



## **ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y MODELACIÓN NUMÉRICA (2D) DE EVENTOS EXTREMOS EN LA CUENCA DEL RÍO SIJÁN**

**Eder Matías<sup>1,2</sup>, Barbeito Osvaldo<sup>2,3</sup>, Ambrosino Silvio<sup>3</sup>, Hillman Gerardo<sup>1</sup>, Rydzewski Ana Laura<sup>3</sup>, Moya Gonzalo<sup>1</sup>, García Carlos Marcelo<sup>1,2</sup> y Rodríguez Andrés<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Laboratorio de Hidráulica – Centro de Estudios y Tecnología del Agua (LH-CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEfyN). Av Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina.

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigadores Científicos y Tecnológicos (CONICET), Argentina.

<sup>3</sup>Centro de Región Semiarida del Instituto Nacional del Agua (CIRSA-INA), Argentina.

E-mail: matiaseder2@gmail.com

### **RESUMEN**

En la región montañosa de la Provincia de Catamarca las crecientes repentinas constituyen la amenaza natural más significativa, condicionada por la baja permeabilidad de las cuencas, la fuerte energía del relieve y la escasa vegetación sumado a la interacción entre las características orográficas y climatológicas regionales, que resultan en fenómenos hidrológicos localizados e intensos.

La localidad de Siján, ocupa el piedemonte occidental de la Sa. De Ambato. El mismo constituye un ambiente deposicional en forma de una bajada aluvial derivada del aporte detrítico histórico ligado al desgaste del abrupto por efecto de la erosión y los procesos de remoción de masa en forma de caídas, deslizamientos y flujos.

Los procesos de erosión hídrica, de márgenes y remoción de masa ante la ocurrencia de lluvias intensas, puede ocasionar la generación de flujos densos (hiperconcentrados).

En enero de 2014 se produjo un evento de estas características en la zona de estudio que motivó el presente trabajo. En el cual se realiza un análisis geomorfológico de la cuenca del río Siján y se realizaron modelaciones numéricas bidimensionales con el programa FLO-2D, el cual permite realizar modelaciones de flujos hiperconcentrados.

### **ABSTRACT**

In the mountainous region of the Province of Catamarca the sudden flood constitute the most significant natural threat. Conditioned by the low permeability of the basin, the great slope of the relief and sparse vegetation. In addition to the interaction between regional orographic and climatological characteristics, resulting in localized and intense hydrological phenomena.

The town of Siján, occupies the western piedmont of the Sa. De Ambato. It constitutes a depositional environment in the form of an alluvial descent derived from the historical detrital building connected to the abrupt erosion and the process of mass removal in the form of falls landslides and flows.

The processes of water erosion and margins erosion and removal of mass before heavy rainfall can cause the generation of hyperconcentrated flows.

In January 2014 an event of this type occurred in the area of study that motivated the present study. In which it was carried out a geomorphological analysis of the Siján basin and the two-dimensional model was made with the FLO-2D program, which allows modeling of hyperconcentrated flows.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de producción y transporte de sedimentos son función de las características geológicas propias del terreno, de sus condicionantes morfológicos y de la ocurrencia de eventos hidrológicos intensos.

Para el caso en estudio, río Siján ubicado en el piedemonte occidental de la Sierra Ambato, se detectó la acción conjunta de procesos de erosión hídrica, erosión de márgenes y remoción de masa. La acción conjunta de estos procesos ante la ocurrencia de lluvias intensas, sumado a la fuerte energía del relieve puede ocasionar la generación de flujos densos (hiperconcentrados) que se incorporan a la red de drenaje.

Estos flujos contienen una fracción de materiales finos derivados de la erosión hídrica (limos-arcillas) y otra de material grueso (gravas, cantos, bloques), incorporando a la vez restos de vegetación. La alta densidad de la masa viscosa permite transportar grandes bloques a distancias considerables.

Los flujos de sedimentos hiperconcentrados se definen como eventos de crecidas con concentraciones de sedimentos que superan el 20% en volumen.

En la Tabla 1 se presentan cuatro categorías de flujos y sus principales características en función de su concentración de sedimentos, tres de las cuales corresponden a flujos hiperconcentrados. Esta tabla fue desarrollada a partir de los datos de laboratorio utilizando flujos de barro reales de Glenwood Springs, Colorado.

