Maestría en Ingeniería Civil

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

Jorge Eduardo Uparela Olivera

Bogotá, D.C., 24 de mayo de 2017

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

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

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en geotecnia

Manuel García López

Director

Bogotá, D.C., 24 de mayo de 2017

Escuela Colombiana de Ingeniería
Julio Garavito

La tesis de maestría titulada “Metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia”, presentada por Jorge Eduardo Uparela Olivera, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis

Manuel García López

Jurado

José Vicente Amórtegui Gil

Jurado

Ricardo Salazar Ferro

Bogotá, D.C., 02 de junio de 2017

Dedicatoria

A mis padres, familiares y amigos más cercanos.

Agradecimientos

A Dios por darme sabiduría y paciencia para la realización de este sueño.

A la familia Uparela Olivera por ser mi apoyo incondicional.

A la Dra. Noemí González quien me facilitó una licencia educacional del software FLO 2D.

A mi director de tesis, el Ingeniero Manuel García López, quien me acompañó y asesoró en la realización de mi tesis.

A entidades gubernamentales como Corpoboyacá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y el Servicio Geológico Colombiano, quienes me facilitaron la información requerida para la realización de mi tesis.

Resumen

En este documento 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 nivel nacional e internacional, la cual fue aplicada al caso de estudio de la cuenca de la quebrada La Chapa, un sitio históricamente susceptible 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 que en el casco urbano del municipio de Paz de Río algunas viviendas del barrio Santa Teresa está 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 trasladarse debido a los recientes eventos que han ocasionado pérdidas humanas y materiales.

Palabras clave: Amenaza, avalancha, lodo, modelación, riesgo, sedimentos, susceptibilidad, vulnerabilidad.

TABLA DE CONTENIDO **Pág No.**

1 INTRODUCCIÓN ---------- 1
2 OBJETIVOS---------- 3
2.1 Objetivo general ---------- 3
2.2 Objetivos específicos ---------- 3
3 METODOLOGÍA ---------- 4
4 MARCO TEÓRICO ---------- 5
4.1 CONCEPTOS BASICOS SOBRE RIESGO Y DESASTRE ---------- 5
4.1.1 Riesgo ---------- 5
4.1.2 Factores que componen el riesgo ---------- 6
4.2 GESTIÓN DE RIESGOS ---------- 8
4.2.1 Análisis del riesgo ---------- 9
4.2.2 Cálculo del riesgo ---------- 11
4.2.3 Evaluación del riesgo ---------- 11
4.2.4 Mitigación y prevención de riesgos ---------- 12
4.3 FLUJOS HIPERCONCENTRADOS ---------- 12
4.3.1 Definición ---------- 12
4.3.2 Clasificación ---------- 13
4.4 REOLOGÍA DE FLUIDOS ---------- 24
4.5 REOLOGÍA DE FLUJOS HIPERCONCENTRADOS ---------- 26
5 MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS ---------- 31
5.1 ANÁLISIS DE AMENAZA ---------- 31
5.1.1 Definición de los factores geoambientales o condicionantes que intervienen en la amenaza por flujos de lodos y avalanchas de una cuenca ---------- 31
5.1.2 Análisis de la susceptibilidad de una cuenca a flujos de lodos y avalanchas ---------- 33
5.1.3 Zonificación de la susceptibilidad de una cuenca a flujos de lodos y avalanchas ---------- 35
5.1.4 Identificación y análisis de los factores detonantes que intervienen en la amenaza por flujos de lodos y avalanchas en una cuenca ---------- 35
5.1.5 Zonificación de la amenaza por flujos de lodos y avalanchas en una cuenca ---------- 38
5.1.6 Identificación de los factores que intervienen en la amenaza por flujos de lodos y avalanchas de una zona urbana ---------- 39
5.1.7 Zonificación de la amenaza por flujos de lodos y avalanchas en una zona urbana 49
5.1.8 Utilización del programa FLO 2D para la modelación de flujos de lodos y avalanchas ---------- 51
5.1.9 Calculo de la amenaza por flujos de lodos y avalanchas en la zona urbana ---------- 54
5.1.10 Aplicación de un SIG para la zonificación de la amenaza por avalanchas y flujos de lodos ---------- 56
5.2 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ---------- 61
5.2.1 Identificación y localización de los elementos expuestos ---------- 62
5.2.2 Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia ---------- 62

TABLA DE CONTENIDO **Pág No.**

5.2.3 Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad. ---------- 67
5.2.4 Zonificación de la vulnerabilidad ---------- 67

5.3 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO ---------- 68

5.3.1 Cálculo del riesgo ---------- 68
5.3.2 Pérdidas económicas directas o indirectas. Cálculo del riesgo ---------- 69
5.3.3 Categorización del riesgo ---------- 71

6 CASO DE ESTUDIO: CUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA ---------- 73

6.1 INTRODUCCIÓN ---------- 73
6.2 LOCALIZACIÓN ---------- 73
6.3 ANTECEDENTES ---------- 74
6.4 GEOLOGÍA ---------- 75

6.4.1 ESTRATIGRAFÍA ---------- 75
6.4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL ---------- 80

6.5 GEOMORFOLOGÍA ---------- 82

6.5.1 Unidades geomorfológicas ---------- 83
6.5.2 Procesos morfodinámicos ---------- 86

6.6 FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN LA QUEBRADA LA CHAPA ---------- 88

6.6.1 Morfología ---------- 88
6.6.2 Caracterización geotécnica ---------- 101

7 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA ---------- 103

7.1 DEFINICIÓN DE LA ESCALA Y TAMAÑO DE UNIDADES DE TRABAJO ---------- 103
7.2 DEFINICION DE LOS FACTORES CONDICIONANTES QUE INCIDEN EN LA AMENAZA DE LA CUENCA ---------- 104
7.3 GENERACIÓN DE MAPAS DE FACTORES CONDICIONANTES ---------- 105

7.3.1 Pendiente del terreno ---------- 105
7.3.2 Unidades geológicas ---------- 106
7.3.3 Mapa geomorfológico ---------- 106
7.3.4 Mapa de cobertura vegetal ---------- 106
7.3.5 Mapa de inventario de movimientos de remoción en masa ---------- 106

7.4 GENERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA CUENCA ---------- 112

7.4.1 Aplicación del Método de relación de frecuencias ---------- 112

7.5 ANÁLISIS DE LA LLUVIA COMO FACTOR DETONANTE ---------- 118

7.5.1 MARCO HIDROLOGICO REGIONAL ---------- 118
7.5.2 CARACTERIZACION HIDROLOGICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA ---------- 119
7.5.3 SELECCIÓN DE LA LLUVIA DE DISEÑO ---------- 121
7.5.4 SELECCIÓN DE EVENTO HISTORICO Y DETERMINACION DE SU LLUVIA CRÍTICA Y PERIODO DE RETORNO ---------- 122

TABLA DE CONTENIDO **Pág No.**

7.5.5 ZONIFICACIÓN DE LA LLUVIA COMO FACTOR DETONANTE DE FLUJOS DE LODOS ---------- 129

7.6 ZONIFICACION DE LA AMENAZA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA ---------- 132
7.7 CUANTIFICACIÓN DE LA LLUVIA COMO FACTOR DETONTANTE DE LA AMENAZA DEL CASCO URBANO ---------- 134

7.7.1 CAUDAL LÍQUIDO ---------- 138
7.7.2 CONCENTRACION VOLUMETRICA DE SEDIMENTOS ---------- 145

7.8 MODELACIÓN DE FLUJOS DE LODOS CON EL SOFTWARE FLO 2D ---------- 145

7.8.1 PARÁMETROS DE ENTRADA ---------- 146
7.8.2 PROCEDIMIENTO ---------- 147
7.8.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO ---------- 148
7.8.4 RESULTADOS DEL MODELO ---------- 150

7.9 ZONIFICACION DE LA AMENAZA EN EL AREA RURAL Y URBANA ---------- 155
7.10 ANALISIS DE LA VULNERABILIDAD ---------- 160

7.10.1 INVENTARIO DE VIVIENDAS ---------- 160
7.10.2 VULNERABILIDAD FÍSICA ---------- 161

7.11 ANÁLISIS DEL RIESGO ---------- 165

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS ---------- 168

8.1 Susceptibilidad de la cuenca ---------- 168
8.2 Evaluación de la lluvia como factor detonante de movimientos de remoción en masa ---------- 169
8.3 Amenaza de la cuenca ---------- 169
8.4 Amenaza del casco rural y urbano ---------- 169
8.5 Análisis de la vulnerabilidad ---------- 170
8.6 Calculo del riesgo ---------- 171

9 CONCLUSIONES ---------- 172

9.1 Conclusiones generales de la metodología ---------- 172
9.2 Conclusiones del caso de estudio (Quebrada La Chapa) ---------- 173

10 RECOMENDACIONES ---------- 175
11 BIBLIOGRAFÍA ---------- 176
12 ANEXOS ---------- 182

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág No.

Figura No. 1 - Marco de referencia para evaluación de riesgo por movimientos en masa y la toma de decisiones 9
Figura No. 2 - Representación del curso de una avalancha (Vista en planta y sección transversal) 15
Figura No. 3 - Frente de onda de un flujo hiperconcentrado en la Quebrada La Chapa (Boyacá) 16
Figura No. 4 - Clasificación reológica propuesta por Pierson y Costa (1987) 18
Figura No. 5 - Clasificación reológica de los flujos de agua y sedimento..... 19
Figura No. 6 - Resistencia al flujo de varias mezclas de agua y sedimento (tamaño promedio de partículas indicado) versus concentración de sedimentos. 21
Figura No. 7 - Representación de un fluido en flujo cortante simple 24
Figura No. 8 - Curvas de flujo típicas de diferentes fluidos. 26
Figura No. 9 - Esfuerzo cortante como una función de la velocidad de corte para modelos de deformación de fluidos 28
Figura No. 10 - Variables del Método de SCS. 41
Figura No. 11 - Clasificación de la amenaza por flujo de detritos de acuerdo con su intensidad y probabilidad de ocurrencia. 55
Figura No. 12 - Exposición de elementos físicos ante una avenida torrencial 65
Figura No. 13 - Localización del estudio (Google Earth) 74
Figura No. 14 - Esquema general del procedimiento para la generación del mapa de susceptibilidad de la Cuenca de la Quebrada La Chapa 116
Figura No. 15 – Lluvia promedio mensual Estación Curital 118
Figura No. 16 - Lluvia promedio mensual Estación Tasco 118
Figura No. 17 - Lluvia promedio mensual Estación Tutasá 119
Figura No. 18 – Localización de las Estaciones Pluviométricas analizadas 120
Figura No. 19 – Curva IDF de la Cuenca de la Quebrada La Chapa 121
Figura No. 20 - Precipitación Acumulada de la Quebrada La Chapa entre septiembre y noviembre de 1986. 124
Figura No. 21 - Precipitación Acumulada de la Quebrada La Chapa entre octubre y diciembre de 2011 125
Figura No. 22 - Creación del mapa de isoyetas en ArcGIS ® 131
Figura No. 23 - Mapa de isoyetas definitivo en ArcGIS ® 131
Figura No. 24 - Delimitación de subcuencas y localización de los puntos de entrada de caudal al cauce principal, por donde viajan los flujos de lodo 134
Figura No. 25 – Mapa de Grupo Hidrológico de Suelos 136
Figura No. 26 – Mapa de uso del suelo 136
Figura No. 27 - Mapa de Numero de Curva 137
Figura No. 28 – Hietogramas de diseño para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años 139
Figura No. 29 – Modelación de la quebrada la Chapa en HEC – HMS 140
Figura No. 30– Hidrogramas de las subcuencas de la quebrada La Chapa para un periodo de retorno de 5 años 141
Figura No. 31 - Hidrogramas de las subcuencas de la quebrada La Chapa para un periodo de retorno de 10 años 142

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág No.

Figura No. 32 - Hidrogramas de las subcuencas de la quebrada La Chapa para un periodo de retorno de 25 años 143
Figura No. 33 - Hidrogramas de las subcuencas de la quebrada La Chapa para un periodo de retorno de 50 años 144
Figura No. 34 - Modelación del evento del 06 de diciembre de 2011 para verificar calibración..... 149
Figura No. 35 - Altura de depositación final del evento del 06 de diciembre de 2011 para verificar calibración..... 150
Figura No. 36 - Altura de depositación final para el periodo de retorno de 5 años..... 151
Figura No. 37- Presión de impacto del flujo para el periodo de retorno de 5 años..... 151
Figura No. 38 - Altura de depositación final para el periodo de retorno de 10 años 152
Figura No. 39 - Presión de impacto del flujo para el periodo de retorno de 10 años 152
Figura No. 40 - Altura de depositación final para el periodo de retorno de 25 años 153
Figura No. 41 - Presión de impacto del flujo para el periodo de retorno de 25 años 153
Figura No. 42 - Altura de depositación final para el periodo de retorno de 50 años 154
Figura No. 43 - Presión de impacto del flujo para el periodo de retorno de 50 años 154

ÍNDICE DE TABLAS

Pág No.

Tabla No. 1 - Clasificación de flujos hiperconcentrados 17
Tabla No. 2 – Esfuerzo cortante de cedencia y viscosidad de flujos de lodos 30
Tabla No. 3 - Valores típicos de CN 43
Tabla No. 4 - Grupos hidrológicos de suelos..... 43
Tabla No. 5 - Valores típicos de volumen de sedimentos..... 44
Tabla No. 6 – Definición del nivel de amenaza..... 56
Tabla No. 7 - Definición de la Intensidad de flujo de detritos 56
Tabla No. 8 - Factor de vulnerabilidad según el número de pisos de la edificación..... 63
Tabla No. 9 - Factor de vulnerabilidad según el tipo de abertura de las fachadas..... 64
Tabla No. 10 - Factor de vulnerabilidad según el sistema estructural..... 64
Tabla No. 11 - Categorización de la vulnerabilidad 68
Tabla No. 12 - Factor C, método de depreciación física de Ross - Heidecke 70
Tabla No. 13 - Estimación del costo aproximado de daño..... 71
Tabla No. 14 - Categorización del riesgo de bienes físicos 71
Tabla No. 15 - Categorización del riesgo para personas..... 72
Tabla No. 16 - Criterio de afectación de personas 72
Tabla No. 17 - Categorías de riesgo para bienes físicos y personas..... 72
Tabla No. 18 – Registro fotográfico de la visita a la quebrada La Chapa 93
Tabla No. 19 – Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio 101
Tabla No. 20 - Escalas de trabajo para mapas de riesgo 103
Tabla No. 21 - Dimensiones de las Unidades de Cálculo del Terreno..... 104
Tabla No. 22 – Clasificación de pendientes 105
Tabla No. 23 - Aplicación del método de relación de frecuencias..... 114
Tabla No. 24 – Parámetros morfométricos de la cuenca de la Quebrada La Chapa ... 119
Tabla No. 25 - Información de las estaciones pluviométricas analizadas 120
Tabla No. 26 -Descripción del momento justo de ocurrencia de la avalancha de 6 de diciembre de 2011..... 123
Tabla No. 27 - Umbrales de lluvia critica seleccionados para el evento del 9/11/86.... 125
Tabla No. 28 - Umbrales de lluvia critica seleccionados para el evento del 6/12/11.... 126
Tabla No. 29 -Series de máximos multianuales de los umbrales posibles para el evento del 9/11/86..... 126
Tabla No. 30 - Series de máximos multianuales de los umbrales posibles para el evento del 6/12/11..... 127
Tabla No. 31 - Parámetros de distribución de Gumbel para distintos umbrales o duraciones (Evento 9/11/86) 127
Tabla No. 32 - Parámetros de distribución de Gumbel para distintos umbrales o duraciones (Evento 6/12/11) 128
Tabla No. 33 - Lluvia crítica y periodo de retorno del evento de 09/nov/86 128
Tabla No. 34 - Lluvia crítica y periodo de retorno del evento de 6/11/12 128
Tabla No. 35 - Parámetros de distribución de Gumbel de las 3 estaciones para el umbral de 49 días 130
Tabla No. 36 - Lluvia crítica acumulada para un periodo de retorno de 2 años 130
Tabla No. 37 - Relación de precipitación acumulada y media anual por estación pluviométrica..... 132
Tabla No. 38– Parámetros morfológicos de las subcuencas de la Quebrada La Chapa 135

ÍNDICE DE TABLAS

Pág No.

Tabla No. 39 – Cálculo del tiempo de concentración de las subcuencas de la Quebrada La Chapa..... 135
Tabla No. 40 – Numero de Curva de las subcuencas..... 137
Tabla No. 41 – Concentración de sedimentos máxima por periodo de retorno..... 145
Tabla No. 42 – Características de las viviendas en zona de Amenaza Alta..... 161
Tabla No. 43 – Categorización de la vulnerabilidad para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 5 años)..... 162
Tabla No. 44 - Categorización de la vulnerabilidad para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 10 años) 162
Tabla No. 45 - Categorización de la vulnerabilidad para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 25 años) 162
Tabla No. 46 - Categorización de la vulnerabilidad para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 50 años) 163
Tabla No. 47 - Categorización del riesgo para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 5 años)..... 165
Tabla No. 48 - Categorización del riesgo para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 10 años)..... 165
Tabla No. 49 - Categorización del riesgo para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 25 años)..... 166
Tabla No. 50 - Categorización del riesgo para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 50 años)..... 166

ÍNDICE DE PLANOS

Pág No.

Plano No. 1 – Mapa de pendientes 107
Plano No. 2 – Mapa geológico 108
Plano No. 3 – Mapa geomorfológico 109
Plano No. 4 – Mapa de cobertura vegetal 110
Plano No. 5 – Mapa de inventario de movimientos de remoción en masa 111
Plano No. 6 – Mapa de susceptibilidad de la cuenca a movimientos de remoción en masa 117
Plano No. 7 – Mapa de Amenaza de la cuenca por movimientos de remoción en masa 133
Plano No. 8 – Mapa de Amenaza en el área rural y urbana por flujos de lodo Tr = 5 años 156
Plano No. 9 - Mapa de Amenaza en el área rural y urbana por flujos de lodo Tr = 10 años 157
Plano No. 10 - Mapa de Amenaza en el área rural y urbana por flujos de lodo Tr = 25 años 158
Plano No. 11 - Mapa de Amenaza en el área rural y urbana por flujos de lodo Tr = 50 años 159
Plano No. 12 – Mapa de Vulnerabilidad Física de viviendas Tr = 50 años 164
Plano No. 13 - Mapa de Riesgo por flujos de lodo Tr = 50 años 167

1 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, sumado a las lluvias intensas, ocasionan desastres naturales tales 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 identificado es el alto número de desastres ocasionados 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 a su vez genera 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. Un informe presentado en septiembre de 2008 por la Dirección Nacional de Planeación (DNP) 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 3.181 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 2,452 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 realizar 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 ello 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 ocasionados por los flujos de lodos y avalanchas en Colombia obligan a reflexionar y tomar medidas al respecto. ¿De qué manera se puede reducir, mitigar y prevenir los desastres ocasionados por los flujos de lodos y avalanchas?

Frente a este contexto la presente tesis pretende desarrollar una metodología para la Evaluación del Riesgo por flujos de lodo y avalancha, de tal forma que se puedan determinar áreas en riesgo y desarrollar herramientas y metodologías que ayuden a tomar correctas decisiones para la reducción del riesgo de las personas.

2 OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar una metodología para la evaluación de riesgos por flujos de lodos y avalanchas en Colombia mediante investigación bibliográfica, con el fin de fomentar el diseño de un manual de mitigación y prevención de riesgos por flujos de lodos y avalanchas que permita reducir los riesgos de desastres ocasionados por este tipo de movimientos de remoción en masa en Colombia.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de estudios de riesgo por flujos de lodos y avalanchas realizados a nivel nacional e internacional.
- Analizar las distintas alternativas existentes para la evaluación de la amenaza por flujos de lodos y avalanchas.
- Identificar y analizar alternativas existentes para el análisis de la vulnerabilidad física de infraestructura por flujos de lodos y avalanchas.
- Identificar y analizar alternativas existentes para la evaluación de riesgos flujos de lodos y avalanchas.
- Establecer una metodología para evaluación de riesgos por flujos de lodos y avalanchas.
- Aplicar la metodología establecida en el estudio de riesgo de la cuenca de la quebrada La Chapa, en el Departamento de Boyacá.

3 METODOLOGÍA

El trabajo de grado se desarrolló mediante una metodología deductiva y analítica, ya que, en primer lugar, se aplicaron conceptos aceptados como válidos en el estudio de evaluación de riesgos por flujos de lodos y avalanchas; y segundo, se aplicó la teoría de evaluación de riesgos a una zona susceptible a la ocurrencia de avalanchas. La metodología también fue analítica porque en el caso de aplicación, la zona susceptible a avalanchas se descompuso en sus partes o elementos para observar las causas, la naturaleza y los efectos.

La investigación planteada 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, la metodología establecida se aplicó a una zona susceptible a ocurrencia de procesos de remoción en masa, especialmente avalanchas, como fue la cuenca de la quebrada la Chapa, en el Departamento de Boyacá.

