m/seg y el caudal máximo de 66 m<sup>3</sup>/seg, requeriría un área de 22 m<sup>2</sup>, el mismo que sería mayor que la sección del canal existente.

En conclusión, los peligros existentes pueden ser en primer lugar debido al volumen líquido que podría concentrarse debido al tamaño considerable de la cuenca y segundo lugar por un eventual desbordamiento de las lagunas existentes en las nacientes del río.

De las estimaciones de avenidas máximas que pueden ocurrir, sólo las lluvias con períodos de retorno de 50 años pueden tener incidencia y ocasionar algunas inundaciones. Estas tendrían lugar en los tramos próximos al río Vilcanota que podrían afectar algunas parcelas. En cuanto a la seguridad de los sitios arqueológicos que forman parte del complejo Ollantaytambo, ésta se vería afectada sólo en caso de producirse avenidas centenarias. En este caso nos referimos a recintos conocidos como el Baño del Inca y otros adyacentes.

#### **- Erosión y transporte de sedimentos**

A lo largo del cauce se aprecia diferentes tipos de comportamiento en cuanto al transporte de sedimentos. Así en la parte alta de la cuenca, el transporte de sedimentos está constituido por material grueso desde 1 pulgada hasta 0.40 m de diámetro medio.

En el tramo de río inmediatamente aguas abajo se aprecia material grueso (aprox. 2 pulgadas de diámetro medio) y muy poca erosión.

El tramo canalizado de la ciudad también acusa la presencia de piedras con tamaños máximos de 50 cm.

#### **3.4.4. Adecuación de los hidrogramas de flujo**

Los hidrogramas generados para el proyecto Ciudades Sostenibles y particularmente de las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, fueron para un periodo de retorno de 100 años (Carlotto et al., 2005), es decir para una precipitación máxima que se puede dar o

repetir en un periodo de 100 años. Para efectos de la investigación son muy importantes estos valores, ya que con estos datos se puede expresar perfectamente un flujo extraordinario originado, por ejemplo, por la caída de hielo y rocas de los nevados por efecto de un sismo.

En base a la experiencia adquirida en el manejo del software, se ha recalculado los hidrogramas para un periodo de retorno de 50 años y poder simular flujos mas pequeños que se podrían originar por lluvias intensas o pequeños deslizamientos. Así se probará el comportamiento de las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, para dos eventos de diferentes magnitudes, uno para 50 y otro para 100años (Figs. 10 al 14).

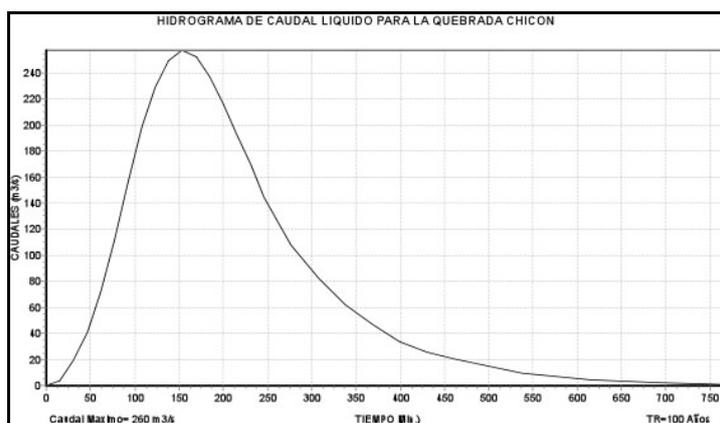


Fig. 10. Hidrograma de caudal líquido para un periodo de retorno (TR) de 100 años de la quebrada Chicón (Urubamba).

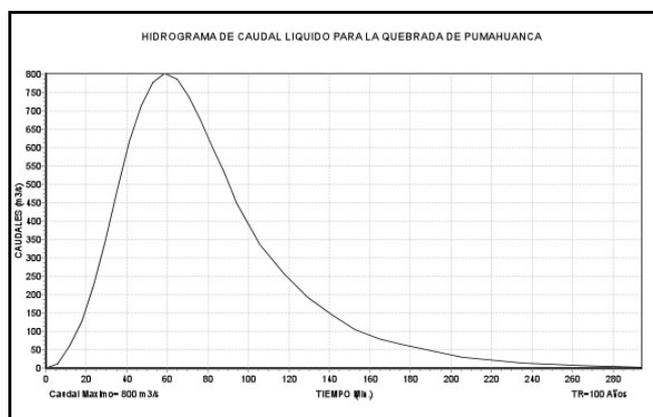


Fig. 11. Hidrograma de caudal líquido para un periodo de retorno (TR) de 100 años de la quebrada Pumahuanca (Urubamba).

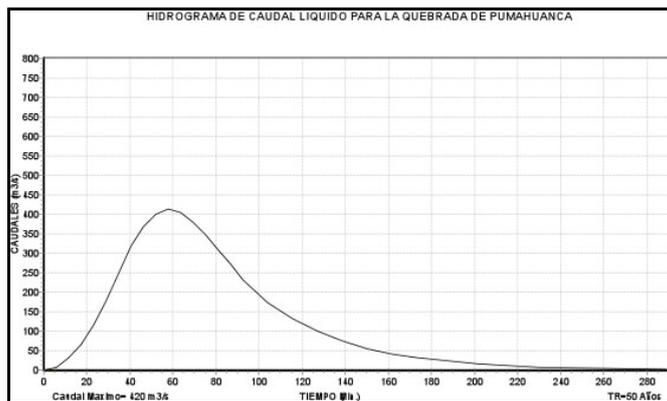


Fig. 12. Hidrograma de caudal líquido para un periodo de retorno (TR) de 50 años de la quebrada Pumahuanca (Urubamba).

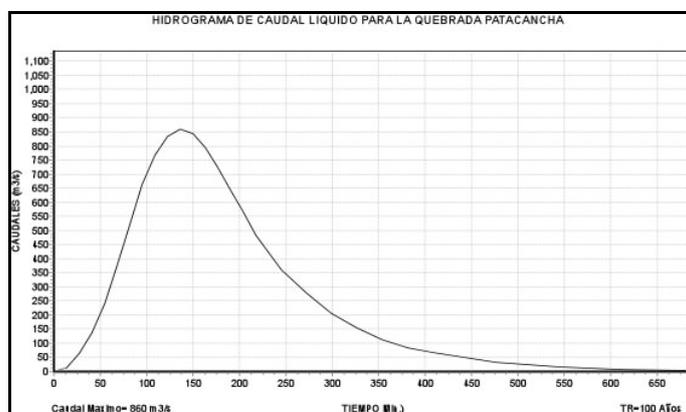


Fig. 13. Hidrograma de caudal líquido para un periodo de retorno (TR) de 100 años de la quebrada PatacanCHA (Ollantaytambo).

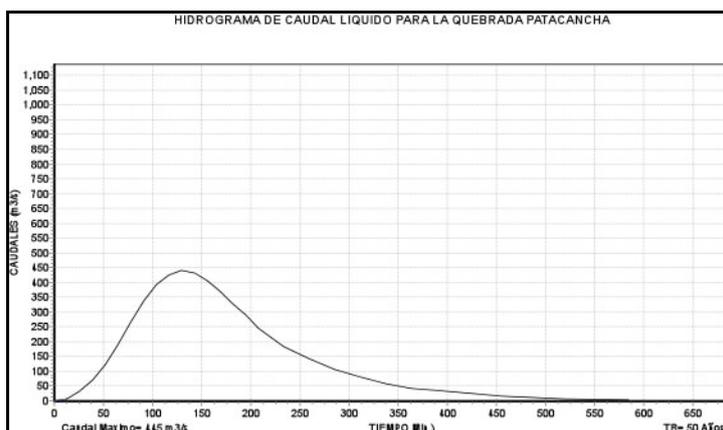


Fig. 14. Hidrograma de caudal líquido para un periodo de retorno (TR) de 50 años de la quebrada PatacanCHA (Ollantaytambo).

**CAPÍTULO IV**  
**MODELO DE SIMULACIÓN FLO 2D**

## 4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FLO 2D

El movimiento de un fluido tan complejo como el que forma los flujos de detritos 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 flujos de detritos hace que estos fluidos se comporten 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. Por el contrario, si el esfuerzo actuante es inferior al esfuerzo crítico, el fluido se detiene.

El método de modelamiento FLO 2D (O' Brien, 2000) simula flujo de fluidos no-newtonianos, como flujos de detritos en conos aluviales. 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 (flujos de detritos) y flujos de barro.

### 4.1.1. Lógica del FLO 2D

La topografía de la superficie se divide en una malla o grilla formada por celdas (elementos cuadrados) de tamaño uniforme para toda el área de estudio. A cada elemento se le asigna una posición en la malla, una elevación o cota de terreno, un coeficiente de rugosidad (n de Manning) y factores de reducción del flujo que atraviesa la celda.

El procedimiento computacional para flujos superficiales involucra el cálculo de la descarga a través de cada una de las fronteras en ocho direcciones de flujo. Las direcciones de flujo incluyen las cuatro direcciones de la brújula y las cuatro direcciones diagonales (NE, SW, etc.) como se muestra en el esquema en planta de la Fig. 15.

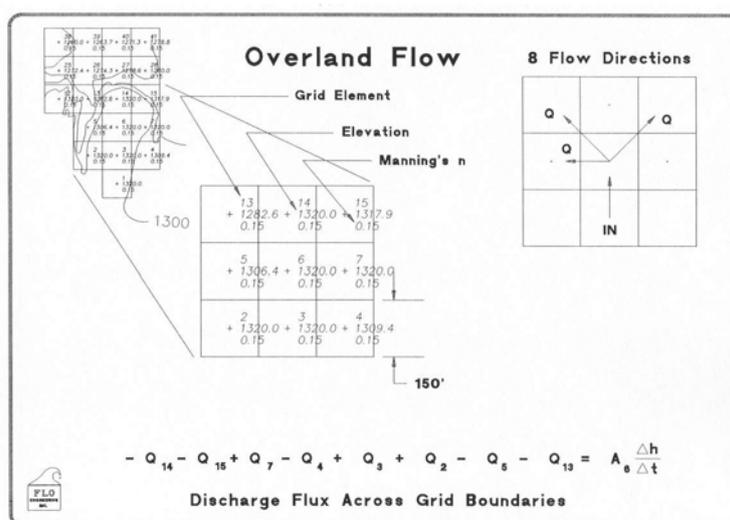


Fig. 15. Direcciones de flujo preferenciales en FLO 2D.

El cálculo hidráulico de cada elemento de grilla empieza con una estimación de la profundidad del flujo en la frontera del elemento de grilla. La profundidad estimada

del flujo es un promedio de las profundidades de flujo en los dos elementos de grilla que comparten descarga en una de las ocho instrucciones. Los otros parámetros hidráulicos son también promediados para computar la velocidad de flujo incluyendo resistencia de flujo (la cual toma su valor del valor  $n$  de Manning), área del de flujo, pendiente, elevación de la superficie de agua y perímetro mojado.

El FLO 2D solucionará ya sea la ecuación de onda difusiva o la ecuación de onda dinámica completa para computar la velocidad. La ecuación de Manning es luego aplicada en una dirección usando el promedio de la pendiente en la superficie de agua para calcular la velocidad. Si la ecuación de onda difusiva es seleccionada, la velocidad es entonces calculada para todas las ocho direcciones del flujo en cada elemento de grilla. Si la opción de onda dinámica completa es aplicada, la velocidad de onda difusiva calculada es utilizada como primera aproximación en el método de segundo orden de Newton-Raphson de tangentes para determinar las raíces de la ecuación de onda dinámica completa, el cual es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, no lineal. Esta ecuación es el fundamento lógico del software FLO 2D.

## **4.2. APLICACIÓN DEL MODELO FLO 2D**

En el capítulo III de la presente tesis se explicó los parámetros de los fluidos y las características de las quebradas. Con estas características, procedemos al ingreso de datos en el software FLO 2D (O'Brien, 2000).

### **4.2.1. Simulación con el software FLO 2D**

#### **4.2.1.1 Información básica**

Se recopilaron fotografías aéreas, topografía digital, planos topográficos, hidrogramas de caudal líquido y estudios previos, los que fueron procesados para la obtención de la información básica necesaria para el desarrollo del presente estudio.

##### *A. Fotografías aéreas*

Para el estudio de las quebradas y conos de las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo se obtuvieron las fotografías aéreas de vuelo alto del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de vuelo bajo del Servicio Aerofotográfico Nacional (SAN).

##### *B. Planos topográficos*

Se obtuvieron los mapas de la cuenca del río Vilcanota a escala 1:25000 del año 1974 del Ministerio de Agricultura. Sobre esta base topográfica se delimitó la cuenca de las quebradas en estudio, se determinó el área y se obtuvo el perfil longitudinal del cauce principal.

Para el estudio en detalle incluyendo el software FLO 2D se trabajó con mapas topográficos a escala 1:10000 del Proyecto Vilcanota - Ministerio de Agricultura. Estos mapas con curvas cada 10 m garantizan un buen funcionamiento del software de simulación.

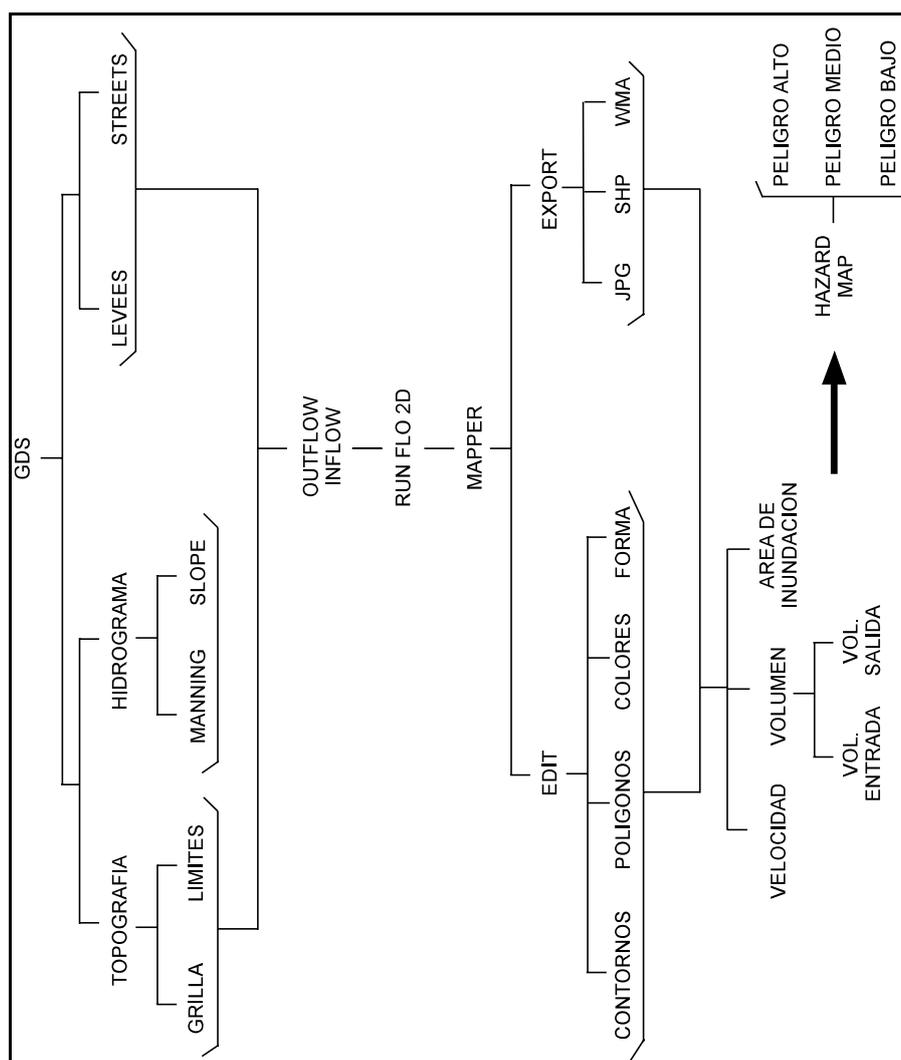


Fig. 16. Diagrama de flujo del FLO 2D.

### C. Hidrología

Se han utilizado hidrogramas de caudal líquido para la precipitación de celda concentrada correspondientes al valor máximo de precipitación, para un tiempo de retorno de 100 y 50 años dentro de la cuenca del río Vilcanota (capítulo III).

#### 4.2.1.2. Diagrama de flujo para la simulación con el FLO 2D

En la figura 16 se muestra el diagrama de flujo a seguir para el caso de simulaciones de flujos de detritos aplicando el FLO 2D.

#### 4.2.1.3. Descripción de la simulación con el FLO 2D

Para la simulación, el primer paso es procesar la topografía existente. Una vez obtenido el Modelo de Elevación de Terreno (DEM) en un sistema GIS, se exporta la topografía al pre-procesador *Grid Developer System* (GDS) que nos ayuda a definir las grillas utilizadas para la simulación (Fig. 17).

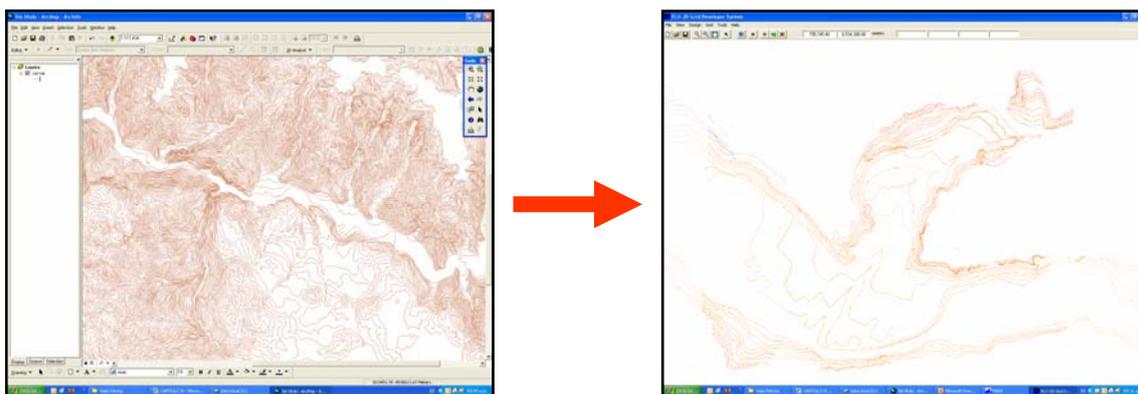


Fig. 17. Exportación de la topografía desde un sistema GIS al GDS del FLO 2D.

Dentro del pre-procesador GDS, una vez obtenida las grillas y la delimitación de la zona de simulación, se procede a asignar los coeficientes de Manning y la ubicación del hidrograma de entrada (Inflow) en la grilla correspondiente. Finalmente, se crea una capa de grillas cuadradas, donde cada celda posee una cota y un coeficiente de Manning asignado automáticamente por el software. Además en la parte baja del cono aluvial, se definen las grillas que son salidas de flujo (*Outflow*) (Fig. 18).

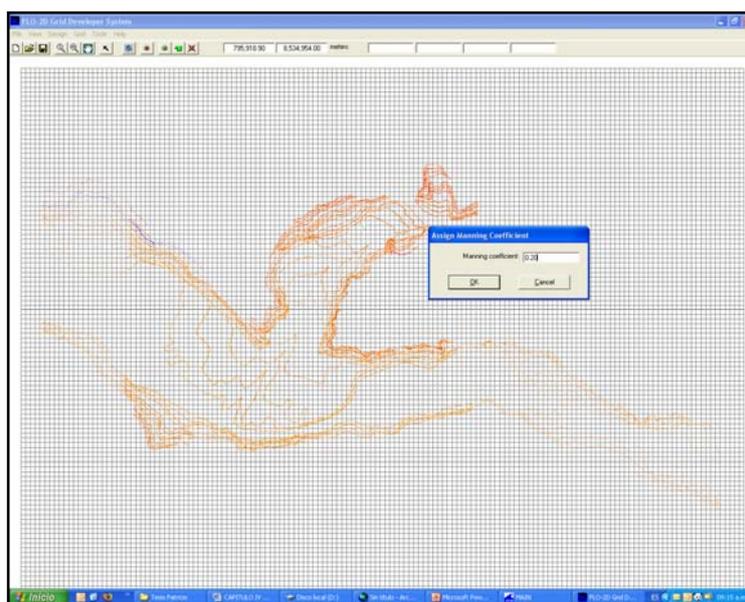


Fig. 18. Asignación del coeficiente de Manning y ubicación del hidrograma de entrada (*Inflow*).

Para la modelación de un flujo de detritos con el programa FLO 2D se requiere como mínimo 7 archivos cuya extensión es \*.DAT. Estos archivos son los siguientes

- FPLAIN.DAT
- CADPTS.DAT
- CONT.DAT
- TOLER.DAT
- INFLOW.DAT
- OUTFLOW.DAT
- SED.DAT

En la ventana principal (*MAIN*) del FLO 2D se requieren otros archivos más, los cuales son complementarios y sirven para poner parámetros más específicos como son las calles, altura de las canales, etc. (Fig. 19).

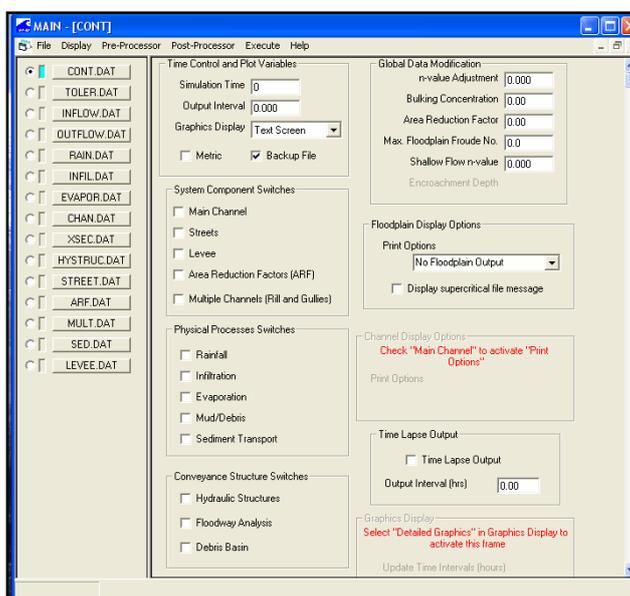


Fig. 19. Ventana principal del FLO 2D que muestra los diferentes componentes.

A continuación se explica brevemente los principales archivos que requiere el software FLO 2D para realizar una simulación:

Los archivos FPLAIN.DAT y CADPTS.DAT son creados por el pre-procesador GDS y nos indican el número de grillas utilizadas con su respectiva numeración. La cota de terreno y el coeficiente de Manning que corresponde a cada grilla son ingresados en estos archivos (Fig. 20).

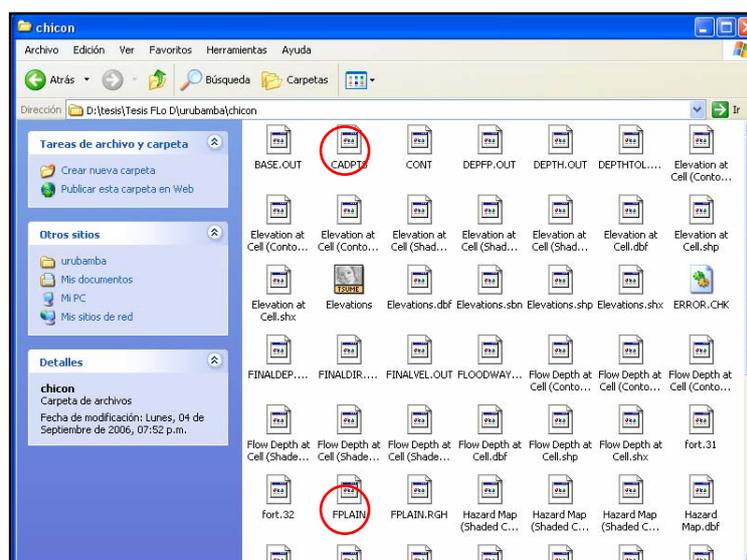


Fig. 20. Ubicación de los archivos FPLAIN.DAT y CADPTS.DAT en la carpeta FLO 2D.

El archivo CONT.DAT es el archivo principal del programa y aquí se define el tiempo de simulación y el proceso físico a analizar. Para nuestro caso el proceso a ser simulado es *Mud/Debris* o flujo de lodo y detritos (Fig. 21).

