

Metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia

Risk assessment method for mud flows and avalanches in Colombia

JORGE EDUARDO UPARELA OLIVERA¹ - MANUEL GARCÍA LÓPEZ²

1. Ingeniero civil. Estudiante de la maestría en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Magíster en Ingeniería Civil. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

jorge.uparela@mail.escuelaing.edu.co - manuel.garcia@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/03/2018 Aceptado: 09/04/2018

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

A lo largo del presente artículo se establece una metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia mediante el estudio de algunas metodologías existentes a escalas nacional e internacional, la cual se aplicó al caso de estudio de la cuenca de la quebrada La Chapa, un sitio históricamente vulnerable a la ocurrencia de flujos de lodo.

En primer lugar, se evaluó la amenaza de la cuenca de la quebrada utilizando el método de relación de frecuencias por medio de sistemas de información geográfica, considerando como factores condicionantes: la litología, la geomorfología, la cobertura vegetal y la topografía. También, se evaluó la amenaza por flujos de lodo y avalanchas al casco urbano y la zona rural del municipio de Paz de Río para diferentes periodos de retorno utilizando como herramienta el *software* FLO 2D, el cual permite modelar flujos hiperconcentrados como flujos de detritos y flujos de lodos. El *software* predice alturas de depósito y presión de impacto de los flujos, las cuales son variables utilizadas en el cálculo de la amenaza.

El análisis de la vulnerabilidad se realizó teniendo en cuenta variables como el grado de exposición y la calidad de la construcción de las edificaciones.

Finalmente, se calculó el riesgo tomando como variables la amenaza y la vulnerabilidad.

Los resultados obtenidos coinciden en señalar que algunas viviendas del barrio Santa Teresa, situado en el casco urbano del municipio de Paz de Río, están en zona de riesgo. También muchas viviendas del área rural se encuentran en zonas de alto riesgo, a pesar de que en los últimos años muchas familias han decidido mudarse del lugar debido a los recientes eventos, que han ocasionado pérdidas humanas y materiales.

Palabras claves: amenaza, avalancha, lodo, modelación, riesgo, sedimentos, susceptibilidad, vulnerabilidad.

Abstract

This document established a methodology for risk assessment of mud flows and torrential floods in Colombia through the study of some existing methodologies at national and international level, which was applied to the case study of the basin of Quebrada La Chapa, a site historically susceptible to the occurrence of mud flows. In the first place, the threat of the ravine basin was evaluated using the method of frequency relation by means of geographic information systems, the conditioning factors: lithology, geomorphology, vegetation cover, and topography. Also, the threat of mud and torrential flows to the urban area and the rural area of the municipality of Paz de Río was evaluated for the different return periods using FLO 2D software as a tool, which allows the modeling of hyperconcentrated flows as debris flows and sludge flows. The software predicts deposit heights and impact pressure of the flows, which are variables used in the threat calculation.

Vulnerability analysis is performed taking into account the variables such as the degree of exposure and the quality of the construction of the buildings.

Finally, the risk was calculated taking the threat and the vulnerability as variables.

The results obtained coincide in the urban area of the municipality of Paz de Río some housing in the Santa Teresa neighborhood is in the risk zone. Also, many rural dwellings are located in high risk areas, despite the fact that, in recent years, many families have decided to move due to the latest events that caused human and material losses.

Keywords: Flood, Hazard, modelling, mud, risk, sediments, susceptibility, torrential flood, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

La Región Andina colombiana es susceptible de sufrir frecuentes procesos geológicos internos y externos, los cuales generan grandes procesos físicos, tales como terremotos, erupciones volcánicas, fusión de nieves, que, sumados a las lluvias intensas, ocasionan desastres naturales como los flujos de lodos y avalanchas. Además, el desconocimiento o falta de políticas de prevención y mitigación de riesgos por flujos de lodos y avalanchas aceleran el desarrollo de los desastres.

El problema central, ya identificado, es el elevado número de desastres causado por flujo de lodos y avalanchas en Colombia.

Los flujos de lodos y avalanchas son movimientos en masa muy complejos, que generan daños en infraestructura (edificaciones y carreteras) y afectación humana (muertos, heridos, desplazados), lo cual genera, a su vez, problemas sociales, de salud y educación.

En los últimos 30 años, Colombia ha sido uno de los países más vulnerables a desastres naturales en América. En un informe presentado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en septiembre de 2008, se revela que en promedio cada año ocurren 597 desastres en Colombia, superando a Perú (585), México (241) y Argentina (213) (*Vanguardia*, 2009).

Entre 2006 y 2014 hubo 3181 muertos y 12,3 millones de afectados debido a los desastres naturales (DNP, 2015). En el caso de las avalanchas (caso específico de desastre natural), entre 1998 y 2015 hubo un total de 335 eventos, los cuales dejaron como consecuencia: 334 muertos, 302 heridos, 101 desaparecidos y 2452 viviendas destruidas (NGRD, 2016).

A partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas orientadas a la planificación del progreso seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible. Por esta razón, el Servicio Geológico Colombiano publicó en el año 2016 la *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. En la guía se describen los procesos metodológicos para hacer estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local, de modo que su ejecución sea viable a partir de la información y las herramientas disponibles y que con esto se consigan condiciones básicas de calidad, rigurosidad

y uniformidad en los estudios. La guía se podrá aplicar en la mayoría de las cabeceras municipales y centros poblados pequeños y medianos de Colombia (Ávila, Cubillos & Granados, 2016).

Sin embargo, en la metodología de evaluación de riesgo que se plantea en la guía se limita exclusivamente a riesgos por movimientos en masa, es decir, se excluyen los procesos metodológicos para evaluación de riesgos por inundaciones o avenidas torrenciales. Los desastres causados por los flujos de lodos y avalanchas en Colombia obligan a reflexionar y tomar medidas al respecto. ¿De qué manera se pueden reducir, mitigar y prevenir los desastres ocasionados por los flujos de lodos y avalanchas?

