

SIMULACIÓN INTEGRADA COMPARATIVA DE AVENIDAS TORRENCIALES. CASO DE ESTUDIO: MOCOÁ-COLOMBIA

N. Reyes, J. M. Barros, C. Fuentes, C. Barajas, J. Escobar-Vargas, L. F. Prada y A. Ramos

Instituto Geofísico, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

E-mail: nidia.reyes@javeriana.edu.co, j_barros@javeriana.edu.co, cafuentesc@unal.edu.co, cbarajasgarzon@gmail.com,
jorge-escobar@javeriana.edu.co, lf.pradas@javeriana.edu.co, a-ramos@javeriana.edu.co

Introducción

El Municipio de Mocoa está ubicado en la parte norte del Departamento del Putumayo, Colombia y su población actual aproximada es de 43.731 habitantes (DANE, 2005). Su territorio se ubica en una zona de piedemonte y es atravesado por dos ríos: el Mulato y el Sangoyaco, el cual es alimentado por las quebradas Taruca y la Taruquita.

Las fuertes lluvias que se presentaron el 31 de marzo de 2017 en horas de la noche, precedidas de lluvias de alta intensidad registradas los días anteriores, detonaron procesos de remoción en masa en la parte alta del municipio, que sumados a represamientos parciales en los cauces y procesos de socavación, generaron un evento de avenida torrencial que ocasionó daños catastróficos, en términos de pérdidas humanas y materiales (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Se estima que en dicho evento fue depositado un volumen de aprox. 3'000.000 m³ de material en el área municipal, del cual, 30% provino de deslizamientos, 10% de la precipitación y 60% de procesos de socavación y erosión, principalmente en el lecho y las bancas de los cuerpos de agua por donde el flujo transitó.

El flujo de material desagregado observado en Mocoa, fue generado por la interacción de diversos procesos físicos, estudiados por disciplinas como la hidrología, la geología, la geotecnia y la dinámica de fluidos. De forma general, el desarrollo de un proceso de este tipo se puede describir en las siguientes etapas: (i) inicia con un evento hidrológico, en donde existe un flujo base inicial y una escorrentía superficial generada, (ii) en función del tiempo y la intensidad de la precipitación el suelo se va saturando e incrementa la presión de poros, provocando el inicio de movimiento de masas de suelo y (iii) se forma un flujo desagregado el cual transita por medio de laderas y cauces naturales provocando procesos de erosión y depósito.

Teniendo en cuenta los procesos involucrados en dichas etapas, el presente trabajo presenta la metodología empleada para modelación fluido-dinámica del evento ocurrido en Mocoa en marzo de 2017. Debido a su complejidad y al alto número de procesos físicos asociados, se propuso realizar su simulación empleando cuatro herramientas de modelación numérica disponibles en el mercado: FLO-2D, RAMMS, Open TELEMAC y R. AVAFLOW, buscando evaluar diferentes opciones para la modelación de este tipo de flujos y comparar las limitaciones y ventajas que presentan estas herramientas de simulación computacional.

Metodología

Inicialmente, se analizaron las características de las herramientas seleccionadas, particularmente, las ecuaciones de gobierno que solucionan, el tipo de software (licenciado o de código abierto y libre distribución), el método numérico empleado y la posibilidad de modelar cambios morfológicos en el cauce. En la Tabla 1 se presenta una comparación de las características generales de las herramientas empleadas. Las ecuaciones de gobierno de todos los programas son las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones.

Para la construcción de los modelos, se contó con información secundaria entregada por diferentes entidades gubernamentales y recolectada directamente a través de trabajo de campo. Fue empleado un modelo de elevación digital (DEM) de una resolución de 5 metros y datos de precipitación correspondientes, en su mayoría, a dos años de registro de una estación pluviográfica ubicada en la parte alta del municipio.

Tabla 1- Comparación de las herramientas empleadas para la simulación del evento.

Criterio	FLO2D	RAMMS	RAVAFLOW	OPEN TELEMAC
Licenciado	SI	SI	NO	NO
No. de fases del flujo	(1)	(1)	(2)	(1)
Discretización espacial	DF ¹	DF	DF	DF / FEM ²
Tipo de malla	Estruc.	Estruc.	Estruc.	Estruc./ No Estruc.
Evolución del lecho	NO	NO	SI	SI
Acoplar modelo hidrológico	SI	NO	SI	SI
Condición Inicial	NO	SI	SI	SI

Por la carencia de estaciones de medición de caudal en la cuenca, fue necesario realizar transposición de caudales empleando información de cuenca vecina con características similares. Fueron definidas catorce unidades de respuesta hidrológica (microcuencas) y evaluados diferentes modelos hidrológicos, dentro de los cuales fue seleccionado el GR4J por presentar mejores resultados en el proceso de calibración.

