

# Calculo y análisis de hidrogramas para el flujo torrencial del 22 de Junio de 2006 ocurrido en la microcuenca "El Salto", Ibagué - Colombia

**Miguel Ignacio Barrios P.<sup>1</sup> & Esther Julia Olaya M.<sup>2</sup>**

*1. Departamento de Ingeniería, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia  
barriosm@ut.edu.co*

*2. Comité Central de Investigaciones y Desarrollo Científico ,  
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia*

*Recibido para evaluación: 22 de Agosto de 2007 / Aceptación: 18 de Septiembre de 2007 / Versión Final: 1 de Octubre de 2007*

## Resumen

El presente artículo aporta evidencia acerca de la necesidad de construir modelos hidrológicos de flujos torrenciales para cuencas hidrográficas colombianas con información hidrometeorológica escasa. La investigación se desarrolló con base en la generación de un hidrograma sintético del Soil Conservation Service (SCS) y un hidrograma analítico fundamentado en mediciones de campo, para el flujo torrencial ocurrido el 22 de junio de 2006 en la microcuenca El Salto, afluente del río Combeima en el municipio de Ibagué Tolima. La precisión de estos hidrogramas fue calculada y convalidada a través de simulaciones elaboradas con el modelo reológico para flujos torrenciales (*mud and debris flow*) del software Flo2D, tomando como función objetivo el área del depósito medido en campo. Como resultado, se encontró que el hidrograma sintético del SCS no expresa la respuesta hidrológica de la microcuenca y subestima significativamente el caudal pico; por tanto, no se recomienda su uso para modelar la transformación precipitación-escorrentía, para diseñar estructuras hidráulicas, ni para definir mapas de amenaza en el área de estudio.

## Abstract

This paper provides evidence about the need to develop hydrological models of torrential flows for ungaged Colombian watersheds. The research was carried out through construction of a synthetic hydrograph of Soil Conservation Service (SCS) and an analytical hydrograph founded on field data for the torrential flow occurred on 22 June 2006 at El Salto basin, affluent of Combeima River in the municipality of Ibagué, Tolima. Accuracy of those hydrographs was calculated and validated through simulations, applying the rheological model for mud and debris flows with the Flo2D software, using the observed deposit of flow as objective function. The most relevant result was that synthetic hydrograph of SCS does not express the hydrological behavior of El Salto basin, and underestimate the peak of discharge; therefore, its use is not recommended to model rainfall-runoff rethen for events, design of hydraulic structures nor to define hazard zones in that area.

**Key Words:** Synthetic Hydrograph, Mud and Debris Flow, Hydraulic Modeling, Rheology.

**Palabras Clave:** Hidrograma Sintético, Flujo Torrencial, Modelación Hidráulica, Reología.

# 1. Introducción

En tareas de ingeniería hidrológica es común aplicar modelos sintéticos para el cálculo de hidrogramas de eventos extremos en cuencas hidrográficas que no disponen de la información hidrometeorológica básica. Los parámetros de tales modelos sintéticos no han sido calibrados para las condiciones biogeofísicas y climáticas particulares de las cuencas Colombianas, y por tanto, su utilización en estas zonas implica la introducción de un alto nivel de incertidumbre en los cálculos.

Estos modelos sintéticos han sido construidos con base en relaciones de variables hidrológicas que presentan un comportamiento de flujo newtoniano, pero los flujos típicos torrenciales generados en las cuencas de los Andes colombianos presentan concentraciones elevadas de sólidos que le otorgan un comportamiento dominado por relaciones de fluido no newtoniano. Por ello se incorpora un segundo factor de incertidumbre al utilizar modelos sintéticos tradicionales para el pronóstico de flujos torrenciales extremos sin tener en cuenta las interacciones producidas entre las fuerzas de los sólidos y del fluido (Iverson, 1997) (Wang y Jan, 1999).

Este trabajo indaga modelos sintéticos tradicionales empleados para simular el hidrograma de un flujo torrencial en una cuenca de montaña de la región andina de Colombia. Se expone la necesidad de investigar la generación de recursos teóricos y metodológicos alternativos para determinar hidrogramas sintéticos de flujos torrenciales en las cuencas de montaña de Colombia.