Existe una serie de planteamientos para la evaluación de riesgo por fenómenos de remoción en masa, como las establecidas en la norma NTC 5254 y la “GUÍA METODOLÓGICA PARA ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA” publicada en el año 2015 por el Servicio Geológico Colombiano. Dentro del concepto de adaptabilidad se busca dar a la metodología propuesta validez interna mediante el análisis técnico y conceptual de los planteamientos metodológicos, y validez externa en su correspondencia con estas normas.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 CONCEPTOS BASICOS SOBRE RIESGO Y DESASTRE

4.1.1 Riesgo

El origen de la palabra *riesgo,* se le atribuye tanto al latín como al árabe. Aparentemente llegó al italiano a través de la palabra *risico* o *rischio.* Del árabe proviene de la palabra *rizq* (lo que depara la providencia), o del latín *resecu* (riesgo en el mar, roca, risco) y *risicare* (desafiar, retar, enfrentar, atreverse o transitar por un sendero peligroso). El significado de riesgo estaba asociada al peligro que representaban los riscos marinos para las embarcaciones en la antigüedad (Mejía, R., 2011).

El riesgo como concepto tiene numerosas definiciones ya que las diferentes disciplinas científicas adoptan su definición de acuerdo con su punto de vista. Por tal razón, el riesgo no ha sido abordado de forma integral, sino que por el contrario ha sido fraccionado de acuerdo al enfoque de cada disciplina (Prieto, C., 2011).

La Real Academia Española define el riesgo como: Contingencia o proximidad de un daño (ASALE, s. f.).

Lavell (2001) definió el riesgo de forma global como:

> “El “riesgo” se refiere a un contexto caracterizado por la probabilidad de pérdidas y daños en el futuro, las que van desde las físicas hasta las sicosociales y culturales. El riesgo constituye una posibilidad y una probabilidad de daños relacionados con la existencia de determinadas condiciones en la sociedad, o en el componente de la sociedad bajo consideración (individuos, familias, comunidades, ciudades, infraestructura productiva, vivienda etc.). El riesgo es, en consecuencia, una condición latente que capta una posibilidad de pérdidas hacia el futuro. Esa posibilidad está sujeta a análisis y medición en términos cualitativos y cuantitativos”.

La UNDRO (1979) presenta las siguientes definiciones respecto al riesgo y sus componentes:

a. Riesgo: Número esperado de vidas perdidas, personas heridas, daños a la propiedad y la interrupción de la actividad económica debido a un fenómeno natural particular. Es el producto del riesgo específico por los elementos en riesgo (expuestos).

b. Riesgo específico: Grado esperado de pérdida debido a un fenómeno natural en particular y en función de los peligros (amenazas) naturales y la vulnerabilidad.

c. La peligrosidad o amenaza natural (Hazard): Probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente dañino en un tiempo y lugar específico.

d. La vulnerabilidad: El grado de pérdida de un determinado elemento o elementos en situación de riesgo como resultado de la ocurrencia de una catástrofe natural de una magnitud dada. Se expresa en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total).

Las definiciones de riesgo de la UNDRO corresponden a un concepto de riesgo particularizado o específico, el cual se puede llamar como "**riesgo de desastre**". Este riesgo pertenece a un subconjunto de riesgo global o total y, considerando las interrelaciones entre sus múltiples componentes, tendrá grandes relaciones con los aspectos con que se describe el riesgo global, tales como el riesgo financiero, el riesgo de salud, el riesgo tecnológico etc.

4.1.2 Factores que componen el riesgo

Cuando se habla de factores de riesgo de desastre se hace referencia a la presencia de condiciones físicas y sociales que contribuyen a la existencia de riesgo en la sociedad y que se diferencian entre sí. Además, se constituyen en factores de riesgo a raíz de relaciones, y secuencias de causa y efecto, diferenciadas (Lavell, Narváez, & Pérez, 2009).

Básicamente, hay dos tipos de factores: (1) Amenaza (eventos físicos potencialmente dañinos) y (2) vulnerabilidad. La existencia de estos factores depende de la exposición de la sociedad a los eventos físicos potencialmente peligrosos, es decir la localización en áreas potencialmente afectables (Lavell et al., 2009).

4.1.2.1 Amenaza

La amenaza o los eventos dañinos hace referencia a una serie de fenómenos que pueden ocasionar destrucción por su alto nivel de energía o puede presentar condiciones dañinas para la sociedad. Existen diferentes tipos de eventos dañinos y se pueden clasificar como naturales, socionaturales, antrópico-tecnológicos y antrópicocontaminantes (Lavell et al., 2009).

Los eventos naturales son inherentes a la dinámica de la naturaleza; los socio-naturales provienen de la intervención del ser humano en el medio ambiente, de tal forma que se generan condiciones físicas adversas; y los antrópicos son concernientes a la actividad humana en la producción, manejo y transporte de materiales peligrosos (Lavell et al., 2009).

4.1.2.2 Vulnerabilidad

Según Chuquisengo y otros (2005) la vulnerabilidad se define como:

> "El conjunto de condiciones ambientales, sociales, económicas, políticas y educativas que hacen que una comunidad esté más o menos expuesta a un desastre, sea por las condiciones inseguras existentes o por su capacidad para responder o recuperarse ante tales desastres.
>
> La vulnerabilidad de una comunidad cambia continuamente con las fluctuaciones de la población, la construcción de nuevas viviendas, carreteras, instalaciones industriales y otras obras de infraestructura.
>
> El grado de vulnerabilidad de una población expuesta a una amenaza puede ser reducido, si es que se diseñan acciones de preparación para las emergencias o si se reducen las condiciones de riesgo existentes mediante las políticas y estrategias de desarrollo local".

La vulnerabilidad hace referencia tanto a la susceptibilidad de un sistema social de ser afectado por una amenaza, como a la capacidad del mismo sistema de sobreponerse luego de la afectación. Sobre la vulnerabilidad actúan factores físicos, políticos, educativos, ideológicos, culturales, institucionales y organizativos; su combinación e interrelación constituye la

vulnerabilidad global; es un proceso complejo y dinámico (Millán & Gonzalez, 2001).

4.2 GESTIÓN DE RIESGOS

Según Núñez y Giraldo (2012), es el proceso planificado, establecido, interactivo e integral de disminución de los escenarios de riesgo de desastres de una población. Implica la complementariedad de capacidades y recursos locales, regionales y nacionales y está intrínsecamente ligada a la búsqueda del desarrollo sostenible. Es el conjunto de decisiones administrativas, de organización y conocimientos operacionales para establecer políticas y estrategias con el objetivo de disminuir el impacto de amenazas naturales y desastres ambientales y tecnológicos.

La Ley 1523 de 2012 define la gestión del riesgo como un proceso social encaminado a la formulación, ejecución, control y evaluación de planes, políticas y estrategias para el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, cuyo objetivo es contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (Política nacional de gestión de riesgos de desastres, 2012).

Ávila et al (2016) plantean tres etapas para la gestión de riesgos de desastres (Ver la Figura No. 1):

“1) Análisis del riesgo,
2) Evaluación del riesgo,
3) Mitigación y prevención del riesgo”.

Cada una de ellas consta, a su vez, de una serie de elementos y procesos que, de acuerdo con el tipo de evaluación que se realice, pueden ser de mayor o menor grado de detalle y complejidad (Ávila et al., 2016).

Figura No. 1 - Marco de referencia para evaluación de riesgo por movimientos en masa y la toma de decisiones (Ávila et al., 2016)

4.2.1 Análisis del riesgo

Según la Ley 1523 de 2012, el análisis del riesgo es la etapa en la cual se identifican las causas y escenarios de riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de ocurrencia de eventos destructivos. El análisis se realiza mediante métodos determinísticos, probabilísticos o cualitativos de la amenaza y la vulnerabilidad, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y la probabilidad de ocurrencia (Política nacional de gestión de riesgos de desastres, 2012).

El resultado de la etapa de análisis del riesgo es la estimación de daños, los costos asociados y las pérdidas potenciales.

4.2.1.1 Análisis de la amenaza

Según Ávila et al (2016) el análisis de la amenaza se desarrolla en 3 fases:

> "(1) Identificar y definir los factores condicionantes (inherentes al área de estudio) que pueden generar desastres naturales.

(2) Plantear escenarios de amenaza de acuerdo con la identificación de los factores detonantes (externos).

(3) Zonificar la amenaza. Como resultado de estas fases y de la etapa de análisis en sí misma, se obtienen los mapas de amenaza".

La definición de escenarios permite caracterizar la amenaza en términos de ubicación, clasificación, material, tamaño, distancia de viaje, velocidad y frecuencia de ocurrencia, para integrarla con los escenarios de vulnerabilidad en la fase de análisis de vulnerabilidad (Ávila et al., 2016).

La definición de las áreas de amenaza se realiza mediante la aplicación de métodos determinísticos o probabilísticos en términos de probabilidad de ocurrencia del evento. Al finalizar el análisis de la amenaza se obtendrá un mapa de zonificación de la misma que permitirá tomar decisiones en un primer nivel de conocimiento, para la aplicación de las fases y etapas posteriores en la elaboración de estudios de riesgo (Ávila et al., 2016).

4.2.1.2 Análisis de la vulnerabilidad

Neumanns y Downs (2002) definen el análisis de vulnerabilidad como:

"Un proceso mediante el cual se determina el nivel de exposición y la predisposición a la pérdida de un elemento o grupo de elementos frente a una determinada amenaza o peligro. La vulnerabilidad puede ser definida por tres niveles: baja, media y alta; también puede ser expresada como un porcentaje de elementos que pueden sufrir daño o destrucción (pérdida) sobre un total, aunque es difícil establecer una referencia de carácter absoluto. Los porcentajes pueden ser establecidos en función de las características del área, del tipo de fenómeno, de la densidad y frecuencia de ocupación humana, densidad de construcciones, etc".

Según Ávila et al (2016) el análisis de la vulnerabilidad se desarrolla en 2 fases:

"(1) Identificación de escenarios de vulnerabilidad,

(2) Zonificación de la vulnerabilidad".

Los escenarios de vulnerabilidad se construyen de acuerdo con los escenarios de amenaza y consiste en la identificación de los daños esperados, tanto en la infraestructura como en las personas, y la debilidad de los elementos frente al tipo de amenaza definida en el escenario evaluado. La debilidad de los elementos depende del tipo de estructura, su resistencia y el grado de exposición. Finalmente, se hace la zonificación de la vulnerabilidad mediante la construcción de mapas en los que se identifiquen las zonas de vulnerabilidad alta, media y baja (Ávila et al., 2016).

4.2.2 Cálculo del riesgo

El riesgo se calcula como el producto de la amenaza por la vulnerabilidad y el valor o número de elementos. Este cálculo se expresa como un valor total de pérdidas probables por año en el caso de bienes físicos, y como un número probable de personas afectadas (muertas o heridas) por año (Ávila et al., 2016).

4.2.3 Evaluación del riesgo

Según Prieto (2011), la evaluación del riesgo consiste en la comparación de los análisis de riesgo con el riesgo tolerable de una determinada comunidad o persona.

Según Dai et al (2001a) el **riesgo tolerable** se define como el riesgo con el cual la sociedad está dispuesta a aceptar con el objetivo de tener ciertos beneficios, pero con la seguridad de que están siendo manejados apropiadamente, sujetos a estudio y reducción. El riesgo tolerable varía para los individuos y las sociedades.

Según Dai, Lee y Ngai (2001a) el riesgo aceptable tiene las siguientes características:

1. La decisión de aceptar el riesgo tiene un carácter beneficio/costo.
2. Aceptación del riesgo depende del grado de voluntad de las personas.
3. La aceptación del riesgo se lleva a cabo ya sea a nivel personal, local, regional o nacional.

El riesgo aceptable se expresa en pérdida de vidas por año. Los riesgos aceptables y tolerables varían en todos los países y dentro de los países, dependiendo de la

exposición histórica a desastres naturales, y los sistemas de alertas tempranas y/o monitoreos existentes (Dai, Lee, & Ngai, 2001b).

Después de comparar el riesgo calculado con el riesgo tolerable, se procede a zonificar el riesgo en mapas.

La zonificación del riesgo consiste en plasmar en mapas las zonas de riesgo, de acuerdo con los criterios antes definidos. Se definen las zonas de **riesgo bajo, medio, alto y alto no mitigable** (Ávila et al., 2016).

4.2.4 Mitigación y prevención de riesgos

La zonificación del riesgo permite tomar medidas de mitigación y prevención en zonas de alto riesgo.

La prevención y mitigación de desastres es el conjunto de acciones que se deben tomar para evitar que ocurra un desastre, o en caso tal de que suceda, que no perjudique con toda la intensidad que podría hacerlo (UNICEF, 2006).

La prevención se define como la aplicación de medidas para evitar que un evento se convierta en un desastre. Por ejemplo, sembrar árboles previene la erosión y, en cierto grado los deslizamientos del terreno (UNICEF, 2006).

La mitigación se define como la aplicación de acciones para reducir la vulnerabilidad frente a ciertas amenazas. Por ejemplo, hacer construcciones resistentes puede evitar que las casas no se caigan con un huracán (UNICEF, 2006).

4.3 FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

4.3.1 Definición

Una de las primeras definiciones de flujo hiperconcentrado fue la de los autores Beverage y Culbertson (1964). Estos definieron flujo hiperconcentrado como una corriente de agua cuyas concentraciones de sedimentos están entre 40 y 80 por ciento en peso (20 a 60 por ciento en volumen). Este flujo es una mezcla de agua sedimento que tiene una resistencia al corte o flujo medible pero que es parecido a un líquido.

Suarez (2001) afirma que:

> “Los flujos hiperconcentrados están formados por la mezcla de partículas gruesas y agua. En el flujo hiperconcentrado predominan las partículas granulares (arenas, gravas, cantos y bloques) por lo tanto la mezcla no tiene cohesión. Se considera un flujo como hiperconcentrado si la concentración en volumen de sólidos en el flujo es mayor de 0.2 (20%) pero no supera 0.6 (60%), valor éste que corresponde a un peso específico de 2.0 ton/ m^3 aproximadamente.
>
> En todos los casos los pesos específicos y las viscosidades son mayores en los flujos hiperconcentrados que en los flujos ordinarios de agua. Una pequeña cantidad de arcilla o limo fino en los flujos hiperconcentrados genera cambios importantes en sus propiedades geológicas y debido a estos cambios la velocidad de caída de las partículas de sedimentos presenta características muy diferentes a las de un flujo ordinario de agua”.

Según García (2008) un flujo hiperconcentrado es un fluido en movimiento que transporta gran cantidad de material fino que a diferencia de los flujos de agua clara recorren una distancia y luego se detienen. El comportamiento hidráulico del fluido está gobernado por las propiedades del fluido tales como las profundidades y velocidades del flujo y la concentración volumétrica.

4.3.2 Clasificación

El comportamiento de un flujo hiperconcentrado depende de las siguientes propiedades:

- La matriz de fluido,
- Geometría del canal o cauce,
- Pendiente del canal,
- Rugosidad.

La matriz de fluido está compuesta por partículas finas de sedimento y agua; con una concentración relativamente alta de partículas finas se puede alterar las propiedades de fluido incluyendo la densidad, la viscosidad y los esfuerzos de fluencia (Niño, 2015).

La naturaleza de un flujo hiperconcentrado se puede definir por medio de las siguientes variables:

- Concentración volumétrica de sedimentos,
- Concentración por peso de sedimentos,
- Densidad del sedimento,
- Densidad de la mezcla de sedimentos,
- Factores de engrosamiento.

Cuando se examinan parámetros de flujos hiperconcentrados, especialmente de flujos de lodos, es importante determinar la concentración de sedimentos en términos de volumen o en peso (Niño, 2015).

La función principal de un cauce fluvial es la de drenar el agua de escorrentía proveniente de una lluvia en exceso. Además, el cauce transporta partículas sólidas, las cuales son erosionadas por la velocidad de la corriente. Mientras que en la hidráulica fluvial se asume que la máxima concentración volumétrica de sedimentos que se pueden transportar para que el fluido permanezca como newtoniano es de 2.5%; para concentraciones superiores al 5% se considera que el flujo deja de comportarse como newtoniano y pasa a ser no newtoniano en el cual las propiedades y características hidráulicas dependen de la concentración de sedimentos, tamaño del grano que lo compone y del contenido de arcilla de la mezcla. Estos flujos son los denominados flujos hiperconcentrados.

Un aspecto fundamental de los flujos hiperconcentrados de sedimentos radica en que son los únicos tipos de flujo capaces de detenerse, es decir, estos tipos de flujo tienen una distancia máxima de viaje (también conocida como distancia de alcance) y la distancia que pueden alcanzar depende de las concentraciones de sólidos en la mezcla (Niño, 2015).

Los flujos hiperconcentrados durante su movimiento llevan consigo lodo, grava, rocas de diversos tamaños, árboles y todo lo que se encuentre en su camino, lo cual le permite adquirir una gran fuerza destructiva. Ese poder destructivo se comienza a perder cuando se acaba la energía y eso ocurre en zonas donde se comienza a

depositar el material arrastrado (Ver Figura No. 2) (Stefanović, Gavrilović, & Bajčetić, 2015).

Figura No. 2 - Representación del curso de una avalancha (Vista en planta y sección transversal) (Stefanović, Gavrilović y Bajčetić 2015)

La zona de producción de sedimentos (“Collection zone”, en la Figura No. 2), es la zona más alta de la cuenca (donde se inicia el flujo); es una zona de erosión en la cual la erosión fluvial y pluvial separa los escombros torrenciales y los recoge en los afluentes y el curso de agua principal. Esta zona se caracteriza por la erosión superficial en la "zona de producción de sedimentos", la erosión del lecho y la erosión de los afluentes y del curso de agua principal. La velocidad de las aguas torrenciales y los residuos transportados aumentan hasta llegar a la zona de transporte (Stefanović et al., 2015).

La zona de transporte es la zona que transporta el material proveniente de la zona de producción de sedimentos. Esta zona se caracteriza por una profunda erosión en el lecho del curso del flujo. En esta zona, el flujo adquiere su máxima velocidad y su máximo poder destructivo (Stefanović et al., 2015).

La zona de depositación tiene una pendiente muy baja, y, por lo tanto, el flujo pierde velocidad y energía, mientras va depositando los escombros. Esta zona se caracteriza por el aluvión depositado por agua torrencial, alteraciones frecuentes en el lecho del curso de agua principal, así como por formarse una gran cantidad de meandros (Stefanović et al., 2015).

El frente de onda empinada inicial tiene la mayor energía; se lleva la mayor cantidad de desechos que incluye bloques rocosos, escombros, árboles, y todo su poder destructivo llega hasta aguas abajo. En la Figura No. 3 se presenta el frente de onda de un flujo hiperconcentrado (Stefanović et al., 2015).

Figura No. 3 - Frente de onda de un flujo hiperconcentrado en la Quebrada La Chapa (Boyacá) (Fuente: YouTube)

Como el comportamiento de un flujo hiperconcentrado depende de varias variables como: la concentración de sedimentos de la mezcla, la distribución granulométrica y tipos de solidos que la compone, se han planteado varios criterios de clasificación de flujos. Algunos de estos se basan en el mecanismo detonante del evento, otros se basan en la concentración de sedimentos de la mezcla y otros en el comportamiento reológico y cinemático (Niño, 2015).

Bradley y McCutcheon (1987) (citado en (García, 2006), pp 893) hicieron una revisión de las clasificaciones de flujos hiperconcentrados. En la Tabla No. 1 se presenta el resumen de dicha revisión (Niño, 2015).

Tabla No. 1 - Clasificación de flujos hiperconcentrados

Fuente	Concentración en porcentaje por peso (100% por WT=1.000.000 ppm) 23 40 52 63 72 80 87 93 97 100									
	Concentración en porcentaje por volumen (G = 2,65) 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100									
Beverage y Culbertson (1964)	Alto	Extremo	Hiperconcentrado				Flujo de lodos			
Costa (1984)	Inundación		Hiperconcentrado			Flujo de escombros				
O'Brien y Julien (1985) usando National Research Council (1982)	Inundación		Avenida de lodos		Flujo de Lodos		Deslizamiento			
Takahashi (1981)	Flujo de agua			Flujo de escombros o granular				Caídas, deslizamientos, reptación, flujos piroclásticos		
Investigadores Chinos (Fan y Dou, 1981)			Flujos de escombros o de lodos							
		Flujo hiperconcentrado								
	Carga de sedimentos									
Pierson y Costa (1987)	FLUJO EN CAUCES: Normal : Hiperconcentrado			FLUJO DE BARRO: (Torrentes de escombros, flujos de escombros y de lodos			FLUJO GRANULAR: Avalanchas de escombros, flujos de tierras, reptación		Rápido Lento	

Fuente: (Marcelo García, 2008)

Pierson y Costa (1987) clasifican los flujos de acuerdo al comportamiento reológico de la mezcla, el cual a su vez depende de la concentración de los sedimentos. A partir de esto, los flujos hiperconcentrados se clasifican en los tipos siguientes:

- Avenidas torrenciales,
- Flujos de detritos,
- Flujos de lodos,
- Reptación,
- Flujo de tierras,
- Avalancha de detritos.