La simulación hidrológica permitió estimar series minutas de caudales en cada subcuenca para el día del evento, los cuales fueron empleadas como condiciones de entrada (o términos fuente) en los modelos construidos en FLO-2D, RAMMS y Open Telemac. Para el caso de R.AVAFLOW, se trabajó directamente con valores de precipitación, buscando estudiar la erosión presentada al interior de cada una de las subcuencas, haciendo uso de los módulos con los que cuenta el programa para la simulación de ese tipo de fenómenos.

La modelación del componente geotécnico del evento, que buscaba calcular la distribución en el tiempo de los volúmenes de sólido deslizados, se realizó empleando una herramienta de libre distribución: *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model* (TRIGRS), la cual contempla un modelo geomecánico para calcular volumen deslizado por área, teniendo en cuenta la variación de la presión de poros en el perfil de suelo, en el tiempo y en la zona no saturada. Posteriormente, fue empleado R.AVAFLOW para transitar los volúmenes deslizados y generar condiciones de entrada de volúmenes de sólidos para los otros tres modelos (FLO-2D, RAMMS y Open Telemac).

Como parte de la información secundaria recolectada, se contó con mediciones de profundidad de la mancha de inundación del evento en más de 80 puntos a lo largo del municipio. Estas mediciones, fueron empleadas para estimar la exactitud de los resultados de las diferentes herramientas en términos de altura de lámina de agua, evaluando el error en cada punto como la diferencia absoluta entre la profundidad de la lámina de agua observada y simulada.

Resultados y discusión

Los resultados de la simulación comprenden la estimación de la lámina libre de flujo, la magnitud de la velocidad y el volumen depositado en el área de estudio para el día del evento. Algunos resultados de las cuatro herramientas se presentan en Figura 1 y

¹ DF: Método de diferencias finitas

² FEM: Método de elementos finitos

a continuación, se ofrece una discusión sobre los resultados y las características generales de cada uno de los programas.

Cabe resaltar que la comparación entre las herramientas se realizó en términos de la magnitud de las diferencias entre las alturas simuladas y las observadas, el volumen de sólidos depositados, la similitud de las áreas inundadas con respecto a las fotografías aéreas y la versatilidad de la herramienta para la representación de fenómenos como la erosión.

(i) FLO-2D: en términos generales, se logró reproducir la forma de la mancha inundación y las velocidades de flujo que se esperaban, pero no se logró reproducir adecuadamente el volumen de sólidos transitado. Esto se debe esencialmente a que el software no cuenta con un modelo de erosión para modelar el flujo de lodos y detritos y por lo tanto no simula la erosión de bancas. Las alturas de flujo fueron subestimadas, alcanzándose diferencias hasta de 3 m con respecto a lo observado.

ii) RAMMS: Se observaron limitaciones en cuanto al número de hidrogramas de entrada que se pueden ingresar al modelo. La zona con mayor afectación por el evento el nivel de lámina de agua simulada se encuentra en el rango de 0.1 a 0.4 metros, siendo un estimativo bajo en comparación con los valores observados; las diferencias con respecto a lo observado llegan a alcanzar los 3 m. No fue posible modelar procesos de socavación y erosión con esta herramienta.

iii) R. AVAFLOW: A diferencia de las otras herramientas empleadas, esta modela dos fases de flujos desagradados, incorporando términos fuente de erosión debido al flujo y a erosión mecánica; lo anterior siendo lo que permite simular los procesos de erosión del lecho a medida que el flujo avanza en el espacio y tiempo. Se lograron representar los volúmenes de sólidos que se estima fueron transportados en el evento.

iv) Open TELEMAC: Presenta gran versatilidad por ser un modelo de código abierto; así, requerimientos adicionales en la modelación pueden ser suplidos por medio de la modificación y/o implementación de rutinas. Adicionalmente, el uso de una malla no estructurada, permite refinar en zonas de interés. Originalmente, el modelo solo representa el movimiento de agua clara y aunque permite el cálculo de sólidos en suspensión, estos no afectan la hidrodinámica, por lo que la modelación estaría bajo el supuesto de que el material transportado corresponde a agua sin materiales sólidos. La anterior dificultad fue sorteada a través de la modificación del código fuente, que permitió la representación de la mancha de inundación y las velocidades esperadas.