El estudio se desarrolló con base en la medición y caracterización física del flujo torrencial del 22 de junio de 2006 ocurrido en la microcuenca El Salto, localizada en zona rural del municipio de Ibagué, departamento del Tolima, entre las coordenadas planas con origen Bogotá: (861.054 m, 992.318 m) - (860.122 m, 991.932 m) - (861.407 m, 991.207 m) - (863.275 m, 991.998 m).

La microcuenca El Salto drena un área de 2,12 km<sup>2</sup> sobre una topografía escarpada. En su cono de deyección, se encuentra ubicado el centro poblado de Villa Restrepo a una altura de 1.650 msnm.

El evidente desarrollo que muestra el cono de deyección, permite inferir que esta microcuenca ha experimentado históricamente

una significativa actividad torrencial. En la literatura se reporta la ocurrencia de tres avenidas torrenciales, sucedidas el 4 de junio de 1996, el 27 de agosto de 1998 y el 22 de junio de 2006; esta última considerada como la más grande y destructiva (Barrios y Olaya, 2007).

# 2. Métodos

## 2.1. Método del hidrograma analítico

Inicialmente se construyó el hidrograma de la avenida torrencial ocurrida el 22 de junio de 2006 mediante la aplicación de un método analítico fundamentado en mediciones hechas a la huella del flujo dejada en el cauce, el levantamiento del mapa del material depositado en el cono de deyección. La estimación de sus propiedades reológicas se hizo mediante ensayos de laboratorio y se compararon con las de otras avenidas torrenciales con similar composición granulométrica y concentración de sólidos. Debido a que no existe información hidrometeorológica para esta cuenca, se estableció la duración promedio de la onda de crecida y la duración de la precipitación que generó el flujo a través de información reportada por personas que presenciaron el evento.

Para determinar el caudal máximo alcanzado por la avenida torrencial del 22 de junio de 2006 se midió la huella dejada por el flujo en una curva del cauce y se calculó la velocidad promedio en esa sección con base en tres métodos:

Método de sobre-elevación: la velocidad promedio se calculó con base en la diferencia de alturas en el calado producto de la acción de la fuerza centrífuga a través de la ecuación de Grashoff (TRAGSA, 1998):

$$V = \sqrt{\frac{\Delta h \times g}{2.3 \times \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}} \quad (1)$$

donde,

*V*: Velocidad promedio del flujo (m/s).

*g*: Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

*Δh*: Diferencia de altura del flujo en los extremos de la sección transversal (m).

$R_2$ : Radio de curvatura externo (m).

$R_i$ : Radio de curvatura interno (m).

Método de Kherkhevlidze: se calculó la velocidad promedio del flujo a través de una relación empírica propuesta por Kherkhevlidze, basada en la formula de Chezy (Kozlovskii, 1988):

$$V = 1.14 \times \sqrt{S \times h^3 \times \left(1 - \frac{CV_{\min}}{CV_{\max}}\right)} \quad (2)$$

Donde,

$V$ : Velocidad promedio del flujo (m/s)

$h$ : Altura media del flujo en la sección (m)

$S$ : Gradiente hidráulica (m/m)

$CV$ : Concentración de sólidos en volumen, máxima y mínima

Método de Thiery: este método propone el cálculo de la velocidad promedio del flujo a través de la aplicación de la ecuación de Manning multiplicada por un factor que está en función del peso específico del líquido, del material sólido y su concentración (Chow et al. 1994; Hattinger, 1974):

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \times \frac{\gamma_w}{\gamma_w + \alpha(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (3)$$

donde,

$V$ : Velocidad promedio del flujo (m/s).

$n$ : Coeficiente de rugosidad para cauces naturales (Chow).

$R$ : Radio hidráulico (m).

$S$ : Gradiente hidráulica (m/m).

$\gamma_w$ : Peso específico del agua (kgf/m³).

$\gamma_s$ : Peso específico del material sólido (kgf/m³).

$\alpha$ : Relación entre el volumen sólido y el volumen líquido en el flujo.

El caudal máximo del flujo se calculó multiplicando el área de la sección transversal del cauce por el promedio de la velocidad obtenida con la aplicación de los tres métodos anteriormente descritos (ecuación de continuidad):

$$Q = V \times A \quad (4)$$

donde,

$Q$ : Caudal máximo del flujo en la sección de la curva (m³/s).