**Tabla 1.-** Comportamiento del flujo en función de la concentración de sedimentos (FLO-2D, 2003).

Comportamiento del Flujo en Función de la Concentración de Sedimentos			
	Concentración de Sedimentos		Características del Flujo
	Por Volumen	Por Peso	
Deslizamientos	0.65 – 0.80	0.83 – 0.91	No fluye, falla por deslizamiento en bloque
	0.55 – 0.65	0.76 – 0.83	Deslizamiento en bloque con deformación interna y; reptación previa a la falla.
Flujo de barro	<b>0.48 – 0.55</b>	0.72 – 0.76	Flujo evidente; reptación sostenida de barro; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no ocurre esparcimiento sobre una superficie plana
	<b>0.45 – 0.48</b>	0.69 – 0.72	Flujo con esparcimiento sobre superficies planas. Flujo cohesivo; mezcla.
Inundaciones o crecidas de barro	0.40 – 0.45	0.65 – 0.69	Flujo se mezcla fácilmente; deposición de grandes bloques; ocurren ondas pero se disipan rápidamente.
	0.35 – 0.40	0.59 – 0.65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; esparcimiento casi completo en superficies planas; dos fases en superficie con ondas.
	0.30 – 0.35	0.54 – 0.59	Separación del agua en superficie; las ondas viajan fácilmente; arena y grava viaja como carga de fondo
	0.20 – 0.30	0.41 – 0.54	Ondas dominan el movimiento superficial
Inundaciones o crecidas de agua	<0.20	<0.41	Inundación de agua con posibilidad de sedimentos en suspensión o carga de fondo.

Un “flujo de barro” consiste en una matriz fluida de sedimentos finos que puede transportar rocas de diferentes tamaños. Su comportamiento es una función de las propiedades de la matriz de fluidos, la geometría del canal, la pendiente y la rugosidad. La concentración de sedimento fino (limo, arcilla y arena fina en la matriz de líquido) controla las propiedades del fluido incluyendo la viscosidad, la densidad y la tensión de fluencia. La propiedad dominante de un flujo de barro es la alta viscosidad que se traducirá en velocidades lentas. La alta densidad de la matriz de líquido puede aumentar la flotabilidad de partículas grandes de sedimentos de gravas hasta rocas. La tensión de fluencia afectará tanto el inicio como el fin del flujo. Para un evento de flujo de barro, la concentración promedio de sedimentos generalmente varía en el rango de 20% a 35% en volumen con picos de concentración de aproximadamente 50%.