En la Figura No. 4 se presenta un esquema de la clasificación de Pierson y Costa (Pierson & Costa, 1987).

FLUID TYPE	NEWTONIAN	NON-NEWTONIAN		
INTERSTITIAL FLUID	WATER	WATER+FINES		WATER+AIR +FINES
FLOW CATEGORY	STREAMFLOW		SLURRY FLOW	GRANULAR FLOW
FLOW BEHAVIOR	LIQUID	PLASTIC		

Figura No. 4 - Clasificación reológica propuesta por Pierson y Costa (1987)

FLUID TYPE	NEWTONIAN	NON-NEWTONIAN		
INTERSTITIAL FLUID	WATER	WATER+FINES		WATER+AIR +FINES
FLOW CATAGORY	STREAMFLOW		SLURRY FLOW	GRANULAR FLOW
FLOW BEHAVIOR	LIQUID	PLASTIC		

Figura No. 5 - Clasificación reológica de los flujos de agua y sedimento. Las divisorias verticales A, B y C son umbrales reológicos que dependen de la distribución granulométrica (se asume la existencia de bloques y una mezcla escasamente clasificada) y de la concentración del sedimento. La línea A marca el inicio de la resistencia al corte; la línea B marca un incremento brusco de resistencia al corte, que permite la suspensión estática de grava y el inicio de la licuefacción; el límite C indica el cese de la licuefacción. En el eje vertical, los límites de velocidad (también dependientes la distribución granulométrica, de la concentración de sedimento y de la densidad de las partículas) son determinados por el mecanismo(s) de transmisión de tensiones entre partículas durante el flujo (Pierson y Costa, 1987).

Para el desarrollo del presente trabajo, se utilizará la clasificación de Pierson y Costa (1987). A continuación, se definen los diferentes tipos de flujos hiperconcentrados.

4.3.2.1 Flujo en cauce hiperconcentrado: Avenida torrencial

Es una mezcla de agua y sedimentos que tiene un límite de fluencia pero que el flujo parece un líquido (el límite de fluencia es muy bajo). Es parecido a un “flujo en cauce normal”, pero con la diferencia de que es un flujo de tipo turbulento (Pierson & Costa, 1987).

Un “flujo en cauce normal” es aquel que tiene una concentración de sedimentos suficientemente pequeña tal que el comportamiento del flujo no es afectado por la presencia de sedimentos en el transporte (Pierson & Costa, 1987).

Cuando la concentración de partículas suspendidas aumenta, estas partículas comienzan a interactuar. En mezclas de agua y arcilla, la interferencia entre partículas es el resultado de fuerzas de atracción electroquímicas de caras cargadas positiva y negativamente. El resultado de esto son los enlaces atómicos. Cuando ocurre la interacción entre partículas, el fluido adquiere un límite de fluencia y el fluido comienza a comportarse como plástico o ***no newtoniano***, si se supera ese límite. Es decir, que un flujo en cauce normal (por ejemplo, un río) se convierte en ***avenida torrencial*** cuando aumenta la concentración de sedimentos. Las avenidas torrenciales generalmente tienen concentraciones de sedimentos entre 40% y 80% en peso (20% a 60% en volumen) (Pierson & Costa, 1987).

4.3.2.2 Flujos lodosos: Flujos de detritos y flujos de lodos

Cuando la concentración de sedimentos de la mezcla agua-sólidos aumenta, el límite de fluencia se incrementa lentamente hasta que se cruza otro punto de transición (Límite B de la Figura No. 4). Esta transición puede ser identificada por la curva suave de la gráfica de resistencia al flujo versus concentraciones de sedimentos (Figura No. 6). El incremento en el límite de fluencia se debe a la fricción interna (Pierson & Costa, 1987).

Figura No. 6 - Resistencia al flujo de varias mezclas de agua y sedimento (tamaño promedio de partículas indicado) versus concentración de sedimentos. La intersección de cada curva con la abscisa marca la transición de flujo en cauce normal a avenida torrencial (límite A de la Figura No. 5). El crecimiento abrupto de la pendiente de cada curva marca aproximadamente la transición de avenida torrencial a flujo lodoso (límite B de la Figura No. 5) (Pierson y Costa 1987).

Se llama flujo lodoso al flujo de mezcla de agua y sedimentos que tiene un límite de fluencia suficiente alto para exhibir un comportamiento de flujo plástico y que se licua parcialmente ya que hay cambio de volumen. Esa mezcla es saturada, el agua de los poros es atrapada en algún grado en la estructura de los granos, y el Índice de Liquidez es mayor que 1. El fluido de los poros es la presión en exceso de la presión hidrostática porque parte del peso de la fase solida es tomada por el agua de los poros (la mezcla está parcialmente licuada). La mezcla fluirá como una masa homogénea cuando se supera el límite de fluencia. El agua atrapada es transportada por el flujo de masa granular, y el aire arrastrado probablemente no exceda de un bajo porcentaje en volumen (Pierson & Costa, 1987).

Dependiendo de la resistencia al corte de la mezcla, las partículas del tamaño de cantos rodados pueden ser suspendidas en los flujos lodosos. Cuando los flujos lodosos se detienen, estos se consolidan a la velocidad a la cual se drena el fluido de los poros; las partículas finas y gruesas se asientan juntas sin ningún movimiento interparticular, diferencia de las

avenidas torrenciales, cuyas partículas se depositan separadamente, dependiendo de las velocidades de caída (Pierson & Costa, 1987).

Las fuerzas viscosas pueden controlar el comportamiento de lodos cuando el contenido de arcilla de la mezcla es relativamente alto o cuando la velocidad de corte, tamaño promedio de partículas, densidad de partículas y contenido de agua son relativamente bajos. En estas condiciones, puede seleccionarse el modelo plástico de Bingham para predecir el comportamiento del flujo. Este tipo de flujos son llamados *flujos lodosos de tipo viscoso*. Cuando la viscosidad de fluido de poros es baja y la velocidad de corte, tamaño promedio de partículas, densidad y contenido de agua son altos, los efectos de las fuerzas de viscosidad son tomadas por las fuerzas inerciales donde el momento es transferido a través de las colisiones entre partículas. Este tipo de flujos son los *llamados flujos lodosos de tipo inercial*, y se utiliza el modelo de fluido dilatante para predecir su comportamiento (Pierson & Costa, 1987).

4.3.2.2.1 Flujos de detritos y flujos lodosos

Dentro del grupo de los flujos lodosos se encuentran los flujos de detritos y los flujos de lodos.

Flujo de detritos: Es un término apropiado para flujos de tipo lodoso de variedad tanto viscosa como no viscosa, a excepción de los flujos de regolito extremadamente saturados los cuales son llamados soliflucción.

Flujos de lodos: Son flujos lodosos viscosos y las mezclas ricas de lodo son frecuentemente dominadas por fuerzas viscosas. Está clasificación mantiene la diferenciación entre flujo inercial y flujo viscoso basada en la velocidad de corte y no en la composición. El predominio de mezclas de grano grueso o fino influye en el tipo de flujo ya sea inercial o viscoso, dependiendo también de la pendiente de la ladera, densidad de las partículas y contenido de agua (Pierson & Costa, 1987).

4.3.2.3 Flujos granulares: "Sturzstrom", Avalancha de detritos, flujo de tierra y reptación.

Los flujos granulares se inician cuando la concentración de sedimentos del material incrementa hasta tal punto donde la masa no se licua parcialmente cuando cambia de volumen (limite C de la Figura No. 4). En otras palabras, la presión de agua en los poros ya no está en exceso de la presión hidrostática, y el peso total de la masa de flujo granular es tomado por el esqueleto de suelo. El índice de liquidez es menor que 1.0. La mezcla puede ser parcialmente seca con algunos poros llenos de aire, puede estar saturada con una distribución granulométrica que permite que la el agua en los poros drene fácilmente durante el cambio volumétrico. Middleton (1970) (citado por García (2008)) afirma que los flujos granulares son aquellos flujos cuya concentración granular es alta, hay una frecuente interacción entre partículas y el comportamiento del flujo depende de las fuerzas interparticulares, llamadas fricción y colisión (Pierson & Costa, 1987).

Los flujos granulares son de dos tipos: los inerciales y los friccionantes.

En los **flujos granulares inerciales** existe un régimen de flujo de inercia de granos. Esto ocurre cuando a velocidades de corte moderadas, los efectos de inercia de los granos dependientes de la velocidad comienzan a ser dominantes, aunque existe esfuerzo de fricción considerable. Las colisiones granulares transfieren momentos entre las partículas, dando como resultado esfuerzos dispersivos. La velocidad promedio de este tipo de flujos está entre 0.1 y 35 m/s (Pierson & Costa, 1987).

Se incluyen dentro de los flujos granulares inerciales los "Sturzstrom" los cuales pueden ser llamados también avalancha de detritos. Sturzstrom es un término más específico para grandes flujos granulares inerciales (Pierson & Costa, 1987).

En los **flujos granulares friccionantes** existe un régimen de flujo de inercia cuasi estático y macro viscoso. Esto ocurre cuando a velocidades de corte bajas, la fricción de deslizamiento independiente de la velocidad y el arreglo

de los granos, combinado con los efectos viscosos del fluido intersticial, determina los esfuerzos totales dentro de la masa deformada. La inercia de los granos es insignificante. La velocidad promedio de este tipo de flujos es menor que 0.1 m/s (Pierson & Costa, 1987).

Los **flujos de tierra** son flujos granulares friccionantes cuyas velocidades de movimiento están entre 10^{-8} y 10^{-1} m/s (Pierson & Costa, 1987).

La **reptación** es un tipo de flujo granular friccionante que presenta pequeñas deformaciones durante periodos largos de tiempo (Pierson & Costa, 1987).

4.4 REOLOGÍA DE FLUIDOS

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales. Para comprender el comportamiento mecánico de los fluidos es necesario referirse a la Figura No. 7, en la cual se representa la ocurrencia de un flujo cortante simple. Un líquido está entre 2 placas separadas a una distancia L. La placa superior se desplaza a una velocidad constate v debido a la aplicación de una fuerza F(Méndez & Pérez, 2010).

Figura No. 7 - Representación de un fluido en flujo cortante simple (Méndez y Pérez 2010)

En este caso, el esfuerzo de corte τ que ejerce la placa superior al fluido se define como (Méndez & Pérez, 2010):

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:
A es el área de la placa superior en la cual se aplica la fuerza F.

De igual manera, la deformación del fluido se expresa como:

$$\gamma = \frac{x}{L} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde:
x es el desplazamiento del fluido y L es la separación entre las 2 placas.

Similar ocurre con la deformación elástica por corte que sufre un material sólido, en cuyo caso, la deformación tiene un límite y se mantiene constante hasta que se retira la carga. Pero, para el caso de los fluidos, la deformación se incrementa gradualmente hasta que se remueve la fuerza. Por tal razón, se utiliza el concepto de rapidez de deformación en los fluidos, la cual representa la variación de la deformación respecto al tiempo (Méndez & Pérez, 2010):

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \qquad \text{Ecuación 3}$$

Las unidades de la velocidad de deformación en el Sistema Internacional son s^{-1}. Si la distancia L es constante, entonces (Méndez & Pérez, 2010):

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{L}\frac{dx}{dt} = \frac{1}{L}v \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde:
v es la velocidad de la placa superior.

En los sólidos, el módulo de corte es una propiedad característica del material que representa la resistencia a ser deformado y se expresa como el cociente entre el esfuerzo de corte y la deformación unitaria. Análogamente, para los fluidos, existe una propiedad característica que representa la resistencia a fluir. Esta propiedad es la viscosidad η y se define como el cociente entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación, es decir (Méndez & Pérez, 2010):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad \text{Ecuación 5}$$

Las unidades de la viscosidad en el SI son Pascales. La viscosidad depende de la fuerza necesaria para mover la placa superior a una velocidad constante v, del espaciamiento entre las placas(L) y del área de contacto (A).

El reograma o curva de flujo es la representación gráfica que relaciona el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación. En la Figura No. 8 se presenta un reograma típico para diferentes tipos de fluidos.

Figura No. 8 - Curvas de flujo típicas de diferentes fluidos. 1) Fluido newtoniano, 2) Fluido no newtoniano adelgazante, 3) Fluido no newtoniano dilatante, 4) Fluido tipo Bingham (Méndez & Pérez, 2010)

La pendiente de las curvas representa el comportamiento viscoso en función de la rapidez de deformación. Por ejemplo, para el caso del **fluido newtoniano**, la viscosidad es constante e independiente de la rapidez de deformación. Sin embargo, para el **fluido no newtoniano** adelgazante, la viscosidad (pendiente de la curva) disminuye al aumentar la velocidad de deformación. Al contrario del fluido dilatante, la viscosidad aumenta al incrementar la velocidad de deformación. El fluido tipo Binghman es un tipo de fluido no newtoniano ya que se requiere un esfuerzo crítico para comenzar a fluir, seguido de un comportamiento newtoniano (Méndez & Pérez, 2010).

4.5 REOLOGÍA DE FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

En los flujos hiperconcentrados el comportamiento reológico implica la interacción de procesos físicos diversos y complejos, de tal manera que las partículas que componen la fase sólida del flujo chocan, rozan o rotan; además, si el contenido de arcilla es alto, se

pueden producir fuerzas electroquímicas entre las partículas que hacen más difícil el flujo del material. De igual manera, dentro del flujo se producen esfuerzos adicionales producto de la viscosidad de la mezcla y de la turbulencia del flujo. Por lo tanto, para el estudio del comportamiento reológico de un flujo hiperconcentrado se deben considerar 4 variables importantes:

- La cohesión entre partículas de sedimento,
- La viscosidad de la matriz de fluido,
- La turbulencia del flujo,
- La colisión entre partículas.

Los esfuerzos viscosos y de cedencia dependen de la cohesión entre finos. Los cuatro componentes del esfuerzo cortante en un flujo hiperconcentrado dependen de la concentración volumétrica de sedimentos y del contenido de finos (Niño, 2015).

El esfuerzo cortante total en un flujo hiperconcentrado de sedimentos, incluyendo los flujos de detritos y los flujos de lodos, pueden ser calculado como la suma de 5 componentes (J O' Brien & Julien, 1985):

$$\tau = t_c + t_{mc} + t_V + t_t + t_d \qquad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

τ_c = Esfuerzo de cedencia
τ_{mc} = Esfuerzo cortante de Mohr Coulomb
τ_v = Esfuerzo viscoso
τ_t = Esfuerzo turbulento
τ_d = Esfuerzo dispersivo

El comportamiento reológico de los flujos hiperconcentrados se ha analizado mediante varios modelos que se basan en la mecánica del medio continuo y se han integrado en distintas ecuaciones reológicas, en las cuales las relaciones de fricción del flujo, se basan en la variación del esfuerzo cortante con la profundidad. Entre los modelos más destacados están: la teoría del flujo plástico, flujo dilatante, el modelo Bingham, modelo Herschel Bulkley, Voellmy, entre otros. En la Figura No. 9 se muestran algunos de los modelos más conocidos (J O' Brien & Julien, 1985):

Figura No. 9 - Esfuerzo cortante como una función de la velocidad de corte para modelos de deformación de fluidos (O' Brien y Julien 1985)

Uno de los modelos más conocidos es el planteado por O'Brien y Julien (1985), utilizado por el programa FLO 2D, el cual se expresa mediante la siguiente ecuación cuadrática:

$$\tau = \tau_y + \eta\left(\frac{dv}{dy}\right) + \xi\left(\frac{dv}{dy}\right)^2 \qquad \text{Ecuación 7}$$

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \qquad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

τ es el esfuerzo cortante

τ_y es el esfuerzo cortante de cedencia

η es la viscosidad dinámica del agua

ξ es el parámetro turbulento dispersivo

du/dy es el gradiente de velocidad normal al flujo.

El primer término de la ecuación (τ_y), describe el esfuerzo de fluencia debido a la cohesión entre partículas finas; este esfuerzo es considerado como una propiedad del material que no depende de la tasa de deformación. El segundo término, η dv/dy describe el esfuerzo viscoso de un fluido interactuando con las partículas dentro del fluido. El tercer término, ξ

$(dv/dy)^2$, se refiere al esfuerzo turbulento-dispersivo que combina el efecto de la turbulencia y el efecto del choque entre partículas. El esfuerzo turbulento se une con el esfuerzo dispersivo de Bagnold por que ambos esfuerzos son proporcionales a la segunda potencia del esfuerzo cortante. El propósito de combinar ambos términos de la ecuación parte del concepto de que con grandes cantidades de partículas gruesas los esfuerzos dispersivos serán dominantes, mientras que con grandes concentraciones de partículas finas, los esfuerzos viscosos y de fluencia superarán a los esfuerzos turbulentos (J O' Brien, 2009).

El parámetro combinado de los esfuerzos dispersivos y turbulentos ξ se calcula como:

$$\xi = \rho_m l^2 + a_i \rho_s \lambda {d_s}^2 \qquad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

ρ_m y l son la densidad y longitud de mezcla de la mezcla, respectivamente.
d_s es el diámetro de las partículas de sedimento.
a_i es una constante empírica definida por Bagnold.
ρ_s es la densidad de las partículas sólidas.
λ es la concentración lineal de sedimentos definida por Bagnold la cual depende de la concentración volumétrica de sedimentos C_v y de la máxima concentración volumétrica C* (C* tiende a 0,615) (J O' Brien, 2009):

$$\lambda = \left[\left(\frac{C^*}{C_v}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right]^{-1} \qquad \text{Ecuación 10}$$

Tanto la viscosidad η como el esfuerzo cortante de cedencia τ_y aumentan exponencialmente con el incremento de la concentración volumétrica C_v y se calculan como:

$$\eta = \alpha_1 e^{ß_1 C_v} \qquad \text{Ecuación 11}$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{ß_2 C_v} \qquad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

α_1, α_2, $ß_1$, y $ß_2$ son constantes empíricas definidas por O'Brien obtenidas de análisis de regresión para cada muestra de flujo de lodos presentada en la Tabla No. 2.

Tabla No. 2 – Esfuerzo cortante de cedencia y viscosidad de flujos de lodos

Source (1)	$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$		$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$	
	α_2 (dynes/cm^2) (2)	β_2 (3)	α_1 (poises) (4)	β_1 (5)
(*a*) Relationships Found in Field				
Aspen pit 1	1.81×10^{-1}	25.7	3.60×10^{-2}	22.1
Aspen pit 4	2.72	10.4	5.38×10^{-2}	14.5
Aspen natural soil	1.52×10^{-1}	18.7	1.36×10^{-3}	28.4
Aspen mine fill	4.73×10^{-2}	21.1	1.28×10^{-1}	12.0
Aspen natural soil source	3.83×10^{-2}	19.6	4.95×10^{-4}	27.1
Aspen mine fill source	2.91×10^{-1}	14.3	2.01×10^{-4}	33.1
Glenwood 1	3.45×10^{-2}	20.1	2.83×10^{-3}	23.0
Glenwood 2	7.65×10^{-2}	16.9	6.48×10^{-1}	6.2
Glenwood 3	7.07×10^{-4}	29.8	6.32×10^{-3}	19.9
Glenwood 4	1.72×10^{-3}	29.5	6.02×10^{-4}	33.1
(*b*) Relationships Found in Literature				
Iida (1938)	—	—	3.73×10^{-5}	36.6
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	7.5×10^{-3}	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	4.05×10^{-2}	8.29
Qian et al. (1980)	1.36×10^{-3}	21.2	—	—
	$\sim 5.0 \times 10^{-2}$	~15.48	—	—
Chien and Ma (1958)	5.88×10^{-2}	19.1~32.7	—	—
Fei (1981)	1.66×10^{-1}	25.6	—	—
	$\sim 4.7 \times 10^{-3}$	~22.2	—	—

Fuente: (Jim O' Brien & Julien, 1988)

5 MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS

5.1 ANÁLISIS DE AMENAZA

5.1.1 Definición de los factores geoambientales o condicionantes que intervienen en la amenaza por flujos de lodos y avalanchas de una cuenca

Prieto (2011), citando a Ferrer Guijón (1995), afirma que los factores condicionantes son aquellos intrínsecos a la naturaleza del suelo, los cuales dependen de la formación geológica, estructura, composición y forma del terreno.

Jhonson (1984) (en el Capítulo 8 de Brunsden y Prior, 1984), explica los factores que condicionan al terreno a la formación de avalanchas y flujos de lodos.

Investigadores de flujos de detritos han indicado algunos factores condicionantes que controlan la ocurrencia de flujos. Sin embargo, los condicionantes correlacionan indirectamente con uno o más factores de estabilidad de taludes (propiedades de resistencia del suelo, presión de poros, relación esfuerzo-deformación, la pendiente y la forma del terreno, etc.). Jhonson (1984) citando a Blackwelder afirma que las siguientes condiciones favorecen al desarrollo de flujos:

- Material no consolidado que se vuelve viscoso cuando entra en contacto con el agua.
- Pendientes abruptas que inducen el flujo del material.
- La poca cobertura vegetal.

Salvo algunas modificaciones, estas son los factores considerados por la mayoría de los geólogos.