$V$ : Velocidad promedio del flujo (m/s).

$A$ : Área de la sección transversal en la curva (m²).

El volumen total del flujo ocurrido el 22 de junio de 2006 en la microcuenca El Salto, se calculó multiplicando el volumen sólido movilizado por el inverso del coeficiente de concentración en volumen de sólidos presente en el flujo ( $C_V$ ).

El volumen sólido movilizado por el flujo se determinó mediante mediciones del volumen de las remociónes en masa producidas por el evento, y el volumen de socavaciones generadas en los cauces. El coeficiente de concentración en volumen de sólidos ( $C_V$ ), se determinó a través de ensayos de laboratorio realizados a doce muestras tomadas del flujo.

El volumen del hidrograma analítico fue ajustado con el volumen total del flujo del evento del 22 de junio de 2006, y calibrado a través de simulaciones con el modelo *mud & debris flow* del software Flo2D tomando como función objetivo el área de depósito del flujo torrencial y empleando un modelo digital de terreno con tamaño de celda de 10 metros.

Finalmente se realizó una superposición del mapa producto de las simulaciones con el mapa del depósito del 22 de junio de 2006 (función objetivo) en el programa ArcView GIS para estimar el grado de correlación existente entre la simulación basada en el hidrograma analítico y el área afectada por el flujo en el cono de deyección de la microcuenca.

## 2.2. Método del hidrograma sintético del SCS

El modelo sintético del Soil Conservatio Service (SCS) se empleó para mostrar la incertidumbre que implica su utilización en este evento particular.

Los valores de caudal pico y del tiempo de ocurrencia se estimaron utilizando el modelo simplificado de hidrograma unitario triangular, en el cual el tiempo de recesión se aproxima a  $1,67 T_p$ , en donde  $T_p$  es el tiempo de ocurrencia del pico.

El caudal pico del hidrograma unitario y su tiempo de ocurrencia se calcularon mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones (Chow, Maidment, y Mays, 1994):

$$q_p = 2,08 \times \frac{A}{T_p}, \quad (5)$$

donde,

$q_p$ : Caudal pico del hidrograma unitario para una lluvia efectiva de 1 cm ( $m^3/s$ ).

$A$ : Área de la cuenca ( $Km^2$ ).

$T_p$ : Tiempo de ocurrencia del pico (horas).

$$t_p \cong 0.6 T_c \quad (6)$$

donde,

$t_p$ : tiempo de retardo

$T_c$ : tiempo de concentración de la cuenca

y,

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p, \quad (7)$$

donde,

$T_p$ : Tiempo de ocurrencia del pico

$t_r$ : Tiempo de duración de la lluvia efectiva

$t_p$ : Tiempo de retardo

Al hidrograma sintético SCS obtenido se le aplicó el método propuesto por O'Brien (2006) para generar el hidrograma total del flujo torrencial, que consiste en generar una convolución del hidrograma de caudales líquidos (en este caso el hidrograma sintético SCS) con un factor volumétrico que depende del coeficiente de concentración en volumen de sólidos medido en el flujo:

$$BF = \frac{1}{1 - CV} \quad (8)$$

donde,

$BF$ : Factor volumétrico (Bulking Factor)

$CV$ : Coeficiente de concentración en volumen de sólidos

El hidrograma sintético generado por este método, se ingresó como variable de entrada al programa Flo2D con un modelo digital del terreno con celdas de 10 metros de tamaño. La

simulación se hizo con la aplicación de la opción *mud & debris flow*, para generar la superposición del mapa producto de la modelación, con el mapa del área de afectación por el flujo torrencial del 22 de junio de 2006.

Para ello se dispuso de dos hidrogramas calculados por diferentes medios (uno a través del método analítico con base en mediciones de campo y otro producto de la aplicación del hidrograma sintético del SCS), para ser comparados y determinar su grado de precisión en las simulaciones de la avenida torrencial del 22 de junio de 2006.