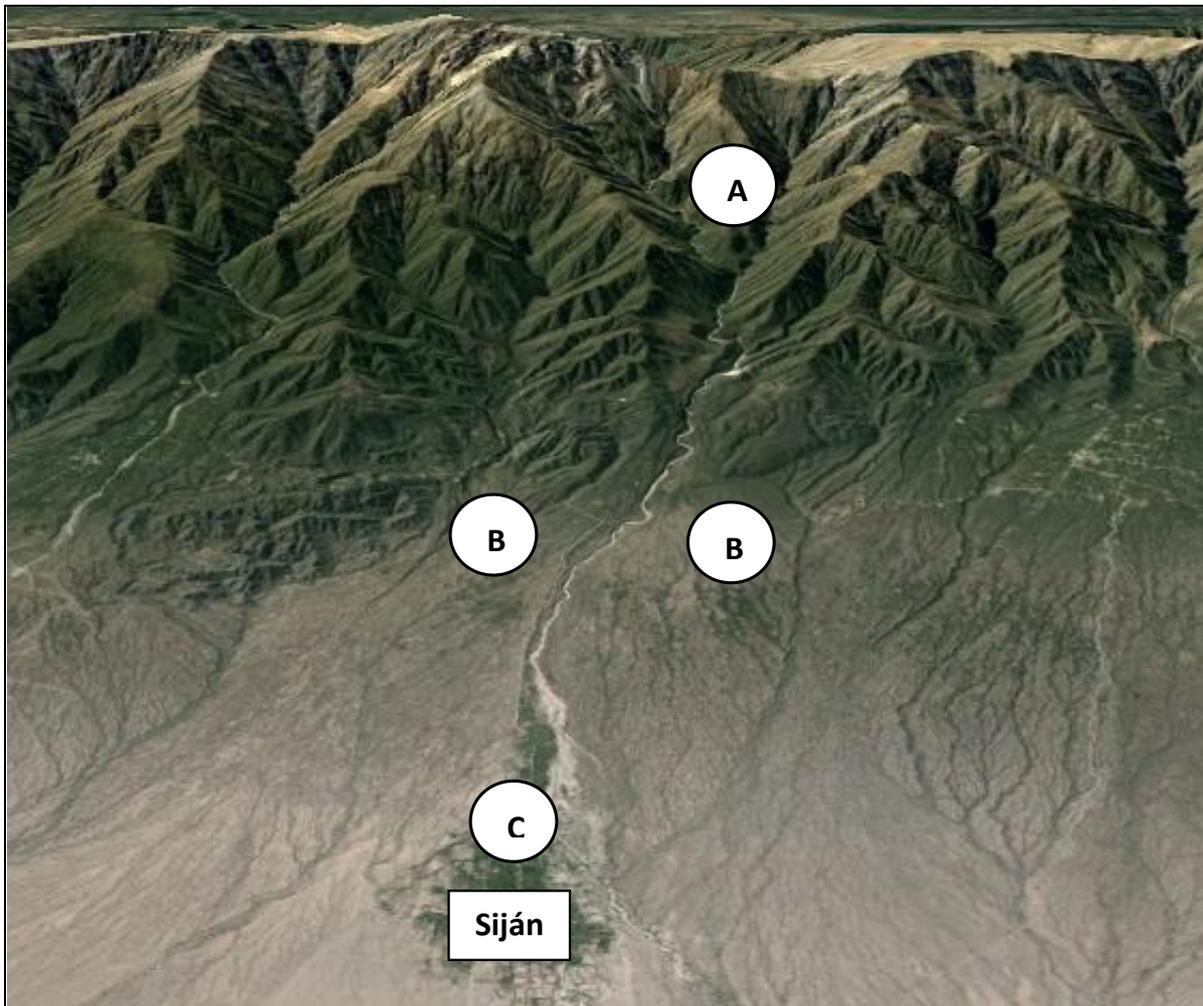
## ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

La localidad de Siján, está ubicada en el piedemonte occidental de la Sa. De Ambato el cual constituye un ambiente deposicional en forma de una bajada aluvial derivada del aporte detrítico histórico ligado al desgaste del abrupto por efecto de la erosión y los procesos de remoción de masa en forma de caídas, deslizamientos y flujos hiperconcentrados.

Desde la salida de la sierra (A en Figura 1), el río Siján corre encajado sobre la parte media del antiguo abanico que forma parte de la bajada aluvial antigua (B en Figura 1).

Desde el ápice de este antiguo abanico (B en Figura 1) el canal con trazo semirecto de baja sinuosidad, recorre una distancia de 5 km con una amplitud variable entre 30 y 40 m hasta el ápice del abanico más reciente y activo (Figura 1 (C)), en el que se emplaza la población, con una pendiente de 7.5% y con una carga de fondo de alta competencia con inclusión de gravas y bloques de diversos tamaños.

En sus inicios (B en Figura 1), el canal tiene un grado de encajamiento del orden de los 10 m con disminución progresiva en dirección Oeste, para perder encajamiento y dar lugar a la formación del cono activo (Figura 1 (C)), que desde el ápice hasta la parte distal, tiene una longitud de 4 km y una amplitud máxima de 2 km.



**Figura 1.-** (A) Frente de montaña (abrupto de falla Sa. De Ambato), (B) Bajada aluvial antigua sin conexión hidrológica con la montaña (conos aluviales inactivos) y (C) conos aluviales activos con conexión hidrológica.

En la situación evolutiva actual el “lóbulo deposicional activo”, zona activa del cono aluvial, se recuesta sobre el límite sur del cono activo y se prolonga más allá de la ruta provincial (Figura 2).



Figura 2.- Lóbulo deposicional activo del río Siján.

## MODELACIÓN NUMÉRICA

Para realizar las modelaciones numéricas en la zona urbana se utilizó el programa FLO-2D.