En el archivo TOLER.DAT se indican las variables de control del sistema y aquí se define la ecuación de *momentum* (*Full Dynamic Wave*) y los coeficientes de estabilidad para la onda dinámica. También se indica el tiempo transcurrido en la simulación (*Timestep*) (Fig. 21).

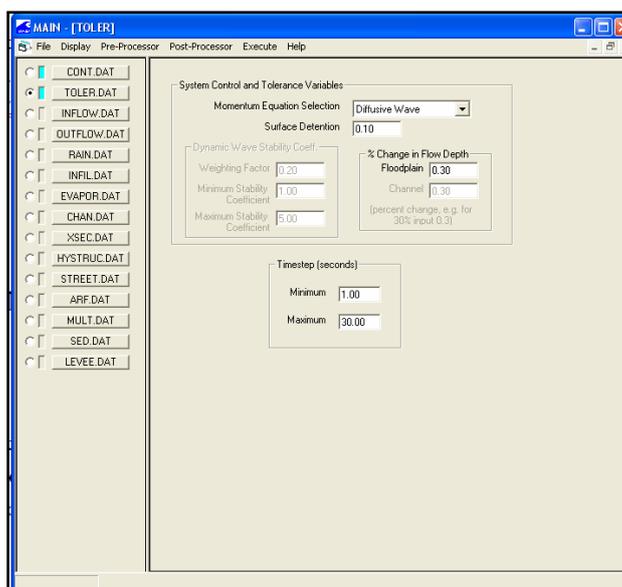


Fig. 21. Archivos CONT.DAT y TOLER.DAT en la ventana principal del FLO 2D.

El archivo INFLOW.DAT es donde se describe el hidrograma de entrada y la numeración de la grilla de inicio. Para el caso de simulaciones de flujos de detritos el hidrograma líquido va acompañado de una distribución de concentración de sedimentos. El software se encarga de calcular el hidrograma de la mezcla para después proceder a simular su avance aguas abajo (Fig. 22).

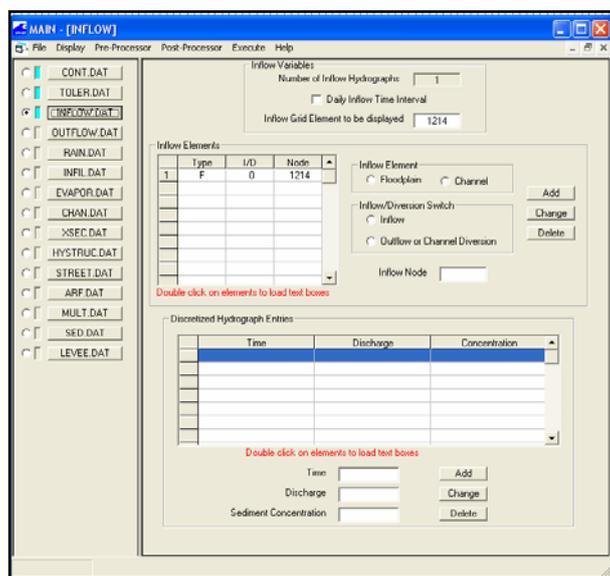


Fig. 22. Archivo INFLOW.DAT en la ventana principal del FLO 2D.

En el archivo OUTFLOW.DAT se indican las grillas por donde el flujo seguirá su camino. Para nuestro caso, estas grillas se ubicarían en la parte baja del cono aluvial. Estas grillas de flujo de salida deben indicarse para el caso de que las curvas de nivel topográficas no éste completa aguas abajo (Fig. 23).

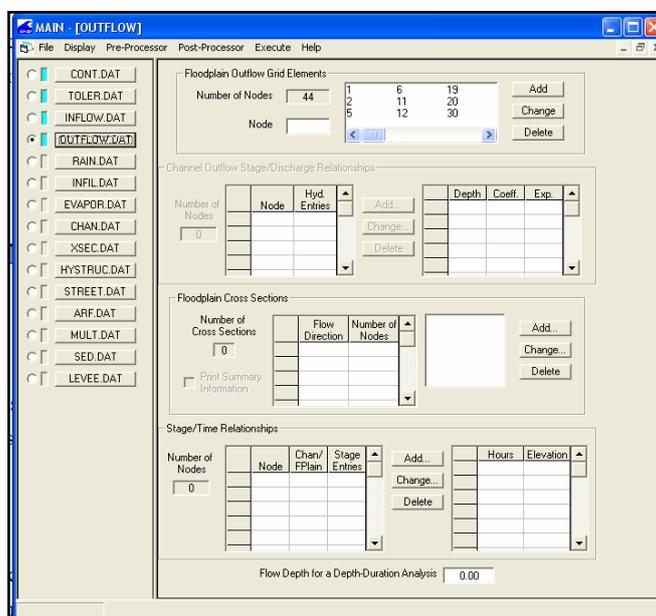


Fig. 23. Parámetros del archivo OUTFLOW.DAT.

El archivo SED.DAT es donde se indican las propiedades físicas del flujo de detritos. Las propiedades físicas dependen del tipo de material existente en la quebrada de aporte y si se trata de un flujo muy viscoso o granular.

Una vez ingresado todos los parámetros correspondientes y bajo cierto criterio del tipo de flujo a simular, se procede a realizar el *Run* o simulación del flujo de detritos para la quebrada respectiva.

Finalmente, los resultados son graficados en los post-procesadores MAXPLOT y MAPPER pertenecientes al programa FLO 2D. Los resultados obtenidos por el programa son las elevaciones del terreno, tirantes, velocidades y volúmenes de agua y sedimento del flujo.

Como parte de los resultados se registró que el volumen de simulación del modelo para la ciudad de Urubamba fue de 9130364.71 m<sup>3</sup> de agua y sedimento, y para la ciudad de Ollantaytambo fue de 701007.75 m<sup>3</sup> de agua.

#### 4.2.2. Simulación del FLO 2D en las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo

Una vez conocido los parámetros reológicos característicos de la quebrada provenientes de la calibración del modelo, se procede a simular bajo éstas condiciones el posible flujo en cada ciudad. Para ello se empleará la topografía digital de los mapas a escala 1:10000.

En el caso de la ciudad de Urubamba, se ha generado tres simulaciones ya que en esta

ciudad confluyen dos quebradas. Dos simulaciones son para la quebrada de Pumahuanca y una para la quebrada Chicón. Para la ciudad de Ollantaytambo, se han generado dos simulaciones con caudales distintos.

En ambas ciudades, primero se toma la topografía digitalizada a escalas detallada (curvas cada 10 m), las cuales se procesaron en un programa de Sistema de Información Geográfica (GIS), para que nos diera puntos de elevación por cada celda empleada, vale decir, que las líneas de las curvas de nivel se convirtieron a puntos (Fig. 24).



Fig. 24. Topografía, expresada en puntos de elevación.

Una vez obtenida dicha información se procedió a cargarla en el FLO 2D mediante el GDS, para posteriormente comenzar el creado de las celdas para la simulación (Fig. 25).

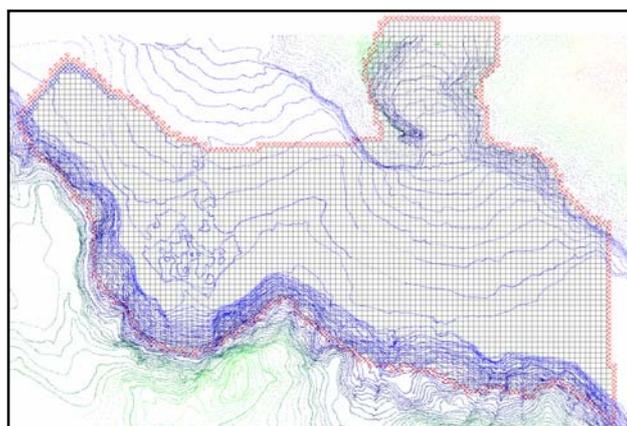


Fig. 25. Vista de Gris Develoment System (GDS).

Para la ciudad de Urubamba se creó grilla de celdas de 25 x 25 m, teniendo un total 4879 celdas para la quebrada Pumahuanca y 3545 celdas para la quebrada Chicón. Para la ciudad de Ollantaytambo también se creó celdas de 25 x 25 m, teniendo un total de 1833 celdas (Fig. 26).

Una vez creadas las celdas, procedemos a interpolar las altura, ya que no siempre dentro de una celda va ha haber un punto de elevación, entonces al interpolar las alturas, las celdas que no tienen puntos de elevación, toman un promedio de sus cuatro celdas

vecinas.

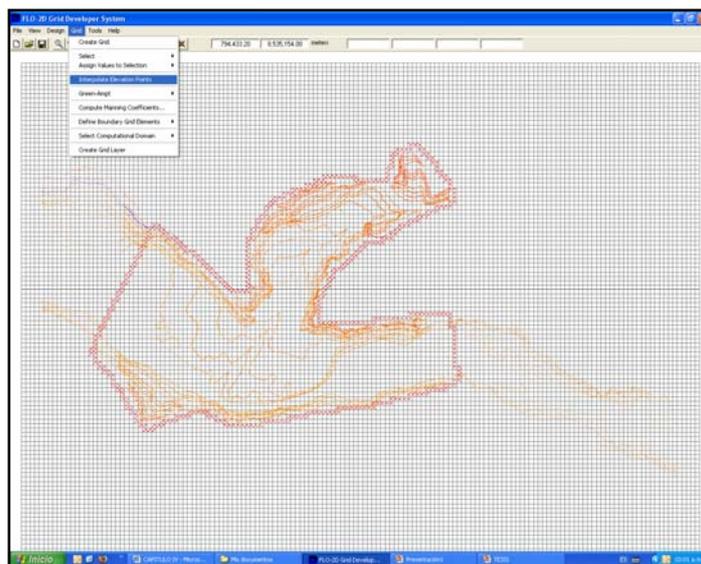


Fig. 26. Creación de grilla e interpolación de alturas en la simulación de la ciudad de Ollantaytambo.

Luego, se escoge en que celda se va a poner el hidrograma de entrada (Inflow), que es el que tiene los valores de tiempo y caudal para un tiempo de retorno de 100 o 50 años de ambas ciudades según corresponda el tipo de animación (Fig. 27).

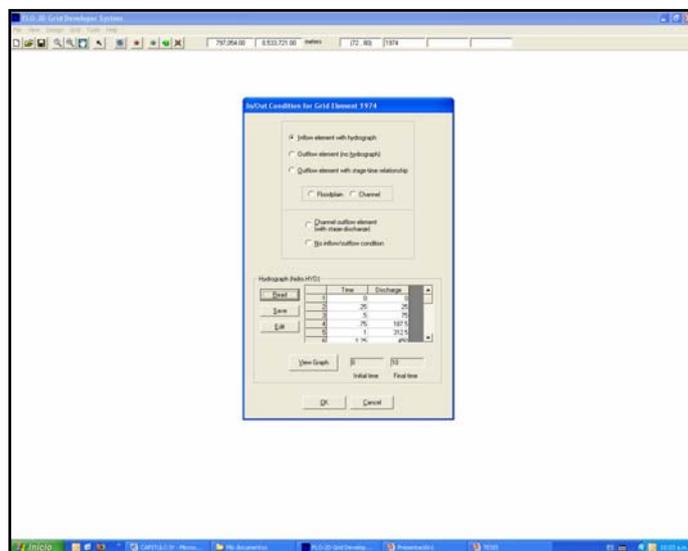


Fig. 27. Ingreso de los datos del hidrograma líquido a una celda de entrada (Inflow).

Para que el flujo no se estanque donde las curvas topográficas acaban en nuestra zona de simulación, se pone elementos de salida (Outflow), así el programa interpretará que no existe un impedimento para que el flujo se acumule y continúe fluyendo (Fig. 28).

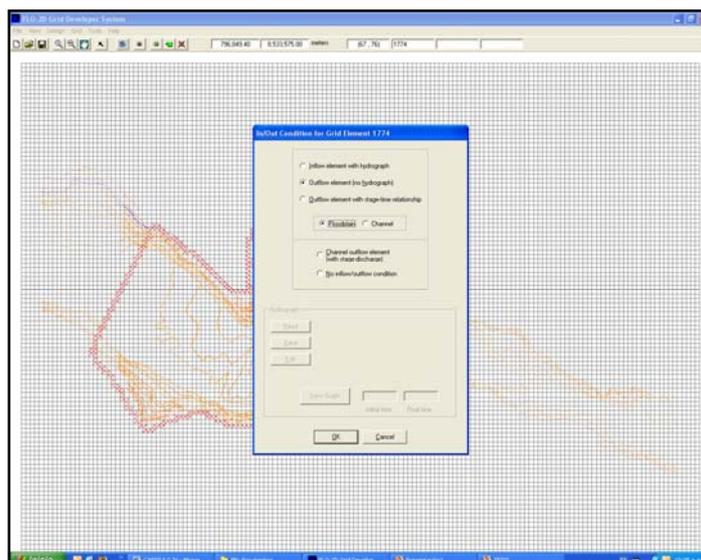


Fig. 28. Creación de celdas de salida (Outflow).

Una vez realizados estos pasos, se procede a superponer una imagen de satélite de alta resolución, o un archivo que contenga las viviendas, manzanas, lotes digitalizados con el fin de poder marcar las calles, manzanas, muros de contención, y todo los factores que puedan influir en la dirección y velocidad del flujo. Para mayor presión se puede importar un archivo GIS, para darle los toques finales (Fig. 29).

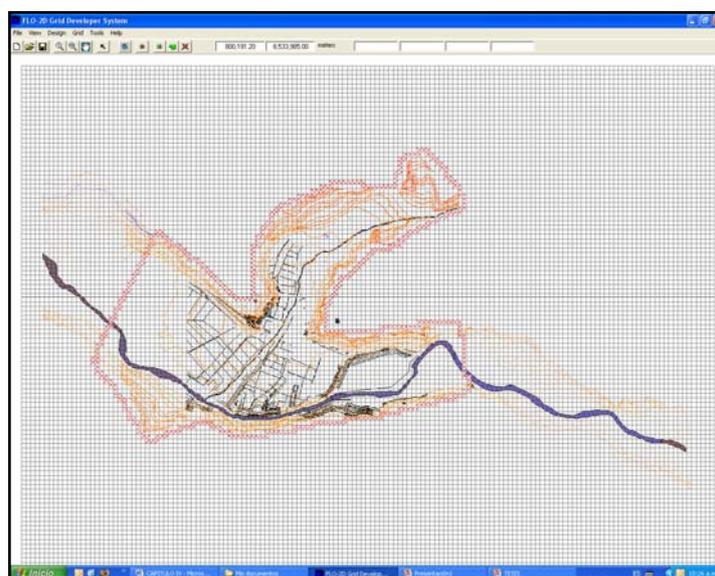


Fig. 29. Superposición de capa con parámetros de viviendas y calles.

Una vez cargados todos los datos fisiográficos de las ciudades, uno a la vez, se procede a cambiar los datos que por defecto pone el programa con respecto a los parámetros hidrológicos, como el coeficiente de Manning y rugosidad del terreno, forma del cauce, forma de la quebrada etc. (Fig. 30). Estos valores se sacan de tablas propuestas por O' Brien en el manual del FLO 2D.

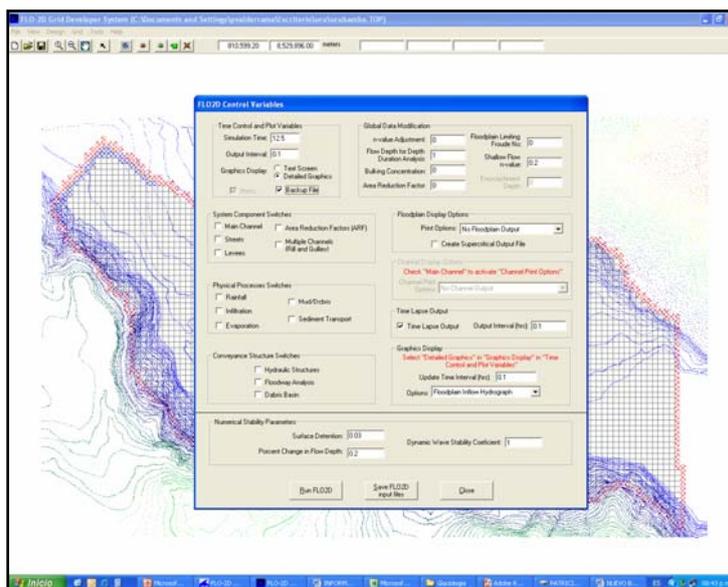


Fig. 30. Ventana donde se realiza los cambios de datos.

Una vez comprobados los datos mediante verificación manual, procedemos a correr el FLO 2D propiamente dicho, donde se nos abre dos ventanas, la primera que nos muestra como el flujo se está desplazando en un tiempo  $T$  con caudal  $Q$ , y la segunda es una representación grafica del hidrograma propiamente dicho (Fig. 31). Este es el proceso mas largo, ya que cuando el caudal llega a su pico, aumenta demasiado rápido con respecto al tiempo, por lo que la simulación se hace más lenta. Para la ciudad de Urubamba la simulación dura 23 horas con 48 segundos, esto por que se realizaron tres simulaciones; mientras que, para la ciudad de Ollantaytambo, la simulación dura 15 horas con 30 minutos aproximadamente.

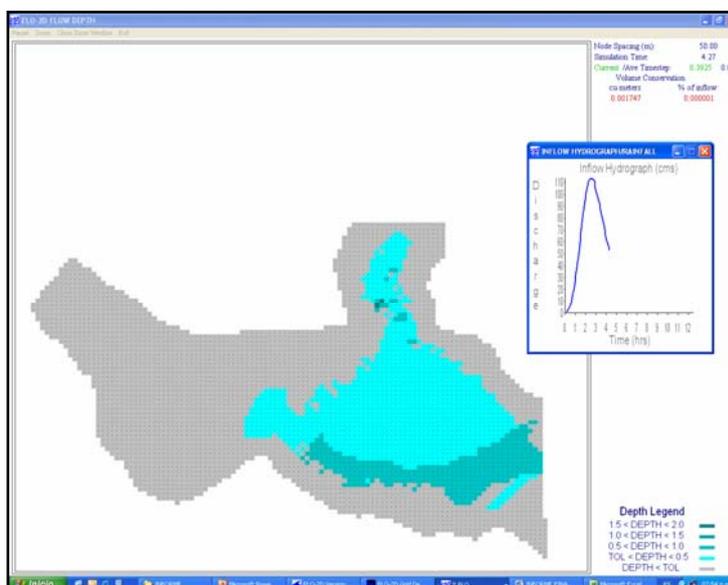


Fig. 31. Ventana de FLO 2D, se aprecia en color celeste la simulación del flujo; mientras que en la ventana pequeña se observa cómo se desarrolla el hidrograma.

### 4.2.3. Utilización del Post Processor (Mapper) en el FLO 2D

El post processor es la parte del FLO 2D que se usa para el tratamiento de los datos generados, los cuales se explicaron en el ítem anterior.

Con este programa, uno puede acceder a los datos de velocidad del flujo, altura máxima de los flujos (picos), dirección preferencial que tomaron los flujos, generar mapas de peligros digitales según la simulación anterior.

#### 4.2.3.1. Partes del Mapper

A continuación describiré las diferentes aplicaciones del Mapper. Las abreviaciones son tomadas de su nombre original en inglés.

##### A. Elevación de la superficie del terreno (*Grid Element Ground Surface Elevation-GEGSE*)

Identificado con el primer botón en la barra de aplicaciones, aquí nos muestra como es la elevación de la superficie del terreno, según sus elementos de grilla (Fig. 32).

Estas diferencias de elevaciones están representadas por una gradación de colores variando desde el azul para los elementos de grilla con una cota más baja, hasta el rojo, para los elementos de grilla con una cota más alta.

En el extremo derecho nos muestra una escala de colores que nos indica las variaciones de altitudes, mientras que en el extremo inferior derecho nos muestra una escala gráfica que nos indica las dimensiones del terreno.

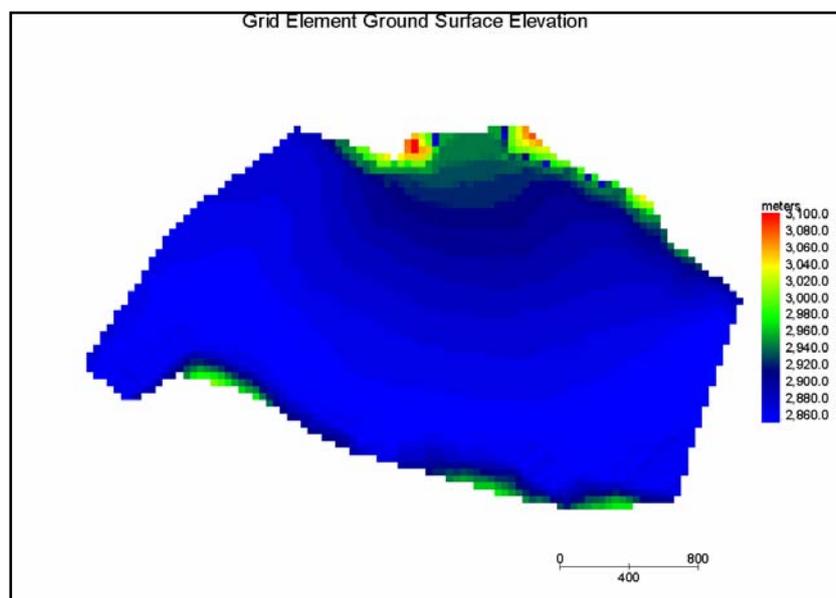
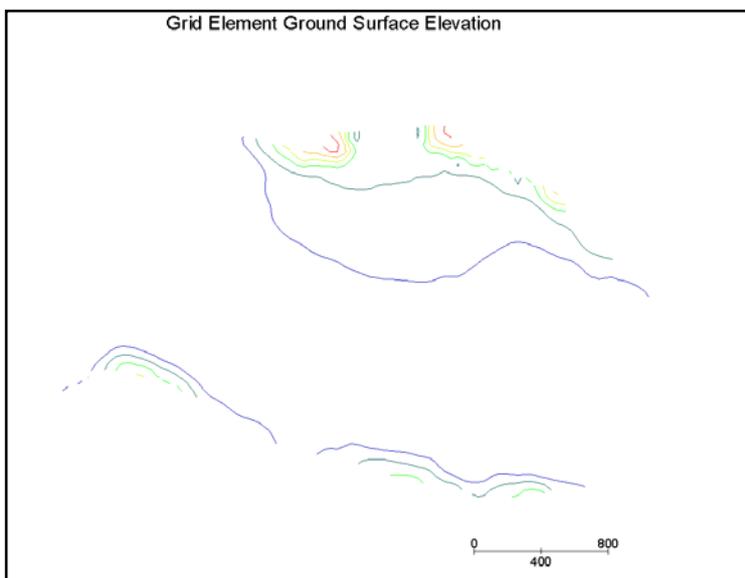


Fig. 32. Elevación de la superficie del terreno, según sus elementos de grilla.

En la pestaña del GEGSE, existen dos variantes:

a.1 GEGSE (Contours).

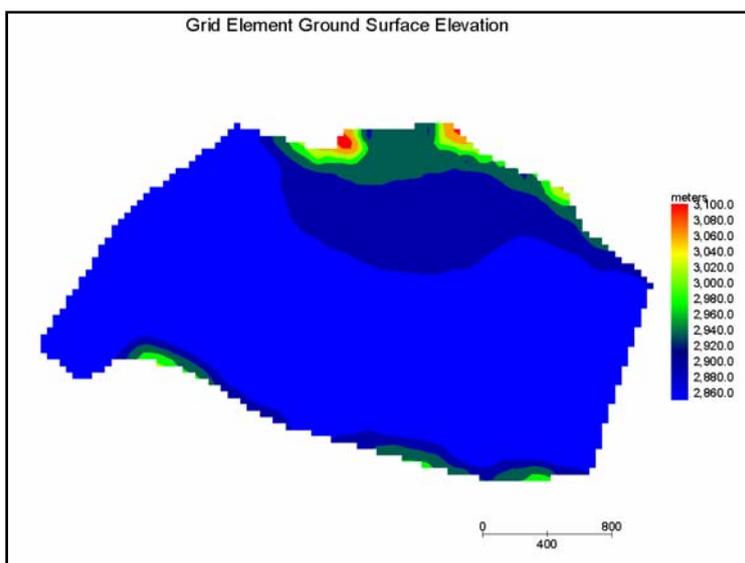
Muestra sólo las mayores elevaciones, encerradas en polígonos de acuerdo a su altura (Fig. 33).