### 2.3. Consideraciones reológicas

Los flujos torrenciales hiperconcentrados están dominados por esfuerzos viscosos y dispersivos, y constituyen un fenómeno diferente al regido típicamente por el transporte de sedimentos en suspensión y carga del lecho, analizados tipicamente en el campo teórico de la hidráulica fluvial. En este sentido, para determinar la velocidad y profundidad alcanzada por el flujo se empleó el modelo reológico cuadrático de O'Brien (2006) que integra el modelo viscoplástico de Bingham con un modelo de esfuerzos dispersivo y turbulento:

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{dv}{dy} \right) + c \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (9)$$

donde,

$\tau$ : Esfuerzo tangencial

$\tau_y$ : Esfuerzo de fluencia

$\eta$ : Viscosidad dinámica del flujo

$\frac{dv}{dy}$ : Velocidad de deformación tangencial

$c$ : Parámetro inercial del modelo

## 3. Resultados y Discusión

De acuerdo con el inventario de remociones en masa, se determinó que el área correspondiente a los deslizamientos del 22 de junio

de 2006 fue de 19.888,39 m<sup>2</sup> con una profundidad promedio de 1,5 m, lo que representa un volumen de 29.832 m<sup>3</sup>.

A pesar de la inexistencia de levantamientos topográficos sobre los cauces antes de ser erosionados, se estimó que en promedio se generó una socavación de 0,5 m en taludes y lecho, que corresponde a un área promedio de 12,5 m<sup>2</sup>; en una longitud total de 3.473,66 m; por tanto el volumen sólido removido de los taludes y el lecho de los cauces fue de 43.420 m<sup>3</sup>.

Al sumar el volumen de remociones en masa con el volumen socavado en los cauces, se estimó que el volumen sólido total removido para el flujo del 22 de junio en la microcuenca El Salto fue de 73.253,2 m<sup>3</sup>. La concentración en volumen promedio de sólidos en el flujo fue de 0,5, lo que permite inferir que el volumen de agua neta asociado al flujo fue 73.253 m<sup>3</sup> que representan 43,5 mm de precipitación efectiva en promedio en toda la cuenca.

De acuerdo con información aportada por personas que presenciaron la tormenta, la duración promedio de la tormenta que ocasionó el evento fue de 20 minutos.

De acuerdo con las expediciones de campo realizadas se determinó que la sección transversal más adecuada para calcular el caudal máximo del flujo es la localizada en las coordenadas (862.870,94 m, 992.024,75 m), por expresar de una manera adecuada el comportamiento de las variables físicas necesarias para elaborar los cálculos (Figura 1). Además, esta sección se localiza en la zona de transición entre la cuenca de recepción y el cono de deyección de la microcuenca.

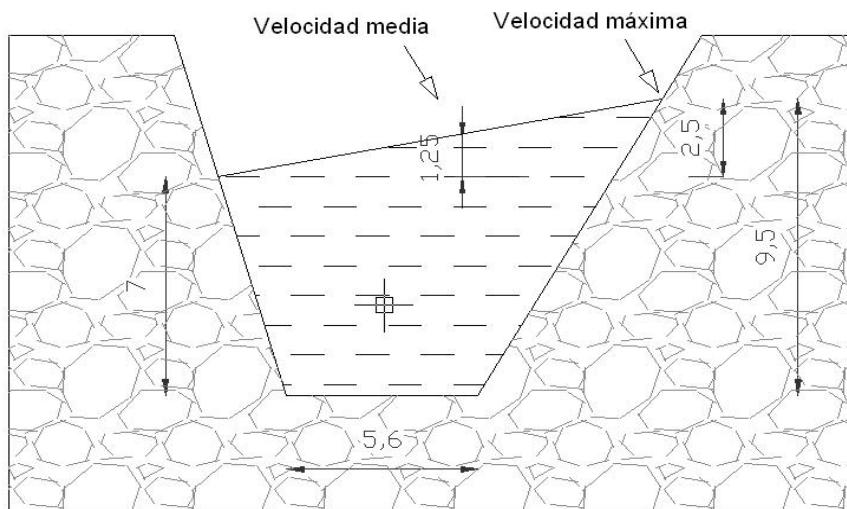
En la Tabla I se presentan los resultados del cálculo de la velocidad promedio del flujo y el caudal máximo para el pico de la avenida torrencial del 22 de junio de 2006:

**Tabla I.** Velocidad media del flujo para la máxima huella y el caudal máximo en la sección transversal analizada

	Variable	Método de sobre-elevación	Método de Kerkhevlidze	Método de Thierry
$\Delta h$	Diferencia de altura del flujo (m)	1,25	-	-
$R_2$	Radio de curvatura externo (m)	33,5	-	-
$R_1$	Radio de curvatura interno (m)	20,3	-	-
$h$	Altura media del flujo (m)	-	8,25	-
$S$	Gradiente hidráulica (m/m)	-	0,1	0,1
$C_v$	Concentración en volumen de sólidos	-	-	-
$C_{vmín}$	$C_{vmín}$ del flujo (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> de flujo)	-	0,4	-
$C_{vmax}$	$C_{vmax}$ del flujo (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> de flujo)	-	0,6	-
$n$	Coeficiente de rugosidad	-	-	0,07
$R$	Radio hidráulico (m)	-	-	3,13
$\gamma_w$	Peso específico del agua (Kg/m <sup>3</sup> )	-	-	1.000
$\gamma_s$	Peso específico del material sólido (Kg/m <sup>3</sup> )	-	-	1.950
$\alpha$	Volumen sólido/Volumen líquido	-	-	1
<b>Velocidad promedio del flujo para la máxima huella</b>				
$V$	(m/s)	4,95	4,93	4,96
$V_m$	Media de las velocidades promedio del flujo para la máxima huella (m/s)	-	-	4,95
$A$	Área de la sección transversal (m <sup>2</sup> )	-	-	74,6
$Q$	Caudal máximo promedio del flujo (m <sup>3</sup> /s)	-	-	369,27

El hidrograma del flujo del 22 de junio de 2006 en la microcuenca El Salto se determinó a partir de calibraciones hechas con el modelo *mud & debris flow* del software Flo-2D, los parámetros usados fueron los siguientes: esfuerzo de fluencia del flujo ( $\tau_y = 927$  Pa), viscosidad dinámica ( $\eta = 4378,9$  poises), caudal máximo

del flujo ( $Q_{máx} = 369,27$  m<sup>3</sup>/s), tiempo de duración de la onda de crecida ( $T_b = 30$  minutos), volumen total movilizado por el flujo ( $V_t = 146.506,4$  m<sup>3</sup>), y el modelo de elevación digital con tamaño de celda de 10 m.



**Figura 1.** Sección transversal de la máxima huella del flujo del 22 de junio de 2006.

De esta manera, se encontró que el hidrograma de mejor ajuste con las simulaciones bajo estas condiciones es el presentado en la Tabla 2, y genera la propagación de onda de crecida más próxima

a la ocurrida el 22 de junio de 2006 en el centro poblado de Villa Restrepo (Figura 2).

**Tabla 2.** Hidrograma analítico calibrado con Flo-2D para la avenida torrencial del 22 de junio de 2006

Tiempo (Horas)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Caudal ( $m^3/s$ )	0,00	10,53	369,27	19,86	7,50	0,00

Microcuenca El Salto

**Figura 2.** Resultados de la simulación con Flo2D para el flujo torrencial del 22 de junio de 2006 en la microcuenca El Salto, empleando el hidrograma analítico.

Finalmente, se calculó el hidrograma sintético del SCS para comparar sus resultados con los obtenidos a través de la aplicación del hidrograma analítico. En la Tabla 3 se presentan

**Tabla 3.** Parámetros del hidrograma sintético del SCS.

Duración lluvia efectiva (tr)	Área cuenca	Tc	Tiempo de retardo (tp)	Tiempo del caudal pico (Tp)
10 minutos	2,1228 Km <sup>2</sup>	0,238 hr	0,6Tc = 0,143hr	(tr/2) + tp = 0,226hr
<b>Tiempo base</b>	<b>Caudal Unitario (lluvia efectiva 1 cm)</b>			
2,67Tp = 0,603hr	19,53 m <sup>3</sup> /s			

Al hidrograma obtenido se le aplicó el principio de superposición y proporcionalidad para generar el hidrograma de caudal líquido correspondiente a la avenida torrencial del 22 de junio de 2006. Como resultado se encontró un caudal máximo de 66 m<sup>3</sup>/s y un volumen total de escorrentía de 91.800 m<sup>3</sup>, que se ajusta en un 80% con el volumen líquido estimado a partir de la relación entre la concentración de sedimentos del flujo y el volumen de material sólido movilizado en la cuenca.

los parámetros morfométricos e hidrológicos de la cuenca asociados al hidrograma sintético del SCS.