### Programa computacional:

El programa FLO-2D permite predecir el movimiento de flujos hiperconcentrados como un fluido viscoso en función de la concentración de los sedimentos. Utiliza un modelo reológico cuadrático para predecir tensiones viscosas y de corte. El modelo considera a los flujos de barro como un continuo pronosticando el movimiento del fluido viscoso como una función de la concentración de sedimentos.

El modelo Flo 2D utiliza las siguientes ecuaciones de acuerdo a O'Brien and Julien (1985):

- Ecuación de Continuidad

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial[uh]}{\partial x} + \frac{\partial[vh]}{\partial y} = i \quad (1)$$

- Ecuación de Movimiento

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

$$S_{fy} = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3)$$

Donde  $S_{0x}$ ,  $S_{0y}$  son las componentes de la pendiente de fondo en las direcciones x e y y g es la aceleración de la gravedad.

- Modelo Reológico

El esfuerzo cortante en los flujos de sedimentos hiperconcentrados se puede calcular a partir de la siguiente ecuación cuadrática reológica (O'Brien y Julien, 1985)

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{d_v}{d_y} \right) + C \left( \frac{d_v}{d_y} \right)^2 \quad (4)$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad dinámica y  $C$  denota el coeficiente de corte inercial que depende de la densidad de la mezcla  $\rho_m$ , de la longitud de mezcla de Prandtl  $l$ , del tamaño del sedimento  $d_s$  y de una función de la concentración volumétrica de sedimentos  $C_v$ :

#### Escenarios Hipotéticos Modelados:

Para la definición de los escenarios correspondiente a las simulaciones de flujo de barro, se consideró que estos flujos se asocian a eventos de crecida relativamente frecuentes (O'Brien, 1993), cuyo caudal líquido se encuentra entre 10 y 25 años de recurrencia.

A partir de estas consideraciones se definieron los siguientes escenarios que se presentan en la tabla 1, donde  $C_{v\text{máximo}}$  es la concentración de sedimentos en volumen ( $C_v = \text{Vol. Sed/Vol. Agua y Sed.}$ ):

**Tabla 2.- Escenarios hipotéticos**

Escenario	Caudal Líquido	$C_{v\text{máximo}}$
Nº 1	Tr: 10 años	0
Nº 2	Tr: 10 años	0.55
Nº 3	Tr: 25 años	0
Nº 4	Tr: 25 años	0.55

## RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos del estudio geomorfológico y de las modelaciones numéricas.

Geomorfológico

La zonificación de la amenaza realizada se basa en las condiciones geomorfológicas de los ámbitos fluviales, no considerando la recurrencia de los eventos, ni la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Teniendo en cuenta el análisis de los datos fotogeológicos y fotogeomorfológicos obtenidos en gabinete y el correspondiente control de campo, se establece una escala de amenaza o peligrosidad frente a las inundaciones repentinas relacionada con las condiciones geomorfológicas.

En la Figura 3 se presenta la Carta de Amenaza en la localidad de Siján.