Frente a este contexto, en el presente artículo se pretende desarrollar una metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodo y avalancha, de tal manera que se puedan determinar áreas en riesgo y desarrollar herramientas y metodologías que ayuden a tomar decisiones correctas para reducir el riesgo que corren de las personas.

METODOLOGÍA

En la investigación planteada se contempló la revisión de la información disponible respecto al estudio de evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas. De la recopilación y estudio de metodologías, se estableció una metodología de evaluación de riesgos por flujos de lodos y avalanchas en Colombia. Finalmente, dicha metodología se aplicó a una zona vulnerable a ocurrencia de procesos de remoción en masa, sobre todo a avalanchas, como fue la cuenca de la quebrada La Chapa, en el departamento de Boyacá.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA

La metodología establecida (de acuerdo con el estudio de la bibliografía) más conveniente para el estudio de riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia se resume a continuación (tabla 1).

Tabla 1
Resumen de la metodología planteada (elaboración propia)

Variable	Definición	Procedimiento de análisis
1. Amenaza	Condición potencial de que un evento natural se presente con una intensidad tal que pueda afectar la vida de las personas o causar daños en infraestructura física. Se evalúa en función de la probabilidad de ocurrencia temporal y espacial. La intensidad de la amenaza se expresa en términos de velocidad y presión de impacto en el caso de flujos de lodo y avalanchas (Ávila, Cubillos & Granados, 2016).	1.1 Definición de los factores geoambientales o condicionantes que intervienen en la amenaza de una cuenca.
		1.2 Análisis de la susceptibilidad de una cuenca.
		1.3 Zonificación de la susceptibilidad de una cuenca.
		1.4 Identificación y análisis de los factores detonantes que intervienen en la amenaza en una cuenca.
		1.5 Zonificación de la amenaza en una cuenca.
		1.6 Identificación y análisis de los factores que intervienen en la amenaza de una zona urbana.
		1.7 Zonificación de la amenaza en una zona urbana.
2. Vulnerabilidad	Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada en caso de que se presente un evento natural. Se expresa en una escala de 0 (no pérdida) a 1 (pérdida total) (Ávila et al., 2016).	2.1 Identificación y localización de los elementos expuestos.
		2.2 Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia.
		2.3 Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad.
		2.4 Zonificación de la vulnerabilidad.
3. Riesgo	El riesgo es una medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, la salud, la propiedad o el ambiente. Se mide en vidas humanas, propiedades en riesgo y daños ambientales. Generalmente, el riesgo estimado como el producto de la probabilidad de la amenaza por las consecuencias para los elementos en riesgo (Suárez, 1998).	3.1 Cálculo del riesgo
		3.2 Zonificación del riesgo.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Localización

La quebrada La Chapa es el límite político entre los municipios de Socha y Tasco. Nace en el páramo de Mesa Alta a una altura de 3600 msnm, fluye aguas abajo a través de una topografía escalonada y recibe aportes de agua de quebradas menores. La longitud total de la quebrada es de aproximadamente 6,5 kilómetros y desemboca en el río Chicamocha, en el municipio de Paz de Río, en la zona donde está ubicada la inspección de policía de Santa Teresa, corregimiento del municipio de Socha, sobre la cota 2250 m. En la parte media del recorrido de la quebrada se localiza el campamento de la mina La Chapa (figura 1).



Figura 1. Localización del área de estudio (Google Earth).

Antecedentes

En la quebrada La Chapa, tanto en la cabecera como en su cauce, se presentan frecuentemente movimientos en masa que, según la clasificación de Varnes (1978), son denominados flujos de lodos y avalanchas de detritos. Se movilizan materiales granulares de diferentes tamaños, desde bloques de varios metros de diámetro hasta fracciones más finas de arenas, embebidas en una fase líquida formada por agua, suelos finos (limo y arcilla) y aire, acompañado por residuos vegetales. Debido a la alta pendiente por donde se moviliza la quebrada, el lodo alcanza altas velocidades, lo cual trae consecuencias devastadoras sobre las personas y viviendas que habitan en la zona.

Según Chaparro (2004), citando a Sarmiento (1986), en el año 1963 ocurrió una avalancha que arrasó la inspección de Santa Teresa, dejando como saldo fatal un centenar de muertos. Además, los días 6 y 9 de noviembre de 1986 se presentaron avalanchas que afectaron la mina La Chapa e inundaron varias estructuras de propiedad de Acerías Paz del Río S.A.; afortunadamente, no hubo pérdidas humanas, pero se vieron afectadas algunas tierras fértiles (Chaparro, 2005).

Según el Comité Regional para la Prevención y Atención de Desastres de Boyacá (Crepad), se presentó una avalancha en noviembre de 1995, dejando como saldo cuatro muertos, aparte de los daños estructurales sufridos por cuatro viviendas que tuvieron que ser evacuadas.

El 6 de diciembre de 2011 hubo una avalancha, la cual dejó una persona herida (Radio, 2011).

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA

El procedimiento empleado para el estudio de riesgo en la cuenca de la quebrada La Chapa se presenta más adelante (tabla 2).

RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología al caso de estudio de la cuenca de la quebrada La Chapa fueron los siguientes:

- Mapa de vulnerabilidad a movimientos de remoción en masa en la cuenca de la quebrada La Chapa.

- Mapa de amenaza de la cuenca de la quebrada La Chapa por movimientos de remoción en masa.
- Mapa de amenaza en las áreas rural y urbana por flujos de lodos (para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años).
- Mapa de vulnerabilidad física (para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años).
- Mapa de riesgo (para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años).