El hidrograma total, que vincula caudales líquidos y sólidos, se estimó a través del método propuesto por O'Brien (2006), en el cual se estima el hidrograma de flujo de detritos a partir de la convolución del hidrograma de gastos líquidos con el factor volumétrico del flujo equivalente a dos (*Bulking factor* = 2). De acuerdo con este procedimiento, el caudal pico alcanzado por la avenida torrencial fue de 132 m<sup>3</sup>/s y movilizó un volumen total de flujo del orden de 181.737 m<sup>3</sup> (tabla 4), este valor coincide en un 80,6% con el volumen total estimado a través de las mediciones hechas en campo, correspondiente a 146.506 m<sup>3</sup>.

**Tabla 4.** Hidrograma sintético calculado para la avenida torrencial del 22 de junio de 2006 ocurrida en la microcuenca El Salto.

Tiempo (horas)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Caudal líquido m <sup>3</sup> /s	0,00	18,70	44,10	59,05	66	41,30	18,50	7,55	0,00
Caudal del flujo m <sup>3</sup> /s	0,00	37,4	88,2	118,1	132	82,6	37	15,1	0,00

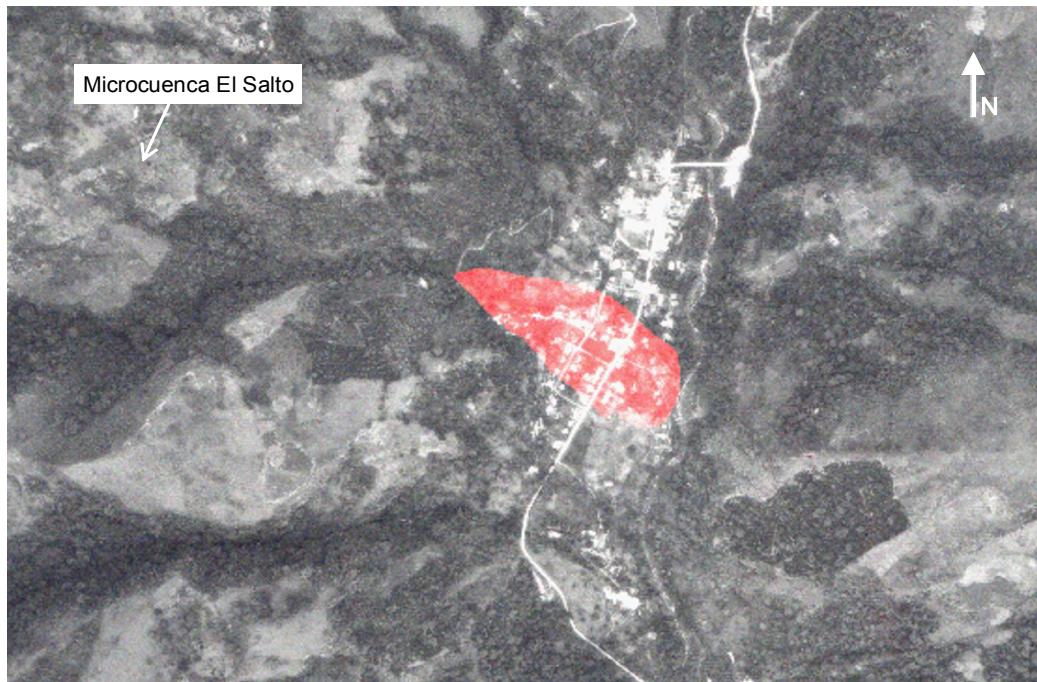
El hidrograma obtenido mediante el procedimiento descrito anteriormente, se utilizó para simular el comportamiento del flujo a través de la aplicación del modelo *mud & debris flow* del software Flo-2D. Se encontró que el área de deposito simulada no corresponde con la real zona de afectación del flujo del 22 de junio de 2006 (Figura 3); en este sentido, el hidrograma calculado con el modelo del SCS no es una buena representación del comportamiento del flujo ocurrido el 22 de junio de 2006 en la microcuenca El Salto.