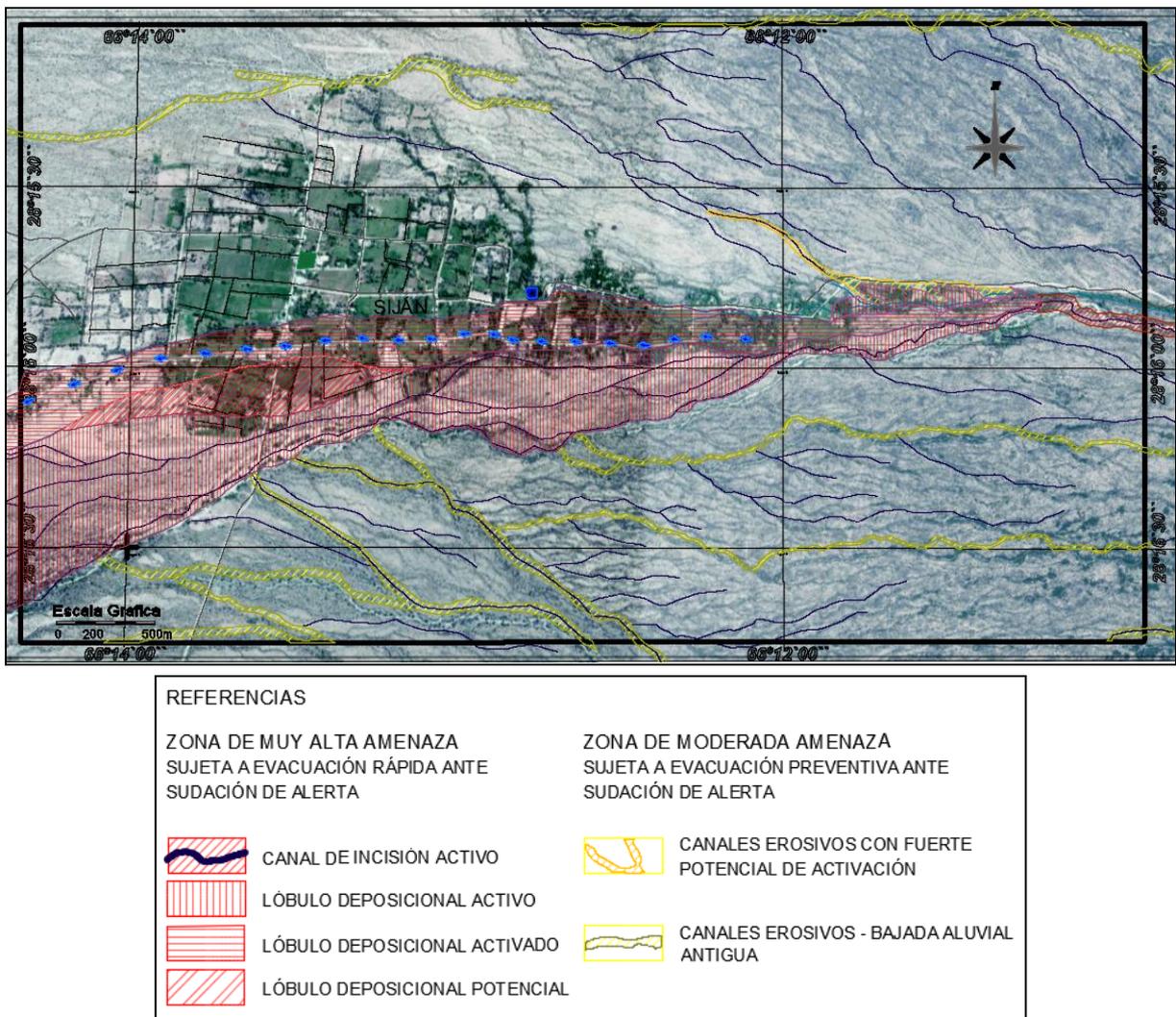


Figura 3.- Carta de amenaza.

Modelación Numérica

A continuación se presentan las manchas de inundación obtenidas de las modelaciones numéricas para los escenarios 1 (Figura 4) y 2 (Figura 5), y en la Figura 5 una comparación de la mancha de inundación producida por el escenario 4 (crítico) con las zonas de riesgo definidas en la Carta de Amenaza Geomorfológica.