Existen algunas observaciones concernientes a las propiedades de los materiales de origen de los flujos. Jhonson (1984) dice que algunos investigadores han indicado que la distribución del tamaño de las partículas de materiales susceptibles a flujos es pobremente gradada.

Según Brunsden (1984), los flujos de lodos ocurren en arcillas saturadas de todos los tipos, desde arcillas blandas intactas hasta arcillas duras fisuradas, las cuales han sido progresivamente ablandadas y meteorizadas. Esas arcillas generalmente tienen un índice de plasticidad medio. Los materiales pueden ser ligeramente o altamente sobreconsolidados. Son comunes las arcillas derivadas de las lodolitas o las lutitas. Algunos materiales contienen limos y arenas, y los flujos de lodos contienen arenas finas y limos suprayaciendo y moviéndose sobre las arcillas blandas. El contenido de arcilla de los flujos de lodos generalmente sobrepasa el 50%. Estos poseen límites líquidos entre 50 y 80%, limites plásticos entre 22 y 36 %, índice de plasticidad entre 20 y 30 %, índice de liquidez entre 0.02 y 0.5, actividad entre 0.7 y 0.8 y peso unitario entre 1.7 y 2.0 g/cm^3.

El principal elemento geométrico medido en las laderas que condicionan los flujos es la pendiente. Los flujos se movilizan desde pendientes mayores a 39° en California; pendientes mayores a 19° en Virginia; entre 42 y 48° el 80% de los flujos en Hawái; y en pendientes mayores al 30° en algunas áreas del oeste de los Estados Unidos. La pendiente incide en la velocidad del flujo y su capacidad de mantenerse en movimiento (Brunsden, 1984).

La cobertura vegetal es otro de los factores condicionantes. Es un factor difícil de analizar La cobertura vegetal presenta protección al impacto directo de la lluvia, reducción de la energía de las aguas de escorrentía superficial, incremento de la infiltración por acción de las raíces y el aumento de la capacidad de retención de agua (Sepúlveda & Patiño, 2016).

En resumen, los factores que condicionan la ocurrencia de flujos son: geometría del área de la cuenca (pendiente y geomorfología), litología (tipo de rocas) y la cobertura vegetal.

5.1.2 Análisis de la susceptibilidad de una cuenca a flujos de lodos y avalanchas

5.1.2.1 Metodologías para el análisis de la susceptibilidad de una cuenca

Existen varios métodos que utilizan SIG que permiten determinar la susceptibilidad de cuencas a la ocurrencia de avalanchas y flujos de lodos. Algunos de estos métodos se presentan a continuación.

5.1.2.1.1 Análisis geomorfológico

En este análisis, mediante cartografía se identifican las condiciones geomorfológicas que generan inestabilidad de laderas. Las variables que se tienen en cuenta en la zonificación de la susceptibilidad son la geomorfología y el inventario de deslizamientos. La ventaja de esta metodología es que ayuda a entender la morfodinámica de los deslizamientos. La desventaja es la alta susceptibilidad y el juicio final depende del experto (Á. Súarez, Peraldo, Badilla, & Obando, 2009).

5.1.2.1.2 Método heurístico o de combinación de mapa de factores

Es un método cualitativo que se basa en la superposición de capas de variables. En este método se realiza un análisis cruzado de mapa de factores. Antes se deben estimar los coeficientes de ponderación de los factores que causan la ocurrencia de movimientos de ladera. Los pesos de las variables dependen de la experiencia y conocimiento de los expertos, los cuales deciden cuales parámetros son importantes a tomar en cuenta para la ocurrencia de movimientos de ladera y el peso que se le debe asignar a cada uno de ellos (Obregón & Lara, 2014).

5.1.2.1.3 Métodos estadísticos

Son métodos basados en expresiones matemáticas que correlacionan los factores condicionantes y los eventos históricos de movimientos en masa. Los factores se califican por medio de puntajes ponderados y se combinan con ecuaciones matemáticas que determinan la probabilidad de ocurrencia de un evento.

Según Cardozo (2013), los métodos estadísticos se dividen en dos tipos:

(1) “Análisis Multivariado (considera para cada unidad, polígono o píxel, la presencia o ausencia de movimientos de laderas generándose una matriz de datos que es analizada en un soporte estadístico mediante regresión múltiple, análisis discriminante, etc.)”.

(2) “Análisis Bivariado (considera el peso de cada clase y de cada parámetro de análisis utilizando técnicas de inferencia, por ejemplo, Lógica difusa o “Fuzzy” e Inferencia Bayesiana)”.

5.1.2.1.4 Método determinístico

El grado de amenaza se expresa por medio de un factor de seguridad, y se aplica particularmente al caso de estabilidad de taludes. Se deben elaborar modelos de análisis de estabilidad de taludes con base en la información obtenida. El método requiere informacion relacionada con las propiedades de resistencia de los materiales, estratificacion, estructura y posicion del nivel freático (Cardozo, 2013).

La ventaja del método es su alta simplicidad, principalmente para mapeos de escala media y regional, debido a la gran variabilidad de los parámetros geotécnicos. De ésta forma, el desempeño del método depende totalmente de la calidad y cantidad de los datos colectados (Cardozo, 2013).

5.1.3 Zonificación de la susceptibilidad de una cuenca a flujos de lodos y avalanchas

La zonificación de la susceptibilidad se realiza mediante un Mapa de Susceptibilidad. En éste se localizan las unidades de terreno que muestran una actividad de eventos de remoción en masa con diferentes grados de potencialidad, la cual se obtiene del análisis de susceptibilidad mediante cualquiera de los métodos explicados en el numeral anterior (J. Súarez, 1998).

5.1.4 Identificación y análisis de los factores detonantes que intervienen en la amenaza por flujos de lodos y avalanchas en una cuenca

Prieto (2011), citando a Ferrer Guijón (1995), afirma que los factores detonantes son externos ya que al actuar sobre el terreno alteran o perturban el equilibro en el cual se encuentran.

Según Mayorga (2003) citando a Castellanos (1996), los estudios realizados revelan que las causas de los desastres naturales como inundaciones, deslizamientos, avalanchas, etc., son en un 96% meteorológicas. El 56% de estas causas se presentan por las lluvias prolongadas o temporadas lluviosas, el 37% por lluvias intensas de corta duración y en un menor porcentaje por los huracanes. Dado que la lluvia es el evento que desencadena con mayor frecuencia, los movimientos en masa, el estudio de la causa de este fenómeno con algunos factores meteorológicos es de gran importancia.

Según Chaparro (2005) citando a Takahashi (1991), los flujos de detritos y avalanchas son detonados por eventos de lluvia de corta duración, asociada frecuentemente a la lluvia de 10 minutos. Sin embargo, ya que es muy difícil obtener registros de precipitación para duraciones de lluvia menores a 24 horas de estaciones pluviométricas en Colombia, se propone la metodología propuesta por Castellanos (1996).

Ya que muchos flujos y avalanchas ocurren luego de intensas lluvias, se debe conocer la cantidad de lluvia necesaria para detonarlos, la cual Castellanos y otros investigadores en Colombia y el exterior llaman como *lluvia critica*.

La metodología propuesta por Castellanos (1996) consiste en determinar la lluvia crítica, su duración y periodo de retorno para un evento histórico ocurrido en una cuenca especifica. Por lo tanto, es necesario obtener series históricas de precipitación diaria anterior al evento. Estas series se analizan utilizando métodos estadísticos y aplicando la teoría de las probabilidades.

Mayorga (2003b) citando a Castellanos (1996) afirma que la metodología se basa en calcular la lluvia acumulada en diferentes periodos, los cuales son clasificados según su nivel de probabilidad estadística. Con los registros de precipitación máxima 24 horas de las estaciones pluviométricas más cercanas a la cuenca de estudio, se organizan de tal manera que se pueda realizar el análisis de probabilidades utilizando la distribución de Gumbel, Esta distribución es una de las más utilizadas en estadística para calcular probabilidades de excedencia de eventos con datos extremos.

En resumen, con la distribución de Gumbel, se obtiene el periodo de retorno de la lluvia acumulada para diferentes duraciones. La lluvia critica será aquella cuya duración le corresponda el mayor periodo de retorno.

Según Mayorga (2003a) el procedimiento general a seguir es el siguiente:

1. A partir de la serie histórica de precipitación diaria regresiva para el evento, se elabora una serie de sumas acumuladas regresivas, la cual inicia desde el día en que ocurrió el evento hasta los 3 a 6 meses anteriores.

2. Realizar la gráfica de la lluvia acumulada del evento, donde el eje de abscisas corresponda a la duración en días y el eje de ordenadas corresponda a la precipitación acumulada en mm. El inicio será día en que ocurrió el evento de flujo; la curva debe realizarse regresivamente hasta cuando la precipitación sea cero, punto que determina la precipitación acumulada.

3. De la gráfica obtenida en el paso anterior, se seleccionan umbrales probables de precipitación crítica, los cuales corresponden a los cambios bruscos de

pendiente. El cambio de menor a mayor pendiente (en sentido retrogresivo) indica un aumento de la precipitación.

4. Se construyen las series parciales de la precipitación diaria máxima 24 horas con los valores de la duración de los umbrales: es una serie de sumas acumuladas para cada duración, es decir, se suma la serie de lluvia diaria en intervalos según cada duración.

5. A partir de las series parciales obtenidas en el paso anterior, se construyen series de máximos multianuales.

6. Con los umbrales de lluvia se calculan los periodos de retorno de cada uno de ellos utilizando la distribución de probabilidad de Gumbel y finalmente se toma el umbral más crítico.

7. Se toma la lluvia acumulada crítica, la cual corresponde a la que tiene el mayor periodo de retorno, ya que es la menos frecuente.

5.1.4.1 Zonificación de la lluvia crítica como evento detonante

Después de obtener la lluvia crítica y el periodo de retorno de un evento de flujo de lodos, se determina la precipitación acumulada de cada una de las estaciones del área de influencia de la cuenca para el periodo de retorno del evento seleccionado.

Ese procedimiento se realiza también usando la distribución de probabilidad de Gumbel, tomando como valores de lluvia máxima, los de los últimos años (2000 – 2015), ya que se buscará predecir un evento futuro, y las precipitaciones de los últimos años permiten predecir el comportamiento de las lluvias en los próximos años.

Por lo tanto, se supone que el evento que pueda ocurrir próximamente, ocurrirá en circunstancias similares al evento histórico seleccionado que se analizará.

En Colombia la lluvia acumulada es la que más interviene en la generación de movimientos en masa. Cuando la lluvia acumulada está alrededor del 30% de la lluvia media anual, existe la probabilidad moderada a alta de

ocurrencia de deslizamiento. Si la lluvia acumulada está entre 20 a 50% de la lluvia anual se considera la probabilidad moderada. Cuando la relación es mayor que la anterior la probabilidad se clasifica de alta y si es menor se considera baja (Mayorga, 2003b).

Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza el mapa de isoyetas de precipitaciones críticas para un evento con un periodo de retorno dado, y se reclasifica de acuerdo con la relación entre la lluvia acumulada y la lluvia promedio anual de cada estación pluviométrica.

5.1.5 Zonificación de la amenaza por flujos de lodos y avalanchas en una cuenca

Para la zonificación de la amenaza en una cuenca, los factores condicionantes y detonantes se integran como una suma de los puntajes obtenidos para cada uno, lo cual se expresa mediante la siguiente formula (Ojeda, Castro, Valencia, & Fonseca, 2002):

$$H = S_t + F_d \qquad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

H = Amenaza

S_t = Susceptibilidad del terreno

F_d = Acción de los factores detonantes

Cada uno de los componentes de la amenaza se analiza por separado y se integran en la ecuación de Amenaza (Ojeda et al., 2002).

La susceptibilidad del terreno (S_t) se obtiene de cualquiera de los métodos de análisis explicados anteriormente, del cual se obtienen diferentes categorías de susceptibilidad (Ojeda et al., 2002).

El factor detonante por lluvia suele corresponder a los valores de lluvias críticas, es decir, se establecen según aquellos umbrales de lluvias que han ocasionado eventos de flujos de lodos y avalanchas (Ojeda et al., 2002).

Cuando se obtengan los valores de amenaza calculados con la Ecuación 13, se agrupan en intervalos de categorías. Los intervalos de categorías se definen estadísticamente (Ojeda et al., 2002).

5.1.6 Identificación de los factores que intervienen en la amenaza por flujos de lodos y avalanchas de una zona urbana

5.1.6.1 Caudal líquido de escorrentía superficial

Aparicio (1982) define la escorrentía superficial como:

> "Agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.
>
> "El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre – una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada – sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca".

Algunos de los métodos utilizados para la estimación del caudal es escorrentía son los siguientes:

5.1.6.1.1 Método racional

El caudal de escorrentía de una cuenca se calcula con la siguiente expresión (Sánchez, 2016):

$$Q = \frac{C * I * A}{3.6} \qquad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

Q = Caudal
C = Coeficiente de escorrentía (valores típicos entre 0.1 y 0.7)
I =Intensidad de la precipitación
A = Área de la cuenca

Según Sánchez (2016) se considera lo siguiente:

- Algunos libros de hidrología presentan valores del coeficiente de escorrentía para diferentes tipos de suelo.

- El método solo calcula el caudal constante que se obtendría de una precipitación constante.
- Por su simplicidad, el método solo debe ser aplicado para cuencas pequeñas y con precipitaciones cortas y homogéneas.

5.1.6.1.2 Método del bloque alterno

Este método permite construir un hietograma de diseño utilizando una curva Intensidad-duración-frecuencia (curva IDF). El hietograma obtenido presenta la lámina de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt con una duración total T_d (Cruz, 2001). El procedimiento para la obtención del hietograma a partir de las curvas IDF es el siguiente:

1. Seleccionar el periodo de retorno de diseño, la duración de la lluvia ($T_d = n\ \Delta t$) y el intervalo de tiempo Δt.
2. Calcular las intensidades medias totales, evaluando cada uno de estos intervalos en la curva correspondiente.
3. Calcular las láminas totales multiplicando la intensidad por Δt.
4. Calcular las láminas por intervalos como la diferencia entre los valores sucesivos de lámina de precipitación total.
5. Calcular las intensidades por intervalos dividiendo la lámina por intervalo entre Δt.

El hietograma se debe reordenar de tal manera que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (Cruz, 2001).

5.1.6.1.3 Método de abstracciones del Soil Conservation Service (SCS)

El SCS desarrolló una metodología para calcular las abstracciones de precipitación de una lluvia. Para una lluvia, la lámina de

escorrentía directa P_e siempre será menor o igual que la lámina de precipitación P; Del mismo modo, después de que comienza la escorrentía, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual que la retención potencial máxima S (Ver Figura No. 10). Existe una precipitación I_a (antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía. Entonces, la escorrentía potencial es P - I_a.

Figura No. 10 - Variables del Método de SCS. I_a = Abstracción inicial, P_e = Exceso de precipitación, F_a = Abstracción continuada, P = Precipitación total (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

La hipótesis del método consiste en que las relaciones de las cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir,

$$\frac{F_a}{s} = \frac{P_e}{P_e - I_a} \qquad \text{Ecuación 15}$$

Del principio de continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a \qquad \text{Ecuación 16}$$

Combinando las 2 ecuaciones anteriores y despejando P_e se tiene que:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \qquad \text{Ecuación 17}$$

La cual es la ecuación básica para el cálculo de la lámina de exceso de precipitación o escorrentía directa de una lluvia usando el método SCS.

La realización de ensayos experimentales permitió concluir a los investigadores que:

$$I_a = 0.2S \qquad \text{Ecuación 18}$$

Entonces:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \qquad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

$$S = \frac{1{,}000}{CN} - 10 \ \ (pulg) \qquad \text{Ecuación 20}$$

CN (Numero de curva) es un número adimensional tal que 0 ≤CN ≤100. Para superficies impermeables y superficies de agua CN = 100; para superficies naturales CN<100.

Los valores de CN dependen del tipo de suelo y su cobertura vegetal. En la Tabla No. 3 se presentan los valores típicos.

Tabla No. 3 - Valores típicos de CN

Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada[1]: sin tratamientos de conservación		72	81	88	91
con tratamientos de conservación		62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres		68	79	86	89
condiciones óptimas		39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas		30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,		45	66	77	83
cubierta buena[2]		25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.					
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más		39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%		49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial[3]:					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable[4]				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.[5]		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados[5]		98	98	98	98
grava		76	85	89	91
tierra		72	82	87	89

1 Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remítese a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9
2 Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.
3 Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.
4 Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.
5 En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Fuente: Ven Te Chow

Tabla No. 4 - Grupos hidrológicos de suelos

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de Infiltración > 76 mm/h	Arenosa Arenosa-limosa
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa
D	Muy Lenta	Capacidad de infiltración<13 mm/h	Arcillosa

http://www.aguaysig.com/2017/01/metodo-del-numero-de-curva-del-scs.html

5.1.6.1.4 Software HEC-HMS

El software HEC-HMS ("Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System") es un modelo lluvia-escorrentía, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center HEC del U.S. Army Corps of

Engineers USACE, que permite simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un punto específico de la red de drenaje después de un evento de lluvia (J. López, González, & Scaini, 2012).

El programa consta de una interfaz gráfica para el usuario que le permite ingresar datos de entrada para la modelación, manejar los componentes de análisis hidrológico a través de módulos integrados, y obtener información mediante graficas o tablas muy sencillas.

5.1.6.2 Concentración volumétrica de sedimentos

La concentración volumétrica de sedimentos se define como la relación que existe entre el volumen de sólidos y el volumen total y se expresa como (J O' Brien, 2009):

$$C_v = \frac{Volumen\ de\ sedimentos}{(Volumen\ de\ sedimentos + volumen\ de\ agua)} \quad \text{Ecuación 21}$$

Los valores típicos para diferentes tipos de flujos se presentan en la Tabla No. 5.

Tabla No. 5 - Valores típicos de volumen de sedimentos

Descripción del tipo de flujo	Concentración de sedimentos (Cv)		Caracteristicas del flujo
	En volumen	En peso	
Deslizamientos	0.65 - 0.80	0.83 - 0.91	No hay flujo; falla por deslizamiento
	0.55 - 0.65	0.76 - 0.83	Derrumbe de bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de fallar
Flujos de lodo (mudflows)	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido por el flujo de lodo; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande en la superficie
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	El flujo es cohesivo y se extiende sobre la superficie
Avenida de lodo (mud flood)	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en la superficie horizontal pero mantiene una superficie fluida inclinada. Partículas grandes se depositan, aparencen ondas pero se disipan rapidamente
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Deposición rápida marcada de gravas y cantos rodados. Se expande rápidamente sobre la superficie horizontal. Aparece la superficie líquida con 2 fases del fluido
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Separación del agua en la superficie. Las olas se mueven con facilidad. La mayoría de las arenas y gravas se han depositado y se mueven como material de arrastre
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Se logra distinguir las olas y las ondas. Las partículas se depositan en el fondo
	< 0.20	< 0.41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo

Fuente: (J O' Brien, 2009)

La relación entre sedimento y agua gobierna la capacidad de flujo de la mezcla. La concentración de sedimentos varía a lo largo del evento de inundación con el surgimiento y el cese del flujo. La distribución de los sedimentos en el hidrograma de inundación controlará la celeridad y magnitud de la onda frontal, el volumen de flujo, la expansión y la dilución del flujo. La concentración promedio de sedimentos (relación entre el volumen total de agua y el volumen de sedimento) determina si el flujo se acumulará en el pie del abanico aluvial o fluirá a una distancia significativa del abanico aluvial. La naturaleza altamente variable de la concentración de sedimentos da lugar a oleadas de flujo inestables a lo largo del evento de inundación y nunca puede reproducirse exactamente con ningún grado de certeza (O' Brien 2009).

Cuando se asignan concentraciones de sedimentos a un hidrograma de inundación se sugieren las siguientes recomendaciones (O' Brien 2009):

- La concentración promedio de sedimentos debería reflejar los volúmenes de agua y sedimentos estimada para la tormenta de diseño.
- El volumen de sedimentos no debe exceder el máximo potencial estimado en campo para la cuenca.
- La sección ascendente del hidrograma debe tener la misma forma que la sección ascendente de concentraciones de sedimentos para simular la onda frontal.
- Al caudal máximo se le debe asignar una concentración de sedimento ligeramente inferior a la onda frontal para tener en cuenta la dilución del agua.
- Las secciones ascendentes y descendentes de los hidrogramas no deben tener menos del 20% de concentración de sedimentos por volumen.
- Para generar un flujo de lodo, la concentración media de sedimentos para todo el hidrograma debe estar en el rango de 25% a 35% en volumen.

5.1.6.3 Caudal total o engrosamiento del caudal

El engrosamiento es el incremento en el caudal de agua clara que circula por un canal en función del exceso de sedimentos transportados por el flujo (Niño, 2015).

A continuación, se explican los métodos más destacados para la determinación del caudal total.

5.1.6.3.1 Obtención del caudal total según O'brien (2006)

El volumen total de una mezcla de agua-sedimento en un flujo de lodos se puede determinar amplificando el volumen de agua por un factor de engrosamiento (BF). Este factor se define como la relación de una unidad volumétrica de una mezcla de agua-sedimentos respecto a la porción volumétrica de agua (J O' Brien, 2009).