Los mapas obtenidos se observan en los planos 1, 2, 3, 4 y 5.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Susceptibilidad de la cuenca

La susceptibilidad es la facilidad con que un movimiento de remoción en masa puede ocurrir sobre la base de las condiciones naturales del suelo. Existen varias metodologías para estimar la susceptibilidad. En el presente trabajo se utilizó el método de relación de frecuencias, el cual pertenece al grupo de métodos estadísticos bivariados. Este método se emplea para establecer la correlación espacial entre la ubicación de deslizamientos y factores que generan los deslizamientos. A continuación, se presentan los factores tenidos en cuenta para la evaluación de la susceptibilidad de la cuenca de la quebrada La Chapa y su incidencia en la ocurrencia de movimientos en masa:

- *Pendiente.* Del mapa de pendientes se concluyó que el terreno es escarpado, y los movimientos en masa más frecuentes son aquellos que están en laderas con pendientes entre los 16° y 35°. Esto se debe a que los esfuerzos cortantes movilizados son muy altos (por la inclinación de la ladera) y existe una gran probabilidad de que se supere la resistencia al corte del suelo.
- *Geología.* En el mapa geológico o litológico se evidencia que los movimientos en masa más frecuentes se presentan en los depósitos coluviales del Cuaternario. La razón es que tales materiales corresponden a antiguos deslizamientos depositados en las bases de las laderas. Su inestabilidad se debe a que son materiales sueltos y heterogéneos.
- *Geomorfología.* El mapa geomorfológico evidencia que los movimientos en masa están asociados a la

Tabla 2
 Procedimiento utilizado para el caso de estudio de la quebrada La Chapa (elaboración propia)

Variable	Procedimiento de análisis	Observaciones
1. Amenaza	1.1 Definición de los factores geoambientales o condicionantes que intervienen en la amenaza de una cuenca.	Factores condicionantes: pendiente del terreno, geología, geomorfología y cobertura vegetal.
	1.2 Análisis de la susceptibilidad de una cuenca.	Se aplicó el método de relación de frecuencias.
	1.3 Zonificación de la susceptibilidad de una cuenca.	Se utilizó la función "álgebra de mapas" ArcGIS.
	1.4 Identificación y análisis de los factores detonantes que intervienen en la amenaza en una cuenca.	Se analizó la lluvia como factor detonante aplicando la metodología de Castellanos (1996).
	1.5 Zonificación de la amenaza en una cuenca.	Se utilizó ArcGIS.
	1.6 Identificación y análisis de los factores que intervienen en la amenaza de una zona urbana.	Modelación de flujos de lodos usando el software FLO 2D. Factores: caudal líquido, concentración volumétrica de sedimentos, gravedad específica de sólidos, viscosidad y esfuerzo cortante.
	1.7 Zonificación de la amenaza en una zona urbana.	De acuerdo con las alturas de depositación y presiones de impacto se realiza la zonificación.
2. Vulnerabilidad	2.1 Identificación y localización de los elementos expuestos.	De acuerdo con el plano catastral obtenido en el IGAC y el plano de amenaza se identificaron los elementos expuestos.
	2.2 Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia.	Se hizo un inventario de las viviendas ubicadas en la zona de amenaza alta. La información obtenida de las viviendas fue: número de pisos, sistema estructural y abertura de las fachadas.
	2.3 Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad.	Aplicación de la metodología propuesta por Ingeocim (1998).
	2.4 Zonificación de la vulnerabilidad	De acuerdo con la categorización de Chaparro (2005) se zonificó la vulnerabilidad en ArcGIS.
3. Riesgo	3.1 Cálculo del riesgo	El riesgo se calcula como el producto de la amenaza y la vulnerabilidad
	3.2 Zonificación del riesgo	De acuerdo con la categorización de Ávila et al. (2016), se zonificó el riesgo en ArcGIS.

unidad geomorfológica IIa, nomenclatura asociada al relieve ondulado en la que se describen procesos de remoción en masa en los cuales hay traslación de detritos por acción hidrogravitacional (coluviones).

- *Cobertura vegetal.* El mapa de cobertura vegetal permite concluir que los movimientos en masa se presentan con mayor frecuencia en zonas con escasa cobertura vegetal, como es el caso del arbustal abierto y el herbazal. Esto se debe a que la ausencia de raíces permite que el suelo se erosione fácilmente.

Por último, se concluye que de acuerdo con los resultados del método de relación de frecuencias, la inestabilidad de las laderas en la cuenca de la quebrada La Chapa está asociada a la presencia de coluviones en la mayor parte de la cuenca y a la escasa cobertura vegetal en algunas zonas.

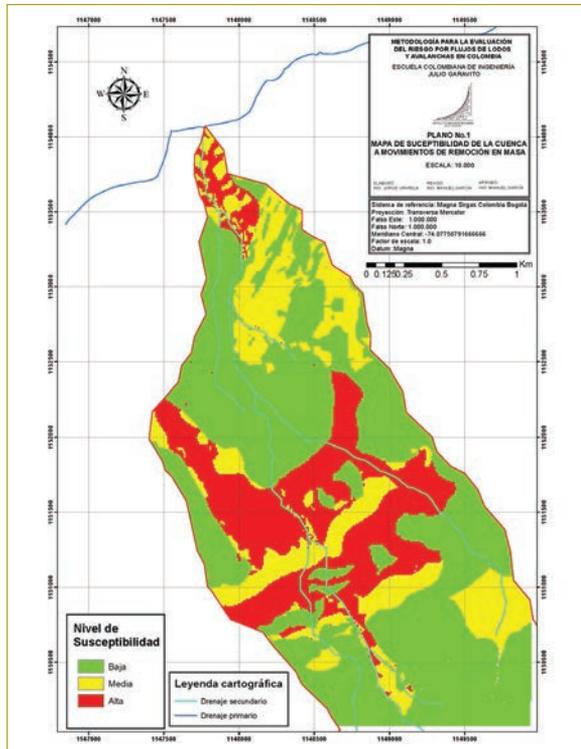
Evaluación de la lluvia como factor detonante de movimientos de remoción en masa

Para evaluar la lluvia como factor detonante de deslizamientos en la quebrada La Chapa se utilizó la metodología probabilística de Castellanos (1996), en la cual se asocia una lluvia crítica acumulada a la formación de este tipo de eventos.