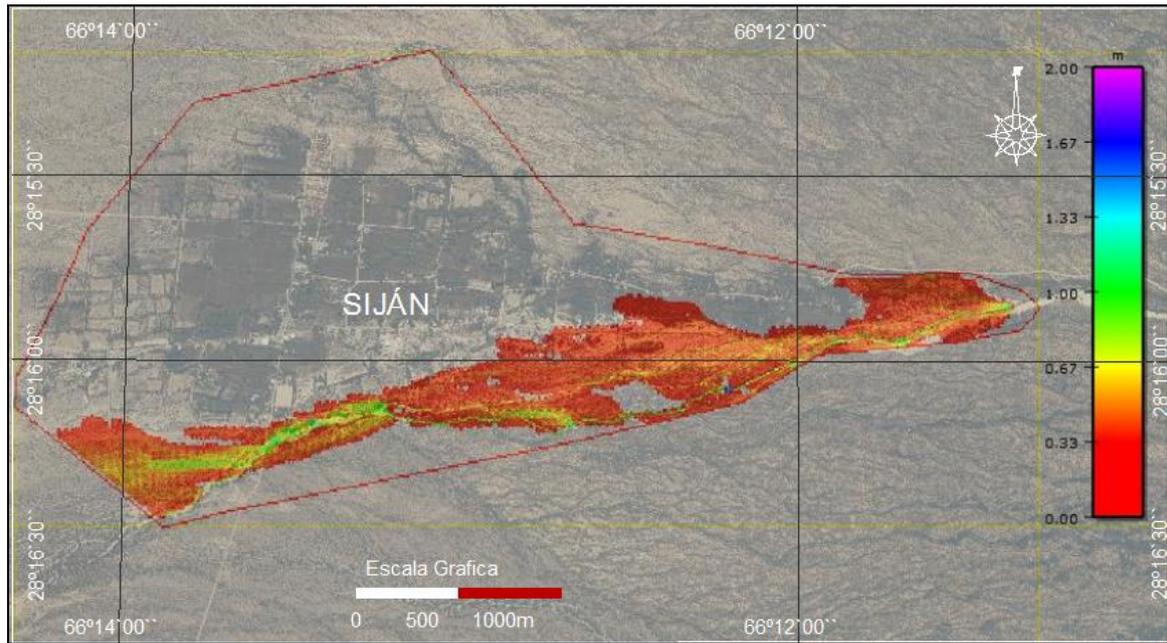


Figura 4.- Tirante máximo del flujo para el escenario 1.

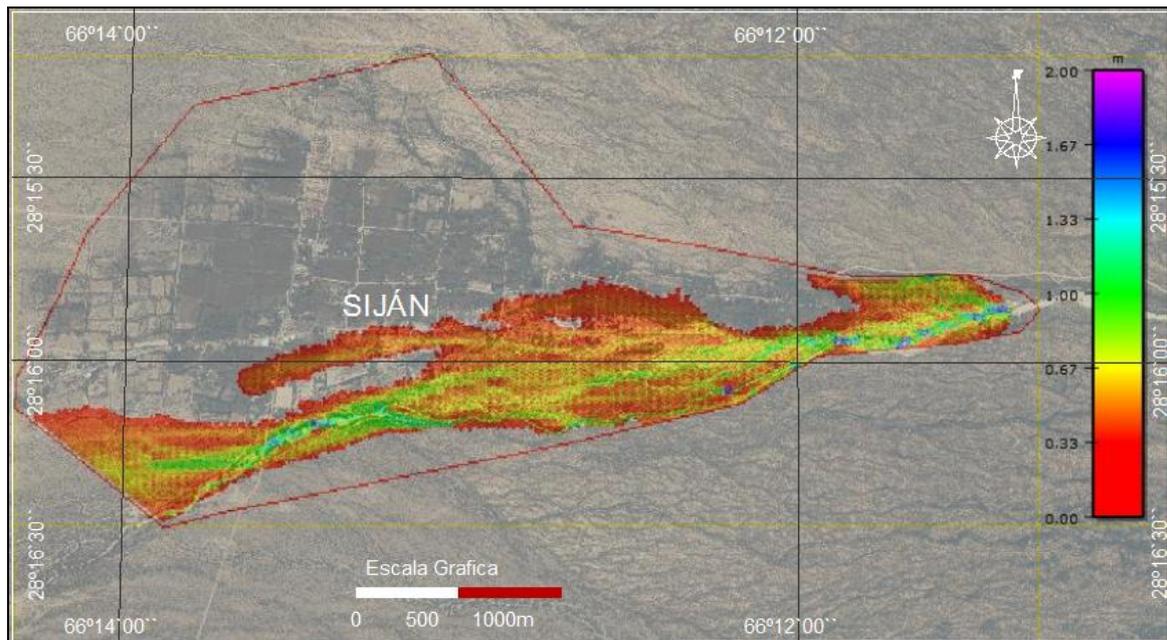


Figura 5.- Tirante máximo del flujo para el escenario 2.