Si el caudal total de un flujo hiperconcentrado puede ser expresado como la suma de la porción líquida y de la porción sólida, el factor de engrosamiento se representa como la relación entre el caudal total y el caudal líquido, o expresado en términos matemáticos:

$$Q_T = Q_W + Q_S \qquad \text{Ecuación 22}$$

$$BF = \frac{Q_T}{Q_W} = \frac{Q_W + Q_S}{Q_W} \qquad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

Q_T (m^3/s) es caudal de flujo engrosado
Q_W (m^3/s) es el caudal pico de agua clara
Q_S (m^3/s) es el caudal de sedimentos volumétrico

Por ende, si el factor de engrosamiento corresponde al cociente entre el caudal engrosado y el caudal de agua clara, y se puede representar como:

$$Q_T = BF * Q_W \qquad \text{Ecuación 24}$$

Según O'Brien (2009) el factor de engrosamiento (BF) depende de la concentración volumétrica (C_v) de sedimentos en el flujo y se calcula mediante la expresión:

$$BF = \left(\frac{1}{1 - C_v}\right) \qquad \text{Ecuación 25}$$

Para flujos de detritos el valor de C_v varía entre 0,20 y 0,45 y para flujos de lodos varía entre 0,45 y 0,55. Un BF de 2 corresponde a una concentración de sedimentos por volumen de 50%; así mismo, un BF de 1.075 le corresponde una concentración de sedimentos de 7%, la cual corresponde a la carga transportada por arrastre y en suspensión de un cauce convencional, lo cual indica que el volumen de la creciente es un 1,75% mayor que el volumen transportado por una creciente de agua clara (J O' Brien, 2009).

El hidrograma de flujo hiperconcentrado se puede estimar a partir de la hidrógrafa de flujo de agua multiplicando por el factor BF que es una función de la concentración volumétrica de los sedimentos (Cv). Con el caudal pico de la descarga y el volumen de sedimentos disponibles en la cuenca, se calcula la concentración promedio para una hidrógrafa y la concentración de sedimentos para el caudal pico. Una concentración de sedimentos típica para la descarga máxima de un flujo de lodos es aproximadamente 45 a 55% por volumen dependiendo de la concentración de sedimentos finos en la matriz de fluido, la concentración promedio de la hidrógrafa de un flujo de lodos esta entre 25% y 35% para tormentas de corta duración y de 10% a 25% para tormentas de larga duración (Niño, 2015).

5.1.6.3.2 Obtención del caudal total según Takahashi (1981)

Takahashi (1981) citado por Niño (2015) establece que el volumen de sólidos que es transportado por una creciente es el siguiente:

$$V_s = V_w * \frac{C_D}{C^* - C_D}$$ Ecuación 26

Donde

V_s : Volumen de lodos y detritos

V_w : volumen de agua

Cd: Densidad volumétrica del flujo de lodos y piedras

C*: Concentración volumétrica de sedimentos en el lecho, estimada como la diferencia entre 1 y la porosidad (ŕ),

$$C_D = \frac{\rho_M tanS}{(\sigma - \rho_M)(tan\Phi - tanS)}$$ Ecuación 27

$$C^* = 1 - \eta$$ Ecuación 28

Donde:

ρ: Densidad de la mezcla agua-sedimentos (T/m^3)

σ: Densidad de sedimentos (T/m^3)

Φ: Ángulo de fricción del material (entre 30° y 40°)

S: Pendiente del lecho en grados

De acuerdo con Niño (2015), con base en lo anterior en las ecuaciones anteriores, Takahashi estima el caudal máximo de la mezcla agua-sedimento como una función del caudal líquido, y el caudal del material fino como una función del caudal líquido:

$$Q_S = \left(\frac{C^*}{C^* - C_D}\right) Q_W$$ Ecuación 29

$$Q_f = \left(\frac{\rho_M - 1}{\sigma - \rho_M}\right) Q_W$$ Ecuación 30

$$Q_T = Q_S + Q_f$$ Ecuación 31

$$Q_T = \left[\left(1 + \frac{V_S}{V_W}\right) + \frac{\rho_M - 1}{\sigma - \rho_M}\right] Q_W \qquad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

Q_W es el caudal líquido (m^3/s)
Q_f es el caudal de material fino (m^3/s)
Q_T es el caudal del fluido (m^3/s)

5.1.7 Zonificación de la amenaza por flujos de lodos y avalanchas en una zona urbana

En zonas de alta montaña es usual la ocurrencia de tormentas intensas, las cuales activan procesos de movimiento de material (flujos y avalanchas) y el transporte de una gran cantidad de sedimentos. En los cauces de alta pendiente, la descarga del sedimento aumenta a medida que avanza el flujo, lo cual puede generar un aumento excesivo en la concentración volumétrica de sólidos, que en muchos casos excede el 50%. De esta manera ocurre con los flujos y avalanchas que transportan grandes volúmenes de sedimentos río abajo, depositándolos en abanicos aluviales, que generalmente corresponden a sitios poblados (N. Suárez & Suárez, 2006).

En el caso de las avalanchas, éstas transportan una gran cantidad de material que causan destrucciones en zonas de depósito. En estos eventos, es posible monitorear la evolución de los taludes, pero la falla no puede preverse. Por esta razón, la modelación de las fases de propagación de las avalanchas proporciona valiosa información a los ingenieros acerca de la velocidad, trayectoria y alturas que alcanzan. Con estos datos, es posible mejorar el manejo del riesgo y proponer medidas de mitigación para reducir la amenaza potencial de un área específica (Manzanal, Drempetic, Haddad, Pastor, & Martin, 2016).

Huang y García (2016) afirman que:

> “Las lluvias torrenciales en áreas montañosas pueden desencadenar poderosos flujos de lodos capaces de transportar gran cantidad de grava, guijarros y cantos rodados, resultando a menudo en flujos de detritos que causan cambios en los

cauces de los ríos y las pendientes de montañas. Los flujos causan grandes pérdidas en infraestructura y vidas humanas. Por lo tanto, es necesario predecir las características de los flujos de lodos con el fin de evitar desastres y reducir las pérdidas económicas".

Existe evidencia que indica que el lodo en altas concentraciones presenta un comportamiento reológico no newtoniano (Huang & García, 2016). Los fluidos newtonianos son aquellos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación, manteniéndose una viscosidad constante a una temperatura y presión dada. En contraposición, en los fluidos no newtonianos el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la deformación. Por lo tanto, su viscosidad varía con la temperatura y el esfuerzo cortante que se le aplique («Medidores de Flujo - Instrumentación», s. f.).

Según estudios reológicos realizados por Krone, Migniot, Wan y Wang indican que el lodo de diferentes fuentes tiene un comportamiento similar a un fluido Bingham plástico cuyo esfuerzo de fluencia τ_y y su viscosidad μ aumenta con el contenido de arcilla. Dicho fluido en reposo puede resistir cualquier esfuerzo de corte menor que el esfuerzo de fluencia. Cuando se supera el esfuerzo de fluencia, la estructura del fluido varía y el material se comporta como un fluido newtoniano manejado por el exceso de esfuerzo de corte más allá del esfuerzo de fluencia. Cuando el esfuerzo de corte cae por debajo del esfuerzo de fluencia, la estructura del fluido cambia de nuevo y cesa el flujo. Hay evidencia de que los flujos de detritos de grano fino, lava fundida y avalancha de nieve pueden ser modeladas como flujos del tipo Bingham plástico (Huang & García, 2016).

Huang y García (2016) afirman que:

"La modelación de flujos de lodos y flujos de detritos es de interés para los ingenieros hidráulicos. Debido a la complejidad reológica de estos flujos al resolver las ecuaciones dinámicas de inestabilidad, los flujos no uniformes siguen siendo complicados. En consecuencia, los conceptos básicos de hidráulica de canales abiertos son frecuentemente aplicados a la simulación de flujos de lodos. Otros parámetros tales como los coeficientes de momento y

energía, n de Manning, coeficientes de resistencia de Darcy-Weisbach usualmente se definen con la ayuda de los perfiles de velocidad definidos por diferentes modelos reológicos".

5.1.8 Utilización del programa FLO 2D para la modelación de flujos de lodos y avalanchas

Castillo, Fidel y Jackson (2006) afirman que:

> "El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien et al., 1988) simula flujo de fluidos no-newtonianos, como aludes torrenciales en conos de deyección. Permite simular flujos en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas, terrazas y conos de deyección; así como el intercambio de fluido entre los canales y el cono de deyección. Puede modelarse flujo de agua y flujos hiperconcentrados (avenida de lodo, flujo de lodo y flujo de detritos). El modelo considera el fluido homogéneo (una sola fase) de concentración variable; esto significa que internamente no se hace distinción de los tamaños de sedimento.
>
> Como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada (líquidos y sólidos), precipitación y propiedades reológicas de la mezcla agua-sedimento. La topografía para la modelación consiste en el detalle del cono de deyección y parte del canal adyacente. El hidrograma líquido calculado por procedimientos hidrológicos normales, es utilizado en la modelación de flujos hiperconcentrados. Finalmente, los parámetros reológicos (viscosidad y esfuerzo de cedencia) son estimados de manera indirecta, comparando muestras de la quebrada con muestras tipo".

Por otra parte, O'Brien, Julien y Fullerton (1993) establecen que el FLO-2D es una evolución del Modelo Hidrodinámico Difusivo (DHM). El algoritmo original del DHM fue revisado y ampliado para mejorar la estabilidad computacional, disminuir el tiempo de modelación y ampliar su aplicación a mayores variedades de condiciones de inundación.

Además, según dichos autores, el FLOD 2D aplica las ecuaciones de movimiento y conservación de la masa para un flujo de agua o un flujo hiperconcentrado. La superficie topográfica es discretizada en mallas con elementos uniformes de forma cuadrada. A cada elemento de la malla, se le asigna una localización, elevación, factor de rugosidad y factores de reducción de área y ancho de flujo usados para simular el flujo.

Por otra parte, O'Brien (2009) propone las siguientes ecuaciones de continuidad y movimiento (ecuación de momento dinámico de onda):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i \qquad \text{Ecuación 33}$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} * \frac{\partial V}{\partial x} - -\frac{1}{g} * \frac{\partial V}{\partial t} \qquad \text{Ecuación 34}$$

Donde:

h = Profundidad del flujo
V = Velocidad promedio a la profundidad h en uno de las 8 direcciones de flujo
i = Intensidad de la lluvia.
Sf = Componente de fricción de la pendiente basado en la ecuación de Manning
S0 = Pendiente del terreno

O'Brien (2009) afirma que mientras que el FLO 2D es un modelo de flujo multidireccional, las ecuaciones de movimiento en FLO 2D se aplican calculando la velocidad promedio del flujo que pasa por un elemento de malla en una dirección durante un tiempo. Hay 8 posibles direcciones del flujo: norte, sur, este, oeste, noreste, noroeste, sureste y suroeste. Cada cálculo de velocidad en una dirección dada es de tipo unidimensional y se resuelve independientemente de las otras siete direcciones.

La forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y momento en el modelo FLO 2D se resuelven por el método numérico de diferencias finitas. El algoritmo resuelve las ecuaciones de momento para una velocidad de flujo a través del elemento de malla en un lapso de tiempo dado. La solución de la forma diferencial de la ecuación

de momento resulta de una representación discreta de la ecuación cuando es aplicada en un solo punto (J O' Brien, 2009).

O'Brien (2009) incorpora los siguientes pasos para la solución del algoritmo:

1. "Se calculan la geometría promedio del flujo, rugosidad, y pendiente entre dos elementos de grilla.
2. La profundidad del flujo para calcular la velocidad a través del borde de la grilla para el siguiente lapso de tiempo (i+1) se estima con el lapso de tiempo anterior i, usando una estimación lineal (promedio de las profundidades de dos elementos de grilla).

$$d_x{}^{i+1} = d_x{}^{i} + d_{x+1}{}^{i} = \qquad \text{Ecuación 35}$$

3. La primera velocidad se calcula usando la ecuación de onda difusiva. La única variable desconocida en la ecuación de onda difusiva es la velocidad para el flujo terrestre, de canal o de corriente.
4. La velocidad de onda difusiva predicha para el lapso de tiempo actual se utiliza como una semilla en la solución de Newton-Raphson para resolver la ecuación de onda dinámica completa para la velocidad de la solución. Si se trata de flujo hiperconcentrado como lodo, flujo de detritos, los cálculos de la velocidad incluyen los términos adicionales de viscosidad y esfuerzo de corte de fluencia.
5. El caudal a través del borde de la grilla se calcula multiplicando la velocidad en la sección transversal del flujo.
6. Se suman los incrementos en el caudal para un lapso de tiempo en las 8 direcciones:

$$\sum Q_x{}^{i+1} = Q_N + Q_S + Q_E + Q_W + Q_{NE} + Q_{NW} + Q_{SE} + Q_{SW} = A_{surf} * \frac{\Delta h}{\Delta t} \qquad \text{Ecuación 36}$$

El cambio en el volumen (caudal neto x Δt) se distribuye sobre el área de almacenamiento disponible dentro de la rejilla o elemento de canal para determinar un aumento incremental en la profundidad de flujo:

$$\Delta d_x{}^{i+1} = \Delta Q_x{}^{i+1} * \frac{\Delta t}{A_{surf}} \qquad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

Qx = Caudal a través de un elemento de grilla

Asurf = Área superficial de un elemento de grilla

Δh/Δt = Cambio en la profundidad del flujo en un elemento de grilla para un lapso de tiempo

7. Luego se verifica el criterio de estabilidad numérica para la nueva profundidad de flujo del elemento de grilla. Si se excede uno de los criterios de estabilidad, el tiempo de simulación se restablece al tiempo de simulación anterior, se reduce el incremento de lapso de tiempo, se descartan todos los cálculos de tiempos anteriores y se vuelven a iniciar los cálculos de velocidad.
8. La simulación progresa con incrementos de tiempo hasta que se superan los criterios de estabilidad".

Según O'Brien et al (1993) algunas de las suposiciones del modelo son las siguientes:

(1) El flujo es estable para un lapso de tiempo (usualmente pocos segundos).
(2) Distribución de presión hidrostática.
(3) Utiliza la ecuación de resistencia de flujo permanente.
(4) La forma de la sección transversal y la rugosidad del canal son lo suficientemente uniformes.
(5) Los elementos de la malla tienen valores únicos de elevación y rugosidad.

Adicionalmente, el modelo no simula la degradación, lo cual no es crítico en zonas planas (superficies menos erosionables) y flujos de deposición tales como flujos de lodo, que pueden dejar de fluir cuando se encuentran obstáculos (J O' Brien et al., 1993).

5.1.9 Calculo de la amenaza por flujos de lodos y avalanchas en la zona urbana

Según Sepúlveda y Patiño (2016), el grado de amenaza por inundación o flujo de un sitio específico depende de la intensidad y probabilidad del evento. La intensidad del evento es función de la profundidad del flujo y la velocidad. La probabilidad de

ocurrencia del evento es inversamente proporcional a la magnitud de la inundación.

Para dichos investigadores, la categorización de la amenaza abarca la probabilidad de ocurrencia de un evento para un periodo de retorno seleccionado. Entonces, se hace la simulación del evento en el programa FLO 2D para dicho periodo de retorno. El modelo pronostica las máximas profundidades y velocidades para el periodo de retorno. La intensidad del evento para un periodo de retorno determina los niveles de amenaza.

La zonificación de la amenaza en el software FLO 2D se basa en una metodología desarrollada por García (2003, 2005). Este enfoque sigue las normas suizas y austriacas que establecen tres zonas para delimitar el nivel de amenaza por inundaciones.

Como se dijo anteriormente, el nivel de amenaza por inundación en un sitio especifico es una función tanto de la intensidad como de la probabilidad. La intensidad de las inundaciones es definida por la profundidad del flujo y la velocidad. La probabilidad de la inundación es inversamente proporcional a la magnitud de la inundación. Grandes eventos de inundaciones no ocurren frecuentemente. El nivel de amenaza es definido como una combinación de la intensidad del evento y el periodo de retorno (frecuencia), tal como se observa en la Figura No. 11.

Figura No. 11 - Clasificación de la amenaza por flujo de detritos de acuerdo con su intensidad y probabilidad de ocurrencia.: (R. García, Noya, & López, 2003)

El color de los mapas indica el potencial de amenaza especifico tal como se presenta en la Tabla No. 6.

Tabla No. 6 – Definición del nivel de amenaza

DEFINICION DE LA AMENAZA		
Nivel de amenaza	**Color del mapa**	**Descripción**
Alta	Rojo	Las personas están en peligro dentro y fuera de sus casas. Las estructuras están en peligro de ser destruidas
Media	Naranja	Las personas están en peligro fuera de sus casas. Las construcciones pueden sufrir daños y posible destrucción dependiendo de las características de las construcciones
Baja	Amarillo	El peligro para las personas es bajo o no existe. Las construcciones pueden sufrir pequeños daños, pero la sedimentación puede afectar el interior de las estructuras.

Fuente: (R. García et al., 2003)

Basado en el método suizo, O´brien (1993) estableció para los flujos de lodos los diferentes niveles de amenaza para cierto grado de intensidad, tal como se presenta en la Tabla No. 7.

Tabla No. 7 - Definición de la Intensidad de flujo de detritos

DEFINICION DE LA INTENSIDAD DE FLUJOS DE LODOS O DETRITOS			
Intensidad del evento	**Máxima profundidad (m)**		**Producto de máxima profundidad h (m) y la máxima velocidad v (m^2/s)**
Alta	h>1.0 m	O	v*h >1.0 m^2/s
Media	0.2 m <h<1.0 m	Y	0.2 m^2/s <v*h<1.0 m^2/s
Baja	0.2 m <h<1.0 m	Y	v*h <0.2 m^2/s

Fuente: (R. García et al., 2003)

5.1.10 Aplicación de un SIG para la zonificación de la amenaza por avalanchas y flujos de lodos

5.1.10.1 Introducción

Según Languen (2010) un Sistema de información geográfica (SIG) se define como:

> "Una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión".

Los SIG están diseñados para trabajar con datos referenciados con respecto a coordenadas espaciales o geográficas.

Moreira (1996) establece que un dato geo-referenciado o dato espacial es un elemento localizado en el espacio mediante un sistema de coordenadas, el cual se puede describir por medio de una serie de atributos o características y que permite conocer su relación con otros elementos. Un conjunto de datos espaciales asociado a una localización específica, y que sea de utilidad para la toma de decisiones, se puede denominar información geográfica.

La razón principal para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite dividir la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, lo cual le permite al profesional trabajar con ellas mucho más rápido y sencillo, lo cual también facilita la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de crear otra nueva que no se podría obtener de otra forma (Languen, 2010).

Según Languen (2010), los principales problemas que puede resolver un SIG de menor a mayor complejidad son:

1. Localización: Preguntar por las características de un lugar concreto.

2. Condición: El cumplimiento o no de unas condiciones impuestas al sistema.
3. Tendencia: Comparación entre situaciones temporales o espaciales distintas de alguna característica.
4. Rutas: Cálculo de rutas óptimas entre dos o más puntos.
5. Pautas: Detección de pautas espaciales.
6. Modelos: Generación de modelos a partir de fenómenos o actuaciones simuladas.

5.1.10.2 Pasos a seguir para la zonificación de la amenaza por flujos de lodos y avalanchas usando un SIG

5.1.10.2.1 Recopilación de la información temática base

Se debe obtener la información correspondiente a los factores condicionantes de la cuenca en estudio.

La información primordial son los mapas: topográficos, geológicos, geomorfológicos, de uso y cobertura del suelo (Ávila et al., 2016). Además, se debe hacer un inventario de avalanchas y un registro histórico de estos (catálogo). El inventario de las avalanchas permite identificar las características de los eventos, su distribución espacial y temporal y su relación con los factores detonantes.

5.1.10.2.2 Creación del Modelo Digital de Elevación del Terreno (MDT)

El MDT describe las elevaciones del terreno respecto del nivel del mar. La representación reflejará el relieve mediante valores numéricos, que simbolizan la cota o altura («Introducción | Instituto Geográfico Nacional de Argentina», 2016). El MDT se obtiene después de remover elementos ajenos a este tales como la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno (Ávila et al., 2016). Por medio del programa ARGIS es posible levantar un MDT a partir de datos de elevación del terreno (curvas de

nivel y puntos de elevación), utilizando redes irregulares de triángulos conocidos como “TIN”. Los TIN, permiten modelar las superficies heterogéneas del terreno de forma prácticamente idéntica a la realidad («Curso online gratis de ArcGIS 9.3», 2016).

5.1.10.2.3 Digitalización y creación de mapas temáticos

La información cartográfica de los factores condicionantes se debe digitalizar al SIG en el cual se va a trabajar. De esta manera se obtienen los mapas temáticos. Tal es el caso de los mapas de uso del suelo, pendientes y geológico, entre otros.