Conclusiones

-Se realizó una comparación entre cuatro herramientas computacionales con el fin de establecer cuál de ellas permitía representar, en mejor forma, el evento de flujo de detritos ocurrido en Mocoa. Todas ellas, permiten estimar de buena forma el área de la marca dejada por el flujo de detritos, pero subestiman las alturas del material depositado cuando se compara con los datos observados en campo.

-Se observó que los programas que no permiten hacer cambios morfológicos en los cauces de los cuerpos de agua (FLO-2D, RAMMS) no son los más apropiados y, por lo tanto, no son recomendables para realizar la simulación de este tipo de flujos. El que permitió realizar la mejor representación de los volúmenes depositados y la mancha de inundación fue R. AVAFLOW.

-Teniendo en cuenta la extensión del área de interés, y limitaciones asociadas con el tiempo computacional demandado por los diferentes programas, se establece que los que permiten tener una mejor relación tiempo/resolución espacial son R.AVAFLOW y OpenTELEMAC.

-Se considera que la complejidad de los procesos físicos asociados al flujo de detritos ocurrido en Mocoa y la gran

cantidad de escalas espaciotemporales presentes en estos procesos, hace que la representación del evento por medio de la simulación sea de un nivel de complejidad alto. Es por esto que la selección de la herramienta a emplear debe ser resultado de un proceso de análisis riguroso, en el cual se establezca el mejor balance entre la realidad observada, información existente y calidad de la misma, modelo constitutivo a emplear y método numérico empleado para realizar la simulación.

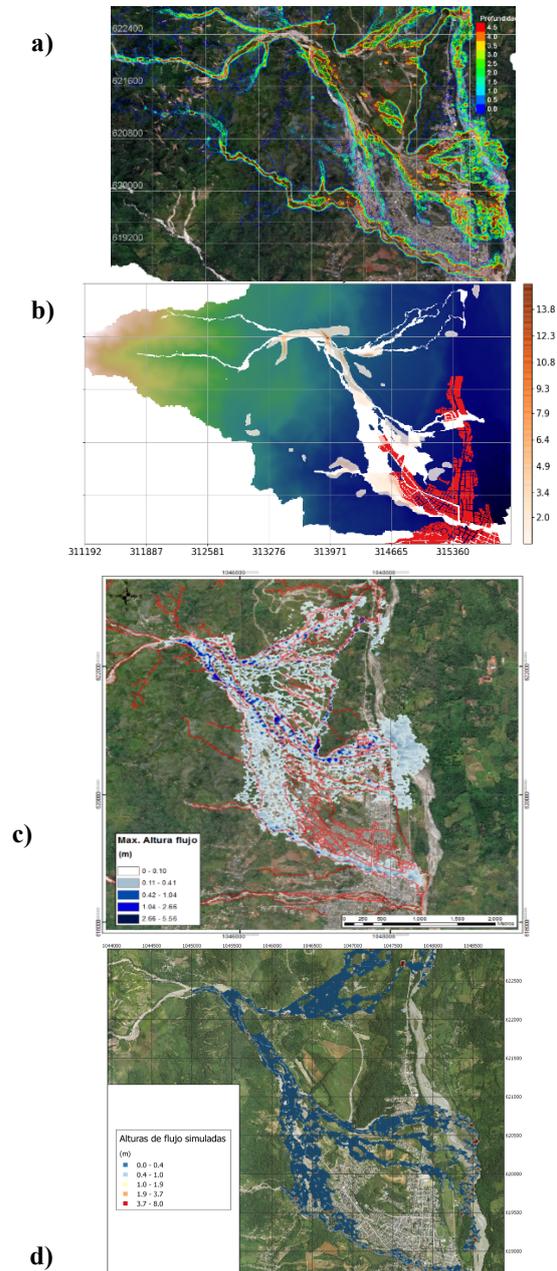


Figura 2.- Máximas alturas de flujo del simuladas con cuatro herramientas de simulación numérica: a) OpenTELEMAC, b) R.AVAFLOW, c) RAMMS y d) FLO-2D

Referencias

- Corpoamazonia, (2003).** Análisis de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada taruca y sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de la población de Mocoa departamento del putumayo. 145 pp.
- FLO 2D Inc. (2015).** Introducción al Modelo FLO-2D Pro.
- Departamento Nacional de Estadística. (DANE) (2005).** Censo General 2005: Manual Técnico [En Línea]. [Disponibile en: <<http://www.dane.gov.co/censo/files/ManualTecnico.pdf>>. 2005.
- Servicio Geológico Colombiano. (2017).** Caracterización del movimiento en masa tipo flujo del 31 de marzo de 2017 en Mocoa – Putumayo. Bogotá D. C.