*Fig. 33. Elevación de la superficie del terreno según sus elementos de grilla expresado en contornos.*

a.2 GEGSE (Shaded Contours)

Muestra los polígonos de mayor elevación coloreados según su altura (Fig. 34).



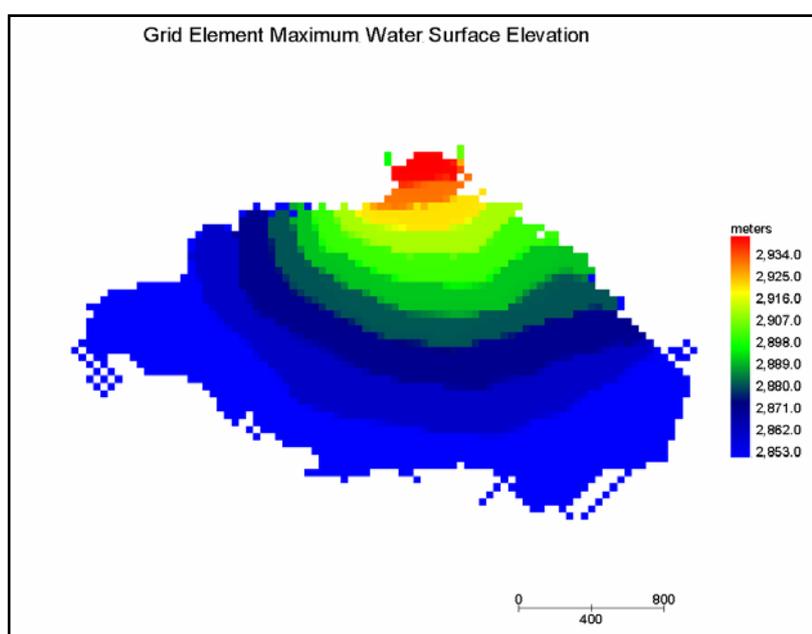
*Fig. 34. Elevación de la superficie del terreno según sus elementos de grilla expresado en polígonos.*

### B. *Máxima elevación de la superficie de agua en el terreno (Grid Element Max Water Surface Elevation-GEMWSE)*

Identificado con el segundo botón en la barra de aplicaciones, aquí nos muestra como es la máxima elevación de la superficie de agua en el terreno, según sus elementos de grilla (Fig. 35).

Estas diferencias de elevaciones están representadas por una gradación de colores variando desde el azul para los elementos de grilla con una elevación de agua menor, hasta el rojo, para los elementos de grilla con una elevación de agua mayor.

En el extremo derecho nos muestra una escala de colores que nos indica las variaciones de altitudes del agua; mientras que, en el extremo inferior derecho nos muestra una escala gráfica que nos indica las dimensiones del terreno.



*Fig. 35. Máxima elevación de la superficie de agua en el terreno, según sus elementos de grilla.*

En la pestaña del GEMWSE, existen dos variantes:

#### b.1 GEMWSE (Contours)

Muestra sólo las mayores elevaciones de agua simulada del flujo, encerradas en polígonos de acuerdo a su altura (Fig. 36).

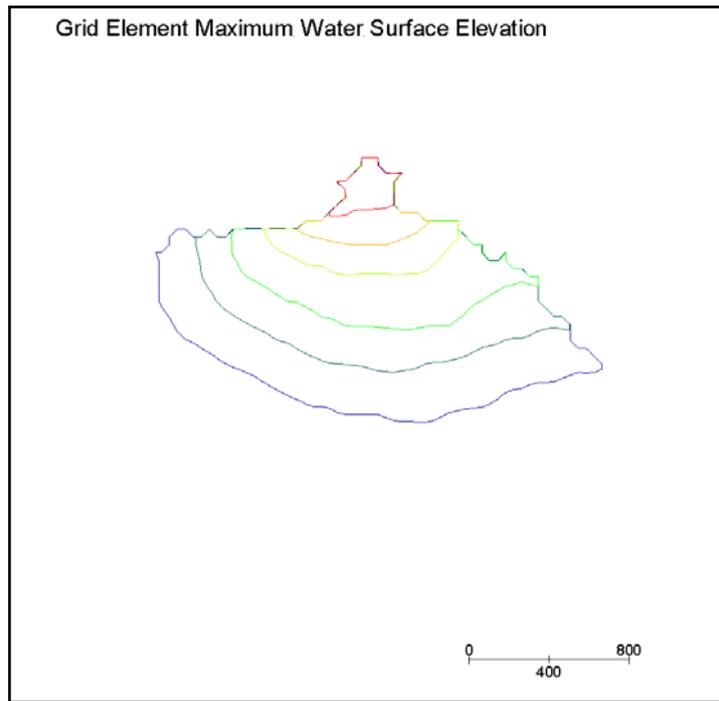


Fig. 36. Máxima elevación de la superficie de agua en el terreno, según sus elementos de grilla, expresado en contornos.

### b.2 GEMWSE (Shaded Contours)

Muestra los polígonos de mayor elevación coloreados según su altura de agua (Fig. 37).

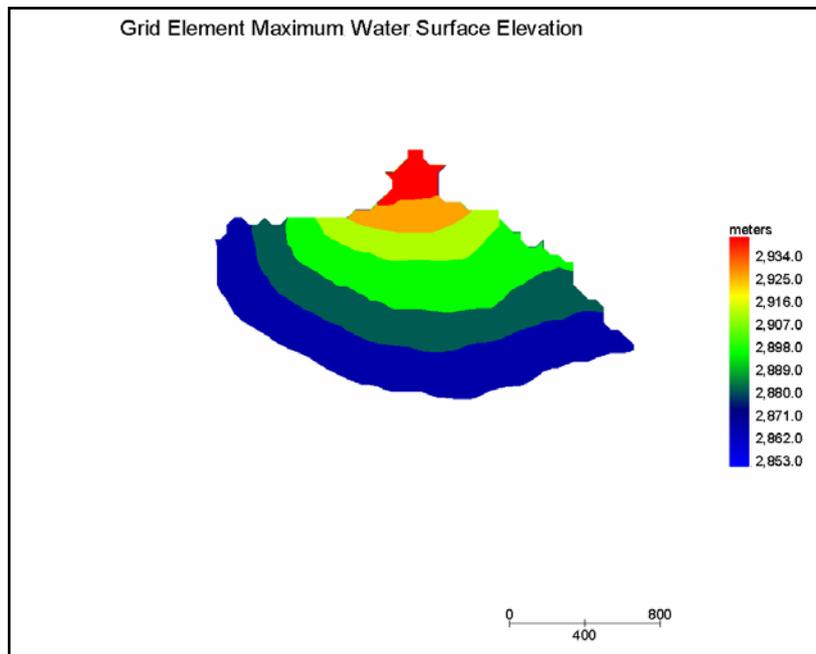


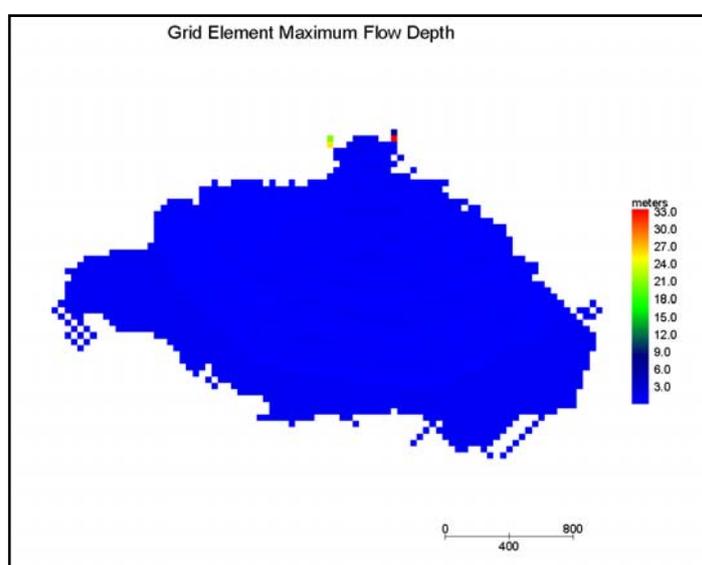
Fig. 37. Máxima elevación de la superficie de agua en el terreno, según sus elementos de grilla, expresado en polígonos.

**C. Profundidad de flujo máxima en el terreno (Grid Element Max Flow Depth-GEMFD)**

Identificado con el tercer botón en la barra de aplicaciones, aquí nos muestra como es la profundidad de flujo máxima en el terreno, según sus elementos de grilla (Fig. 38).

Estas diferencias de elevaciones están representadas por una gradación de colores variando desde el azul para los elementos de grilla con una profundidad de flujo menor, hasta el rojo, para los elementos de grilla con una profundidad de flujo mayor.

En el extremo derecho nos muestra una escala de colores que nos indica las variaciones de profundidad de flujo; mientras que, en el extremo inferior derecho nos muestra una escala gráfica que nos indica las dimensiones del terreno.



*Fig.38. Profundidad de flujo máxima en el terreno, según sus elementos de grilla.*

En la pestaña del GEMFD, existen dos variantes:

**c.1.GEMFD (Contours)**

Muestra sólo las mayores elevaciones de profundidad del flujo, encerradas en polígonos de acuerdo a su profundidad (Fig. 39).

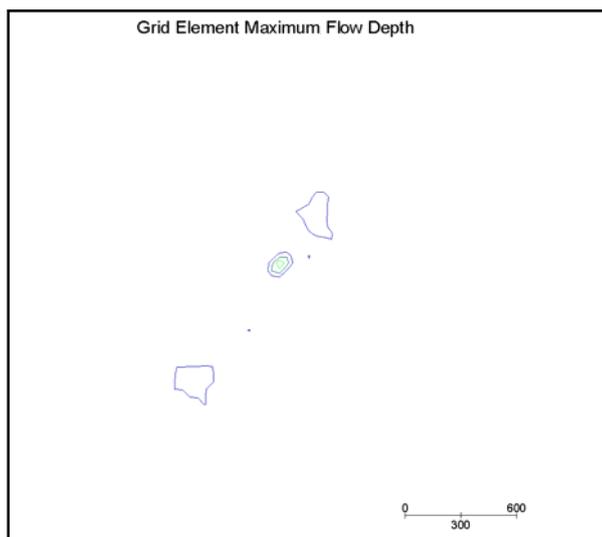


Fig. 39. Profundidad de flujo máxima en el terreno, según sus elementos de grilla, expresado en contornos.

### c.2. GEMFD (*Shaded Contours*)

Muestra los polígonos de mayor profundidad coloreados según la altura del flujo (Fig. 40).

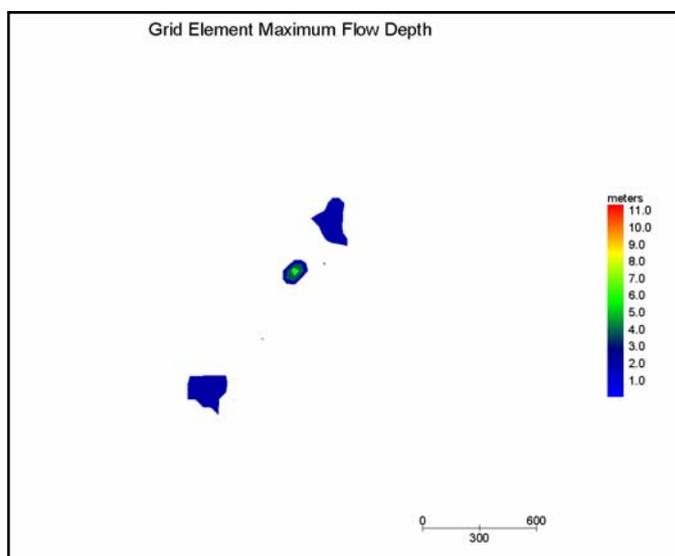


Fig. 40. Profundidad de flujo máxima en el terreno, según sus elementos de grilla, expresado en polígonos.

### D. Máxima velocidad del flujo en el terreno (*Grid Element Max Velocity-GEMV*)

Identificado con el cuarto botón en la barra de aplicaciones, aquí nos muestra como es la máxima velocidad del flujo en el terreno, según sus elementos de grilla (Fig. 41).

Estas diferencias de velocidades están representadas por una gradación de colores variando desde el azul para los elementos de grilla con una velocidad de flujo menor,

hasta el rojo para los elementos de grilla con una velocidad de flujo mayor.

En el extremo derecho nos muestra una escala de colores que nos indica las variaciones de velocidad de flujo; mientras que, en el extremo inferior derecho nos muestra una escala gráfica que nos indica las dimensiones del terreno.

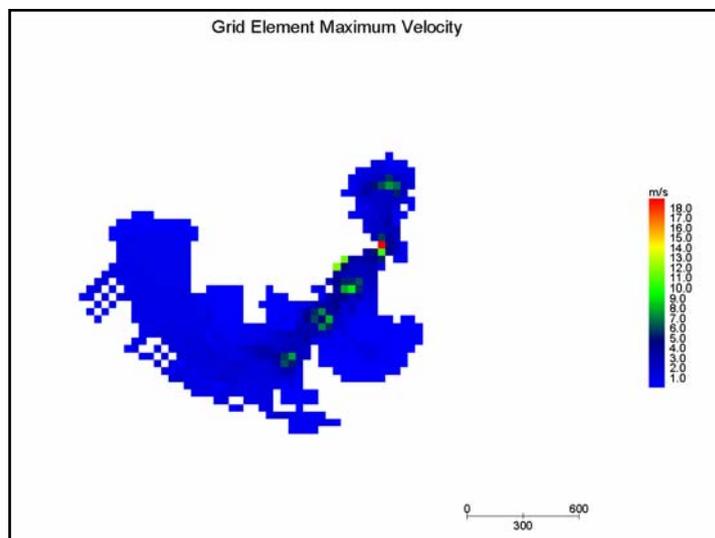


Fig. 41. Máxima velocidad del flujo en el terreno, según sus elementos de grilla.

En la pestaña del GEMV, existen tres variantes:

#### d.1 GEMV (*Contours*)

Muestra sólo las mayores velocidades de del flujo, encerradas en polígonos de acuerdo a su velocidad (Fig. 42).

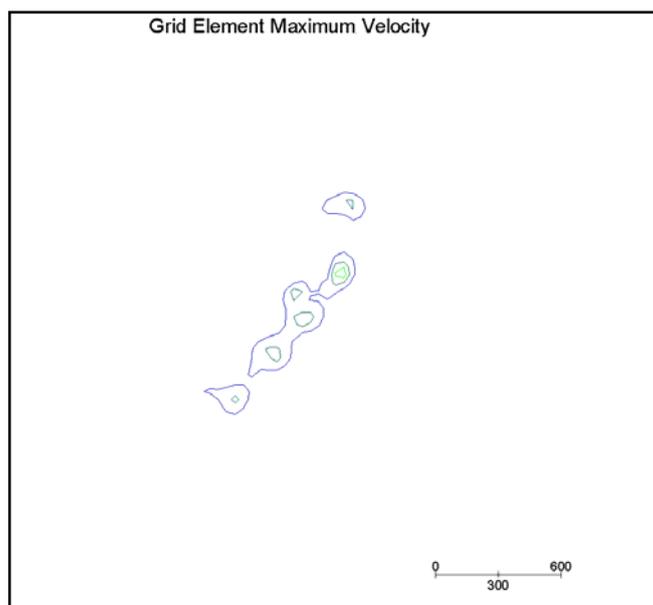
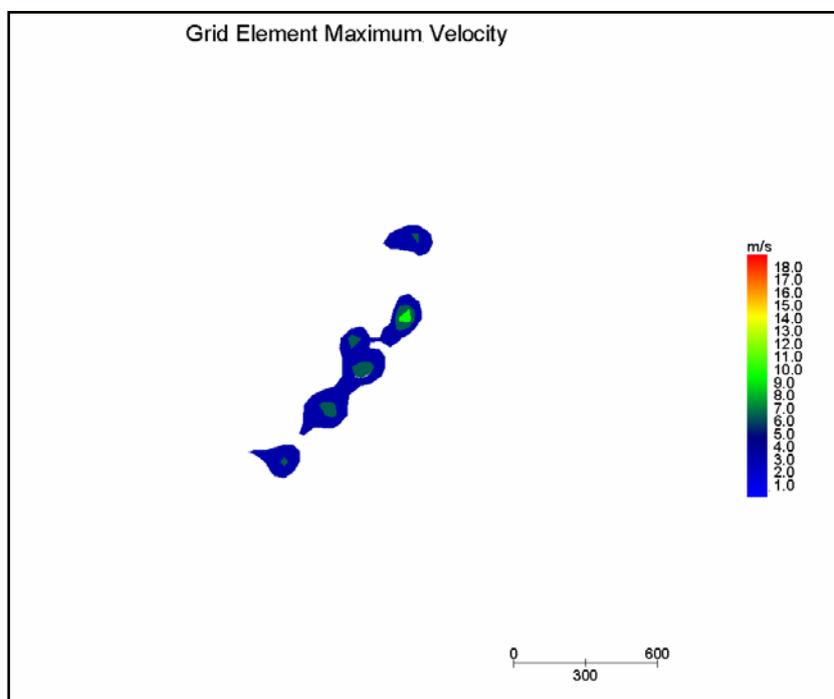


Fig. 42. Máxima velocidad del flujo en el terreno, según sus elementos de grilla, expresado en contornos.

### d.2. GEMV (Shaded Contours)

Muestra los polígonos de mayor velocidad coloreados según la velocidad del flujo (Fig. 43).



*Fig. 43. Máxima velocidad del flujo en el terreno, según sus elementos de grilla, expresado en polígonos.*

### d.3. GEMV (Vectors)

Nos muestra las direcciones preferenciales de los flujos con su velocidad mediante vectores de movimientos.

Nos da una flecha principal que muestra un resumen del movimiento y dirección del flujo, también muestra flechas de diferentes tamaños, lo cual nos muestra por donde el flujo toma mayores velocidades y direcciones preferentes del flujo (Fig. 44).

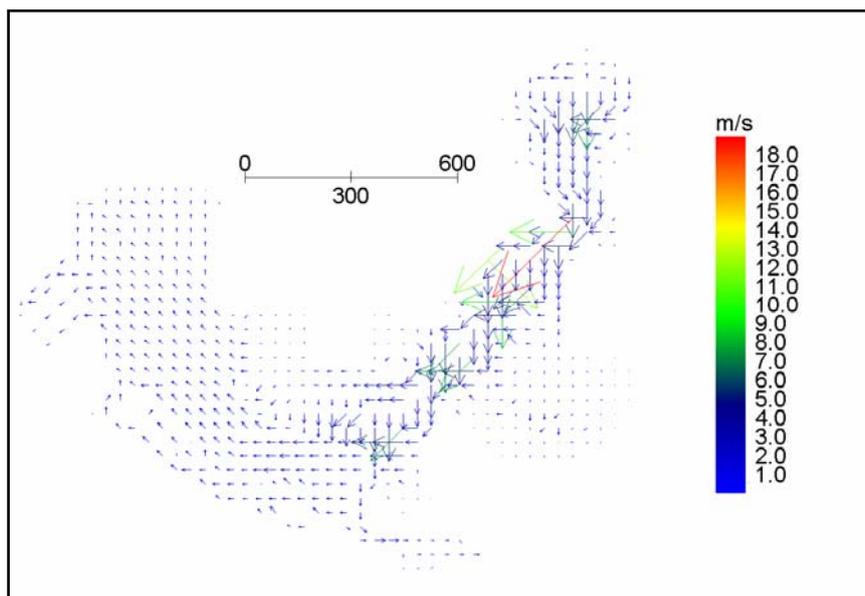


Fig. 44. Máxima velocidad del flujo en el terreno, según sus elementos de grilla, expresado en vectores.

**E. Mapa de peligros digital por elementos de grilla (Grid Element Hazard Map-GEHM)**

Esta es una de las partes más importantes del Mapper y del FLO 2D, mediante el cual con los datos computados de la simulación previa, se genera un mapa de peligros tomando en cuenta los parámetros de altura y/o velocidad del flujo, teniendo unos parámetros predefinidos, los cuales se varían según las alturas y velocidades máximas vistas en la simulación. (Fig. 45). De la misma forma que las aplicaciones anteriores también el GEHM nos muestra el mapa de peligros expresado en polígonos con una calidad gráfica más elaborada (Fig. 46).

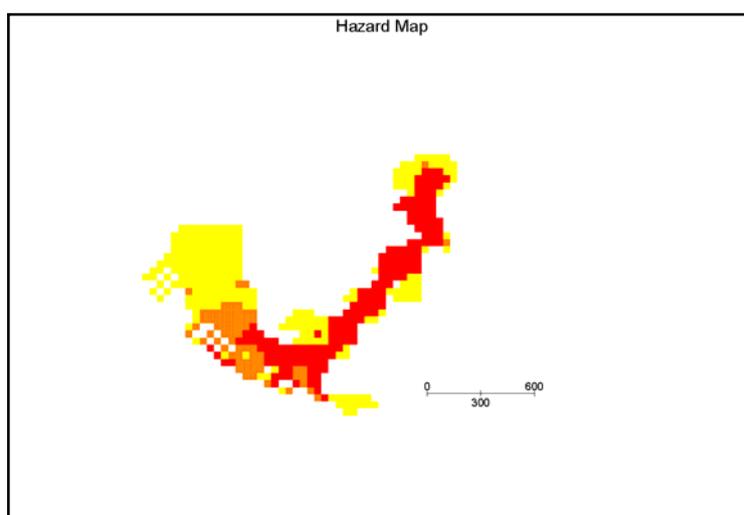
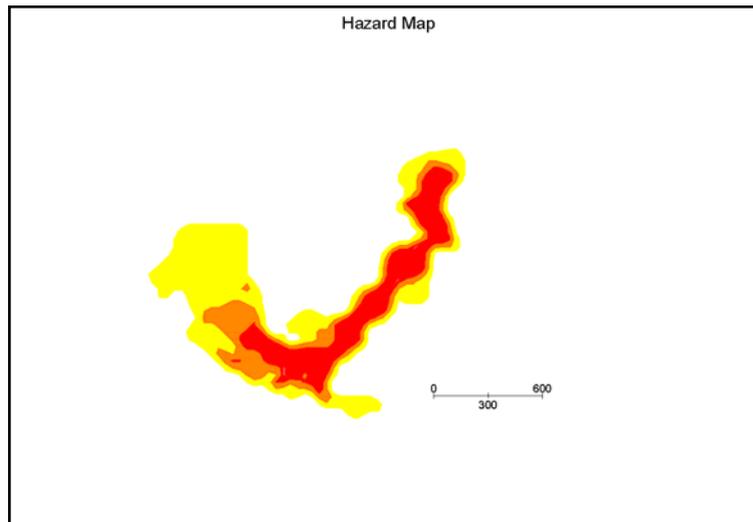


Fig. 45. Mapa de peligros digital, generado con el software FLO 2D.



*Fig. 46. Mapa de peligros digital, generado con el software FLO 2D expresado en polígonos.*

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS DE LA MODELACIÓN FLO 2D PARA LAS CIUDADES DE URUBAMBA Y OLLANTAYTAMBO**

## 5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta todos los resultados de la modelación para las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, incluyendo el mapa de peligros digital.

Una vez terminada la simulación, el FLO 2D crea un archivo de resumen, llamado SUMMARY.DAT en el cual figura estos datos, así como un resumen de los tiempos simulados, caudales, etc.

## 5.2. PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN

Las siguientes características (parámetros de entrada) son empleadas para la simulación:

- Se aplicó el modelo bidimensional FLO-2D para la simulación del flujo hiperconcentrado de barro y escombros, utilizando las ecuaciones que gobiernan el movimiento en su expresión más completa (onda dinámica).
- Para la simulación se consideraron concentraciones de sedimentos que varían entre 50% y 65 %, dado que estas son las características de aluviones de magnitudes similares.
- Se asume la rugosidad “n” de Manning igual a 0.055 para la quebrada Chicón, Pumahuanca y Patacancha, dado que las características de rugosidad del terreno de las 3 quebradas son muy similares.
- Los parámetros reológicos de la mezcla (viscosidad y esfuerzo de cedencia) se encuentran en función de muestras experimentales analizadas por O’Brien y Julien (1988). Ellos proponen diversas ecuaciones para diferentes tipos de muestra. La muestra utilizada para la modelación y que se ajusta al desarrollo del flujo es una muestra tipo Aspen Pit 1, cuyo resultado es conservador. Por lo tanto las ecuaciones de viscosidad y esfuerzo de cedencia utilizadas para el modelo son:

$$\eta = 0.0360e^{22.1C_v}$$

$$\tau_y = 0.181e^{25.7C_v}$$

- La Gravedad específica (Gs) del sedimento lo dejamos como 2.50 que es valor que le FLO 2D pone por defecto según el porcentaje de concentraciones de sedimentos.
- Se asume una resistencia de la planicie al flujo laminar (K) igual a 4000 también valor por defecto según la pendiente promedio de las quebradas.
- Se analiza un tiempo de simulación de 24 horas.