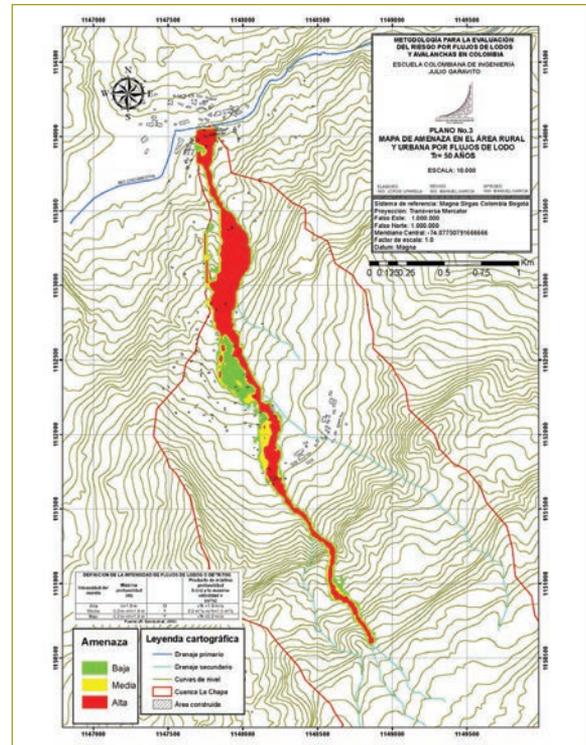
Se realizó el análisis para dos eventos de gran magnitud ocurridos en el pasado. Estos eventos fueron flujos de lodos generados por la continua actividad del deslizamiento de Mesa Alta.

En resumen, el método consistió en realizar la gráfica de precipitación acumulada vs. días antecedentes. En el cambio brusco de la pendiente de la gráfica se logra evidenciar la lluvia que detonó ambos eventos.

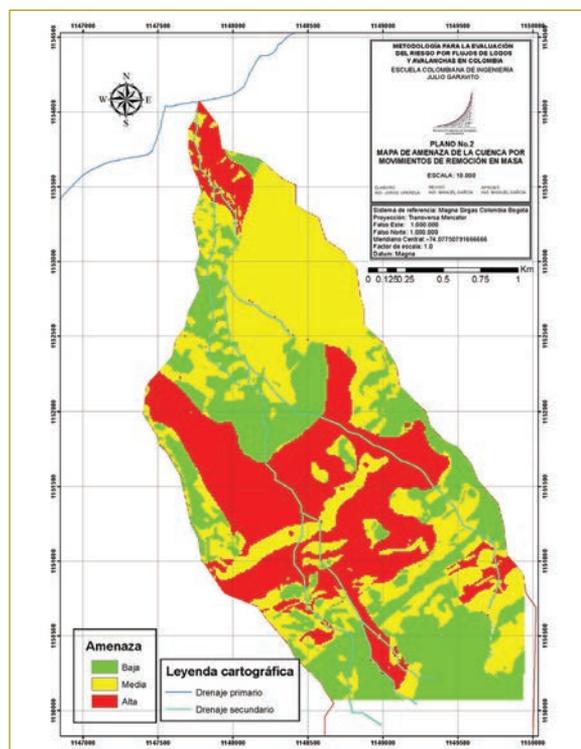
El análisis realizado para los dos eventos históricos permite concluir que ambos se produjeron en una tem-



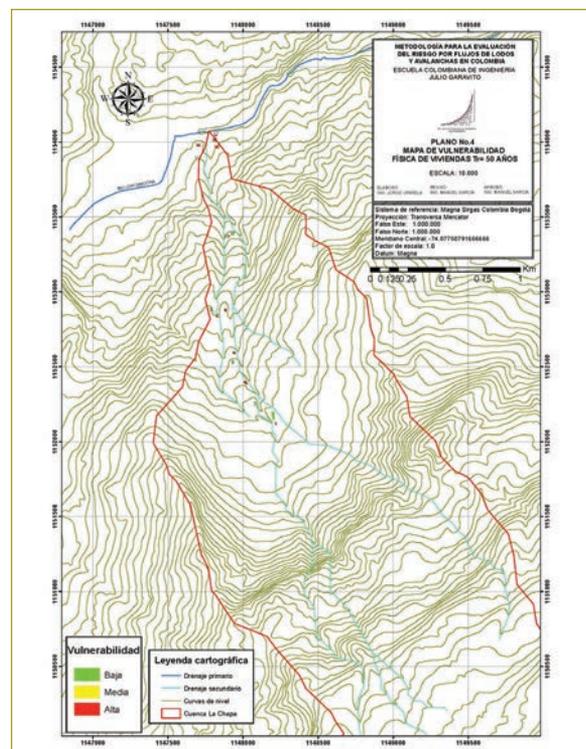
Plano 1. Mapa de la vulnerabilidad de la cuenca a movimientos de remoción en masa.



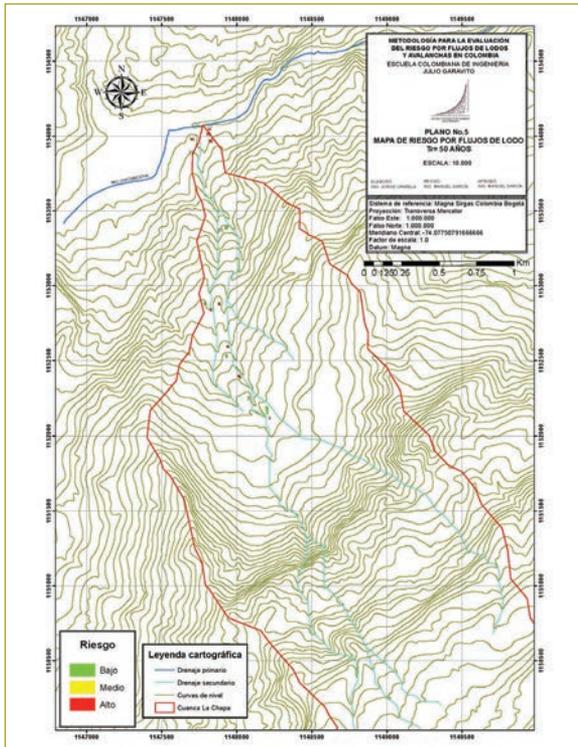
Plano 3. Mapa de amenaza en las áreas rural y urbana por flujos de lodo $T_r = 50$ años.