Los elementos de un tema que tengan las mismas características espaciales (puntos, líneas o polígonos) deben ir en capas separadas, de acuerdo con su tipo de elemento y atributos asociados. Por ejemplo, el tema de geología se puede representar mediante tres capas: formaciones geológicas (polígonos), fallas y pliegues (líneas) y buzamientos (puntos), cada una de ellas con topología y atributos distintos (Ojeda et al., 2002).

Los SIG permiten la generación de mapas temáticos, los cuales utilizan diversidad de herramientas de análisis para realizar operaciones matemáticas, muchas de las cuales involucran un par de cobertura de polígonos y, en algunos casos, de tipos diferentes. Las operaciones más comunes son la unión, intersección, diferencia, generación de *buffers*, entre otros (Ojeda et al., 2002).

La generación de cada uno de los mapas es diferente y ´puede incluir una o más capas y operaciones diferentes entre ellas. También se pueden generar capas intermedias que deban ser reclasificadas, generalizadas o resumidas, para generar finalmente la capa temática resultante de todo el análisis (Ojeda et al., 2002).

5.1.10.2.4 Zonificación de la susceptibilidad

Ojeda (2002) propone el siguiente procedimiento para zonificar la susceptibilidad del terreno a avenidas torrenciales:

1. Intersectar cada una de las capas índice (geología, pendientes, curvatura, uso del suelo) con la capa de inventario de avalanchas o flujo de lodos.
2. Hacer el análisis de susceptibilidad con uno de los métodos explicados en el numeral 5.1.2.1 (preferiblemente el estadístico o el heurístico). Este análisis se hace con el fin de determinar cuantitativamente el peso o relación de cada unidad de parámetro (en cada capa), con respecto a los eventos históricos de avalanchas o flujos de lodos. Los valores de peso se asignan a las tablas relacionadas con cada capa.
3. Se definen rangos de susceptibilidad. Para definir los rangos, se realiza un análisis de dispersión para todos los mapas índice según el tipo de proceso, y se obtienen cinco o más categorías o grados de susceptibilidad, desde nula hasta muy alta.
4. Obtención de los mapas de susceptibilidad de cada uno de los temas de análisis con respecto a cada uno de los eventos históricos de avalanchas o flujos de lodos, teniendo en cuenta los rangos de susceptibilidad y se asigna la simbología de colores de acuerdo a cada rango de susceptibilidad.
5. Hacer la sumatoria de todas las capas temáticas de análisis (geología, pendientes, curvatura, uso del suelo) para obtener el mapa de susceptibilidad total del terreno.

5.1.10.2.5 Zonificación del “factor detonante lluvia”

Utilizando la metodología descrita en el numeral 5.1.4.1 se determinan los umbrales de lluvia como detonantes de avalanchas o flujos de lodos, los cuales se incorporan a la cuenca en estudio utilizando el SIG. Luego se definen los rangos de categoría de lluvia crítica y se asigna la simbología de colores de acuerdo con el grado de amenaza por lluvia.

5.1.10.2.6 Zonificación de la amenaza

Sepúlveda y Patiño (2016) propusieron un procedimiento para la obtención del mapa de amenaza de una cuenca por ocurrencia de flujos de detritos. Dada la similitud en el comportamiento reológico de flujos de detritos y flujos de lodo, se propone aplicar el procedimiento para los flujos de lodos. Los pasos son los siguientes:

1. Se suben al SIG los mapas de susceptibilidad y de umbrales de lluvia como detonador de avalanchas y flujo de lodo en formato ráster.
2. Se utiliza la herramienta del SIG que permita sumar los mapas de susceptibilidad y de umbrales de lluvia. El mapa resultante corresponde al Mapa de Amenaza de la cuenca para ocurrencia de avalanchas o flujo de lodos.
3. Se reclasifica el mapa de amenaza estableciendo la zonificación por medio del método de los Cuantiles disponible en el SIG.

5.2 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

El análisis de vulnerabilidad se debe realizar en zonas de amenaza alta. De acuerdo con el Decreto 1807 de 2014, publicado por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, el procedimiento que se debe seguir para evaluar la vulnerabilidad es:

- Identificación y localización de los elementos expuestos,
- Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia,
- Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad,
- Zonificación de la vulnerabilidad.

Los escenarios de vulnerabilidad relacionan a los elementos expuestos con el evento de flujo; incluyen tanto la exposición de los elementos expuestos (infraestructura y personas) como su grado de fragilidad ante el evento amenazante. Cuando se relaciona la intensidad del flujo que se desplaza (en cuanto a su energía, volumen o deformación) con la fragilidad de los elementos expuestos, se pueden establecer unos niveles de daño y con base en estos se definen categorías de vulnerabilidad física con las cuales se puede zonificar la vulnerabilidad (Ávila et al., 2016).

Por su parte, la vulnerabilidad de las personas se define en función de los posibles niveles de afectación en cuanto a pérdidas probables de vidas o de lesiones corporales, asociadas con los niveles de daño de las edificaciones, previamente evaluados (Ávila et al., 2016).

5.2.1 Identificación y localización de los elementos expuestos

Se necesita la identificación y localización de los elementos expuestos para considerar únicamente aquellos elementos que se encuentran dentro del área de influencia del evento. La selección de los elementos expuestos debe tener en cuenta la infraestructura física del área de estudio, los distintos procesos generadores de daño ("solicitaciones"), la información secundaria disponible y la información de campo que se deba levantar (Ojeda et al., 2002).

Los elementos expuestos se pueden dividir en 3 grupos: corporales, estructurales y funcionales (Ojeda et al., 2002).

Los elementos corporales incorporan a los habitantes expuestos.

Los elementos estructurales que representan los bienes materiales, se subdividen en tres tipos según su naturaleza:

1) Construcciones (edificaciones),
2) Redes (vías, líneas y acequias),
3) Superficies naturales (suelo).

Los elementos funcionales que representan las actividades económicas y no económicas, se subdividen en cuatro tipos:

1) Económicas,
2) Transporte, comunicación y distribución,
3) Sociales, culturales y educación,
4) Socorro, salud y seguridad.

5.2.2 Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia

Se debe describir y categorizar cada elemento identificado y localizado en función de sus características de tipología, exposición y fragilidad, con el propósito de

evaluar su vulnerabilidad física ante la ocurrencia de un movimiento en masa (Ávila et al., 2016).

La caracterización de los elementos expuestos involucra dos parámetros: Índice de resistencia y el Índice de exposición de las edificaciones.

5.2.2.1 Índice de resistencia de las edificaciones

Según Sepúlveda y Patiño (2016) se define como la capacidad que tiene un elemento estructural para resistir ante el contacto con un evento amenazante, el cual depende del número de pisos de la edificación, su sistema estructural y las características de aberturas de la fachada.

Por lo tanto, se debe hacer un inventario de las edificaciones que incluya las características mencionadas antes, de acuerdo con los criterios que se establecen a continuación:

5.2.2.1.1 Número de pisos de la edificación

El número de pisos de la edificación incide en la vulnerabilidad de la estructura ante inundaciones o flujos rápidos (Sepúlveda & Patiño, 2016). En la Tabla No. 8 se presentan los factores que se asignan según el número de pisos.

Tabla No. 8 - Factor de vulnerabilidad según el número de pisos de la edificación

Número de pisos	Factor
Un piso	0.5
Más de un piso	1

Fuente: (Sepúlveda y Patiño 2016)

5.2.2.1.2 Aberturas en fachadas

Sepúlveda y Patiño (2016) citando a (Markus Holub, 2011) afirman que como los flujos transportan gran cantidad de sedimentos, éstos pueden penetrar en las aberturas de los muros, lo cual disminuye la resistencia y la estabilidad de éstos. Además, los sedimentos depositados dentro de la edificación aumentan la carga estática sobre techos y paredes.

En la Tabla No. 9 se presentan los factores que se asignan según el tipo de abertura de fachada.

Tabla No. 9 - Factor de vulnerabilidad según el tipo de abertura de las fachadas

Aberturas en fachada	Factor
Sin ventana	1
Ventanas de seguridad y/o contraventanas pesadas	0.66
Ventanas sin medidas de protección	0.33

Fuente: (Sepúlveda y Patiño 2016) citando a (Ciurean R.L., Hussin H., van Westen C.J., Jaboyedoff M., Nicolet P., Chen L., and Glade T, 2015)

5.2.2.1.3 Sistema estructural

La edificación tiene una respuesta diferente ante un evento de flujos dependiendo del tipo de estructura y materiales que la conforman (Sepúlveda & Patiño, 2016).

En la Tabla No. 10 se presentan los factores que se asignan según sistema estructural de la edificación.

Tabla No. 10 - Factor de vulnerabilidad según el sistema estructural

Sistema estructural	Factor
Muros estructurales	0.95
Pórtico	1
Sistemas duales	0.95
Prefabricado	0.6
Mampostería confinada	0.8
Mampostería estructural	0.85
Mampostería no reforzada	0.6
Estructura y paneles en madera	0.85
Estructuras en madera y paneles en otro material	0.9
Estructuras de acero arriostrado	0.9
Tapia pisada o bareque	0.4

Fuente: (Chaparro, 2005)

Finalmente, luego de evaluar los parámetros de resistencia, se calcula el **Índice de Resistencia** para cada edificación utilizando la siguiente ecuación:

$$IR = 0.2 * NP + 0.2 * A + 0.6 * SE \qquad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

IR = Índice de resistencia

NP = Factor por número de pisos

A = Factor por abertura de fachada

SE = Factor por sistema estructural

5.2.2.2 Índice de exposición de las edificaciones

La exposición es la posición relativa de la edificación con respecto al área afectada por el evento (Ávila et al., 2016).

El concepto de exposición a avalanchas se ilustra en la Figura No. 12.

Figura No. 12 - Exposición de elementos físicos ante una avenida torrencial (Ojeda et al., 2002)

El Índice de Exposición depende de la intensidad de la amenaza, la cual a su vez depende de la altura de depositación del flujo y la presión de impacto (Ávila et al., 2016).

$$IE = v(h_{df}) * v(P_i) \qquad \text{Ecuación 39}$$

Donde:

IE = Índice de exposición

$v(h_{df})$ = Factor por altura de flujo

$v(P_i)$ =Factor por presión de impacto

Las funciones de altura de flujo y presión de impacto fueron tomadas de Luna (2011).

Para el caso de la presión de impacto, se tomó como límite superior de daño un valor de 6.45 KPa, para construcciones ligeras de mampostería; esta presión representa el límite superior del umbral del daño, a partir del cual la vulnerabilidad por la contribución de la presión, toma el valor de 1.0, ya que se debe reconstruir la estructura (Sepúlveda & Patiño, 2016).

$$v(P_i) = \frac{1.596 * \left(\frac{P}{4.845}\right)^{1.808}}{1 + \left(\frac{P}{4.845}\right)^{1.808}} \quad Para\ P_i \leq 6.45\ kPa$$ Ecuación 40

$$v(P_i) = 1 \qquad Para\ P_i > 6.45\ kPa$$ Ecuación 41

En lo referente a la altura del flujo de detritos, se ha observado un incremento repentino del grado de pérdidas una vez la altura de depositación del flujo supera 1.00 m; esto significa que son muy importantes las características de las aberturas de la edificación, especialmente las ventanas, que están relacionadas con esta altura crítica (Sepúlveda & Patiño, 2016).

La siguiente es la formulación para la altura del flujo adaptado de (Luna et al., 2011):

$$v(h_{df}) = \frac{1.49 * \left(\frac{h_{df}}{0.69298}\right)^{1.938}}{1 + \left(\frac{h_{df}}{0.69298}\right)^{1.938}} \quad Para\ h_{df} \leq 1\ m$$ Ecuación 42

$$v(h_{df}) = 1 \qquad Para\ h_{df} > 1\ m$$ Ecuación 43

Finalmente, sustituyendo $v(h_{df})$ y $v(P_i)$ en la ecuación de Índice de exposición se tiene que:

$$IE = \frac{1.49 * \left(\frac{h_{df}}{0.69298}\right)^{1.938}}{1 + \left(\frac{h_{df}}{0.69298}\right)^{1.938}} * \frac{1.596 * \left(\frac{P}{4.845}\right)^{1.808}}{1 + \left(\frac{P}{4.845}\right)^{1.808}} \quad Para\ P_i \leq 6.45\ kPa\ y\ h_{df} \leq 1\ m$$ Ecuación 44

Ecuación 45

$$IE = 1 \qquad Para\ P_i > 6.45\ kPa\ y\ h_{df} > 1\ m$$

5.2.3 Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad.

Los efectos esperados sobre las edificaciones por un evento de flujo de lodos o avalanchas se obtienen mediante el Índice de Vulnerabilidad Física, cuya expresión fue propuesta por INGEOCIM, 1998 y modificada por Lara (2002):

$$IVF = (1 - IR^{IE})^{(1-IE)}$$ Ecuación 46

Donde:

INV = Índice de Vulnerabilidad Física

IR = Índice de Resistencia

IE = Índice de Exposición.

Se debe aplicar la ecuación de vulnerabilidad física a todas las edificaciones ubicadas en la zona de amenaza alta.

5.2.4 Zonificación de la vulnerabilidad

Luego de obtener los valores de Índice de Vulnerabilidad Física, se zonifica la vulnerabilidad utilizando un Sistema de Información Geográfica, en la misma escala del mapa de amenaza. El Decreto 1807 de 2014 solicita establecer tres categorías de Vulnerabilidad: alta, media y baja; esta clasificación se observa en la Tabla No. 11.

Tabla No. 11 - Categorización de la vulnerabilidad

Índice de Vulnerabilidad Física	Categoría de vulnerabilidad	Color	Rangos de daño	Tipo de daño
0 - 0.10	Baja		0.01 – 0.1	Daños no estructurales leves. No se afecta la estabilidad
0.10 – 0.4	Media		0.1 – 0.4	Fisuras en muros, estabilidad no afectada, reparaciones no urgentes.
0.40 – 1.0	Alta		0.4 – 0.6	Deformaciones severas, grietas muy abiertas, grietas en los elementos estructurales. Estabilidad afectada. Puertas y ventanas inutilizables. Evacuación necesaria.
			0.6 – 0.8	Fracturas estructurales, destrucción parcial, es necesario evacuar.
			0.8 – 1.0	Destrucción parcial o total, evacuación necesaria, reconstrucción total

Fuente: (Chaparro, 2005) y (Leone 1996).

5.3 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO

5.3.1 Cálculo del riesgo

El riesgo se relaciona con la probabilidad de que se causen efectos adversos y consecuencias negativas en los ámbitos material, social y ambiental. Por lo tanto, se necesita tomar decisiones para desarrollar análisis que permitan su estimación cuantitativa (Ávila et al., 2016).

Según Ávila et al (2016) el riesgo específico debido a un proceso de inestabilidad se define como el riesgo total a causa de la sumatoria de todos los procesos probables. El riesgo específico se describe por medio de la ecuación siguiente:

$$R_s = P(H_1) * V * E \qquad \text{Ecuación 47}$$

$$P(H_1) = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t \qquad \text{Ecuación 48}$$

Donde:

R_s = Riesgo específico o grado de pérdidas esperadas debido a una amenaza de magnitud o intensidad (H_1), que ha ocurrido en un área específica y en un tiempo dado.

$P(H_1)$ = Amenaza o probabilidad de ocurrencia de un flujo, con una magnitud o intensidad específica (Hi) en un tiempo dado y en un área específica.

V = Vulnerabilidad del elemento expuesto o la proporción de E probablemente afectada en forma negativa por el evento de magnitud (Hi) expresada en una escala entre 0 y 1.

E = Costo de los elementos físicos expuestos o amenazados por el flujo. Para el caso de personas, E = máximo número de personas expuestas (que ocupan las edificaciones).

T = Periodo de retorno

t = Tiempo considerado

El indicador de riesgo que más se utiliza en la planificación territorial es la **pérdida anual esperada**, por lo que se debe hacer el cálculo del riesgo en cuanto a la probabilidad de falla anual para el caso de la amenaza y la valoración económica de los elementos expuestos según su valor presente en pesos. Para personas se usa el indicador de número de personas por metro cuadrado de construcción (Ávila et al., 2016).

El riesgo total se define como la sumatoria de los riesgos específicos para todo tipo de eventos y magnitudes potenciales:

$$R = \sum R_s \qquad \text{Ecuación 49}$$

Donde:

R es el riesgo total
Rs es el riesgo específico

5.3.2 Pérdidas económicas directas o indirectas. Cálculo del riesgo

El costo actual de un inmueble (VA) se calcula según el método Ross – Heidecke, el cual considera la depreciación del inmueble dependiendo del estado de

conservación y mantenimiento. El VA se calcula con la siguiente ecuación (Sepúlveda & Patiño, 2016):

$$VA = VR\big(1 - (1 - r) * (A + (1 - A) * C)\big) \qquad \text{Ecuación 50}$$

Donde:

VA = Valor actual del inmueble

VR = Valor de reposición, el cual se calcula como:

$$VR = Area * VUC \qquad \text{Ecuación 51}$$

VUC = Valor unitario de construcción o valor unitario por m^2

r = Valor residual, valor de salvamento o de chatarra. Entre 5 y 15% según (Caires, 1974)

A = Factor Ross, se calcula como:

$$A = \frac{1}{2}\left[\frac{n}{T} + \frac{n^2}{t^2}\right] \qquad \text{Ecuación 52}$$

C = Factor de plus – Depreciación de Heidecke, según la Tabla No. 12.

Tabla No. 12 - Factor C, método de depreciación física de Ross - Heidecke

ESTADO	CONDICIONES FÍSICAS	COEFICIENTE C
Estado 1	Nuevo.....	0,00%
Estado 1,5	Entre nuevo y regular	0,32%
Estado 2	Regular con conservación normal	2,52%
Estado 2,5	Entre regular y reparaciones sencillas	8,09%
Estado 3	Reparaciones sencillas	18,10%
Estado 3,5	Entre reparaciones sencillas e importantes	33,20%
Estado 4	Reparaciones Importantes	52,60%
Estado 4,5	Entre reparaciones importantes y sin valor	75,20%
Estado 5	Sin valor ... Demolición	100,00%

Referencia: (Contreras, 2007)

Con los daños esperados calculados con la ecuación anterior para cada inmueble, se pueden generar las categorías de riesgo en bienes físicos.

Tabla No. 13 - Estimación del costo aproximado de daño

COSTO APROXIMADO DE DAÑO (%) VALOR INDICATIVO	DESCRIPCIÓN
200	Estructura completamente destruida o con daños a gran escala que requieren trabajos de ingeniería para recuperación. Pueden causarse daños importantes en propiedades adyacentes.
60	Daños extensivos en la mayoría de la estructura o se extiende más allá de los límites del sitio que requieren obras significativas de recuperación. Se pueden causar por lo menos consecuencias considerables a estructuras adyacentes.
60 20	Daños moderados en alguna parte de la estructura o parte significativa que requiere grandes trabajos de recuperación. Se puede causar por lo menos consecuencias menores a propiedades adyacentes.
20	Daños limitados en parte de la estructura que requieren algún trabajo para restablecer su funcionalidad.
0	Daños menores (para eventos de alta probabilidad, esta categoría se puede subdividir a un límite entre valores de 0 y 1 %).

Fuente: (Ávila et al., 2016)

5.3.3 Categorización del riesgo

Para bienes físicos se propone utilizar la Tabla No. 14.

Tabla No. 14 - Categorización del riesgo de bienes físicos

COSTO APROXIMADO DE DAÑO	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
200 – 60%	ALTO	Riesgo inaceptable. Es necesaria la ejecución de investigaciones detalladas, planeación e implementación de medidas para reducir el riesgo. Las medidas de intervención estructural pueden ser dispendiosas y poco prácticas; además, pueden ser más costosas que el valor mismo de la propiedad.
60 – 20%	MEDIO	Puede tolerarse en ciertas circunstancias (de acuerdo con la regulación estatal), pero requiere investigación y planeación detallada para evitar que aumente. Las medidas para reducir el riesgo son viables económicamente.
20 – 0%	BAJO	Usualmente aceptable para los tomadores de decisiones. Se requiere mantenimiento normal de taludes y laderas.

Fuente: (Ávila et al., 2016)

Para personas se propone utilizar la Tabla No. 15.

Tabla No. 15 - Categorización del riesgo para personas

PROBABILIDAD ANUAL DE AFECTACIÓN DE PERSONAS	TIPO DE AFECTACIÓN		
	MUERTES O LESIONES SERIAS	LESIONES MODERADAS Y BAJA PROBABILIDAD DE MUERTE	LESIONES LEVES O INEXISTENTES
ALTA	ALTO	ALTO	BAJO
MEDIA	ALTO	MEDIO	BAJO
BAJA	MEDIO	BAJO	BAJO

Fuente: (Ávila et al., 2016)

La categorización según la probabilidad anual de afectación de personas se determina según la Tabla No. 16.

Tabla No. 16 - Criterio de afectación de personas

PROBABILIDAD ANUAL DE AFECTACIÓN DE PERSONAS	DESCRIPCIÓN
$>10^{-4}$	Alta
$10^{-4} - 10^{-5}$	Media
$<10^{-5}$	Baja

Fuente: (Ávila et al., 2016)

Las categorías de riesgo de bienes físicos y personas se deben combinar para establecer el riesgo total (Ver la Tabla No. 17).