## 5.3. RESULTADOS PARA LA CIUDAD DE URUBAMBA

Los resultados arrojados por el software FLO 2D para las 3 simulaciones de la ciudad de Urubamba son los siguientes:

### 5.3.1. Quebrada Chicón

#### Salidas del programa FLO-2D Quebrada Chicón ( $Q_p = 260 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Flujo ( $\text{m}^3$ )	Agua ( $\text{m}^3$ )	Mezcla Agua Sedimento( $\text{m}^3$ )
Hidrograma de entrada (Inflow)	9 130 364.71	1 034 670.20
Almacenamiento dentro del área de análisis	128 418.32	203 324.30
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	784 646.39	831 345.90

El volumen total de la creciente simulada es de 2.06 millones de  $\text{m}^3$ , de los cuales 0.8 millones de  $\text{m}^3$  son agua y 1.26 millones de  $\text{m}^3$  corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de  $3\,737\,600 \text{ m}^2$ .

Esta animación se realizó para un caudal líquido de  $260 \text{ m}^3/\text{s}$ , para un periodo de retorno de 100 años, los resultados se presentan a continuación:

#### 5.3.1.1. Elevación del terreno por grilla

Nos muestra cómo es el cambio de elevación del terreno, coloreado por tonos; coincidiendo con las cotas de las curvas topográficas (Fig. 47).

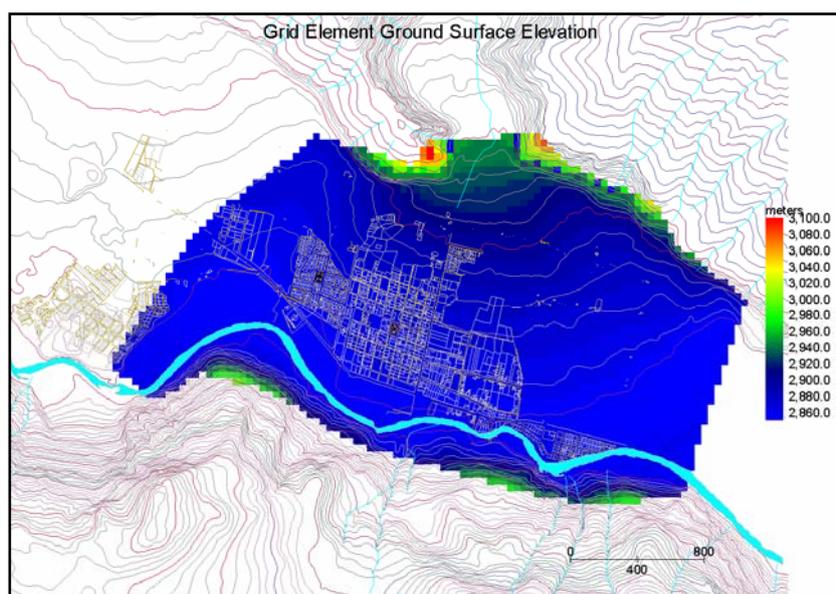


Fig. 47. Elevación del terreno.

#### 5.3.1.2. Máxima elevación del agua en el terreno

Mapa donde se ve las cotas o alturas del terreno que fueron invadidas por el fluido (agua) y las que no fueron afectadas (Fig. 48).

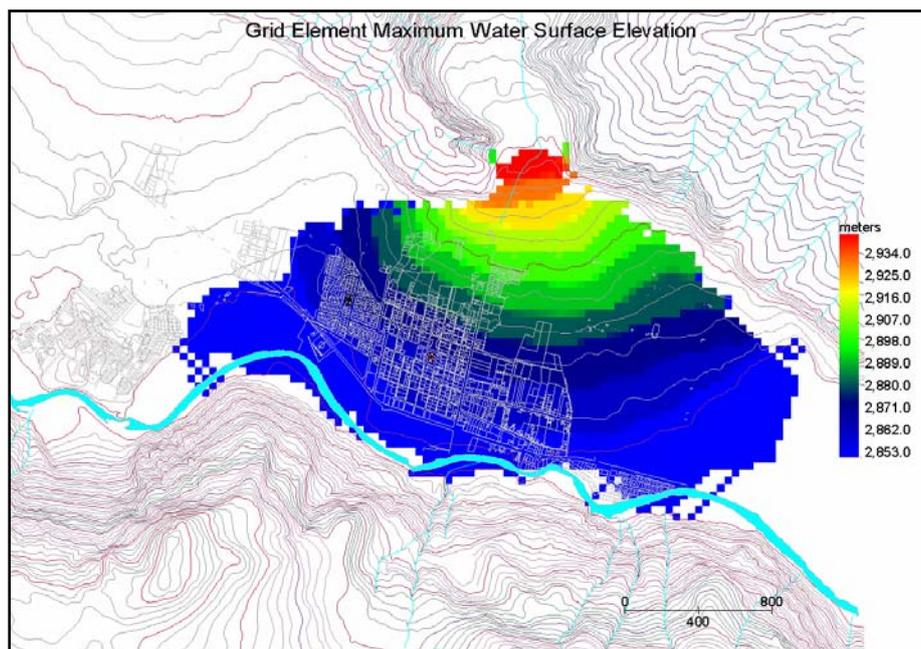


Fig. 48. Máxima elevación del agua en el terreno.

### 5.3.1.3. Profundidad máxima de flujo

Mediante escala de colores se muestra la altura tomada por el flujo en el terreno. La altura es en promedio 6 m (Fig. 49).

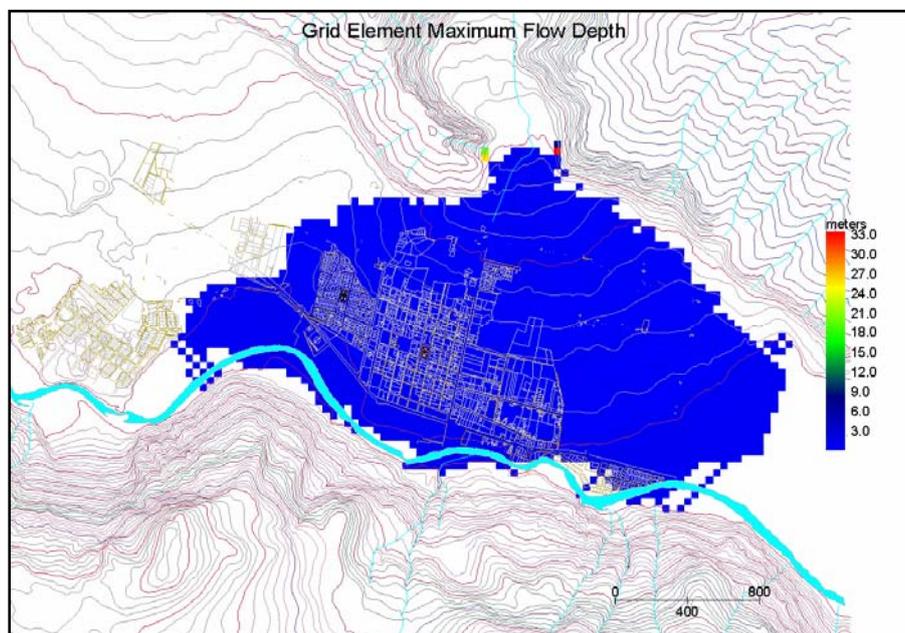
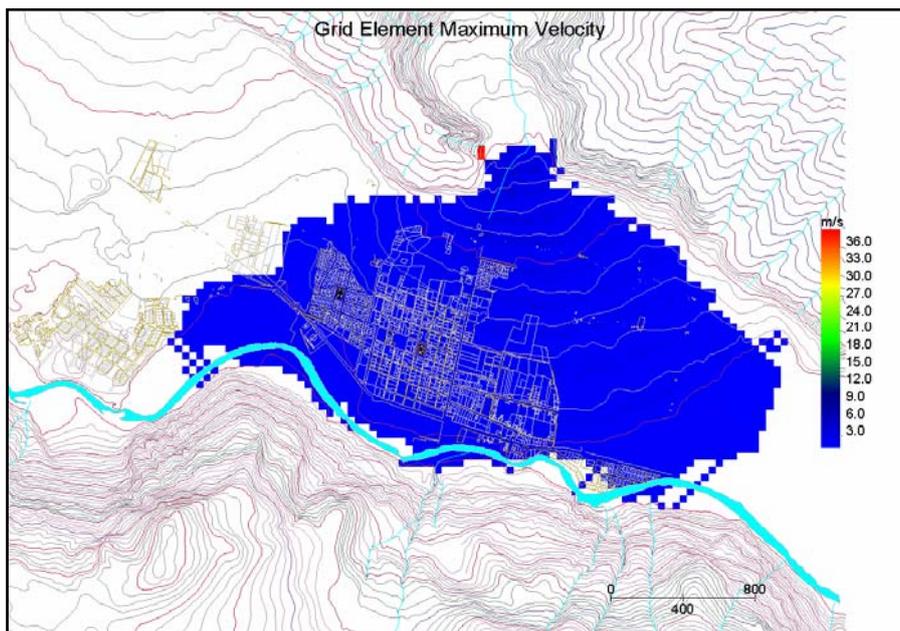


Fig. 49. Profundidad máxima de flujo.

### 5.3.1.4. Máxima velocidad del flujo

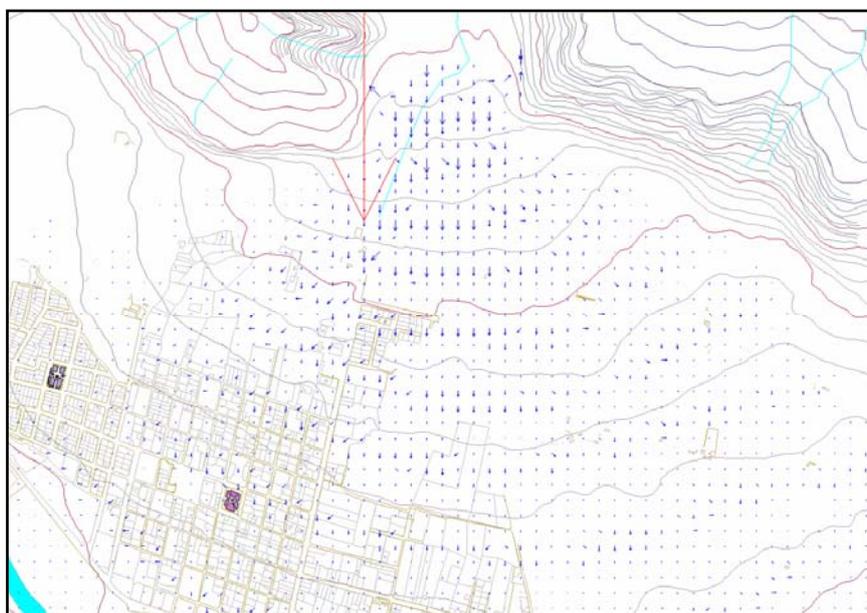
Mapa donde nos muestra las velocidades máximas del flujo en el terreno, siendo en promedio 9 m/s (Fig. 50).



*Fig. 50. Máxima velocidad del flujo.*

### 5.3.1.5. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores

Este mapa se ha incluido en este capítulo dado su importancia. En efecto, aquí se ve los vectores preferenciales de movimiento del flujo, estos varían por efecto de muchos factores, uno de los más importantes son las calles y paredes que “canalizan” el flujo (Fig. 51).



*Fig. 51. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores.*

### 5.3.1.6. Mapa de peligros por aluvión

Se presenta el mapa de peligros digital expresado por grilla para un caudal de  $260 \text{ m}^3/\text{s}$ . Aquí la coloración por cada elemento de grilla tiene una mejor visión de como se comportará un flujo en el terreno (Fig. 52).

Este mapa es el resultado final de las simulaciones con el FLO 2D para la quebrada Chicón con un hidrograma de tiempo de retorno de 100 años. El mapa colorea cada grilla tomando en cuenta el comportamiento del fluido en cada elemento, como puede ser su velocidad, altura, etc.

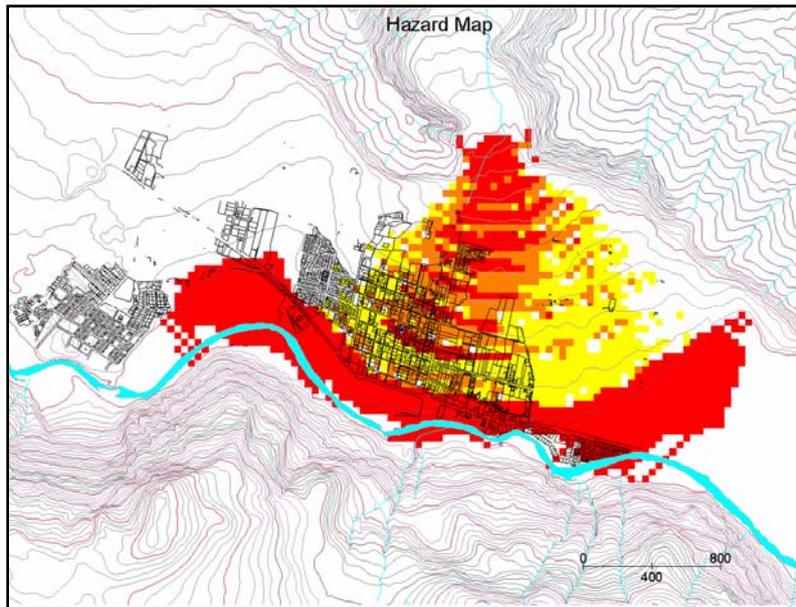


Fig. 52. Peligro por aluvión.

### 5.3.1.7. Mapa de peligros por aluvión en polígonos

Es el mismo mapa anterior sólo que expresado en polígonos. Es una terminación más fina, en la cual las grillas con las mismas características se encierran en un polígono (Fig. 53).

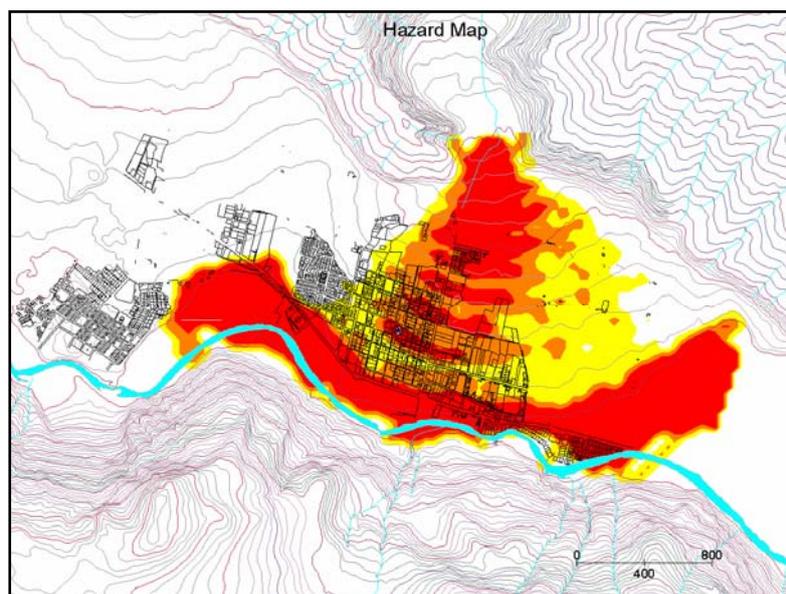


Fig. 53. Peligros por aluvión en polígonos.

### 5.3.2. Quebrada Pumahuanca (TR = 100 Años)

#### Salidas del programa FLO-2D Quebrada Pumahuanca ( $Q_{lp}= 800 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Flujo ( $\text{m}^3$ )	Agua ( $\text{m}^3$ )	Mezcla Agua Sedimento ( $\text{m}^3$ )
Hidrograma de entrada (Inflow)	10 387 459.76	5 291 765.26
Almacenamiento dentro del área de análisis	240 048.19	248 954.17
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	874 411.58	921 111.09

El volumen total de la crecida simulada es de 6.4 millones de  $\text{m}^3$ , de los cuales 0.9 millones de  $\text{m}^3$  son agua y 5.5 millones de  $\text{m}^3$  corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de 2 485 200  $\text{m}^2$ .

Esta primera animación se realizó para un caudal líquido de  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ , para un periodo de retorno de 100 años, los resultados se presentan a continuación:

#### 5.3.2.1. Elevación del terreno por grilla

Este mapa nos muestra como es el cambio de elevación del terreno, coloreado por tonos; coincidiendo con las cotas de las curvas topográficas (Fig. 54).

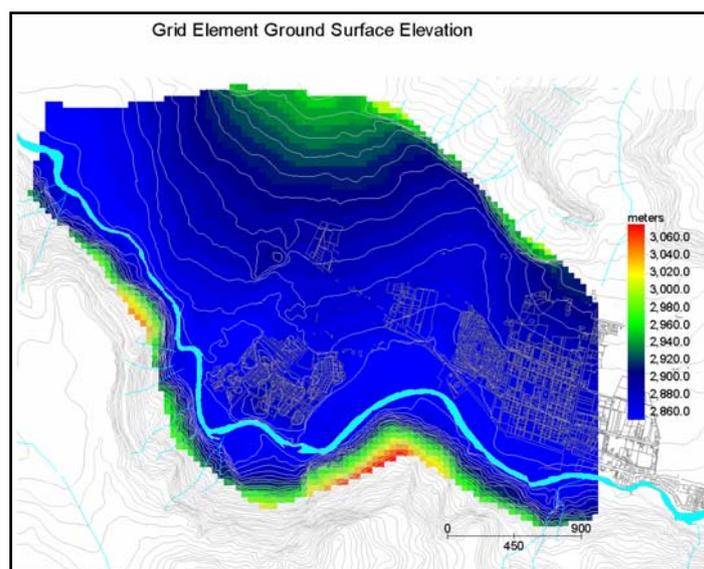


Fig. 54. Elevación del terreno por grilla.

#### 5.3.2.2. Máxima elevación del agua en el terreno

Mapa donde se ve que cotas o alturas del terreno fueron invadidas por el fluido (agua) y cuales no fueron afectadas (Fig. 55).

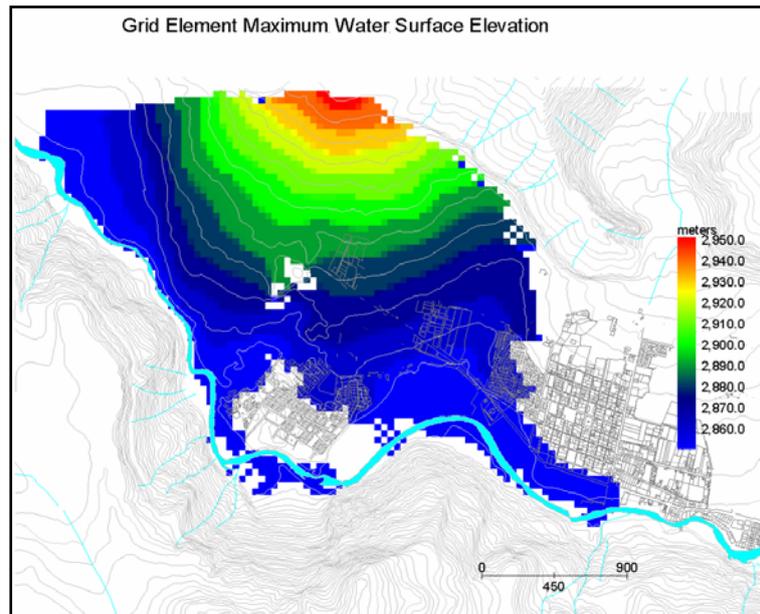


Fig. 55. Elevación del terreno por grilla.

### 5.3.2.3. Profundidad máxima de flujo

Mediante escala de colores se muestra la altura tomada por el flujo en el terreno, en este caso tiene un promedio de 0.6 m (Fig. 56).

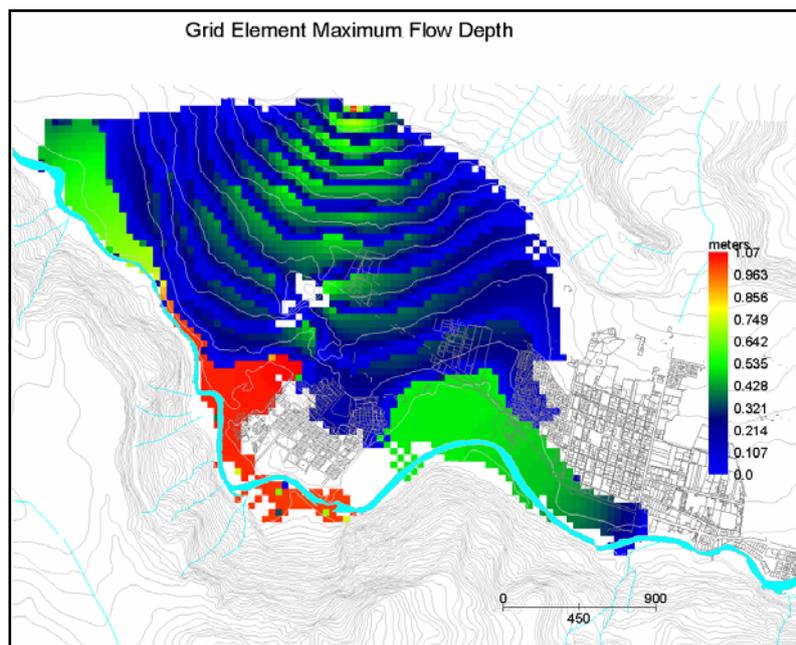


Fig. 56. Profundidad máxima de flujo.

### 5.3.2.4. Máxima velocidad del flujo

Mapa donde nos muestra las velocidades máximas del flujo en el terreno, siendo en promedio 1.29 m/s (Fig. 57).

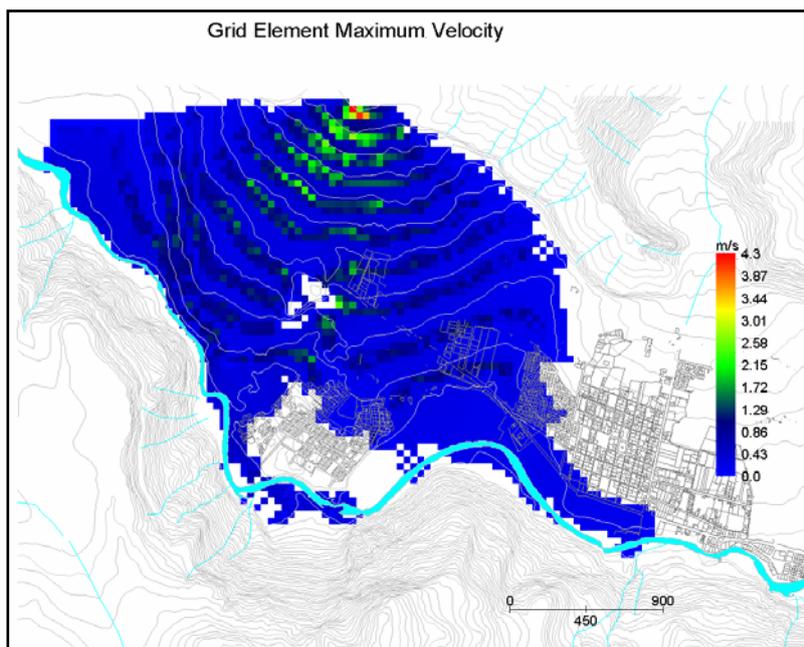


Fig. 57. Máxima velocidad del flujo.

### 5.3.2.5. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores

En este mapa se ve los vectores preferenciales de movimiento del flujo, estos varían por muchos factores, uno de los más importantes son las calles y paredes que “canalizan” el flujo. En este caso, no existen grandes obras de contención o construcciones, por lo que el flujo toma una dirección y velocidad de acuerdo a la topografía (Fig. 58).