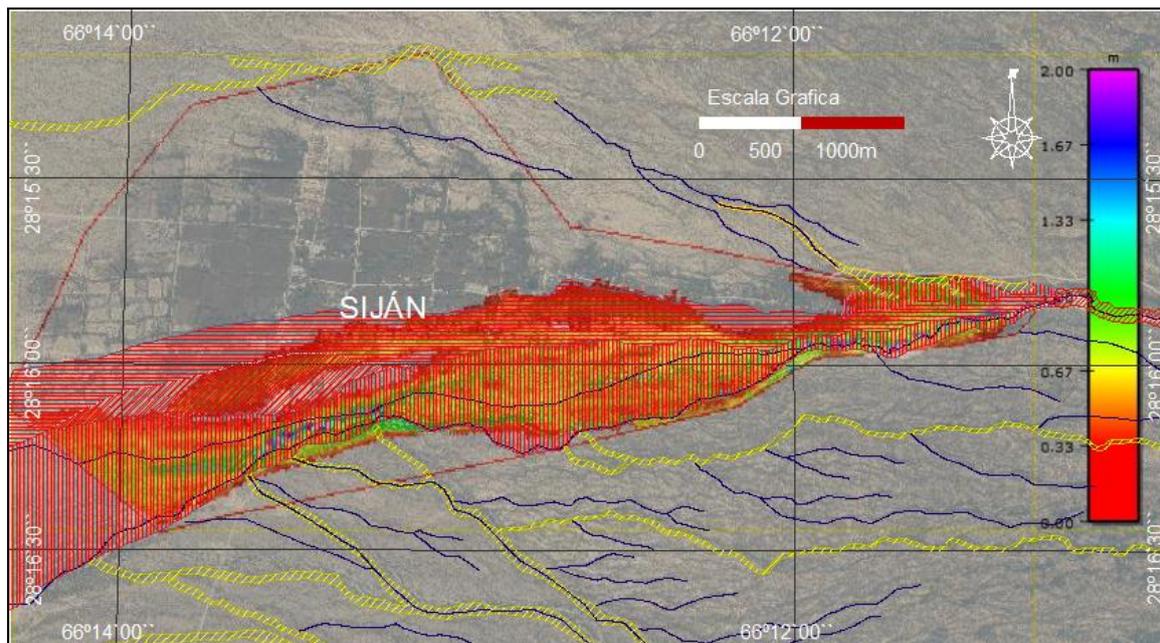


Figura 6.- Comparación entre tirante de flujo correspondiente al escenario 4 y a la Carta de Amenaza.

## CONCLUSIONES

- Se observaron diferencias significativas entre el escenario 1 con aguas claras y el escenario 2 con altas concentraciones de sedimentos ( $C_{v\text{máxima}}:0.55$ ), ambos con un Qlíquido correspondiente a Tr: 10 años y entre el escenario 3 y 4 correspondiente a un Qlíquido de Tr: 25 años con aguas claras y con sedimentos ( $C_{v\text{máxima}}:0.55$ ) respectivamente. Esto muestra que la carga de sedimento tiene una influencia significativa en la magnitud de los eventos y en la mancha de inundación.
- Para que se produzcan flujos hiperconcentrados, la precipitación debe ser de gran intensidad y localizarse en zonas con suficiente disponibilidad de material y fuertes pendientes. Así, la probabilidad de ocurrencia de eventos de flujos hiperconcentrados depende de la probabilidad de ocurrencia conjunta de una serie de condiciones las cuales son difíciles de cuantificar.
- Se recomienda, ya sea para el diseño de medidas estructurales o no estructurales, proponer escenarios extremos con Qlíquido entre Tr:10 y 25 años y adoptar valores de  $C_{v\text{máximos}}$  propuestos por la bibliografía especializada. En este contexto es preciso aclarar que la probabilidad del caudal líquido es diferente a la del evento de flujo hiperconcentrado.
- Finalmente, se observó que la zona de inundación obtenida para los “Escenarios Hipotéticos” es similar a la zona de riesgo delimitada en la Carta de Amenaza en el estudio geomorfológico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Flo-2D** (2003), “Users manual”, Version 2003.06, Nutrioso, Arizona, USA  
Julien y O'Brien (1987, 1993).

**O'Brien, J. S., P.Y. Julien y W.T. Fullerton** (1993), “Two-dimensional wáter flood and mudflow simulation,” *J. Hydr. Eng., ASCE*, 119(2), 244-261.