Plano 2. Mapa de amenaza de la cuenca por movimientos de remoción en masa.



Plano 4. Mapa de vulnerabilidad física de viviendas $T_r = 50$ años.



Plano 5. Mapa de riesgo por flujos de lodo $T_r = 50$ años.

porada de intensas lluvias (entre octubre y diciembre) y que los deslizamientos se detonaron probablemente por lluvias acumuladas entre 30 y 45 días de duración.

Amenaza de la cuenca

La amenaza de la cuenca de la quebrada La Chapa se obtuvo sumando matemáticamente la susceptibilidad y la lluvia. El resultado final fue el mapa de amenaza de la cuenca. El grado de amenaza alta está localizado en la parte media de la cuenca y en sectores específicos como en el páramo de Mesa Alta y la desembocadura de la quebrada. En la mayoría de las zonas de amenaza alta están localizados los depósitos coluviales y las áreas de poca cobertura vegetal, lo cual confirma la gran incidencia que tienen estos factores en la generación de movimientos en masa.

Amenaza en los cascos rural y urbano

La amenaza en los cascos rural y urbano depende básicamente de la altura de depositación y presión de

impacto de las avalanchas que frecuentemente fluyen por el cauce de la quebrada La Chapa.

Para la modelación de flujos de lodos existe gran variedad de *softwares*. En el presente trabajo se utilizó el *software* FLO 2D, el cual permite la modelación de flujos hiperconcentrados como flujos de lodos y avalanchas. Este *software* se ha utilizado en numerosas investigaciones y la comunidad científica lo ha aceptado como válido hoy en día.

Inicialmente, se hizo una calibración del modelo, tomando como referencia algunas alturas de depositación de la última avalancha (9/12/11), las cuales aún se evidencian. De la calibración se concluyó que los parámetros de esfuerzos cortantes y propiedades físicas del flujo utilizados (de acuerdo con ensayos realizados por Cuervo et al. (1989) y Chaparro (2005)) se ajustan satisfactoriamente para la modelación de los flujos en la zona de estudio.

La modelación se realizó para eventos con periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años.

Según los resultados obtenidos, las zonas que presentan el grado de Amenaza Alta son la vereda La Chapa (área rural), y los barrios Santa Teresa y Libertador (área urbana).

Anteriormente había mayor número de viviendas en zona de Amenaza Alta, pero muchas de ellas fueron abandonadas ante el peligro al que estaban expuestas las personas que habitaban en ellas. Incluso la mina La Chapa, que funcionó durante muchos años, también fue abandonada. Actualmente se logra evidenciar la destrucción de algunas edificaciones de la mina debido al impacto de la última avalancha.

Análisis de la vulnerabilidad

El grado de afectación que puedan sufrir las viviendas ubicadas en la zona de amenaza alta se realiza mediante el análisis de vulnerabilidad física, que depende de la calidad de las edificaciones y su grado de exposición.

En total, fueron 17 viviendas localizadas en la zona de amenaza alta, a las cuales se les hizo un inventario para poder evaluar la vulnerabilidad.

Se hizo el análisis de vulnerabilidad para los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años.

De los resultados obtenidos, se concluye que:

- Para el periodo de retorno de 5 años, 7 viviendas tienen cierto grado de vulnerabilidad. El 57 % se ubica en la zona de vulnerabilidad alta, el 14 % en la zona de vulnerabilidad media y el 29% en la zona de vulnerabilidad baja.
- Para el periodo de retorno de 10 años, 11 viviendas tienen cierto grado de vulnerabilidad. El 55 % se ubica en la zona de vulnerabilidad alta, el 18 % en la zona de vulnerabilidad media y el 27 % en la zona de vulnerabilidad baja.
- Para el periodo de retorno de 25 años, 11 viviendas tienen cierto grado de vulnerabilidad. El 73 % se ubica en la zona de vulnerabilidad alta y el 27 % en la zona de vulnerabilidad baja.
- Para el periodo de retorno de 50 años, 17 viviendas tienen cierto grado de vulnerabilidad. El 65 % se ubica en la zona de vulnerabilidad alta y el 35 % en la zona de vulnerabilidad baja.

Cálculo del riesgo

El riesgo de los elementos expuestos al materializarse la amenaza es una función de la probabilidad de ocurrencia del evento, la vulnerabilidad y el valor en pesos del elemento expuesto. El riesgo estima el costo de daños asociados a la ocurrencia del evento.

Para el presente trabajo, dado que no fue posible estimar los costos de las edificaciones, se dejó expresado el riesgo como un porcentaje del costo de las viviendas.

Se calculó el riesgo para los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años.

De los resultados obtenidos se concluye que:

- Para el periodo de retorno de 5 años, 7 viviendas tienen cierto grado de riesgo. El 57 % se ubica en la zona de riesgo alto, el 14 % en la zona de riesgo medio y el 29 % en la zona de riesgo bajo.
- Para el periodo de retorno de 10 años, 11 viviendas tienen cierto grado de riesgo. El 55 % se ubica en la zona de riesgo alto, el 18 % en la zona de riesgo medio y el 27 % en la zona de riesgo bajo.
- Para el periodo de retorno de 25 años, 11 viviendas tienen cierto grado de riesgo. El 55 % se ubica en la zona de riesgo alto, el 18 % en la zona de riesgo medio y el 27 % en la zona de riesgo bajo.
- Para el periodo de retorno de 50 años, 17 viviendas tienen cierto grado de riesgo. El 59 % se ubica en

la zona de riesgo alto, el 6 % en la zona de riesgo medio y el 35 % en la zona de riesgo bajo.