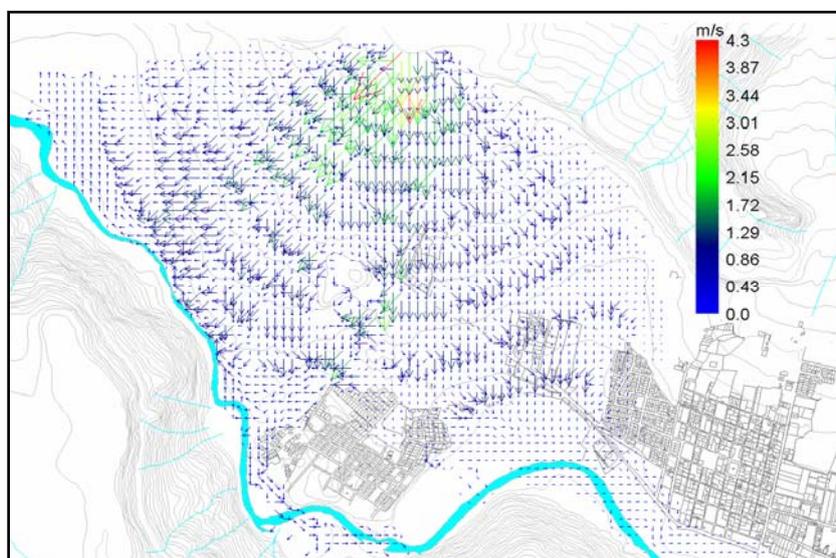
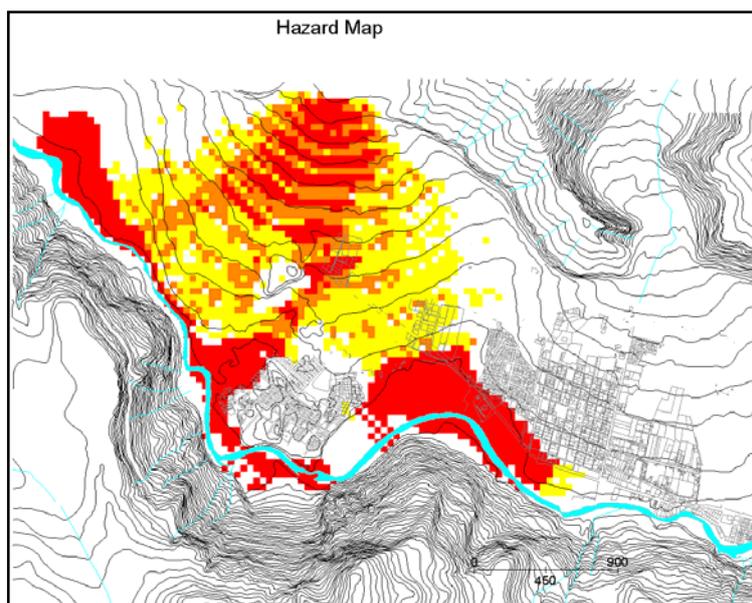


Fig. 58. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores.

### 5.3.2.6. Mapa de peligros por aluvión

Este mapa de peligros digital es expresado por grilla, para un caudal de 800 m<sup>3</sup>/s. La coloración por elemento de grilla (cada grilla) tiene una mejor visión de como se comportará un flujo en el terreno (Fig. 59). Es el resultado final de las simulaciones con el FLO 2D para la quebrada Pumahuanca con un hidrograma de tiempo de retorno de 100 años. El software

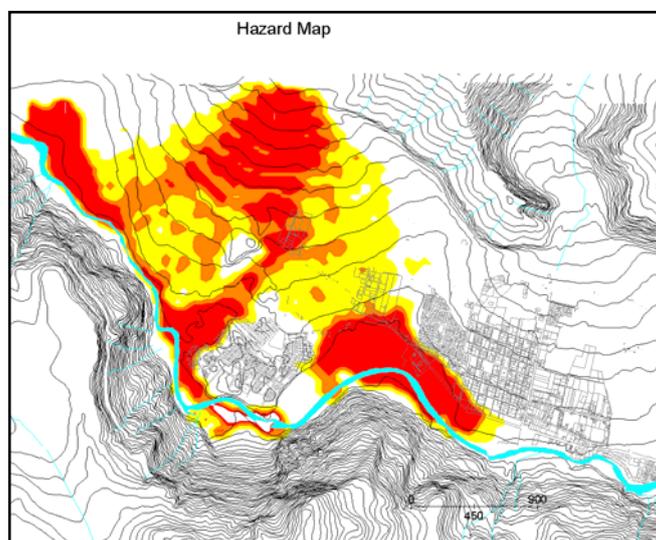
colorea cada grilla tomando en cuenta el comportamiento del fluido en cada elemento, como puede ser, su velocidad, altura, etc.



*Fig. 59. Peligros por aluvión.*

### 5.3.2.7. Mapa de peligros por aluvión en polígonos

Es el mismo mapa anterior, sólo que expresado en polígonos, esta ya es una terminación más fina, en la cual las grillas con las mismas características se encierran en un polígono (Fig. 60).



*Fig. 60. Peligros por aluvión en polígonos.*

### 5.3.3. Quebrada Pumahuanca (TR = 50 años)

#### Salidas del programa FLO-2D Quebrada Pumahuanca ( $Q_{lp} = 420 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Flujo ( $\text{m}^3$ )	Agua ( $\text{m}^3$ )	Mezcla Agua Sedimento( $\text{m}^3$ )
Hidrograma de entrada (Inflow)	5 374 980.83	2 519 888.21
Almacenamiento dentro del área de análisis	123 092.18	130 932.17
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	410 521.86	432 446.52

El volumen total de la crecida simulada es de 3.08 millones de  $\text{m}^3$ , de los cuales 0.4 millones de  $\text{m}^3$  son agua y 2.68 millones de  $\text{m}^3$  corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de 4 561 600  $\text{m}^2$ .

Esta segunda animación se realizó para un caudal líquido de 420  $\text{m}^3/\text{s}$ , para un periodo de retorno de 50 años, los resultados se presentan a continuación.

La metodología es similar al seguido anteriormente, por lo que se presentará directamente los mapas.

#### 5.3.3.1. Elevación del terreno por grilla

Donde nos muestra como es el cambio de elevación del terreno, coloreado por tonos; coincidiendo con las cotas de las curvas topográficas (Fig. 61).

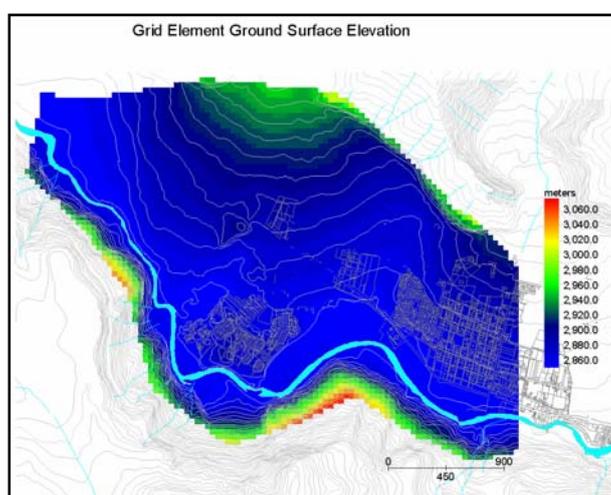


Fig. 61. Elevación del terreno por grilla.

#### 5.3.3.2. Máxima elevación del agua en el terreno

Mapa donde se ve que cotas o alturas del terreno fueron invadidas por el fluido (agua) y cuales no fueron afectadas (Fig. 62).

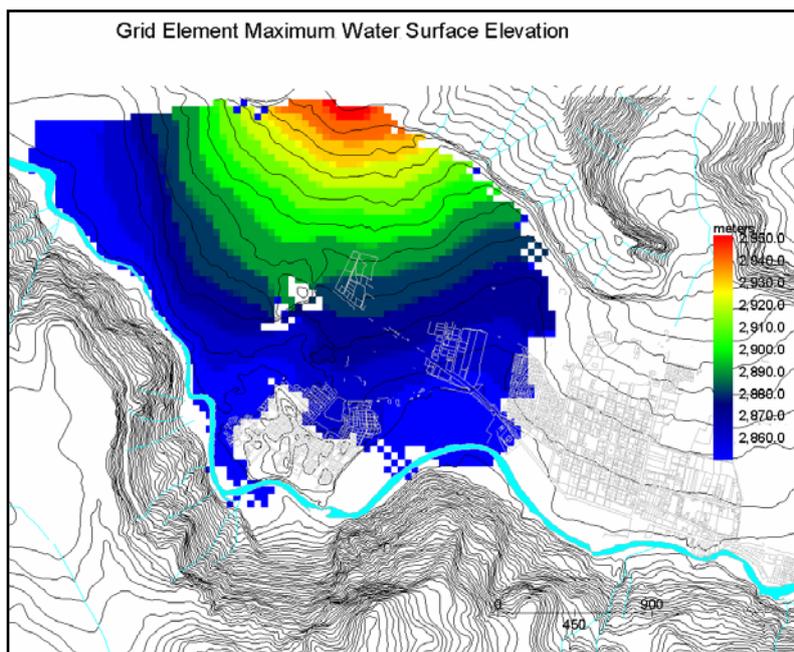


Fig. 62. Máxima elevación del agua en el terreno.

### 5.3.3.3. Profundidad máxima de flujo

Mediante escala de colores se muestra la altura tomada por el flujo en el terreno, la cual es un promedio de 0.396 m (Fig. 63).

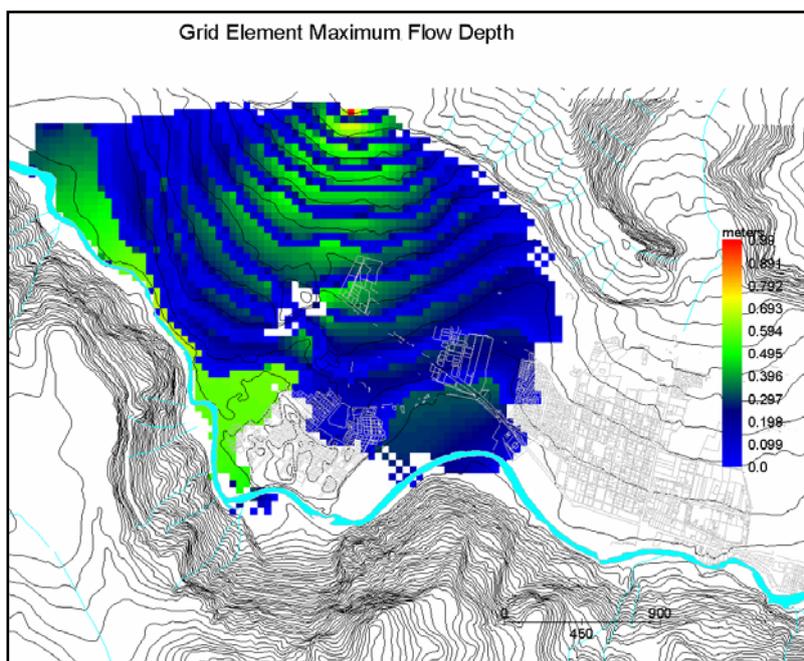


Fig. 63. Profundidad máxima de flujo.

### 5.3.3.4. Máxima velocidad del flujo

Mapa donde nos muestra las velocidades máximas del flujo en el terreno, siendo en promedio 1.00 m/s (Fig. 64).

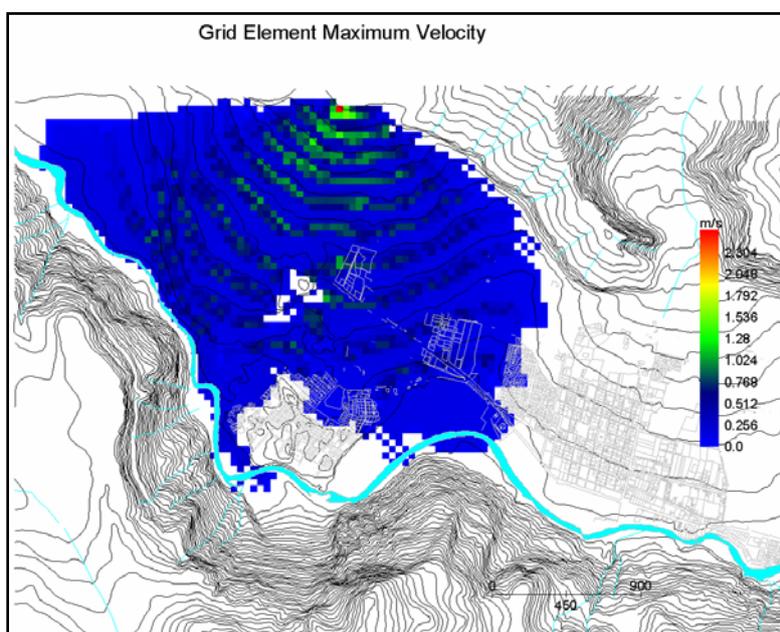


Fig. 64. Máxima velocidad del flujo.

### 5.3.3.5. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores

En este mapa se ve los vectores preferenciales de movimiento del flujo, estos varían por muchos factores, uno de los más importantes son las calles y paredes que “canalizan” el flujo. En este caso, no existen grandes obras de contención o construcciones, por lo que el flujo toma una dirección y velocidad de acuerdo a la topografía (Fig. 65).

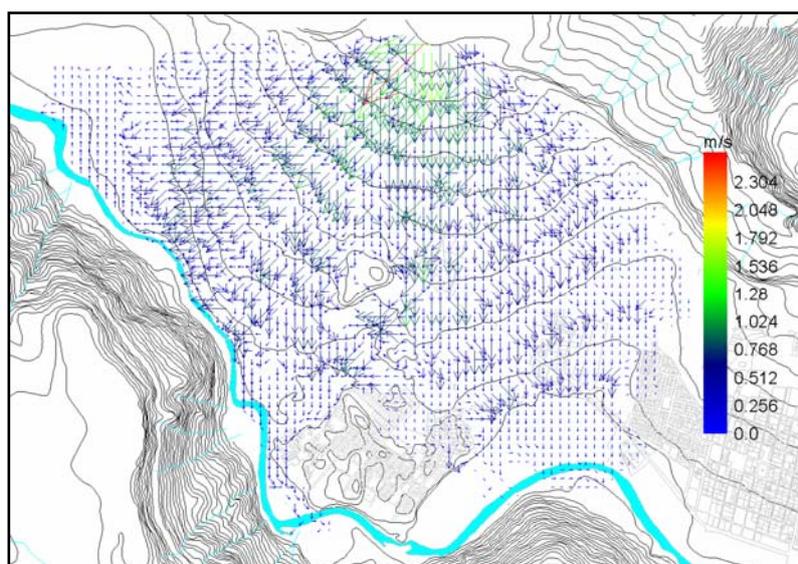
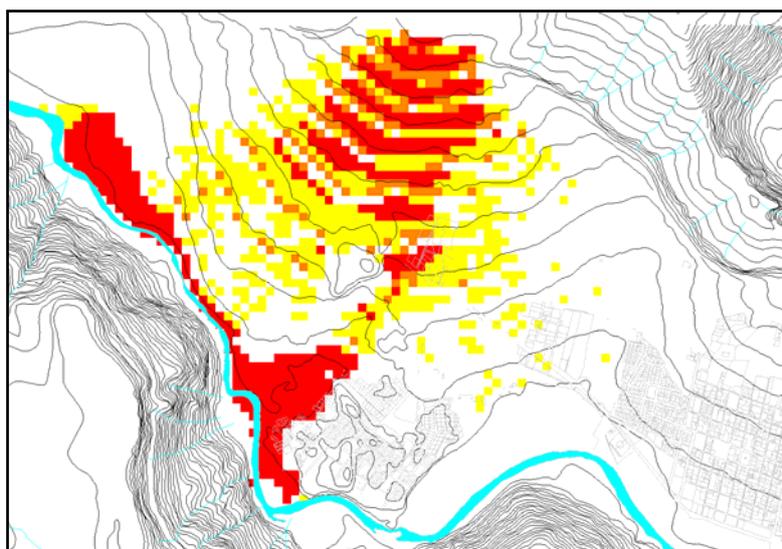


Fig. 65. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores.

### 5.3.3.6. Mapa de peligro por aluvión

El mapa de peligros por aluvión es un mapa de peligros digital, expresado por grilla, para un caudal de  $420 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se presenta este mapa por que con la coloración por elemento de grilla (cada grilla) se tiene una mejor visión de cómo se comportará un flujo en el terreno (Fig. 66).

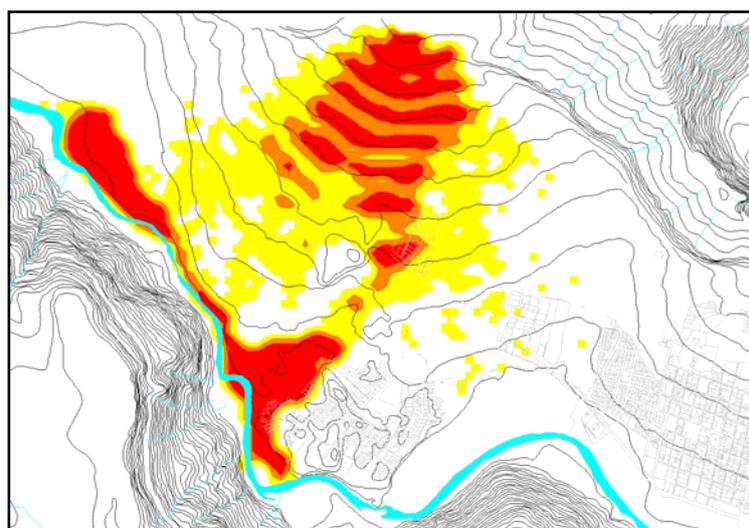
Este mapa es el resultado final de las simulaciones con el FLO 2D para la quebrada Pumahuanca con un hidrograma de tiempo de retorno de 50 años. El software colorea cada grilla tomando en cuenta el comportamiento del fluido en cada elemento, como puede ser, su velocidad, altura, etc.



*Fig. 66. Peligros por aluvión.*

### **5.3.3.7. Mapa de peligros por aluvión en polígonos**

El mismo mapa anterior, sólo que expresado en polígonos, esta ya una terminación más fina, en la cual las grillas con las mismas características se encierran en un polígono (Fig. 67).



*Fig. 67. Peligros por aluvión en polígonos.*

## 5.4. RESULTADOS PARA LA CIUDAD DE OLLANTAYTAMBO

### 5.4.1. Quebrada Patacancha (TR = 50 años)

Salidas del programa FLO-2D Quebrada Patacancha ( $Q_{lp}= 450 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Flujo ( $\text{m}^3$ )	Agua ( $\text{m}^3$ )	Mezcla Agua Sedimento( $\text{m}^3$ )
Hidrograma de entrada (Inflow)	330 664.03	386 203.43
Almacenamiento dentro del área de análisis	321 517.25	353 488.38
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	12 237.68	38 051.05

El volumen total de la creciente simulada es de 0.7 millones de  $\text{m}^3$ , de los cuales 0.3 millones de  $\text{m}^3$  son agua y 0.4 millones de  $\text{m}^3$  corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de  $28\,200 \text{ m}^2$ .

Esta animación se realizó para un caudal líquido de  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ , para un periodo de retorno de 50 años, los resultados se presentan a continuación:

#### 5.4.1.1. Elevación del terreno por grilla

Donde nos muestra como es el cambio de elevación del terreno, coloreado por tonos; coincidiendo con las cotas de las curvas topográficas (Fig. 68).

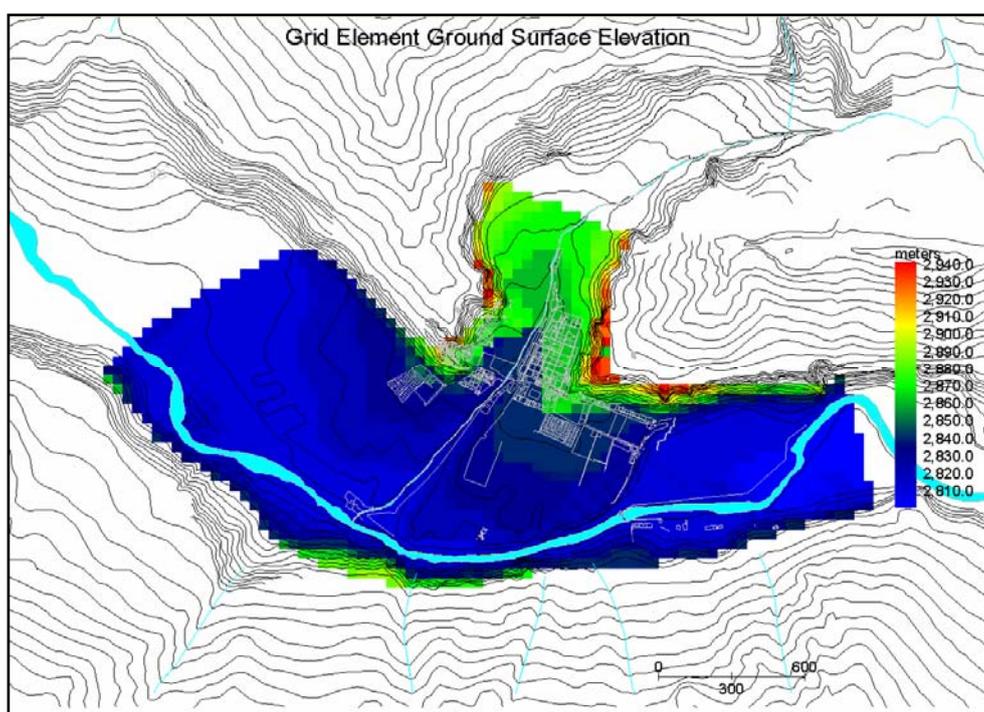


Fig. 68. Elevación del terreno por grilla.

#### 5.4.1.2. Máxima elevación del agua en el terreno

Mapa donde se ve que cotas o alturas del terreno fueron invadidas por el fluido (agua) y cuales no fueron afectadas (Fig. 69).

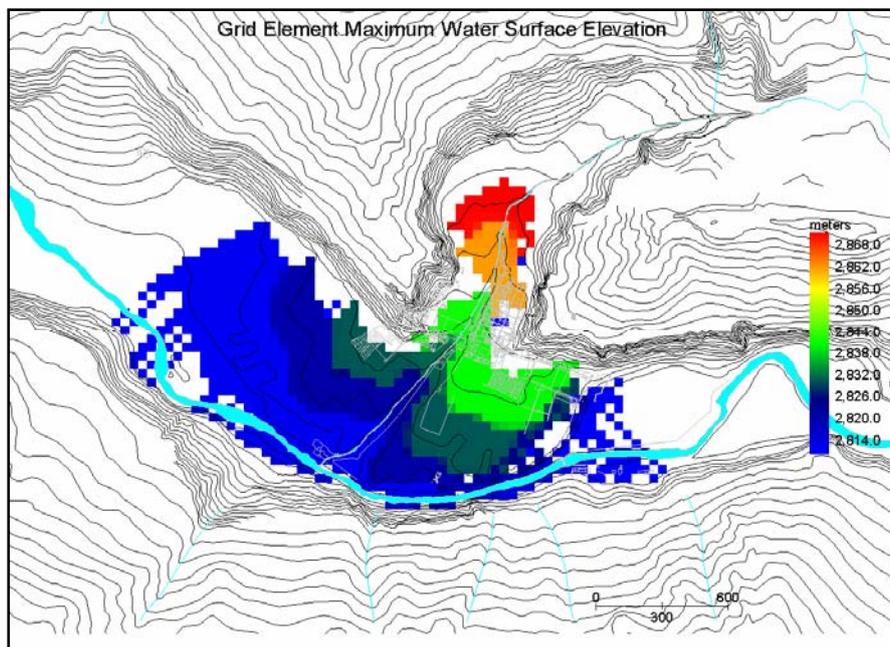


Fig. 69. Máxima elevación del agua en el terreno.

#### 5.4.1.3. Profundidad máxima de flujo

Mediante escala de colores se muestra la altura tomada por el flujo en el terreno, la cual es un promedio de 2.0 m (Fig. 70).