Existen pruebas suficientes para aceptar el método del hidrograma analítico y rechazar la hipótesis del modelo del hidrograma sintético del SCS en su aplicación a la microcuenca El Salto. Los tres modelos empleados para calcular la velocidad promedio del flujo difieren tan solo en 0,4% sobre la media y están soportados

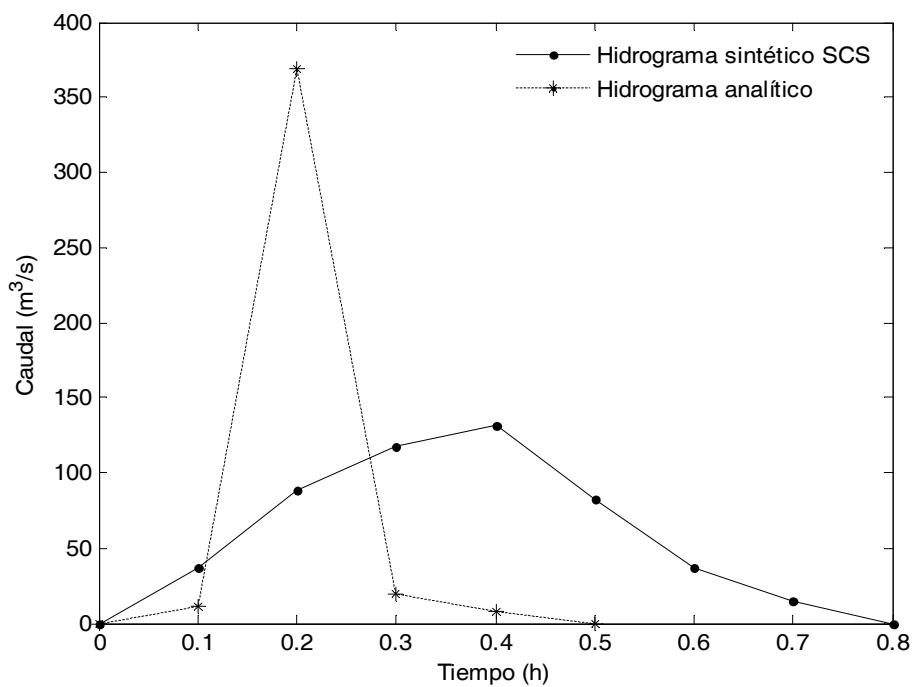
en principios físicos sólidos, lo cual permite dar un alto nivel de certeza al valor calculado para la velocidad promedio del flujo de 4,95 m/s.

El hidrograma analítico fue calibrado mediante simulaciones con el software Flo-2D tomando como función objetivo el área de afectación en el cono de deyección, mientras que la simulación con el hidrograma sintético del SCS sólo se aproximó en un 64% con dicha área de afectación.

El hidrograma obtenido con la aplicación del modelo del SCS, subvaloró de manera significativa la magnitud del caudal pico del flujo torrencial del 22 de junio de 2006, ya que el caudal máximo calculado con base en mediciones de campo fue 279 % mayor al obtenido con el modelo del SCS (Figura 4).



**Figura 3.** Resultados de la simulación con Flo2D para el flujo torrencial del 22 de junio de 2006 en la microcuenca El Salto, empleando el hidrograma sintético del SCS.



**Figura 4.** Comparación gráfica del hidrograma analítico con el hidrograma sintético del SCS para en flujo torrencial del 22 de junio de 2006 ocurrido en la microcuenca El Salto.

A pesar de que el volumen del hidrograma sintético calculado con el modelo SCS presenta un valor aproximado al volumen de escorrentía real del flujo, su distribución temporal no es correcta, lo cual se evidencia en que el tiempo base de este hidrograma es superior al reportado a través del hidrograma analítico.

El hecho de que tal hidrograma, no represente el flujo torrencial objeto de análisis, se debe a que los parámetros de ese modelo sintético fueron determinados con información hidrometeorológica de cuencas localizadas en una zona geográfica (Estados Unidos de América) diferente a las condiciones biogeofísicas de los Andes colombianos.