CONCLUSIONES

Conclusiones generales de la metodología

- En Colombia son muy frecuentes los movimientos de remoción en masa, especialmente los flujos de lodos, flujos de detritos y avenidas torrenciales. Estos eventos han dejado como resultado víctimas fatales y pérdidas económicas millonarias. Se considera necesario incrementar el número de investigaciones que permitan predecir mejor el comportamiento de los flujos, y tomar decisiones que reduzcan el riesgo asociado a este tipo de movimientos de remoción en masa.
- En el presente trabajo se elaboró una metodología para hacer estudios de riesgo por flujos de lodos y avalanchas a escala detallada, y que se puede aplicar a cabeceras municipales en Colombia.
- El trabajo consistió en efectuar una revisión bibliográfica de estudios de riesgo en los ámbitos nacional e internacional. Luego se identificaron los métodos más convenientes para aplicarlos en Colombia, considerando el acceso a la información y viabilidad técnica y económica.
- Se procuró desarrollar una metodología concisa y metódica en la cual se indican los pasos que se deben seguir, los insumos requeridos y los resultados que se esperan al aplicarla.
- Los resultados de estudios que se realicen utilizando la metodología que se planteó en el presente trabajo permitirán a las autoridades gubernamentales tomar medidas preventivas y correctivas para salvaguardar la integridad de las personas que habitan en zonas de riesgo alto.
- Debido a la complejidad en el comportamiento de los flujos de lodos y avalanchas, donde intervienen muchas variables, la metodología planteada integra varias áreas del conocimiento, como geología, geotecnia, hidráulica, hidrología y sistemas de información geográfica.
- La utilización de mapas en la metodología planteada exigió el uso de un sistema de información geográfica (SIG), el cual es una de las características destacadas de la metodología. Los SIG tienen muchas ventajas, entre las cuales se cuenta la agrupación de

los mapas en una serie de capas que permiten una mejor organización e interpretación. Adicionalmente, se pueden hacer operaciones matemáticas con los mapas, cuyos resultados pueden analizarse en una forma rápida, racional y fácilmente inteligible para el usuario, permitiendo así una evaluación ágil y sencilla.

- Para la modelación de flujos de lodos se planteó el uso del *software* FLO 2D, el cual permite modelar flujos hiperconcentrados. La ventaja del *software* es su gran acierto en la predicción del comportamiento de flujos hiperconcentrados. Además, tiene un postprocesador que genera los mapas de amenaza directamente. Otra ventaja es su interfaz amigable y sencilla, que permite al usuario trabajar cómodamente.

Conclusiones del caso de estudio (quebrada La Chapa)

De acuerdo con el estudio de la información disponible sobre la cuenca de la quebrada La Chapa, y la visita de campo realizada para el presente trabajo, se concluye lo siguiente:

- En la cuenca media del río Chicamocha se presentan numerosos procesos de remoción en masa, especialmente en la cuenca de la quebrada La Chapa, en la cual ocurren con frecuencia avalanchas y flujos de lodos que han ocasionado pérdidas de vidas humanas, daños en infraestructura y pérdidas económicas para empresas dedicadas a la minería.
- Se estableció que los flujos de lodos y avalanchas en la quebrada La Chapa se originan en un gran deslizamiento traslacional activo, ubicado en el páramo de Mesa Alta. El material del deslizamiento es un depósito glacial (Cuaternario). En periodos de lluvias fuertes y prolongadas, se produce una aceleración en el deslizamiento que vierte sus materiales a un boquete en el cual comienzan los flujos de lodos.
- Interviene en la generación de flujos de lodos la litología de los materiales, en los cuales predominan bloques de areniscas embebidos en limos y arcillas arenosas.
- El material del deslizamiento de Mesa Alta está formado por arcilla arenosas, que envuelven bloques de arenisca de diferentes tamaños. Al moverse los flujos por el canal de la quebrada, éste se engruesa por el aporte de materiales de deslizamientos laterales.
- De acuerdo con Cuervo et al. (1989), Chaparro (2005) y los ensayos realizados a una muestra de depósito de flujos de lodo en el presente trabajo, se verificó que el material de la matriz fina clasifica como una arena arcillosa. La concentración volumétrica de los flujos se calculó entre 35 y 40 %.
- Se identificaron tres zonas bien definidas para el desarrollo de los flujos: la zona de origen que corresponde al deslizamiento del Mesa Alta, el cual aporta los materiales para la formación de los flujos. Una zona de flujo canalizado de una gran pendiente y escalonada, por donde se movilizan los flujos. La zona de depositación, donde la pendiente se reduce y se comienzan a depositar los flujos.

Según la aplicación del Método para la Evaluación del Riesgo por flujos de lodos y avalanchas al caso de estudio de la quebrada La Chapa, se concluye que:

- Las áreas de la cuenca de la quebrada La Chapa con grado de amenaza alta para la formación de movimientos de remoción en masa son las correspondientes a la parte media, y algunos sectores específicos como el páramo de Mesa Alta y la desembocadura de la quebrada.
- Se realizó el mapa de amenaza de movimientos de remoción en masa y no el de flujos de lodos, ya que los flujos de lodos se presentan en un sitio específico (páramo de Mesa Alta). Al contrario, otros movimientos de remoción en masa, como deslizamientos y caídas de rocas, se distribuyen espacialmente en toda el área de la cuenca. Por lo tanto, resultó ser más conveniente hacer el mapa de amenaza para los movimientos en masa que se presentan en toda el área de la cuenca.
- El mapa de amenaza en los cascos rural y urbano permite concluir que no son muchas viviendas las que se encuentran en el grado de amenaza alta. Esto se debe al desalojo de muchas viviendas que se ubicaron en esa zona durante mucho tiempo, ante el peligro inminente de las avalanchas. En total, se contabilizaron 17 viviendas con grado de amenaza alta.
- De las 17 viviendas clasificadas en el grado de amenaza alta, en cuanto al riesgo físico de las estructuras, se obtuvieron valores altos de riesgo para la mayoría de las viviendas.