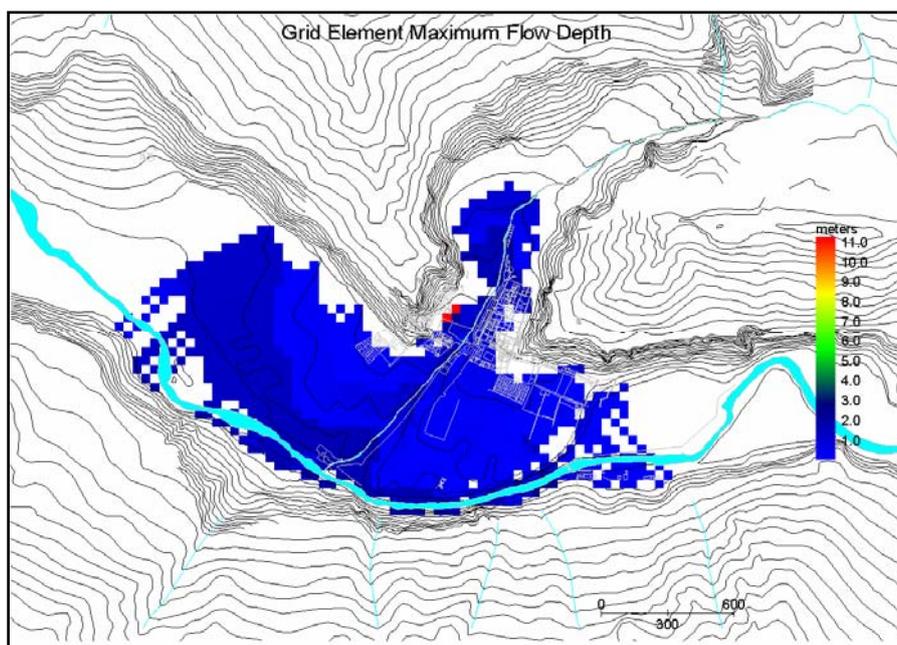


Fig. 70. Profundidad máxima de flujo.

#### 5.4.1.4. Máxima velocidad del flujo

Figura donde nos muestra las velocidades máximas del flujo en el terreno, siendo en promedio 4.00 m/s (Fig. 71).

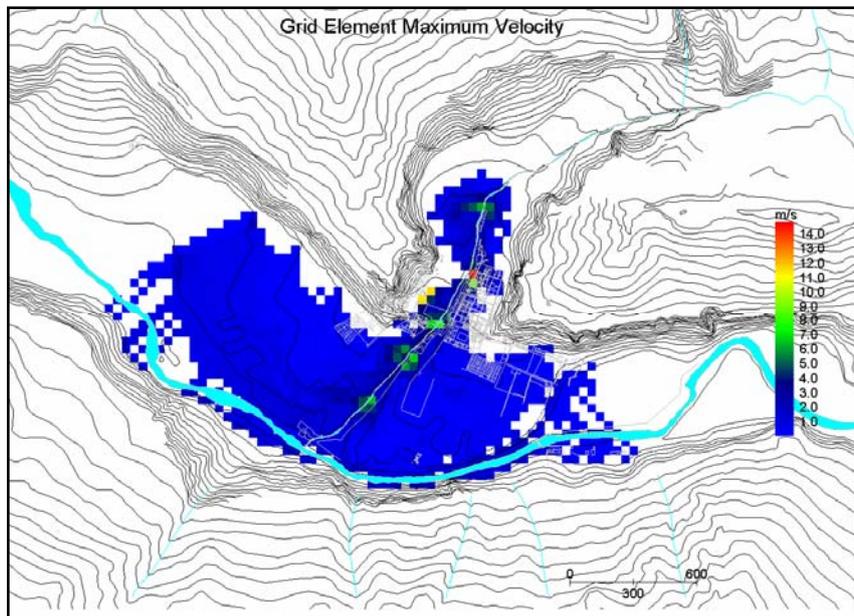


Fig. 71. Máxima velocidad del flujo.

#### 5.4.1.5. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores

En esta figura se ve los vectores preferenciales de movimiento del flujo, estos varían por muchos factores, uno de los mas importantes son las calles y paredes que “canalizan” el flujo. En este caso, no existen grandes obras de contención o construcciones, por lo que el flujo toma una dirección y velocidad de acuerdo a la topografía (Fig. 72).

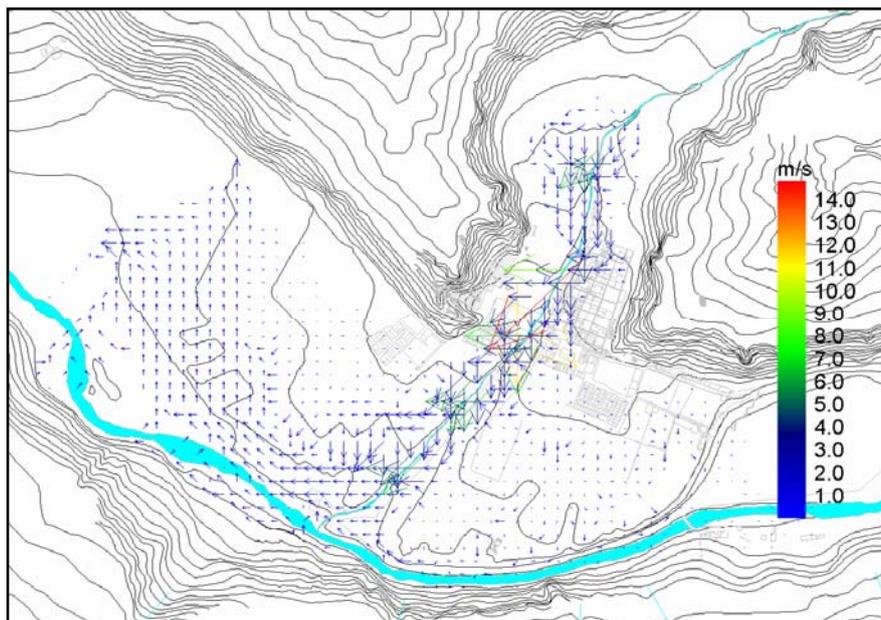
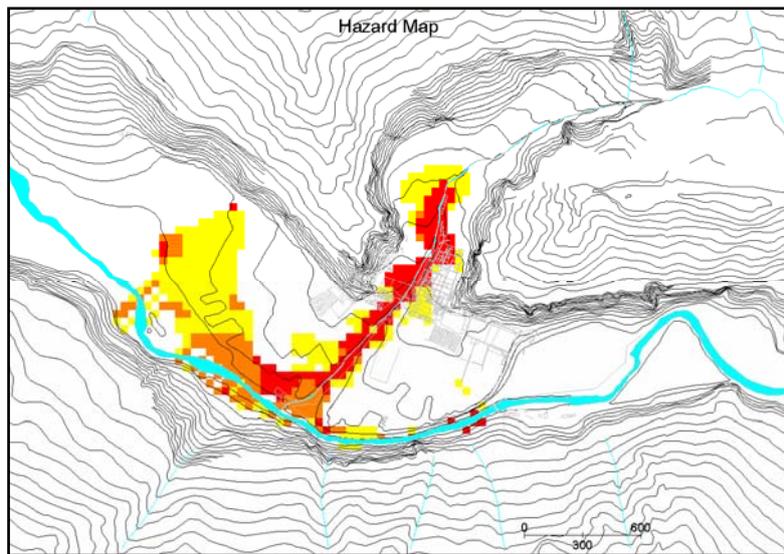


Fig. 72. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores.

#### 5.4.1.6. Mapa de peligros por aluvión

Mapa de peligros digital, expresado por grilla, para un caudal de  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ , se presenta este mapa por que con la coloración por elemento de grilla (cada grilla) se tiene una mejor visión de cómo se comportara un flujo en el terreno (Fig. 73).

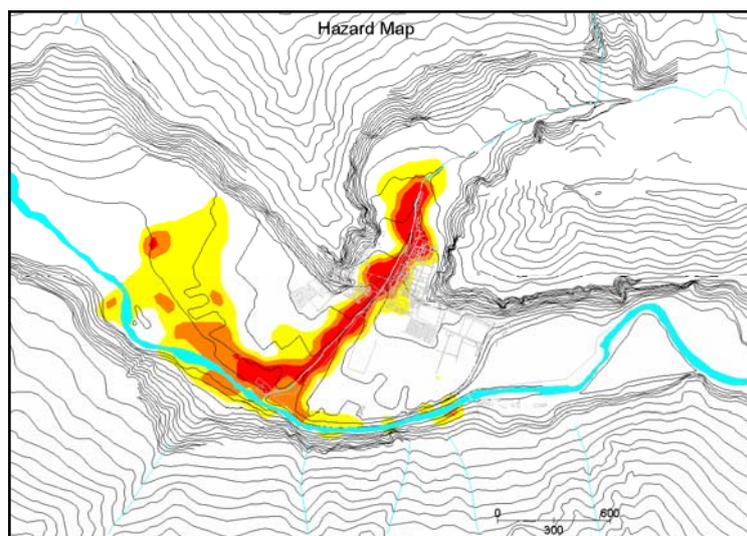
Este mapa es el resultado final de las simulaciones con el FLO 2D para la quebrada Patacancha con un hidrograma de tiempo de retorno de 100 años. El software colorea cada grilla tomando en cuenta el comportamiento del fluido en cada elemento, como puede ser, su velocidad, altura, etc.



*Fig. 73. Peligros por aluvión.*

#### **5.4.1.7. Mapa de peligros por aluvión en polígonos**

El mismo mapa anterior, sólo que expresado en polígonos, esta ya es una terminación más fina, en la cual las grillas con las mismas características se encierran en un polígono (Fig. 74).



*Fig. 74. Peligros por aluvión en polígonos.*

#### **5.4.2. Quebrada Patacancha (TR = 100 años)**

### Salidas del programa FLO-2D Quebrada Patacancha ( $Q_{lp}= 850 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Flujo ( $\text{m}^3$ )	Agua ( $\text{m}^3$ )	Mezcla Agua Sedimento( $\text{m}^3$ )
Hidrograma de entrada (Inflow)	701 007.75	822 613.32
Almacenamiento dentro del área de análisis	675 186.23	742 325.60
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	25 821.51	80 287.72

El volumen total de la creciente simulada es de 1.6 millones de  $\text{m}^3$ , de los cuales 0.8 millones de  $\text{m}^3$  son agua y 0.8 millones de  $\text{m}^3$  corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de  $67\,200\text{m}^2$ .

Esta animación se realizó para un caudal líquido de  $850 \text{ m}^3/\text{s}$ , para un periodo de retorno de 100 años, los resultados se presentan a continuación:

#### 5.4.2.1. Elevación del terreno por grilla

Donde nos muestra como es el cambio de elevación del terreno, coloreado por tonos; coincidiendo con las cotas de las curvas topográficas (Fig. 75).

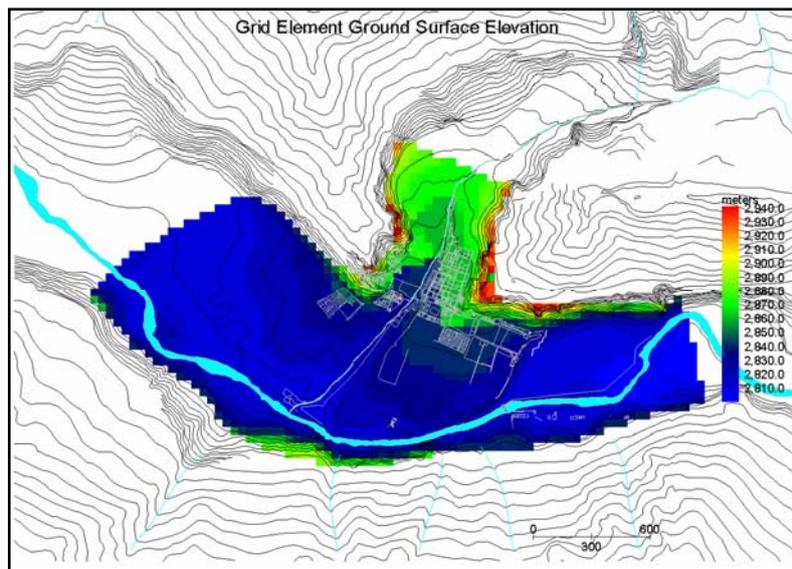


Fig. 75. Elevación del terreno por grilla.

#### 5.4.2.2. Máxima elevación del agua en el terreno

Figura donde se ve que cotas o alturas del terreno fueron invadidas por el fluido (agua) y cuales no fueron afectadas (Fig. 76).

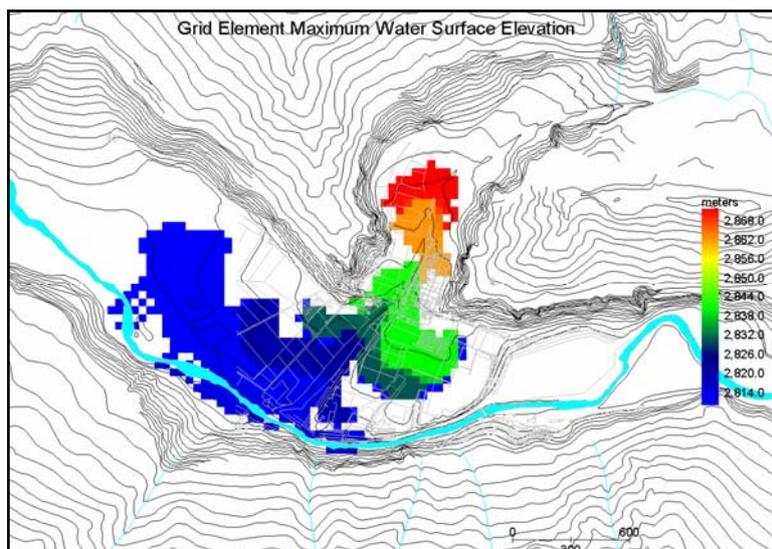


Fig. 76. Máxima elevación del agua en el terreno.

### 5.4.2.3. Profundidad máxima de flujo

Mediante escala de colores se muestra la altura tomada por el flujo en el terreno, la cual es un promedio de 2.5 m (Fig. 77).

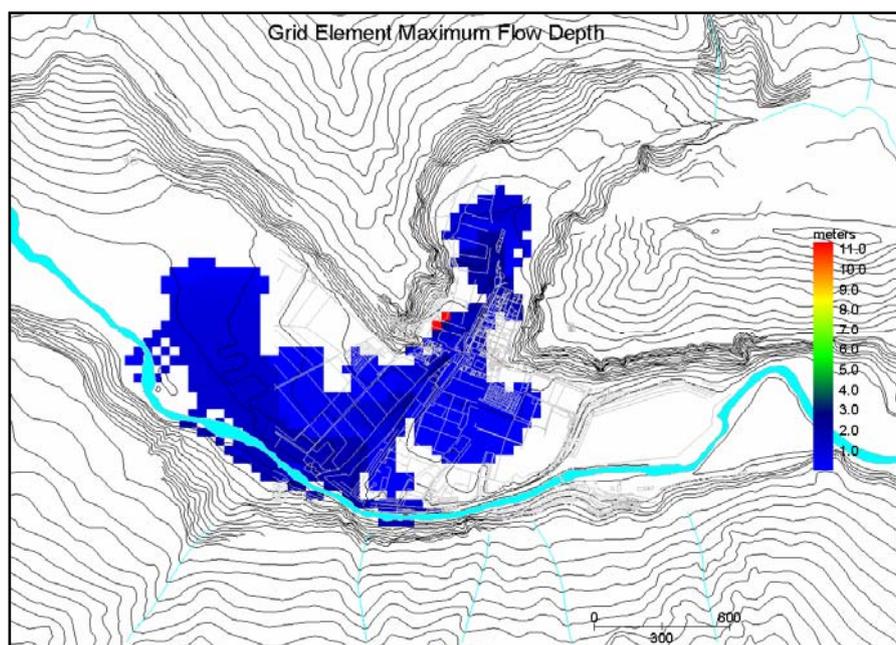


Fig. 77. Profundidad máxima de flujo.

### 5.4.2.4. Máxima velocidad del flujo

Figura donde nos muestra las velocidades máximas del flujo en el terreno, siendo en promedio 4.00 m/s (Fig. 78).

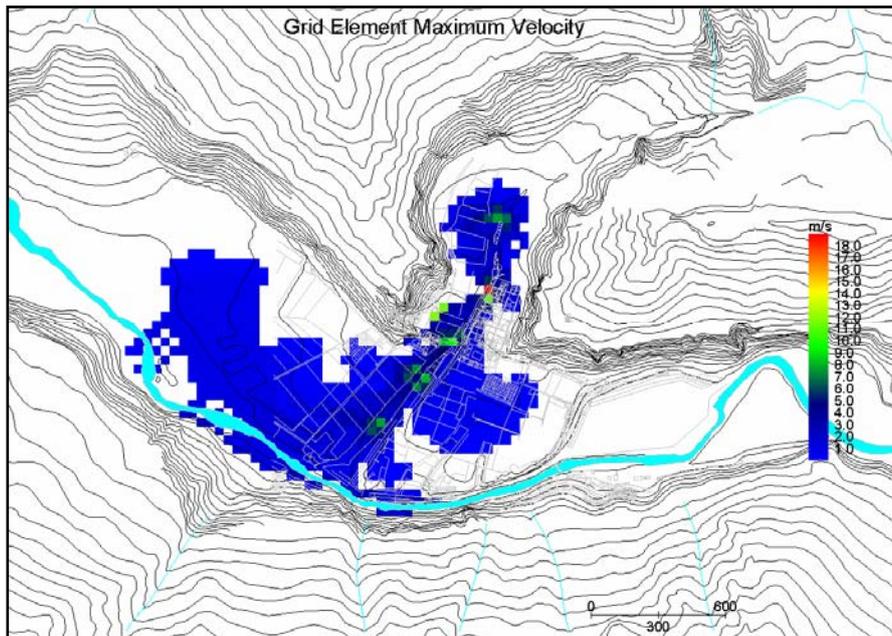


Fig. 78. Máxima velocidad del flujo.

#### 5.4.2.5. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores

En esta figura se ven los vectores preferenciales de movimiento del flujo, estos varían por muchos factores, uno de los más importantes son las calles y paredes que “canalizan” el flujo. En este caso, no existen grandes obras de contención o construcciones, por lo que el flujo toma una dirección y velocidad de acuerdo a la topografía (Fig. 79).

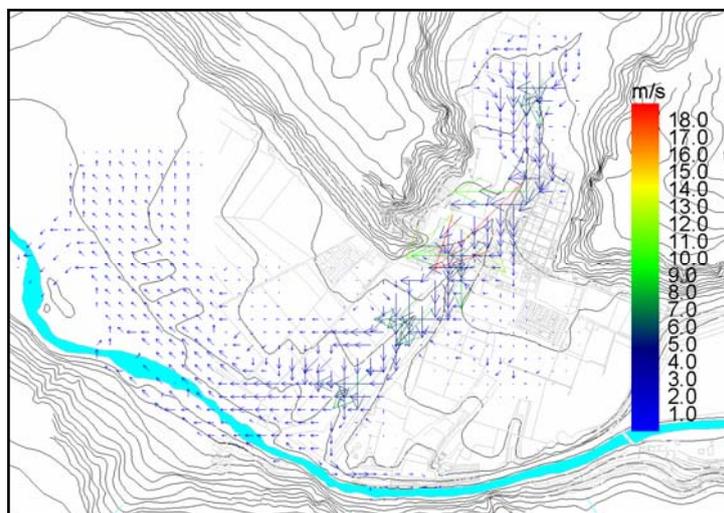
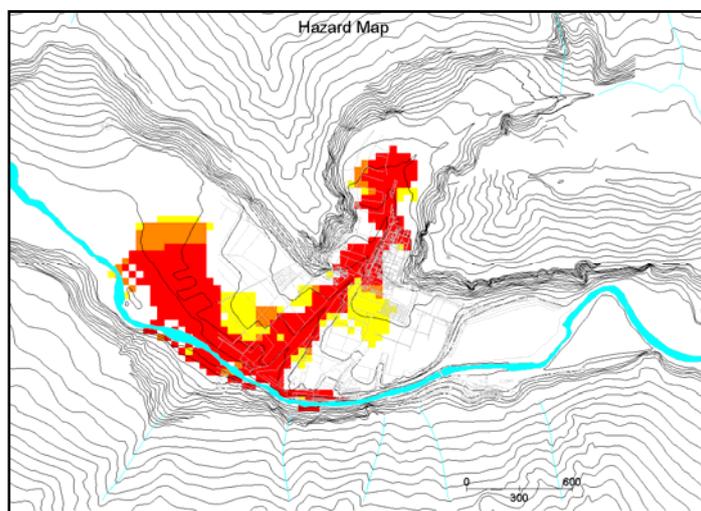


Fig. 79. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores.

#### 5.4.2.6. Mapa de peligros por aluvión

Mapa de peligros digital, expresado por grilla, para un caudal de 850 m<sup>3</sup>/s, se presenta este mapa por que con la coloración por elemento de grilla (cada grilla), se tiene una mejor visión de cómo se comportara un flujo en el terreno (Fig. 80).

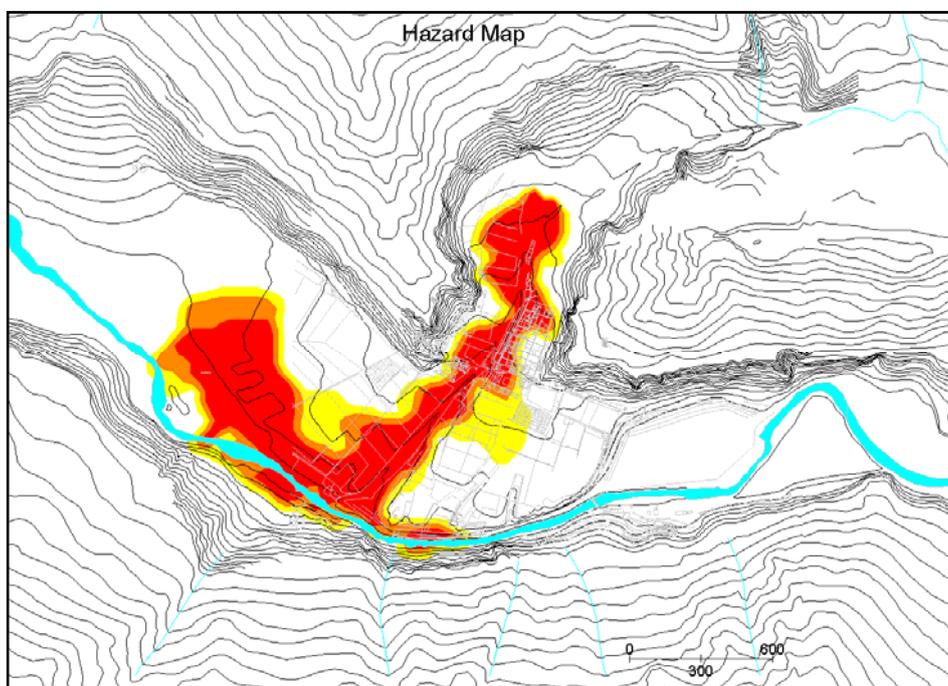
Este mapa es el resultado final de las simulaciones con el FLO 2D para la quebrada Patacancha con un hidrograma de tiempo de retorno de 50 años. El software colorea cada grilla tomando en cuenta el comportamiento del fluido en cada elemento, como puede ser, su velocidad, altura, etc.



*Fig. 80. Peligros por aluvión.*

#### **5.4.2.7. Mapa de peligros por aluvión en polígonos**

El mismo mapa anterior, sólo que expresado en polígonos, esta ya una terminación más fina, en la cual las grillas con las mismas características se encierran en un polígono (Fig. 81).



*Fig. 81. Peligros por aluvión en polígonos.*

**CAPÍTULO VI**  
**ZONIFICACIÓN DE PELIGROS**

## **6.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo, se realiza la comparación de los mapas de peligros digitales realizados con el FLO 2D con mapas de peligros hechos con parámetros geológicos para el proyecto de Ciudades Sostenibles (Carlotto et al., 2005).

Se muestra tanto las similitudes como las diferencias entre ambos mapas, dando una explicación lógica para cada una de ellas.