Tabla No. 17 - Categorías de riesgo para bienes físicos y personas

RIESGO EN BIENES FÍSICOS	RIESGO EN PERSONAS		
	ALTO	MEDIO	BAJO
ALTO	A	A	A
MEDIO	A	M	M
BAJO	A	B	B

Fuente: (Ávila et al., 2016)

6 CASO DE ESTUDIO: CUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA

6.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la cuenca de la Quebrada La Chapa ha sido afectada por fenómenos de remoción en masa tales como, deslizamientos, flujos de lodo y avalanchas.

Existe un caso muy particular, y es el de los constantes flujos que se generan en la cuenca.

La causa principal de los flujos de lodos en la Quebrada La Chapa es un deslizamiento traslacional que ocurre en depósitos morrénicos localizado en el Páramo de Mesa Alta (Ingeniería y Geotecnia Ltda, 1988).

Como causas secundarias se destaca la fuerza de empuje que ejerce la masa en movimiento debido a la alta velocidad de infiltración que presentan estos depósitos no consolidados, los cuales están apoyados sobre rocas arcillosas de naturaleza impermeable en una pendiente topográfica entre 15° y 18°(Rodríguez, 1987).

Otra de las causas secundarias de los flujos es la litología de los materiales subyacentes, los cuales son predominantemente intercalaciones de arenas y arcillas, y que, al estar intercalados materiales porosos con impermeables, determinan el flujo de las aguas subsuperficiales. Además, ante la falta de cobertura vegetal en algunos sectores de la cuenca, como, por ejemplo, en las zonas de pastos y cultivos, existe una mayor probabilidad de erosión del suelo, y por ende, generación de flujos (Rodríguez, 1987).

El proceso se manifiesta por flujos de lodos que transportan gran cantidad de fragmentos de roca de diversos tamaños.

6.2 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 (Ver la Figura No. 13).

Figura No. 13 - Localización del área estudio (Google Earth)

6.3 ANTECEDENTES

En la Quebrada La Chapa, tanto en la cabecera como en su cauce, se presentan frecuentemente movimientos en masa, que según la clasificacion 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 diametro hasta fracciones mas finas de arenas, embebidas en una fase liquida 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, el seis y nueve de noviembre de 1986 se presentaron avalanchas que afectaron la mina La Chapa e inundaron varias estructuras de propiedad de Acerias Paz

del Río S.A, afortunadamente no hubo pérdidas humanas, sin embargo, se vieron afectada algunas tierras fértiles (Chaparro, 2005).

Según el CREPAD (Comité Regional para la Prevención y Atención de Desastres de Boyacá), se presentó una avalancha en noviembre de 1995, dejando como saldo 4 muertos, además de los daños estructurales sufridos por cuatro viviendas que tuvieron que ser evacuadas.

El 6 de diciembre de 2011 se presentó una avalancha que dejó una persona herida (Radio, 2011).

6.4 GEOLOGÍA

En la cuenca de la Quebrada La Chapa se han realizado diversos estudios geológicos, de los cuales, para el presente trabajo se tendrán en cuenta los realizados por Pérez (2004) y Rodríguez (1987).

6.4.1 ESTRATIGRAFÍA

En la cuenca de la Quebrada La Chapa afloran rocas de la edad Cretácea, Terciaria y Cuaternaria, a cuyas edades pertenecen las unidades que se describen a continuación:

6.4.1.1 Cretáceo

6.4.1.1.1 Formación Ermitaño (Ke)

Básicamente está compuesta por areniscas y arcillolitas. En la parte basal de la Formación existe una intercalación de arcillolitas fisibles de color gris, con limolitas silíceas y un banco de arenisca calcárea de color gris. La parte media de la formación tiene un espesor de 250 metros y se encuentran arcillolitas fisibles de color gris con areniscas de grano fino. La parte superior de la Formación está compuesta por una sucesión de areniscas cuarzosas de color gris y arcillolitas calcáreas, en este miembro se destaca el contenido de glauconita en las areniscas y lumaquelas en las arcillolitas, convirtiéndose estos dos indicativos en señales particulares de la Formación.

El techo de la Formación aflora al N.E de Paz de Río y al Norte del patio de la Mina de La Chapa.

Las series aflorantes de la Formación están muy replegadas con respecto a la Formación Guaduas suprayacente, de modo que dentro de ella se pueden reconocer estructuras anticlinales, sinclinales y fallas locales.

Los afloramientos más visibles de la Formación Ermitaño están ubicados en el núcleo del Anticlinal de La Chapa. En la cuenca no se reconocen procesos de inestabilidad importantes relacionados con esta formación.

6.4.1.1.2 Formación Guaduas (Kg)

La Formación aflora al Este y al Sur del patio de la mina de la Chapa y tiene espesores variables. Debido a la importancia que tiene desde el punto de vista de la Geología Económica, se ha dividido en dos conjuntos litológicos: superior e inferior.

El conjunto Litológico Inferior, abarca desde la base de la formación hasta el manto de carbón más inferior. Está compuesto por una sucesión monótona de arcillolitas y limolitas de color gris a gris oscuro, con algunas intercalaciones de arenisca compacta, con estratificación cruzada y de grano fino a grueso, de color blanco, gris y amarillo. Su espesor aproximado es 200 metros.

El conjunto Litológico Superior está constituido por una serie de arcillolitas de color gris oscuro, con intercalaciones muy delgadas de arenisca de color blanco a gris, de grano fino a muy fino, generalmente con estratificación cruzada; interestratificados se encuentran ocho mantos de carbón, con espesores entre 0.60 y 2.70 m. El conjunto litológico tiene un espesor de 217 metros aproximadamente.

Las laderas de esta formación no son estables, debido a la erosión laminar y la intercalación entre rocas de diferentes porosidades que

generan zonas de flujo y de descarga de aguas subsuperficiales; las principales zonas inestables se localizan a los alrededores del campamento de la mina La Chapa.

6.4.1.2 Terciario

6.4.1.2.1 Formación Socha Inferior (Tsi)

Morfológicamente, la formación presenta escarpes pronunciados, debido a que está constituida principalmente por areniscas.

Esta formación está compuesta por una sucesión de arenisca masiva con delgadas intercalaciones de arcillolitas de color gris claro que suprayacen concordantemente a la Formación Guaduas. Esta Formación marca el inicio de las rocas de edad Terciaria y está compuesta de base a techo por un banco de arenisca masiva de grano medio a grueso moderadamente oxidada de color pardo con estratificación cruzada, espesor aproximado de 16 m seguido por un nivel de arcillolitas grises con intercalaciones de arenisca de grano fino de color blanco. Suprayace un banco de arenisca blanca rojiza oxidada de grano grueso con algunos niveles conglomeráticos con estratificación cruzada, espesor aproximado de 40 m, seguida por un nivel de arcillolita finamente estratificada de color gris verdoso, el cual infrayace a un banco de arenisca de 30 m de espesor seguida por un estrato de arcillolita verdosa de 10 m con un tope de arenisca masiva.

La edad de esta formación fue datada palinológicamente por Van Der Hammen (1958) como Paleoceno.

6.4.1.2.2 Formación Socha Superior (Tss)

Los afloramientos de esta formación son escasos ya que en gran parte está cubierta por vegetación y depósitos cuaternarios.

Está conformada principalmente por arcillolitas y limolitas poco compactas, de color gris verdoso en bancos hasta de 19 metros, con intercalaciones de arenisca en bancos de hasta 9 metros,

generalmente de grano fino a muy fino, color gris a amarillo. El espesor total está entre 250 y 270 metros. El contacto con la Formación Socha Inferior y Picacho está marcado por un cambio fuerte de pendiente, su edad es del Paleógeno.

a susceptibilidad a los deslizamientos que presenta es muy baja y al igual que la formación Socha inferior se presentan algunos desprendimientos menores, debido al fracturamiento producto de la tectónica que ha sufrido.

6.4.1.2.3 Formación Picacho (Tp)

La Formación Picacho se divide en dos conjuntos litológicos:

Formación Picacho Inferior (Tpi): Está compuesta por un banco de areniscas conglomeráticas masivas, con estratificación cruzada, de color amarillo rojizo, con contenido de cuarzo lechoso con un diámetro aproximado de 2 cm; la arenisca está intercalada con arcilla oxidada de poco espesor. La Formación Picacho Inferior tiene un espesor aproximado de 100 m y aflora en el escarpe de la Falla La Chapa, en la garganta del deslizamiento de Mesa Alta; el límite inferior es neto con las areniscas de la Formación Socha Superior.

Formación Picacho Superior (Tps): Está conformada por una intercalación de areniscas de grano medio a fino con niveles de arcillolita alterada que alcanzan los 20 m de espesor; concuerda con la parte media superior del deslizamiento de Mesa Alta. El límite superior es transicional, aunque se ha relacionado generalmente con la aparición del nivel ferruginoso productivo considerado ya como Formación Concentración; el ambiente de depositación de esta Formación es de tipo continental deltaico y su edad corresponde con el Eoceno Inferior.

6.4.1.2.4 Formación Concentración (Tc)

Está conformada de base a techo por los siguientes niveles:

Arenisca conglomerática con cantos redondeados principalmente de cuarzo lechoso. Le suprayace un nivel de arenisca gris de grano medio a grueso con estratificación gradada y cruzada. A continuación, se encuentra un paquete de arcillolitas arenosas laminares abigarradas. Suprayaciendo esta sucesión se presenta un banco de mineral de hierro oolítico con espesor aproximado de 2 metros.

La parte basal de la formación aflora en el Páramo de Mesa Alta.

6.4.1.3 Cuaternario

6.4.1.3.1 Depósito glacial (Qm)

Está conformado por bloques de arenisca embebidos en una matriz areno arcillosa. Estos materiales se encuentran en ciertos lugares a cotas más bajas debido a los deslizamientos sucesivos. El material es altamente permeable, su espesor varía entre los 3 y 30 metros y suprayace la Formación Picacho Superior en el páramo de Mesa Alta. También está localizado al Sur Este del campamento de la mina La Chapa. El deslizamiento de Mesa Alta está sobre el Depósito Glacial.

6.4.1.3.2 Depósitos de derrubio (Qd)

Estos depósitos se localizan en los pies de escarpes menores en donde las fuerzas de la gravedad han sido la principal causa del transporte. Están compuestos por bloques de areniscas angulares y subangulares hasta de 3 metros de diámetro, embebidos irregularmente en una matriz arcillosa de color gris parda y amarillenta y se encuentran localizado discordantemente sobre la Formación Socha Superior. Su espesor máximo se ha estimado en 8 metros.

6.4.1.3.3 Depósitos aluviales (Qal)

Son depósitos localizados en las márgenes del Río Chicamocha y de las quebradas afluentes de éste. Son suelos transportados por los cauces longitudinales. Están compuestos por cantos rodados de

diámetros entre los 20 y 30 centímetros y embebidos en una matriz areno – arcillosa; son depósitos moderadamente gradados con un mayor porcentaje de matriz. Los cantos son predominantemente de cuarzo-arenitas muy bien cementadas y de grano fino a medio, de color pardo por oxidación. Los depósitos pueden presentar intercalaciones de niveles delgados de grano fino, que representan probablemente superficies de inundación.

En la parte media de la cuenca se encuentran uno de estos depósitos discordante sobre la Formación Socha Interior, convirtiéndose en un "depósito aluvial colgado", asociado con un levantamiento tectónico. Son conglomerados de gran espesor y tienen cierto grado de cementación, compuestos por elementos de diferentes dimensiones.

6.4.1.3.4 Depósitos coluviales

Ocupan una gran extensión y están localizados en la parte media y baja de la cuenca, por lo que cubren, en su mayor parte a la Formación Guaduas. Están compuestos por bloques angulares y subangulares de arenisca heterométricamente distribuidos en una matriz arcillo-arenosa. Su espesor aproximado es de 30 metros.

Son los materiales con el más alto grado de inestabilidad en la zona. Presentan sectores de inestabilidad debido a socavación lateral del cauce de la quebrada La Chapa, reflejado en hundimientos laterales de poco volumen.

6.4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La región se caracteriza por tener una tectónica de pliegues asociados con intenso fallamiento.

La cuenca está ubicada en el flanco oriental del Anticlinal del Chicamocha, cuyo eje se extiende desde Sogamoso hasta el Noreste de Paz de Río, a lo largo del Río del mismo nombre.

La tectónica del área tiene un grado de complejidad alto porque existe un sistema de fallas normales, inversas y direccionales. El rumbo preferencial de los estratos es NE buzando al SE con una inclinación no mayor a los 38°.

6.4.2.1 Anticlinal de La Chapa

Es un pliegue asimétrico cuyo eje axial tiene un rumbo N20°W. El flanco occidental tiene buzamientos hasta de 40°W y se extiende desde la falla de Paz del Río hasta la mina de su nombre; el flanco oriental está limitado por la Falla Central y sus buzamientos son menores de 10°.

6.4.2.2 Falla de Mesa Alta

Es una falla inversa que tiene un rumbo que varía de N40° a 45°E y su buzamiento de 60° a 65°E con un desplazamiento que varía de 220 metros en las peñas de Mesa Alta a 115 m al NE de Tasco. Esta falla constituye el límite Sureste de explotación en la Mina La Chapa debido a su gran desplazamiento.

6.4.2.3 Falla Central

Es una falla de tipo inverso que se encuentra con la Falla La Chapa al SW del campamento y pone en contacto las Formaciones Concentración y Picacho; se evidencia entre el contacto entre Guaduas y Socha Inferior, justo en el Valle Colgado, pasando por atrás del campamento de la mina. Su desplazamiento es aproximadamente de 70 a 100m. Aunque es una falla menor, cobra importancia por enfrentar dos bloques con actitudes estructurales muy distintas.

6.4.2.4 Falla de Paz del Río

Es una Falla Inversa cubierta por el Cuaternario Coluvial. Esta falla pone en contacto a rocas de la Formación Socha Superior, sobre rocas de la Formación Picacho, y rocas de la Formación Ermitaño, contra rocas de la Formación Socha Inferior, lo que sugiere un gran salto estratigráfico para esta falla, el cual se ha estimado entre 200 y 250 metros de acuerdo a observaciones en perforaciones.

6.4.2.5 Falla La Chapa

Es una falla normal con rumbo paralelo al de la falla Mesa Alta, y buzamiento de 65° - 75°W. Está ubicada en la parte SE del campamento La Chapa formando un escarpe de falla en la Formación Socha Inferior, cuyo desplazamiento es de 100 a 300 m Esta falla ha sido explorada ya que ha intersectado en algunos frentes de la mina en donde su desplazamiento vertical es de 100 metros.

6.4.2.6 Falla 4 B

Es una falla de rumbo cuyo trazo se extiende por varios kilómetros en superficie. Su rumbo varía de N 80° 85°W y buzamiento hacia el sur, intersecta con las Fallas Mesa Alta, Central y La Chapa, desplazándolas aproximadamente 50 metros cada una. El desplazamiento vertical está entre 20 y 30 metros, según las exploraciones realizadas.

6.4.2.7 Falla 1 A

Es una falla de rumbo que corta y desplaza la Falla Central. Tiene una dirección general de N 80°W y un buzamiento de 70° a 75° hacia el sur. El desplazamiento es de 30 m aproximadamente según las exploraciones realizadas.

6.5 GEOMORFOLOGÍA

Geomorfológicamente, la región presenta un relieve de ondulado a quebrado según la intensidad de la descomposición que han sufrido las rocas in situ (Rodríguez, 1987).

La morfología de las vertientes actuales ha sido implantada por una erosión lineal cuyo avance en condiciones naturales puede ser notable y como consecuencia genera movimientos de remoción en masa que finalmente forman depósitos de tipo coluvión (Rodríguez, 1987).

Para la descripción de la geomorfología de la región se tomó como referencia las tesis de grado desarrolladas por Pérez (2004) y López (2004).

6.5.1 Unidades geomorfológicas

6.5.1.1 Relieve Montañoso y Colinado Estructural Plegado (I)

Esta unidad consiste de una serie de rocas sedimentarias que conforman en conjunto que se extiende linealmente siguiendo un rumbo aproximado en dirección SW – NE. Entre las formas estructurales están los plegamientos, así como las generadas a partir de las formaciones duras como son los escarpes de falla y erosionales, las crestas y las cornisas.

Escarpe de Falla (Ia)

Corresponde a una superficie con una pendiente superior a los 45º, de altura y extensión variada asociada con una falla geológica con desplazamiento de bloques que dan origen a una topografía abrupta. Esta geoforma es característica de la superficie inclinada alineada por la Falla la Chapa sobre las areniscas de la Formación Picacho.

Escarpe Mayor (Ib)

Geoforma de origen denudacional estructural que consiste en una ladera vertical rocosa generada por la erosión de material de alta resistencia como es el caso de la superficie casi vertical formada por las areniscas de la Formación Socha inferior, está localizada al Sur del campamento de la Mina de La Chapa.

Escarpe Menor (Ic)

Escarpe de subestructuras con inclinación mayor a 75º conformado por areniscas muy resistentes con una pendiente contraria a la pendiente del terreno. Esta forma es peculiar en las caídas de la Quebrada la Chapa en la parte inferior de la garganta del deslizamiento y en los estratos competentes de arenisca de la Formación Socha Superior.

Ladera erosional en contra pendiente (Id)

Unidad de origen denudativo cuya forma obedece al plegamiento de rocas en sentido contrario a la pendiente con una inclinación entre 20 y 35º,

formando laderas rectas intervenidas por procesos morfodinámicos de erosión Se localizan en toda la cuenca y en la mayor parte de ésta se encuentran cubiertas por especies arbustivas.

6.5.1.2 Relieve coluvial

Es un relieve producto de procesos de depósito o acumulación de materiales heterogéneos de diferente tamaño pobremente gradados y distribuidos variablemente, depositados en rellenos y bases de ladera montañosa.

Relieve Coluvial (II)

Está conformado por los depósitos de ladera provenientes de deslizamientos y avalanchas, de flujos de tierras del pie de deslizamientos y de caída de rocas, compuestos por bloques rocosos heterométricos que pueden alcanzar grandes tamaños.

Presenta una topografía irregular, inclinado-ondulada, con abundantes lobulaciones del terreno en frente de depresiones, en los cuales se acumula el agua lluvia y cuya infiltración puede generar nuevos movimientos de remoción en masa.

Aunque las pendientes locales son considerablemente contrastantes, desde muy suaves hasta inclinadas, el gradiente medio es menor que el de las laderas superiores circundantes, y eso se logra evidenciar en las fotografías aéreas, ya que las construcciones rurales y el uso de la tierra son más intensos en estos paisajes.

Esta forma es característica de la parte media e inferior de la cuenca y se divide en laderas superior, inferior y media. Se diferencian por el grado de inclinación y por la distribución y transporte de materiales.

6.5.1.3 Relieve Glacial (IV)

Forma generada por el desgaste, transporte y depósito realizada por el movimiento de masas glaciares. Las geoformas son el efecto del desplazamiento de la masa de hielo hacia lugares de menor altitud, erosionando, transportando y acumulando fragmentos de roca de diferente

composición granulométrica, dando origen a depósitos morrénicos con granulometría que varía entre grandes bloques, guijarros, gravas, arenas, limos y arcillas, dispuestos a manera desordenada.

Esta unidad está localizada en el sector del Páramo de Mesa Alta. Están distribuidos ampliamente, en forma caótica, sobre grandes y antiguas artesas glaciales. Probablemente corresponden a morrenas terminales que representan el último avance de los antiguos frentes glaciales, aunque su morfología ha sido alterada por procesos erosivos intensos, principalmente por los deslizamientos. De esta manera se forman terrenos mixtos glacio-coluviales en muchos casos. Se subdividen en dos grupos:

Morrenas terminales (IV1)

Son acumulaciones de tierra que se forman en los bordes laterales de los glaciares.

Morrenas laterales (IV2)

Son acumulaciones de material que se forman en el perímetro del glacial que fluye activamente.

6.5.1.4 Relieve Aluvial (V)

Corresponde a un paisaje de depósitos de sedimentos transportados por un valle principal y por riachuelos o arroyos, que pueden llegar a ser diluviales (en el caso de torrentes).

Una llanura aluvial está conformada por paisajes aluviales intermontanos o intercordilleranos, en cuyo relleno longitudinal y lateral interviene más de una corriente mayor.

Valle Aluvial (Va)

Unidad geomorfológica de forma alargada y estrecha de perfil transversal en media caña, de poca inclinación y encajado en un relieve montañoso con un aporte longitudinal de sedimentos que predomina sobre el aporte lateral de los mismos. Este paisaje es el resultado del transporte y sedimentación de

materiales heterogéneos que depositados diferencialmente dan origen a valles como el formado por el río Chicamocha.

Vallecito aluvial (Vb)

Unidad geomorfológica que corresponde a una pequeña sedimentación longitudinal gradada sobre uno de los drenajes de la cuenca en su parte media baja.

Valle aluvial colgado (Vc)

Corresponde a una cobertura en el interfluvio del escarpe de la Formación Socha Inferior y el contacto con la Formación Guaduas. Tiene una forma muy irregular debido a los procesos erosivos.