RECOMENDACIONES

- La modelación de flujos de lodos tiene cierto grado de incertidumbre, asociada con la calidad de la información de campo. Para minimizar la incertidumbre se debe tener una descripción precisa de lo ocurrido (tiempos de duración de la avalancha, profundidades de inundación, entre otros).
- La calidad de la modelación de flujos también depende del grado de precisión del levantamiento topográfico. Se recomienda hacer esta clase de levantamiento con curvas de nivel cada cinco metros en aquellas zonas donde se presenten este tipo de eventos.
- Se debe tener un registro de alturas de depositación de avalanchas ocurridas en el pasado en aquellas zonas donde frecuentemente se presente este tipo de eventos. Esto permitirá hacer una mejor calibración de los modelos que simulan el comportamiento de ese tipo de flujos.
- Para el caso de la cuenca de la quebrada La Chapa se recomienda instalar una estación pluviométrica, ya que las más cercanas quizás no representen con precisión el comportamiento hidrológico de la cuenca.
- El mapa de riesgo obtenido de un estudio de evaluación del riesgo debe emplearse para prever obras de protección y reubicación de las viviendas afectadas, que se encuentren en la zona de alto riesgo.
- En las poblaciones afectadas deben establecerse sistemas de alerta temprana de funcionamiento automático, que sean confiables y permanentes. Además, se recomiendan zonas de evacuación adecuadas para pronóstico anticipado. Su efectividad depende de la calidad de la instrumentación en el origen de los eventos.

REFERENCIAS

- Aparicio, F. (1992). Relaciones lluvia-escorrentía. En *Fundamentos de hidrología de superficie* (pp. 203-237). México, D.F.: Limusa. Recuperado a partir de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf.
- Asale, R. (s. f.). Definición de riesgo. Recuperado el 20 de diciembre de 2016, a partir de <http://dle.rae.es/?id=WT8tAMI>.
- Ávila, G., Cubillos, C. & Granados, A. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa* (1.ª ed.). Bogotá: Minminas y Servicio Geológico Colombiano.
- Beverage, J. & Culbertson, J. (1964). Hyperconcentrations of suspended sediment. *Journal of Hydraulics Division*, 90, 117-128.
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists*. Oxford: Pergamon Press.
- Brunsdon, D. (1984). Mudslides. En *Slope Instability* (p. 620). Chichester: John Wiley & Sons.
- Calvello, M., Cascini, L. & Mastroianni, S. (2013). Landslide zoning over large areas from a sample inventory by means of scale-dependent terrain units. *Geomorphology*, 182, 33-48.
- Cardozo, C. (2013, mayo). Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina). Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado a partir de <http://www.famaf.unc.edu.ar/wpcontent/uploads/2014/04/16-Gulich-Cardoso.pdf>.
- Castellanos, R. (1996). Lluvias críticas en la evaluación de amenaza de eventos de remoción en masa. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Chaparro, O. (2005). Evaluación de riesgo por flujos de lodo en la quebrada La Chapa, municipio de Tasco y Socha (Boyacá). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Chow, V. T., Maidment, D. & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada* (McGraw Hill).
- Chuquisengo, O., Ferradas, P. & Díaz, J. (2005). Gestión de riesgo en los gobiernos locales. En *Gestión de riesgo en los gobiernos locales* (p. 12). Lima. Recuperado a partir de <https://books.google.com.co/books?id=4DDRTIuIMO4C&printsec=frontcover&hl=e s#v=onepage&q&f=false>.
- Contreras, S. (2007, marzo). Avalúo de edificaciones y construcciones. Guanare: Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora (Unellez).
- Cruz, M. (2001). Determinación de la tormenta de diseño. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 22 (2), 27-30.
- Curso online gratis de ArcGIS 9.3. (2016, diciembre). Recuperado el 23 de diciembre de 2016, a partir de <http://www.todosig.es/9-mdt-y-tin.html>.
- Dai, F., Lee, C. & Ngai, Y. (2001a). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64 (1), 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X).
- Dai, F., Lee, C. & Ngai, Y. (2001b). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64 (1), 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X).
- Esper, M. (2014). Susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos, mediante SIG, en una porción del departamento de Iglesia, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71 (2), 267-274.
- García, M. (1998). *Manual de estabilidad de taludes* (Invías). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- García, M. (2008). *Sedimentation engineering. Processes, measurements, modeling and practice*. ASCE.
- García, R., Noya, M. & López, J. (2003). Hazard mapping for debris-flow events in the alluvial fans of northern Venezuela. Presentado in Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Davos, Suiza.
- Huang, X. & García, M. (2016). A perturbation solution for bingham-plastic mudflows. *Journal of Hydraulics Engineering*, 123 (11), 986-994.
- Ingeniería y Geotecnia Ltda. (1988). Problemas geotécnicos en la región Belencito - Paz de Río (N. 222-12). Bogotá.
- Instituto Geográfico Nacional de Argentina (2016, diciembre). Introducción. Recuperado el 23 de diciembre de 2016, a partir de <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Introduccion>.
- Johnson, A. (1984). Debris flow. En *Slope Instability* (p. 620). Chichester: John Wiley & Sons.