## **6.2. MAPAS DE PELIGROS GENERADOS PARA EL PROYECTO CIUDADES SOSTENIBLES**

Estos mapas fueron elaborados para el proyecto de Ciudades Sostenibles en el año 2004 por Carlotto et al. (2005). Los Mapas de peligros geológico climático consideran los aspectos geológicos y de geodinámica externa de los tributarios o subcuencas donde están situadas las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, es decir los deslizamientos, derrumbes, cárcavas, los que pueden provocar a su vez represamientos y posterior desembalse y afectar las ciudades. Estos fenómenos son a veces activados o están acompañados por las máximas avenidas pluviales; por lo tanto, le se le ha denominado peligros geológico-climáticos y se ha realizado una zonificación para posibles aluviones que puedan afectar cada ciudad. (Figuras 82 y 83)

Estos mapas están zonificados en tres zonas las cuales son:

### **6.2.1. Zona de peligro muy alto**

Son las zonas donde los efectos del aluvión son tan grandes que las construcciones efectuadas por el hombre no las pueden resistir.

De ocurrir este fenómeno las pérdidas llegan al 100 %, ya que en los cortes de terreno se observa que han sufrido varios aluviones a lo largo de la historia.

El costo de reducir los daños es tan alto que la relación costo-beneficio hace impracticable su uso para fines urbanos.

### **6.2.2. Zona de peligro alto**

La amenaza por aluvión es alta, pero se pueden tomar medidas efectivas de reducción de daños a costos aceptables.

La zona no ha sido afectada por aluviones antiguos hace mucho tiempo y en los cortes de terreno se observa que no han sufrido muchos aluviones a lo largo de la historia.

### **6.2.3. Zona de peligro medio**

La amenaza natural por aluvión es moderada.

Principalmente son áreas cercanas al cauce principal de un aluvión y zonas con suelos cuya capacidad de carga son regulares a malas.

#### **6.2.4. Zona de peligro medio a bajo**

Son aquellas zonas que son pocos o nada propensas a inundaciones y aluviones.

### **6.3. MAPAS DE PELIGROS GENERADOS CON EL FLO 2D Y SU INTERPRETACIÓN**

Este es un mapa que el software modela recolectando y procesando varios datos como son los de topografía, rugosidad del terreno, grado de retención de fluidos, altura del flujo simulado, velocidad del flujo simulado.

El software colorea cada grilla según el comportamiento que ha tenido el flujo dentro de ella, según su altura, velocidad, densidad, etc. Los colores están estandarizados y son utilizados por norma en todo el mundo.

De acuerdo a los colores obtenidos en el capítulo anterior, se ha realizado la zonificación por peligro de aluviones para las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo y se ha generado 5 mapas de peligros para ambas ciudades.

Para la ciudad de Urubamba se tiene el mapa de peligros de la quebrada de Chicón, con una simulación para 100 años de periodo de retorno (Fig. 53). Las figuras 60 y 67 son de la quebrada de Pumahuanca para periodos de retorno de 50 y 100 años respectivamente.

Además, para la ciudad de Urubamba se ha generado un mapa de peligros combinado para ambas quebradas, para un periodo de retorno de 100 años (Fig. 84).

Para la ciudad de Ollantaytambo se han generado las figuras 74 y 81, es decir corresponde a la quebrada Patacancha, con periodos de retorno de 50 y 100 años respectivamente.

Estos mapas de peligros presentan cuatro coloraciones en relación al grado de peligrosidad, siendo las siguientes.

#### **6.3.1. Zona de peligro muy alto**

Zona coloreada de color rojo, en la cual un flujo con las características simuladas tomaría mayor altura, mayor velocidad de desplazamiento, y otras condiciones. En las zonas marcadas con este color, los daños serían totales, las viviendas y terrenos de cultivos serían destruidos. Estas zonas están dispersas por que no en todos los puntos del terreno el fluido se va a comportar con las mismas características. Corresponden generalmente a las desembocaduras de las quebradas, cauces principales de los ríos y zonas con una pendiente hacia el valle principal fuerte. También el programa considera de peligro muy alto, a las zonas donde se generaría un represamiento, un cierre de valle, etc. A estas zonas el flujo llegaría inmediatamente, vale decir casi sin tiempo de alerta.

### **6.3.2. Zona de peligro alto a medio**

Zona coloreada de color naranja, en la cual el flujo no tuvo características tan complejas como las anteriores. Por ejemplo, la velocidad del flujo pudo haber sido alta pero la rugosidad del terreno o la topografía lo detuvieron, o se canalizó parcialmente, etc. Los daños en estas zonas serían considerables, habría viviendas afectadas, vías de comunicación interrumpidas, etc. Se ubica generalmente bordeando a las zonas de color rojo, es decir las zonas de peligro muy alto. La diferencia de daños radicaría en que las zonas afectadas serían de cierta manera recuperables o también por que el flujo llegaría con retraso, lo que favorecería una eventual evacuación de pobladores.

### **6.3.3. Zona de peligro medio a bajo**

Zona coloreada de color amarillo, donde el flujo no alcanzó más que unos centímetros de altura, los daños materiales serían mínimos o nulos, generalmente se encuentra en la periferia de los conos aluviales.

### **6.3.4. Zona de peligro bajo**

Zona no coloreada, que tiene el color blanco. Esta zona es donde no llegó el flujo, ya sea por factores naturales o por obras de contención, estas zonas serían las más indicadas para ser usadas en caso de evacuación rápida, o para ser almacenes de alimento, medicinas, maquinaria para una posible rehabilitación de vías, etc.

## **6.4. COMPARACIÓN DE MAPAS DE PELIGROS**

A continuación se presenta la comparación del mapa de peligros digital generado con el software FLO 2D con el mapa de peligros geológicos-climáticos del estudio de Ciudades Sostenibles (Carlotto et al., 2005) para las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo.

Se muestran las similitudes entre los mapas, y también las diferencias, dándole una explicación para cada una de ellas.

### **6.4.1. Ciudad de Urubamba**

Se realizó la comparación visual de los mapas de peligros de las quebradas de Chicón y Pumahuanca, teniendo los siguientes resultados.

#### **6.4.1.1. Quebrada Chicón**

##### *A. Similitudes*

A.1. Comparación 1: En ambos mapas el flujo colma todo el cauce de la quebrada Chicón (Fig. 85).

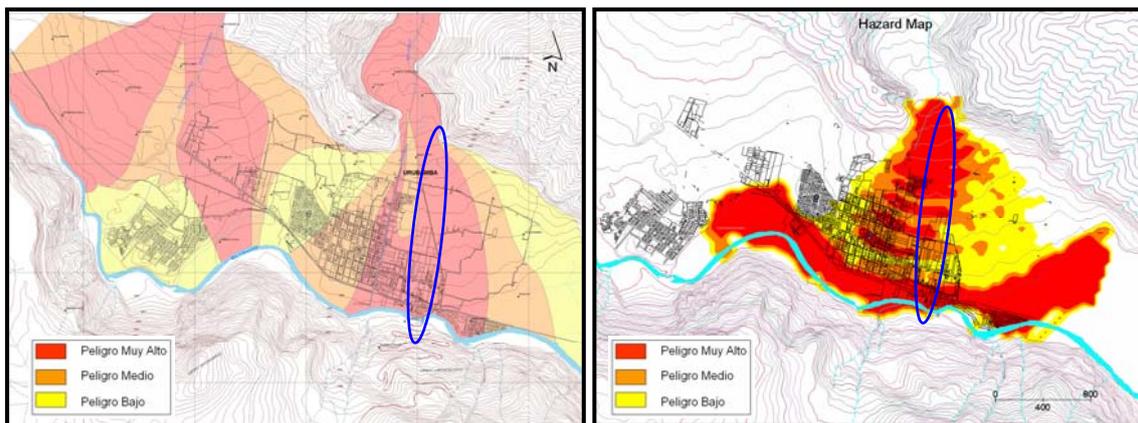


Fig. 85. Comparación 1 - quebrada Chicón.

A.2. Comparación 2: En ambos mapas, las zonas externas o la periferia del cono aluvial son menos peligrosas (Fig. 86).

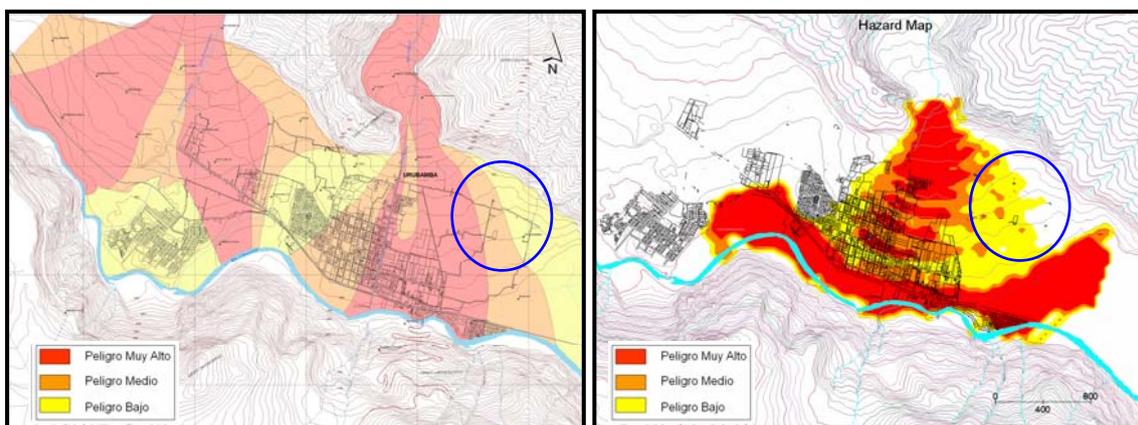


Fig. 86. Comparación 2 - quebrada Chicón.

A.3. Comparación 3: En ambos mapas la zona Este de la ciudad de Urubamba sería gravemente afectada por un aluvión (Fig. 87).

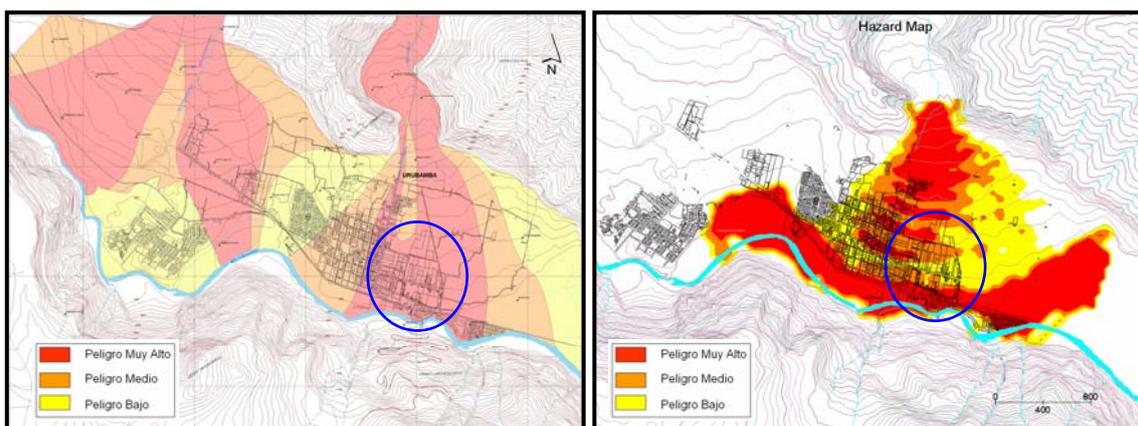
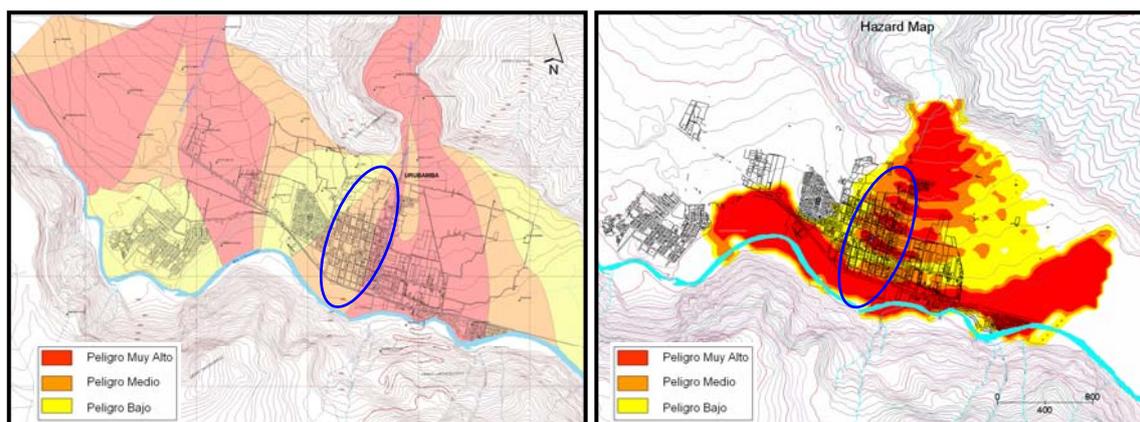


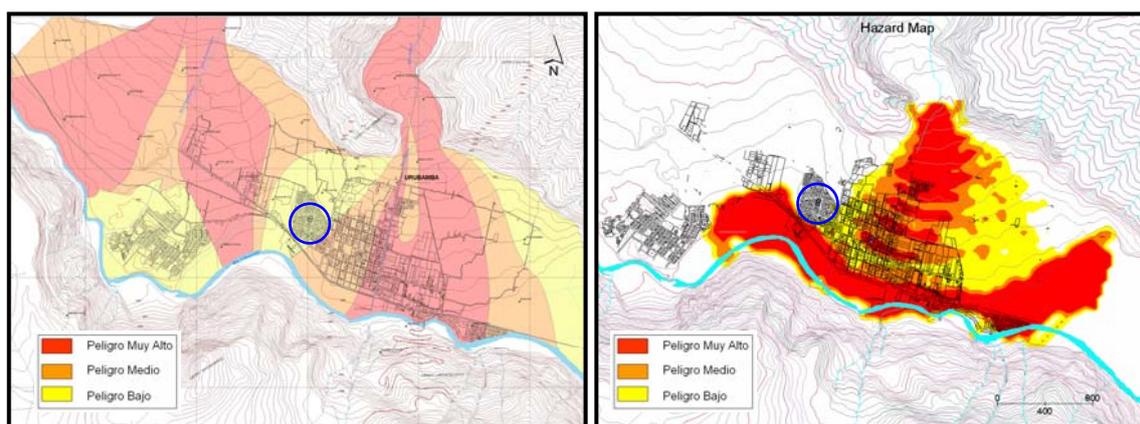
Fig. 87. Comparación 3 - quebrada Chicón.

**A.4. Comparación 4:** La zona céntrica de la ciudad de Urubamba sería afectada moderadamente por un aluvión (Fig. 88).



*Fig. 88. Comparación 4 - quebrada Chicón.*

**A.5. Comparación 5:** La plaza central de la zona de Patahuasi y sus alrededores no sufrirán daños considerables, por lo que podría ser considerada como zona de evacuación primaria (Fig. 89).



*Fig. 89. Comparación 5 - quebrada Chicón.*

**A.6. Comparación 6:** La magnitud de los daños en las vías de comunicación son similares en ambos mapas, tanto en las vías internas dentro de la ciudad como la de la pista principal que comunica la ciudad de Urubamba con la ciudad del Cusco.

## *B. Diferencias*

**B.1. Comparación 7:** El mapa de peligros digital (MPD) muestra una orientación preferencial del flujo de SSW, mientras que el mapa de peligros geológico (MPG) muestra una orientación preferencial de flujo con dirección SSE (Fig. 90). Esto debido a que el software de modelación es muy sensible a los cambios de topografía, mientras que para la elaboración del MPG que estudia eventos antiguos, está condicionado a una topografía cambiante a través del tiempo.

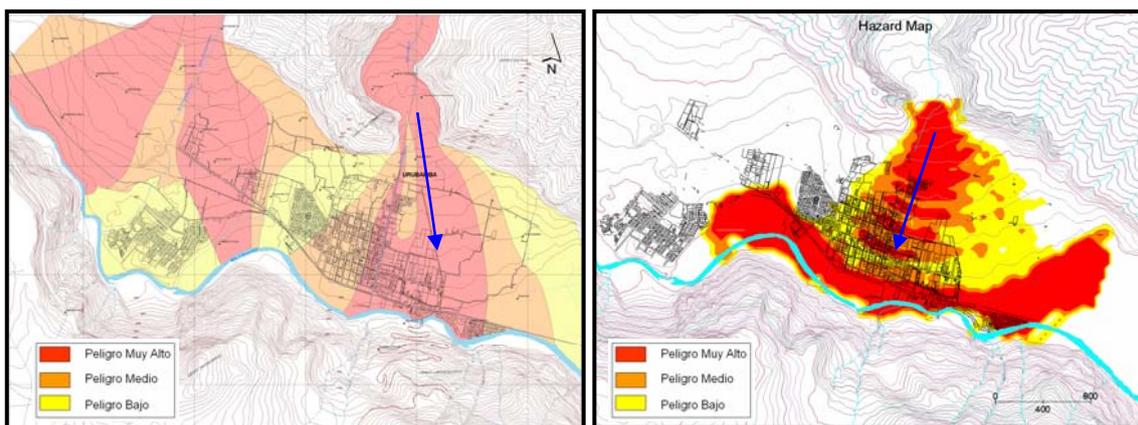


Fig. 90. Comparación 7 - Quebrada Chicón.

**B.2. Comparación 8:** El MPG muestra en la margen derecha de la quebrada Chicón una pequeña zona donde el grado de peligro cambia, mientras que el MPD, no lo muestra (Fig. 91). Esto se debe a que el flujo simulado fue de un caudal mayor, el cual sobrepasó ese pequeño cambio de altura del terreno y lo cubrió con material aluviónico.

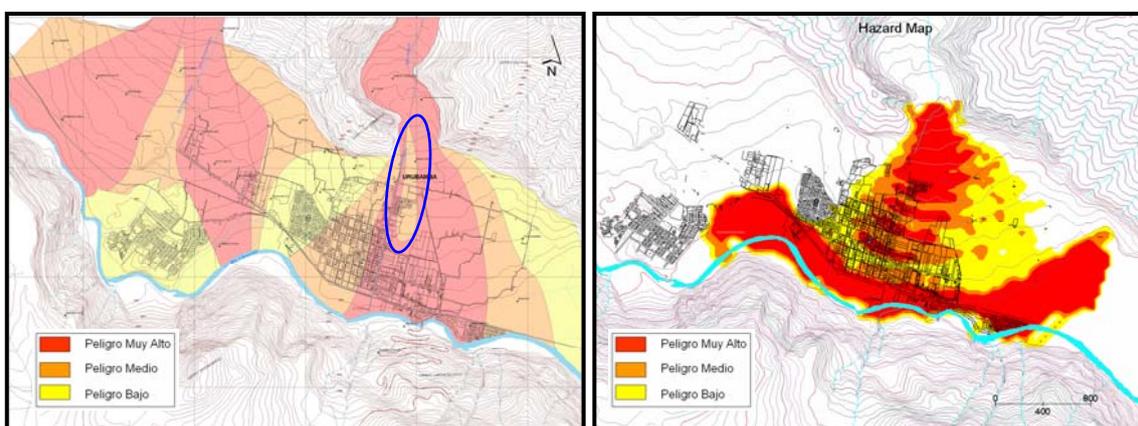


Fig. 91. Comparación 8 - quebrada Chicón.

**B.3. Comparación 9:** En el MPG la zona del estadio de Urubamba está comprendida en una zona de peligro bajo, mientras que en el MPD es considerado de peligro muy alto (Fig. 92). Esta diferencia es debido a que el software FLO 2D considera también el caudal del río Vilcanota y los posibles represamientos que se podrían generar.

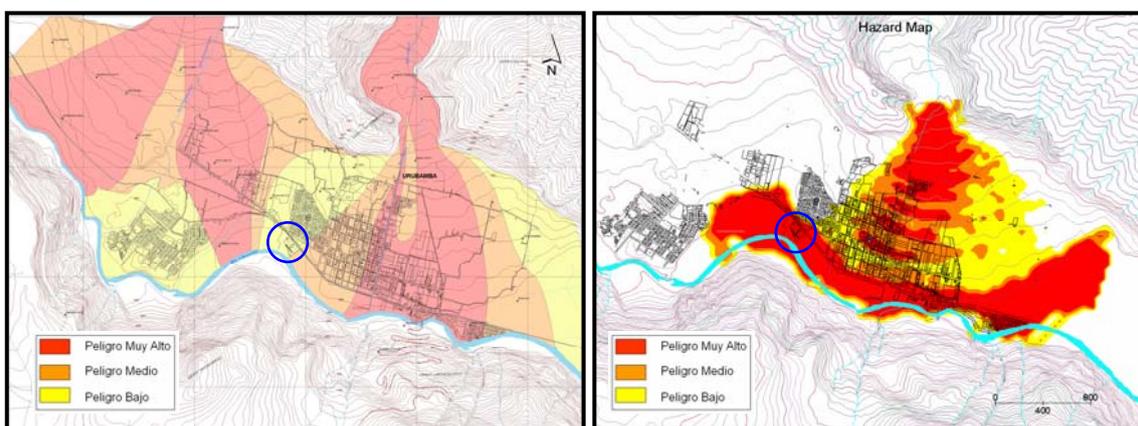


Fig. 92. Comparación 9 - Quebrada Chicón.

**B.4. Comparación 10:** En el MPD se aprecia que la zona donde el río Vilcanota cambia de dirección está identificada como de peligro muy alto; mientras que, en el MPG no es así (Fig. 93). Esto se debe a que el software considera el material aluvionico desplazado por el río Vilcanota, y está sería la zona lógica de acumulación, dado que el río Vilcanota gira considerablemente su dirección.

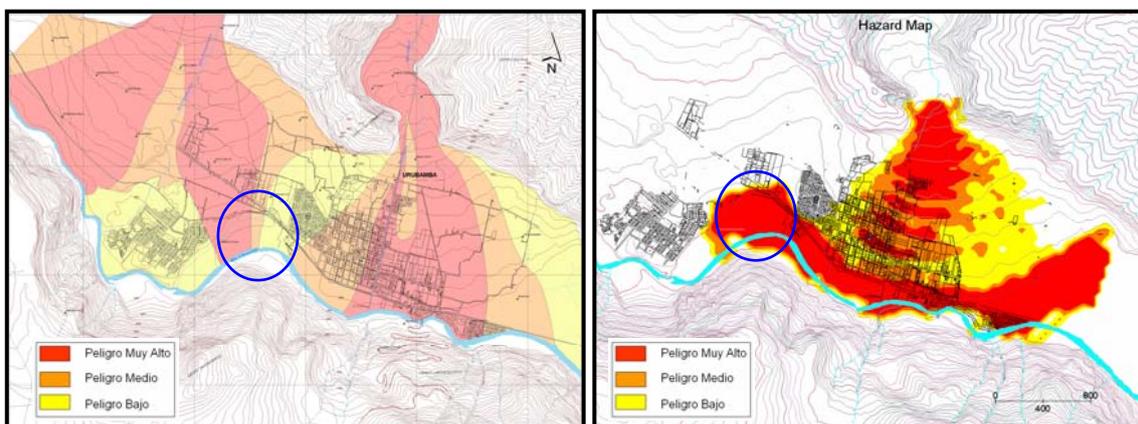


Fig. 93. Comparación 10 - quebrada Chicón.

#### 6.4.1.2. Quebrada Pumahuanca:

##### A. Similitudes

**A.1 Comparación 11:** La mayor cantidad del flujo tiene una dirección SSW en ambos mapas, esto debido a la topografía de la zona (Fig. 94).

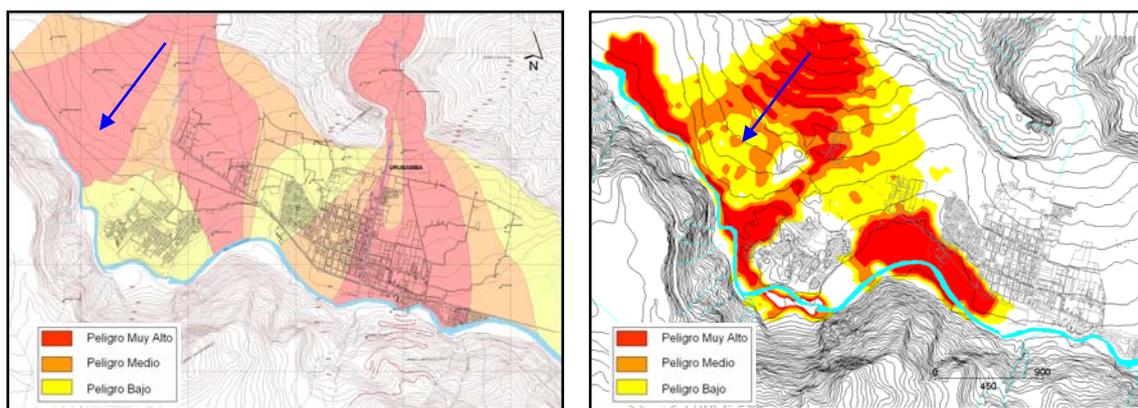


Fig. 94. Comparación 11 - quebrada Pumahuanca.