Un flujo torrencial con concentraciones de material sólido tan altas (coeficiente de concentración en volumen de 0,5 en promedio) como el caso del evento del 22 de junio de 2006, no se rige por las leyes y principios de la hidráulica clásica de flujos newtonianos y están dominados por otro tipo de relaciones reológicas (Iverson, 1997); por tanto, un modelo hidrológico como el hidrograma unitario sintético del SCS elaborado con base en el comportamiento de un flujo newtoniano no puede extrapolarse para ser aplicado a un flujo torrencial hiperconcentrado con características no newtonianas.

Es necesario fortalecer el corpus teórico de la hidrología para que soporte modelos reológicos que simulen el transito de hidrogramas de este tipo de flujos.

## 4. Conclusiones

El hidrograma analítico calculado para el flujo torrencial ocurrido el 22 de junio de 2006 en la microcuenca El Salto, representa el comportamiento hidrológico de tal evento y puede ser empleado para diseñar medidas de mitigación del riesgo de desastre en el centro poblado de Villa Restrepo.

La modelación elaborada al flujo torrencial del 22 de junio de 2006 ocurrido en la microcuenca El Salto, permitió constatar que el hidrograma sintético del SCS no captura el verdadero comportamiento hidrológico en la zona de estudio, y no debe utilizarse para calcular hidrogramas en el diseño de estructuras hidráulicas ni en la elaboración de mapas de amenaza, con el tipo de flujo analizado.

La presente es una investigación preliminar, y se deben desarrollar investigaciones similares en otras áreas de estudio para diversos eventos extremos con el propósito de evaluar la aplicación de modelos sintéticos en la generación de hidrogramas, y determinar si deben o no emplearse en las cuencas torreneciales de los Andes colombianos y calibrar sus parámetros para estas áreas.

Debido a que un flujo torrencial está gobernado por principios no Newtonianos, es necesario desarrollar sus hidrogramas con base en modelos reológicos que tengan en cuenta las propiedades viscoplásticas e inerciales particulares de este tipo de flujos (*Debris-flow*), ya que son relevantes en el comportamiento de los balances de energía y momentum.

## Agradecimientos

Esta investigación hizo parte de la tesis de Maestría de Miguel Ignacio Barrios y Esther Julia Olaya que contó con el apoyo económico del comité central de investigaciones y desarrollo científico de la Universidad del Tolima, y del Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Proyecto: Evaluación Integral del Riesgo por Avenidas Torreneciales, caso Villa Restrepo Ibagué Tolima

## Referencias

- Barrios M, y Olaya E. 2007. Evaluación integral del riesgo por avenidas torreneciales, caso Villa Restrepo, Ibagué Tolima, Trabajo de grado de Maestría, Universidad del Tolima, Ibagué, 215 P.
- Chow V, Maidment D, y Mays L, 1994. Hidrología Aplicada, McGraw-Hill, 583 P.
- Hattinger, Hubert. 1974. Corrección de torrentes II: Hidráulica torrencial y obras de ingeniería. Mérida, Venezuela : Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Oficina de Publicaciones. 116 P.
- Iverson, R. M. 1997. The physics of debris flows, U.S. Geological Survey, American Geophysical Union, pp 254 - 295.
- Iverson, R.M., and R. Denlinger. 2001. Flow of variably fluidized

granular masses across three dimensional terrain, Journal of Geophysical Research, vol 106, pp 537-522.

Kozlovskii, E. 1988. Landslides and mudflows, Volume I, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 234 P.

O'Brien, J. 2006. Flo-2d users manual online , version 2006.01 . 94 P. Nutrioso, United States : Flo-2d software, january, 2006 cited 10 feb. 2007 . Available from Internet: <URL:[http://www.flo-d.com/v2006/documentation/manual\\_main\\_2006.pdf](http://www.flo-d.com/v2006/documentation/manual_main_2006.pdf)>

TRAGSA, 1998. Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de erosión, ediciones mundi-Prensa, 945 P.

Wang J. S., and C. Jan, 1999. Rheological Behavior of Gravel-Mud Mixtures, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan, pp 3-10.