- Langlé, R. (2010, junio). ¿Qué es un SIG? Recuperado el 23 de diciembre de 2016, a partir de <https://langleruben.wordpress.com/%c2%bfque-es-un-sig/>.
- Lara, G. (2002). Análisis de amenaza por inestabilidad de la parte sur del municipio de Guacamayas, departamento de Boyacá. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Lavell, A. (2001). Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición. Recuperado el 20 de diciembre de 2016, a partir de http://www.cridlac.org/cd/cd_inversion/pdf/spa/doc15036/doc15036.htm.
- Lavell, A., Narváez, L. & Pérez, G. (2009). *La gestión del riesgo de desastres: un enfoque basado en procesos* (1.a ed.). Lima.
- López, D. (2004). Evaluación de amenaza por deslizamientos: para el área correspondiente con la plancha 172-I-B. Paz de Río, Boyacá, Colombia, a través de sistemas de información geográfica. Bogotá: Universidad Nacional de Córdoba.
- López, J., González, M. & Scaini, A. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca del río Arga, en Pamplona, y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y Proyectos*, 1 (12), 15-30.
- Luna, B., Blahut, J., Van Westen, C., Sterlacchini, S., Van Asch, T. & Akbas, S. (2011). The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2047-2060.
- Manzanal, D., Drempevic, V., Haddad, B., Pastor, M. & Martin, M. (2016). Application of a New Rheological Model to Rock Avalanches: An SPH Approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (6), 2353-2372. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0909-5>.
- Mayorga, R. (2003a). Desarrollo de una metodología para la determinación de lluvias detonantes de deslizamientos. *Meteorología Colombiana*, 73-80.
- Mayorga, R. (2003b). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 157-168.
- Medidores de flujo - Instrumentación (s.f.). Recuperado 23 de diciembre de 2016, a partir de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/INST_Flujo/fundamentosteoricos.html.
- Mejía, R. (2011). *El riesgo y la historia empresarial antioqueña. Tres casos de estudio* (p. 50). Medellín: Fondo Editorial Universidad Eafit.
- Méndez, A. & Pérez, L. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin American Journal of Physics Education*, 4 (1), 237-245.
- Millán, J. & González, A. (2001). Evaluación de la acción del hombre en los estudios de amenaza y riesgo por deslizamiento en Bogotá (Colombia). Presentado en el III Simposio Panamericano de Deslizamientos, Bogotá.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo. Decreto 1807 de 2014.
- Moreira, A. (1996). Los sistemas de información geográfica y sus aplicaciones en la conservación de la diversidad biológica. *Ambiente y Desarrollo*, 7 (2), 80-86.
- Neumann, A. & Downs, M. (2002). Instrumentos de apoyo para el análisis y la gestión de riesgos naturales en el ámbito municipal de Nicaragua. Managua: Edisa. Recuperado a partir de <http://www.cridlac.org/digitalizacion/pdf/spa/doc14893/doc14893.htm>
- NGRD (2016). Consolidado anual de emergencias. Recuperado el 11 de agosto de 2016, a partir de <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/>.
- Niño, V. (2015). *Comparación de criterios de engrosamiento del flujo para la simulación de avalanchas en casos colombianos de estudio*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Núñez, R. & Giraldo, M. (2012). *Conceptos generales sobre gestión del riesgo de desastres y contexto del país* (p. 6). Santiago: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Recuperado a partir de http://www.preventionweb.net/files/38050_38050conceptosbsicos.pdf.
- O'Brien, J. (2009). Flo 2D. *Reference Manual*. Recuperado a partir de <https://www.flo-2d.com/download/>.
- O'Brien, J. & Julien, P. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediments flows (pp. 260-279). Presentado en Specialty Conference on Delineations of Landslide, Flashflood, and Debris Flow Hazards in Utah. Utah: Logan.
- O'Brien, J., Julien, P. & Fullerton, W. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulics Engineering*, 119 (2), 244-261.
- O'Brien, J. & Julien, P. (1988). Laboratory Analysis of Mud Flow Properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (8), 877-887.
- Obregón, C. & Lara, J. (2014). Aplicación del mapa de susceptibilidad por procesos de geodinámica superficial a la gestión territorial. *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO)*, 17 (33), 73-80.
- Ojeda, J., Castro, E., Valencia, A. & Fonseca, S. (2002). Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa: guía metodológica. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Páez, J. (2016). Modelación matemática de flujos de avalancha. Bogotá: Universidad de los Andes. Recuperado a partir de <https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/10141.pdf>.
- Pérez, J. (2004). Estudio Geológico y Geomorfológico de la Microcuenca de la quebrada La Chapa. Municipios Paz de Río - Socha - Tasco. Crepad Boyacá.
- Pierson, T. & Costa, J. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Engineering Geology*, 7, 1-12.
- Política nacional de gestión de riesgos de desastres, Pub. L. No. Ley 1523 de 2012 (2012). Recuperado a partir de <http://www.alcaldiaibogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=47141>.
- Prieto, C. (2011). Metodología para la evaluación de riesgos por deslizamientos en líneas de conducción de hidrocarburos. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Radio, C. (2011, diciembre 8). Una persona herida deja una avalancha en Paz de Río, Boyacá. Recuperado 31 de marzo de 2017, a partir de http://caracol.com.co/radio/2011/12/08/regional/1323334320_589788.html.
- Rodríguez, A. (1987, junio). Estudio geológico y mapa de riesgos quebrada La Chapa -Área de los municipios de Socha, Tasco y Paz del Río - Depto. de Boyacá. Ministerio de Minas y Energía.
- Sánchez, J. (2016). Hidrología superficial (III): Relación precipitación - escorrentía. Universidad de Salamanca. Recuperado a partir de http://hidrologia.usal.es/temas/Hid_sup_3.pdf.
- Sepúlveda, A. & Patiño, J. (2016). Metodología para la evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Stefanović, M., Gavrilović, Z. & Bajčetić, R. (2015). Local Communities and Challenges of Torrential Floods. OSCE.
- Suárez, Á., Peraldo, G., Badilla, E. & Obando, L. (2009). Zonificación geomorfológica para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la cuenca del río Viejo, Puriscal, Costa Rica. *Revista geológica de América Central*, 41(1), 55-69.
- Suárez, J. (1998). Zonificación de amenaza y riesgo. En *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (Ingeniería de Suelos Ltda, pp. 355-376). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Recuperado a partir de <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonastropicales.html>.

Suárez, J. (2001). Erosión en masa. Flujos y avalanchas. En *Control de erosión en zonas tropicales* (pp. 167-192). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Suárez, N. & Suárez, J. (2006). *Caracterización, análisis y diagnóstico de los flujos de lodos y detritos en la cuenca de la quebrada Angulito en Girón, Santander*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Takahashi, T. (1981). Debris flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13, 57-77.

Undro (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis*. Ginebra. Recuperado a partir de <http://www.unisdr.org/files/resolutions/NL800388.pdf>.

Unicef (2006). *Prevención y mitigación de desastres* (pp. 16-28). Santo Domingo: Unicef.

Vanguardia (2009). Los 10 desastres naturales que marcaron al país. Recuperado el 18 de mayo de 2017, a partir de <http://www.vanguardia.com/historico/26659-los-10-desastres-naturales-que-marcaron-alpais>.