**A.2 Comparación 12:** La Zona indicada en la figura 95, es afectada seriamente por un aluvión.

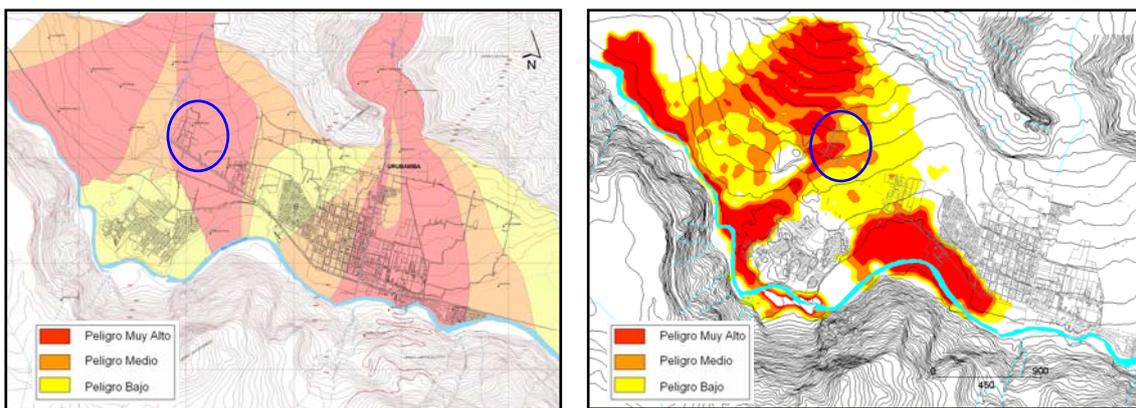


Fig. 95. Comparación 12 - quebrada Pumahuanca.

A.3 Comparación 13: Un morro producto de deslizamientos antiguos, es una zona segura en ambos mapas, incluso para un aluvión de caudales mayores (Fig. 96).

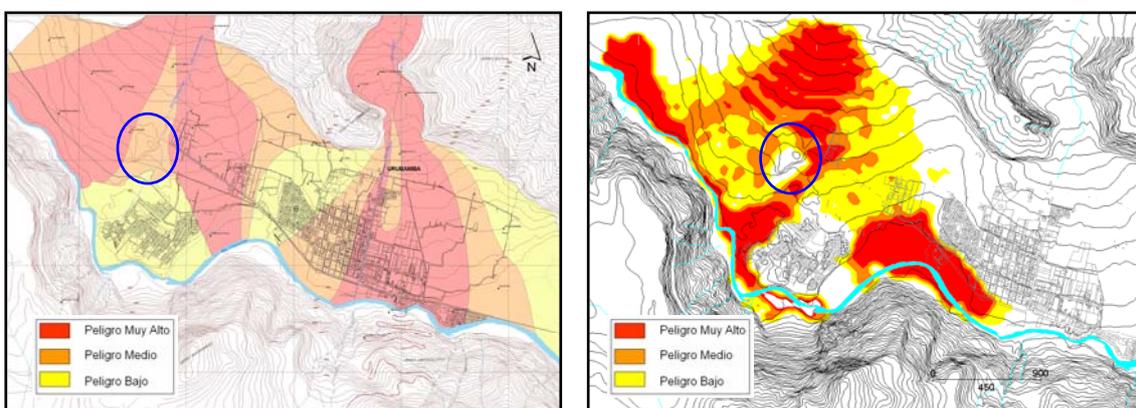


Fig. 96. Comparación 13 - quebrada Pumahuanca.

A.4 Comparación 14: Viviendas de la zona baja son relativamente seguras o poco afectadas en ambos casos (Fig. 97).

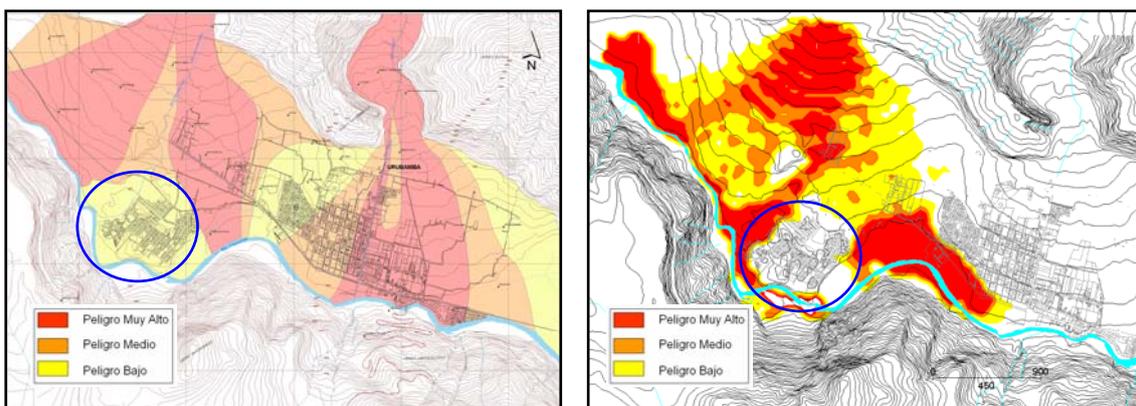


Fig. 97. Comparación 14 - quebrada Pumahuanca.

A.5 Comparación 15: Los terrenos de cultivo y viviendas del extremo Oeste serían seriamente afectados (Fig. 98).

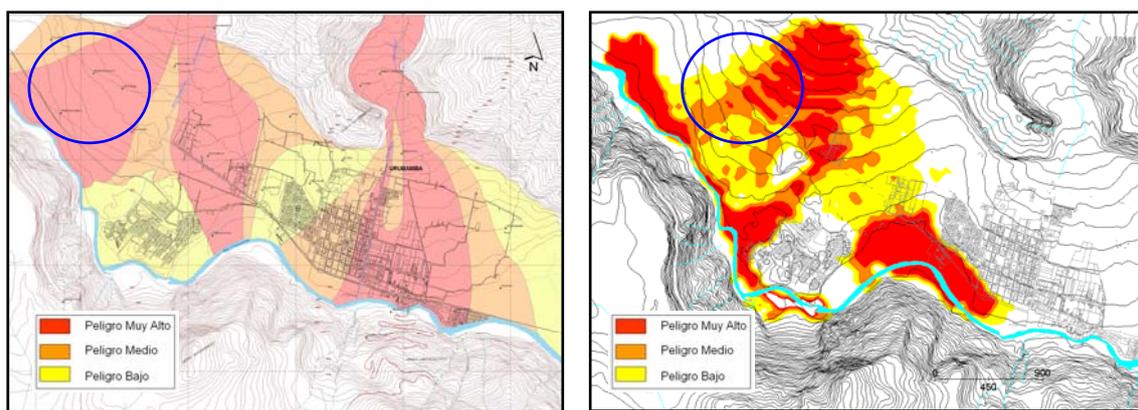


Fig. 98. Comparación 15 - Quebrada Pumahuanca.

### B. Diferencias

**B.1. Comparación 16:** El MPG muestra una zona de menor peligro en la parte central del cono aluvial, el MPD no lo muestra (Fig. 99). Esto es debido a que esta zona de peligro medio fue determinada mediante fotointerpretación y cartografía, por lo que este flujo pudo haberse emplazado cuando la topografía era diferente a la actual. En cambio, nuestro flujo simulado se deposita sobre éste, por que primero tiene un caudal que supera el relieve actual del terreno y además por el principio de superposición de depósitos, un aluvión más joven tiene que cubrir a otro más antiguo depositado en el mismo lugar.

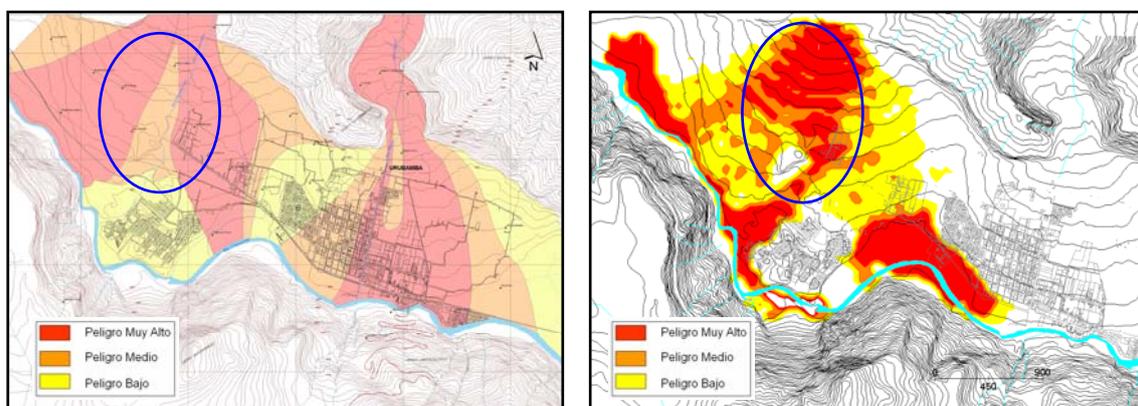


Fig. 99. Comparación 16 - quebrada Pumahuanca.

### 6.4.2. Ciudad de Ollantaytambo

En la simulación realizada para la ciudad de Ollantaytambo se puede apreciar las más grandes similitudes del trabajo, puesto que las diferencias entre el MPD y el MPG son mínimas.

### 6.4.2.1 Quebrada Patacancha

#### A. Similitudes

A.1. Comparación 17: El flujo se canaliza perfectamente por el cauce del río y las zonas de desborde en la parte baja de la quebrada Patacancha son casi las mismas (Fig. 100).

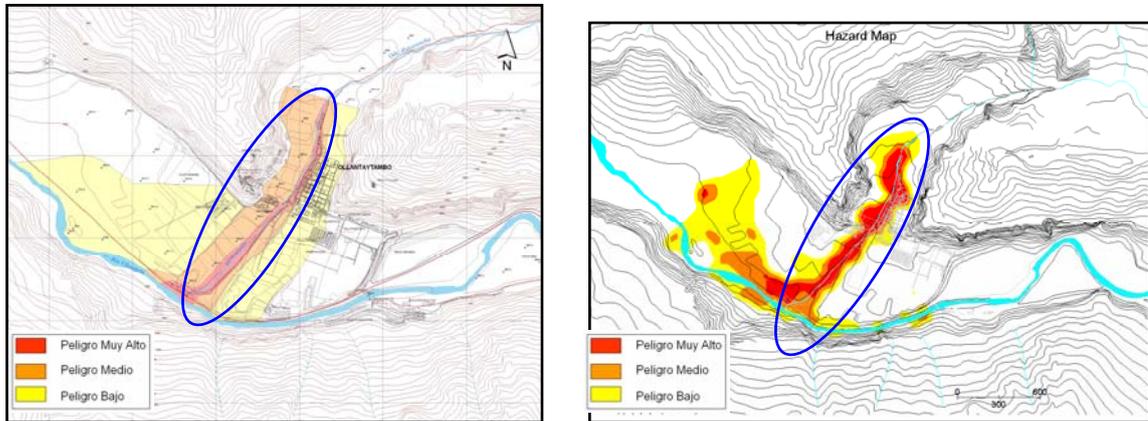


Fig. 100. Comparación 17 - quebrada Patacancha.

A.2. Comparación 18: Las áreas de mayor y menor peligro son muy similares, con los MPD con TR de 50 y 100años (Fig. 101).

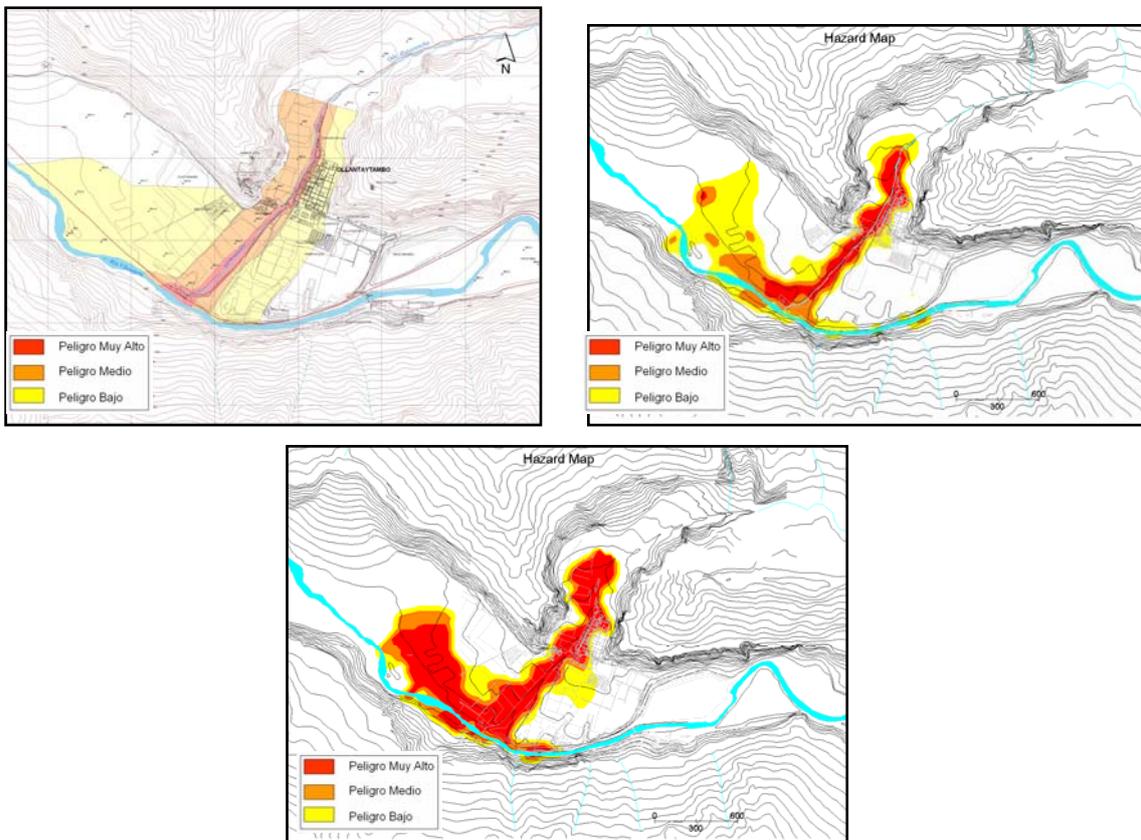


Fig. 101. Comparación 18 - quebrada Patacancha.

## B. Diferencias

**B.1. Comparación 19:** No existen diferencias resaltantes como para mencionar por separado, se podría quizás mencionar la diferencia sutil de zonificación (Fig. 102), pero esto se debe a que el FLO 2D considera mucho los parámetros topográficos que son los factores que varían para hacer que el flujo inunde ciertas zonas más que otras.

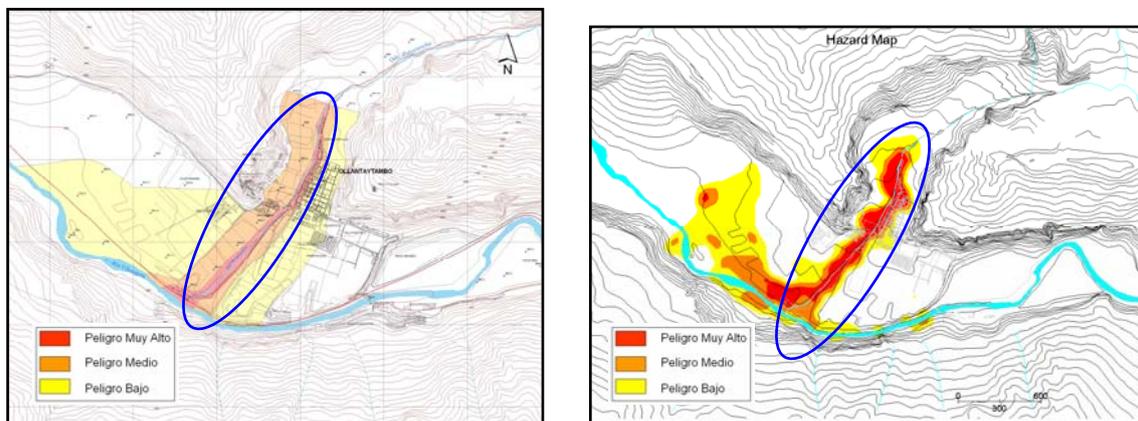


Fig. 102. Comparación 19 - quebrada Patacancha.

## 6.5. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Comparados los mapas de diferentes intensidades para las tres quebradas que afectan las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo, se puede llegar a muchas conclusiones, siendo las más importantes las siguientes:

- El modelo bidimensional FLO 2D es útil y necesario para trabajar con movimientos de masas complejos como son los aluviones. Experiencias anteriores y el presente trabajo han demostrado su eficacia y ha pasado satisfactoriamente la prueba de la comparación con mapas de peligros reales realizados en mayor tiempo y meses de trabajo de campo, fotointerpretación, sedimentología, etc.
- El software FLO 2D puede ser usado en una infinidad de escenarios, sólo cambiando sus componentes o parámetros, dado que puede simular un flujo en presencia de lluvia por ejemplo, o con mayor cantidad de agua en la composición del flujo y otras combinaciones más. En nuestro caso el software fue utilizado para generar mapas de peligros digitales, los cuales son muy útiles en caso de presentarse una emergencia real. En efecto, estos mapas nos dan información rápida de las principales zonas de evacuación y que sectores deben ser evacuados primeros y hacia donde derivar la mayor cantidad de ayuda, medicinas, maquinaria para la rehabilitación, etc.
- Un ejemplo satisfactorio del uso del software se dio en la quebrada de Runtumayo (Ollantaytambo), que sufrió un aluvión el 12 de octubre del 2005, el cual represó parcialmente el río Vilcanota y dañó la vía férrea que une a la ciudad de Ollantaytambo con la ciudad de Aguas Calientes dejando casi dos mil turistas varados. En este caso el software simuló a la perfección el aluvión del 12 octubre. Como resultado de estos estudios el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico en

convenio con la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco presentaron la publicación: “Geología, Geodinámica y Peligros en la Quebrada Runtumayo (Cusco): Avalancha y Aluvión del 12 de octubre del 2005”, la cual se pone como anexo a la presente tesis.

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 7.1. CONCLUSIONES

1. La zona de estudio se localiza al límite entre la Cordillera Oriental y el Altiplano, lugar caracterizado por una morfología abrupta con montañas y quebradas importantes, formando conos aluviales donde se emplazan ciudades como las de Urubamba y Ollantaytambo.
2. Por su emplazamiento, las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo sufren una amenaza constante de nuevos aluviones, por lo que es importante la construcción de mapas de peligros que puedan servir para prevenir desastres y para el desarrollo de planes de ordenamiento territorial y expansión urbana.
3. Una manera de construir mapas de peligros es utilizar el software FLO 2D que simula diferentes tipos de flujos como huaycos o aluviones.
4. Para la ciudad de Urubamba se han generado tres simulaciones ya que en esta ciudad confluyen dos quebradas. Para la quebrada de Pumahuanca se realizaron dos simulaciones con caudales de  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $420 \text{ m}^3/\text{s}$  y para la quebrada Chicón una sola simulación con un caudal de  $260 \text{ m}^3/\text{s}$ , considerando periodos de retorno de 100 y 50 años.
5. Para la ciudad de Ollantaytambo, se han generado dos simulaciones de la quebrada Patacancha con caudales de  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ , igualmente considerando periodos de retorno de 100 y 50 años.
6. Como parte de los resultados se registró que el volumen de simulación del modelo para la ciudad de Urubamba fue de  $9130364.71 \text{ m}^3$  de agua y sedimento, y para la ciudad de Ollantaytambo fue de  $701007.75 \text{ m}^3$  de agua.
7. Con el MAPPER del FLO 2D, se ha generado diversos mapas como son los de elevación del terreno, de velocidad máxima del flujo, de vectores de dirección del flujo, de alturas máximas del flujo y mapas de peligros por aluvión para las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo.
8. Los mapas de peligros generados con el FLO 2D han zonificado las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo como de peligro muy alto, alto-medio y medio-bajo. Estos han sido comparados con los mapas de peligros geológicos-climáticos del Proyecto de Ciudades Sostenibles que indican zonas de peligro alto, alto-medio y bajo.
9. Los resultados de la comparación entre estos mapas elaborados por distintas técnicas muestran que en general son bastantes similares, sólo con pequeñas diferencias.
10. En consecuencia y considerando otros estudios, el software FLO 2D es una herramienta importante para la elaboración de mapas de peligros por aluviones que se ha probado con éxito en las ciudades de Urubamba y Ollantaytambo.

## **7.2. RECOMENDACIONES**

1. Hacer simulación con el FLO 2D para las ciudades de Ollantaytambo y Urubamba con caudales para todos los tiempos de retornos posibles, para así tener un mejor conocimiento del comportamiento de los aluviones en cada ciudad, con el objetivo de mejorar el ordenamiento territorial y zonificación urbana.
2. Hacer simulaciones para todas las quebradas afluentes de los ríos Chicón, Pumahuanca y Patacancha, para obtener los resultados del mayor riesgo para cada ciudad.
3. Usar el FLO 2D para el manejo de situaciones de emergencia, como para determinar las zonas de evacuación, zonas de almacenamiento de material de reserva, etc.
4. En vista de que el FLO 2D funciona para las ciudades estudiadas en la presente tesis y para la quebrada Runtumayo estudiada el 2005, se recomienda aplicarlo en todas las quebradas y zonas que presenten peligros por aluviones.

## **ANEXO**

## BIBLIOGRAFÍA

CARLOTTO V., GUITERREZ S., MONTAÑEZ A. & ACURIO H. (2005).- Mapa de Peligros de las Ciudades de Ollantaytambo, Urubamba, Calca y Pisac. PROYECTO INDECI – PNUD PER / 02/ 051 Ciudades Sostenibles. Cusco.

CARLOTTO V., GIL W., CÁRDENAS J., CHÁVEZ R. & VALLENAS V. (1996).- Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca. *Boletín N° 65 Serie A: Carta Geológica Nacional*. (Hojas 27r y 27s). INGEMMET. Lima.

CASTILLO L. (2006).- *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú*. Tesis de Ingeniero Civil. UNI Lima.

HOLDRIDGE R. (1967).- *Life zone ecology*. Tropical Science Center, San José de Costa Rica.

KALAFATOVICH C. (1977).- *Deslizamientos en el valle del río Urubamba*. Sep. Revista Universitaria Nro. 131. Cusco.

KUROIWA J. (2002).- *Reducción de desastres: viviendo en armonía con la naturaleza*. CECOSAMI, Lima-Perú.

MAROCCO R. (1978).- Estudio Geológico de la Cordillera de Vilcabamba. *Bol. del Instituto de Geología y Minería-4*. 157 p. Lima.

LLAMAS J. (1993).- *Hidrología general: Principios y aplicaciones*. Servicio editorial de la Universidad del País Vasco.

O' BRIEN J. S. & JULIEN. P. (1985).- Physical processes of hyperconcentrated sediment flows. Proc. of the ASCE Specialty Conf. on the Delineation of Landslides, Floods, and Debris Flow Hazards in Utah. Utah Water Research Laboratory.

O' BRIEN J. S. (1986).- Physical processes, rheology and modeling of mudflows. Doctoral dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 1986.

O' BRIEN J. S. & JULIEN. P. (1988).- Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydrology*. Eng., ASCE, 114(8), pp. 877-887.

O' BRIEN J. S. & JULIEN. P. (1993).- Fullerton W.T., Two dimensional water flood and mudflood simulation. *Journal of Hydrology*. Eng., ASCE, 119(2), pp. 224-259.

O' BRIEN J. S. (2000).- FLO-2D User's Manual. Versión 2006.10, Nutrioso, Arizona. 2000.

PULGAR J. (1987).- *Geografía del Perú*. Ed. Inca, Lima 244 p.

VARNES D. J. (1958).- *Sediment Engineering*. Task Comite for the Preparation of the Manual on Sedimentation. ASCE USA.

VARNES D. J. (1978).- Slope movements types and processes. *En* Shuster, R. L. and Kizek, R. J. eds. Landslides: analysis and control. National Research Council Transp. Research Board Special resp. 176, 11-13.