6.5.2 Procesos morfodinámicos

La morfodinámica hace referencia a los procesos que inciden en la erosión de los terrenos. López (2004) caracterizó los procesos de inestabilidad de acuerdo con las condiciones encontradas en campo (relaciones con las unidades geológicas y geomorfológicas) y extrapoló los resultados a los movimientos de remoción en masa evidenciados en las imágenes satelitales y fotografías aéreas, para conformar el inventario de deslizamientos en la cuenca.

6.5.2.1 Erosión hídrica y acelerada

La erosión hídrica superficial ocurre en las áreas donde existe poca cobertura vegetal y hay incidencia directa sobre el suelo o la roca. Se presenta especialmente en formaciones arcillosas de disposición laminar, en los depósitos superficiales de poca consistencia y en áreas de cultivos con pendientes pronunciadas. Un tipo de erosión hídrica especial es la erosión en surcos o cárcavas, con corrientes esporádicas, cuya disección es tal que propaga la generación de grandes deslizamientos ligados a la socavación. Las líneas de disección encauzan los materiales evacuados, constituyendo corredores de flujos de detritos y coladas de barro.

6.5.2.2 Movimientos de remoción en masa

En la cuenca de la Quebrada La chapa son muy comunes los movimientos de remoción en masa. Las áreas urbanas de Socha y Paz de Río fueron relocalizadas debido a grandes deslizamientos y hundimientos. Socha fue reubicado al sitio actual en 1870 y Paz de Río en 1936. Además, aún hay restos de grandes movimientos por derrumbes o deslizamientos que han ocurrido en un pasado no muy lejano.

Deslizamientos coherentes

García (1998) define los deslizamientos así:

> "El movimiento consiste de deformación por corte y desplazamiento, a lo largo de una o varias superficies que son visibles o pueden inferirse de forma razonable, o dentro de una zona más o menos estrecha. La rotura del talud no siempre es simultánea en todos los puntos de la superficie de falla, sino que puede propagarse desde una zona de falla local. La masa afectada puede deslizarse más allá de la superficie original de rotura sobre el terreno natural".

En la zona de estudio, se presentan deslizamientos en las rocas de las formaciones Guaduas, Socha Superior y Concentración, donde hay intercalaciones de materiales blandos con materiales resistentes.

Deslizamientos disgregados y caídas

Los deslizamientos disgregados y caídas se caracterizan porque su superficie de falla se desarrolla a través de discontinuidades litológicas o estructurales. El movimiento ocurre a mayor velocidad, el material desplazado suele ser menor que el de un deslizamiento coherente. Este tipo de deslizamientos se presenta en rocas de alta resistencia que tienen cierto grado de diaclasamiento.

Este tipo de deslizamiento está presente en el Anticlinal La Chapa y en las formaciones Ermitaño, Socha Inferior y Picacho.

Flujos

Suárez (1998) citando a Varnes (1978) afirma que:

> “Los flujos son movimientos relativos de las partículas, o bloques pequeños, dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie. Las deformaciones relativas internas son muy grandes y fluyen en forma similar a un líquido viscoso. El flujo puede ser laminar a turbulento. Al aumentar la densidad y la viscosidad, el flujo puede transportar grandes bloques hacia la parte superior”.

Dicho autor también afirma que las principales causas de flujos están asociadas a lluvias, deshielo de nevados, los sismos, la alteración de suelos sensitivos y los deslizamientos en zonas de alta pendiente.

Los depósitos cuaternarios tales como los aluviales y los coluviales en zonas de alta pendiente son susceptibles a la ocurrencia de flujos ya que tienen muy poca cementación, su permeabilidad es alta y suprayacen rocas consolidadas de menor permeabilidad, que actúan como un sello en donde la concentración de agua es retenida, facilitando la saturación y el colapso.

El deslizamiento de La Chapa o Mesa Alta pertenece a este tipo de movimientos de remoción en masa. Este fenómeno ha tenido un crecimiento acelerado y representa una amenaza constante en la región.

6.6 FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN LA QUEBRADA LA CHAPA

6.6.1 Morfología

La descripción de la morfología de los flujos de lodos se realizó de acuerdo con el trabajo realizado por Cuervo et al (1989) y la visita de campo realizada el día 07 de mayo de 2017 para el presente trabajo. De la visita de campo se elaboró un registro fotográfico (Ver la Tabla No. 18).

Se ha logrado identificar 3 zonas en lo referente a la evolución de los flujos de lodos: Una zona de origen, una zona de flujo canalizado y una zona de depositación.

6.6.1.1 Zona de origen o fuente de materiales

En el páramo de Mesa Alta existe un gran deslizamiento, que al igual que el Páramo, se llama Deslizamiento de Mesa Alta (Ver la Fotografía No.1, Tabla No. 18). En esa zona inician los flujos de lodos, cuya principal causa es la actividad del deslizamiento junto con algunos eventos locales de licuación de depósitos por carga rápida. Entre las cotas 3400 y 3200 se presenta un movimiento en masa de tipo múltiple y complejo, de velocidad lenta, cuyo material involucrado son depósitos de origen glaciar, constituidos por bloques subangulares de areniscas conglomeráticas con marcas de meteorización embebidas en una matriz arcillo-arenosa de color amarillo a gris oscuro con cantos y gravas y una cobertura de suelo orgánico negro de espesor variable (Ver la Fotografía No.2, Tabla No. 18).

El material del deslizamiento se desplaza sobre el contacto con las areniscas masivas de la Formación Picacho Superior. El macizo rocoso presenta cierto grado de fracturamiento debido al cruce de las fallas geológicas La Chapa y 4-B (Cota 3275) y el cruce en sentido Norte-Este de la Falla Mesa Alta (cota 3400). Esas estructuras favorecen el drenaje superficial y subterráneo y aportan bloques de roca al evento de flujos de lodos.

La longitud aproximada del movimiento en masa es de 500 metros, con un ancho promedio de 170 metros, para la sección mayor que se encuentra en la corona, entre las cotas 3400 y 3340, a partir de la cual se reduce y se encauza en una garganta limitado por los materiales competentes (areniscas) que afloran de la Formación Picacho Superior. El ancho en la parte final del deslizamiento se reduce a 75 metros en la cota 3300. El Ingeominas (1987) realizó un estudio geofísico mediante el cual determinaron profundidades de la masa deslizada de 8.5 a 30.2 m.

De acuerdo con la geomorfología de la zona de origen, se puede percibir algunas características del movimiento.

Desde la cota mayor (cota 3400), aparecen las grietas de tracción y escarpes del movimiento, a partir del cual se desarrolla una ladera de pendiente suave

(aproximadamente 15%), muy alterada debido a la separación y volcamiento de bloques de roca meteorizada, hacia una concavidad a la cual drenan las aguas superficiales y subterráneas del área donde se forman pequeñas lagunas. Inmediatamente, se percibe un levantamiento del terreno natural, enmarcado en flancos bien definidos, donde se observan rasgos de falla por el movimiento de la masa. Eso se nota a lo largo del cajón formado por las areniscas de la Formación Picacho Superior.

Como se explicó anteriormente, el tipo de movimiento en masa es múltiple y complejo, el cual parece iniciar en un deslizamiento rotacional de radio máximo de 30 metros, correspondiente al escarpe principal, hasta donde alcanza la roca, en punto desde el cual cambia el modo de desplazamiento a traslacional, y comienza el proceso de vertido hacia el frente del avance, donde la pendiente aumenta a 25° y el ancho disminuye a 75 metros (cota 3300); se induce la desintegración, mezcla y volteo del suelo e incorporación de agua, conduciendo a un remoldeo total hacia la cota 3250 (Ver la Fotografía No.2, Tabla No. 18).

Donde aflora la Formación Picacho Superior, la masa se separa en 2 canales estrechos con pendientes entre 30° y 35°, formados por las quebradas que se unen aguas abajo transportándola a un corto tramo para luego precipitarla a una caída de unos 25 metros de altura; con el aporte de corrientes de agua, se licua el material y se establece el flujo de lodo definitivo (cota 3200).

Como factores condicionantes de la formación de los flujos de lodos están la litología del páramo, la inestabilidad del depósito (generada por las fallas La Chapa y 4-B) y la alta permeabilidad, lo cual facilita la infiltración del agua de escorrentía. Los flujos de lodos son detonados por la alta pluviosidad en el páramo y la escasa cobertura vegetal. Además, el almacenamiento de agua dentro de los estratos de arenisca, genera presiones que empujan la base del deslizamiento y disminuye la resistencia al corte en el contacto.

6.6.1.2 Zona de flujo canalizado

El flujo canalizado se aprecia entre las cotas 3200 y 2690. El recorrido aproximado es de 1.5 km, el cual finaliza en las instalaciones de la Mina La Chapa. En el trayecto de flujo canalizado se logra distinguir tres tramos:

Primer tramo:

Se inicia en la cota 3200 y se prolonga hasta la cota 2925. Durante su recorrido, pasa sobre la Formación Socha Superior, la cual está formada por arcillolitas y areniscas meteorizadas. En ese tramo hay algunos aportes de material proveniente de deslizamientos en las márgenes y presencia de algunos bloques de gran tamaño, transportados por la corriente, algunos de ellos depositados en los márgenes de la quebrada. El tramo finaliza en la cota 2925, que corresponde a un escarpe vertical de 25 metros de altura.

Segundo tramo:

Al finalizar el escarpe, comienza el segundo tramo, es decir, en la cota 2900. En ese tramo, el lodo se moviliza por canales con pendiente longitudinal entre 40° y 60°, con algunos pequeños escalones en formaciones rocosas duras (Ver la Fotografía No.3, Tabla No. 18). El tramo finaliza en la cresta de un segundo escarpe, en la cota 2845. Cuando el material cae del escarpe, éste se licúa completamente y las rocas de mayor tamaño generan grandes ruidos.

Tercer tramo:

El tercero y último tramo comienza en la caída del segundo escarpe. En ese tramo la quebrada pasa sobre la Formación Guaduas, la cual está compuesta por arcillolitas y limolitas que forman taludes. El flujo es engrosado con aportes por incorporación basal y lateral de lutitas carbonáceas, mineral de carbón, bloques pequeños de arenisca, troncos y arboles hasta llegar a la Mina La Chapa (cota 2680), donde termina el tercer tramo de flujo canalizado. En ese sector, el flujo acarrea bloques de varios metros de diámetro.

Cuando el flujo llega a la mina La Chapa, la pendiente disminuye, por lo tanto, la energía también disminuye y se empiezan a depositar algunos bloques (Ver la Fotografía No.4, Tabla No. 18).

6.6.1.3 Zona de depositación

La constituye el área de menor pendiente. Desde la cota 2690, es decir, aguas abajo de la Mina La Chapa, continúa el flujo canalizado. La pendiente tiende a disminuir a 14% en promedio, lo cual permite que haya depositación en algunos sectores planos correspondientes a patios y carretera de acceso, y obstáculos tales como una banda transportadora con sus columnas metálicas, la cafetería y otras edificaciones que están abandonadas actualmente. De hecho, todas estas instalaciones fueron afectadas por la avalancha ocurrida el 6 de diciembre de 2011 (Ver la Fotografía No.9, Tabla No. 18).

Aguas abajo de la Mina La Chapa, en algunos sectores aflora en superficie la Formación Guaduas y La Formación Ermitaño. Sin embargo, predominan depósitos del Cuaternario, en su gran mayoría depósitos coluviales, los cuales son materiales descompuestos, deleznables y susceptibles a la acción de fenómenos de intemperismo, que originan un relieve suave y ondulado expuesto a erosión y socavación al pie de las laderas (Ver la Fotografía No.10, Tabla No. 18).

Aunque la pendiente se mantiene constante hasta la desembocadura, existen algunos resaltos que generan aumento en la velocidad del flujo. Sin embargo, existen algunos depósitos de rocas en los márgenes, dispuestos por tamaños de menor a mayor hacia abajo, debido al paso de diferentes flujos, lo cual provoca una selección por capacidad de arrastre. Esta situación se presente hasta la desembocadura de la quebrada en el Río Chicamocha (Ver la Fotografía No.11, Tabla No. 18).

Tabla No. 18 – Registro fotográfico del deslizamiento originario y de avalanchas en la quebrada La Chapa

FOTOGRAFÍA	DESCRIPCIÓN
1	Vista del deslizamiento de Mesa Alta (tomada en 1989 por M. García).
2	Sitio donde los materiales del deslizamiento de Mesa Alta comienzan a entrar en flujo de lodos. También se logran apreciar algunos bloques subangulares del depósito glaciar (tomada en 1989 por M. García).

Fuente: Elaboración propia

Continuación Tabla No. 18

3 	Flujo canalizado en cauce de pendiente muy alta, parte superior de la quebrada, a continuación del extremo del deslizamiento de Mesa Alta (tomada en 1989 por M. García).
4 	Depósitos de avalancha cerca de la banda transportadora de la Mina La Chapa (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).

Fuente: Elaboración propia

Continuación Tabla No. 18

5 	Depósito de flujos de lodo en la Mina de La Chapa, en el cual se tomó una muestra para hacer la caracterización geotécnica (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).
6 	Lodo depositado en el interior de una edificación de la Mina La Chapa (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).

Fuente: Elaboración propia

Continuación Tabla No. 18

7 	Marca de la altura de depositación la avalancha ocurrida el 6 de diciembre de 2011.en una de las edificaciones de la Mina La Chapa (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).
8 	Destrucción de otra edificación de la Mina La Chapa ocasionada por el impacto de la avalancha del 06 de diciembre de 2011 (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).

Fuente: Elaboración propia

Continuación Tabla No. 18

9 	Vista hacia aguas abajo de la mina La Chapa, donde la pendiente disminuye y se empiezan a depositar bloques rocosos mayores (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).
10 	Vista general de la quebrada La Chapa por donde se movilizan los flujos, desde el punto A, en el cual comienza el flujo de materiales del deslizamiento de Mesa Alta, hasta la desembocadura de la quebrada en el río Chicamocha (punto B). Se aprecian en las laderas vecinas a la quebrada, con relieve suave y ondulado, los depósitos coluviales del Cuaternario y recientes. (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).

Fuente: Elaboración propia

Continuación Tabla No. 18

11 	Desembocadura de la quebrada La Chapa en la margen derecha del Río Chicamocha (a la izquierda en la foto). Observar las acumulaciones de bloques rocosos dejados por la avalancha (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).
12 	En la fotografía se muestra el tamaño de algunos fragmentos de roca depositados en la margen izquierda del río Chicamocha, al frente de la desembocadura de la quebrada. Esto evidencia que los materiales acarreados por la quebrada, pasaron al otro lado del río y pudieron causar un represamiento temporal del mismo (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).

Fuente: Elaboración propia

Continuación Tabla No. 18

13 	Bloque de arenisca conglomerática depositado en la desembocadura de la quebrada (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).
14 	Destrucción de una vivienda en el barrio Santa Teresa del Municipio de Paz de Río (localizada al lado izquierdo de la quebrada, cerca de su desembocadura en el río Chicamocha) ocasionada por el impacto de la avalancha del 6 de diciembre de 2011 (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).

Fuente: Elaboración propia

Continuación Tabla No. 18

15 	Al lado derecho de la quebrada, se localizaba la vivienda cuya destrucción se describe en las fotos 1 a 3 de la Tabla No. 26. La casa fue destruida por la avalancha del 6 de diciembre de 2011 (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).
16 	Vivienda abandonada después de los eventos ocurridos a final de los años 90 del siglo pasado (tomada por J. Uparela el 07 de mayo de 2017).

Fuente: Elaboración propia

6.6.2 Caracterización geotécnica

Cuervo et al (1989) y Chaparro (2005) realizaron investigaciones con el fin de caracterizar físicamente y predecir el comportamiento mecánico de los flujos de lodo que fluyen a lo largo de la quebrada La Chapa.

Adicionalmente, en el presente trabajo se caracterizó el material depositado por la avalancha del 6 de diciembre de 2011. Para el desarrollo de esta actividad, se determinó previamente el sitio de extracción de la muestra, en los alrededores de la banda transportadora de la mina de La Chapa (Ver la Fotografía No.5). Las coordenadas del sitio son las siguientes:

5°57’59.68’’N
72°44’18.57’’W

Los ensayos realizados en el laboratorio de suelos de la firma Ingeniería y Geotecnia SAS fueron los siguientes:

- Humedad natural,
- Materia orgánica,
- Peso unitario,
- Límites de Atterberg,
- Granulometría.

En la Tabla No. 19 se presenta el resumen de resultados de los ensayos realizados y el Anexo No.1 se presenta la hoja de cálculo.

Tabla No. 19 – Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio

Humedad natural (%)	11.5
Materia orgánica (%)	1.2
Peso unitario (g/cm^3)	2.14
Límite líquido (%)	18
Límite plástico (%)	11
Índice de plasticidad	7
Clasificación	Arena arcillosa de baja plasticidad

Fuente: Elaboración propia

Los resultados permiten concluir que la muestra analizada clasifica como una arena arcillosa de baja plasticidad, lo cual coincide con los resultados de los trabajos realizados por Cuervo et al (1989) y Chaparro (2005).

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

7.1 DEFINICIÓN DE LA ESCALA Y TAMAÑO DE UNIDADES DE TRABAJO

Según el Decreto 1807 de 2014 “"Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones”. Considerando: “Que el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 determinó que el Gobierno Nacional reglamentaría las condiciones y escalas de detalle para la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y de las áreas con condiciones de riesgo además de la determinación de las medidas específicas para su mitigación teniendo en cuenta la denominación de los planes de ordenamiento territorial, prevista en el artículo 9 de la Ley 388 de 1997” (Ministerio de Viviendo, Ciudad y Desarrollo).

Según el Artículo 4 del Decreto 1807 de 2014, los estudios de riesgo por fenómenos de remoción en masa se deben realizar como mínimo en las siguientes escalas (Ver la Tabla No. 20):

Tabla No. 20 - Escalas de trabajo para mapas de riesgo

TIPO DE ESTUDIO	CLASE DE SUELO	ESCALA
Estudio básico	Urbano	1:5.000
	Expansión urbana	1:5.000
	Rural	1:25.000
Estudio detallado	Urbano	1:2.000
	Expansión urbana	1:2.000
	Rural suburbano	1:5.000

Fuente: (Ministerio de Viviendo, Ciudad y Desarrollo)

La utilización en SIG para la zonificación de amenaza por movimientos en masa requiere la definición del tamaño de la celda (pixel) adecuada. Esta unidad de cálculo del terreno (UCT) pertenece al dominio referido al territorio con base en el cual se define, calibra y valida un modelo. La selección de su tamaño adecuado depende de la escala de análisis. El área mínima de una UCT, para realizar operaciones en un SIG a una escala dada, depende de la resolución espacial de la cartografía y mapas; es decir, la medida del área identificable más pequeña como una unidad separada discreta (Ávila et al., 2016).

Además, se debe definir la unidad de zonificación del terreno (UZT) como la unidad de discretización para producir mapas temáticos con propósitos de zonificación. No es obligatorio que la UZT deba tener la misma discretización del territorio adecuada para mapas de zonificación; esta última puede tener múltiples UCT. El área mínima de una UZT está relacionada con la resolución de la información de la zonificación que se desee. La UCT se define como una unidad cuadrada (Ávila et al., 2016).

Las unidades mínimas de UCT para diferentes escalas de trabajo se presentan en la Tabla No. 21 (Calvello, Cascini, & Mastroianni, 2013).

Tabla No. 21 - Dimensiones de las Unidades de Cálculo del Terreno

Escala de referencia	Dimensiones del pixel elemental - UCT	
	Longitud (m)	Área (m^2)
1:X	X/1000	$X^2/10^6$
1:250.000	250	62.500
1:100.000	100	10.000
1:25.000	25	625
1:5.000	5	25

Fuente: (Calvello et al., 2013)

Para el caso de estudio de la cuenca de la Quebrada la Chapa, se realizará un estudio básico de amenaza y se analizarán dos tipos de áreas: la urbana (para la zonificación de la amenaza en el casco urbano del municipio de Paz del Río); y la rural (para la zonificación de la amenaza en la cuenca de la Quebrada La Chapa). Por lo tanto, según la Tabla No. 20, las escalas recomendadas para el caso de estudio son: 1:25.000 para el área rural; y 1:5.000 para el área urbana. Sin embargo, para ser más detallado, se utilizará una escala de 1:10.000 para el área rural.

Según la Tabla No. 21, las dimensiones de las UCT para el caso de estudio serán: 10 metros, para el área rural; y 5 metros, para el área urbana.

7.2 DEFINICION DE LOS FACTORES CONDICIONANTES QUE INCIDEN EN LA AMENAZA DE LA CUENCA

De acuerdo con lo descrito en el Titulo 5.1.1, los factores condicionantes por tener en cuenta en la zonificación de la amenaza en la cuenca de la Quebrada La Chapa son los siguientes:

- Pendiente del terreno,
- Litología,
- Geomorfología,

- Cobertura vegetal.

7.3 GENERACIÓN DE MAPAS DE FACTORES CONDICIONANTES

7.3.1 Pendiente del terreno

Para la generación del mapa de pendientes de la cuenca con el programa ArcGIS ® se utilizó el siguiente procedimiento:

1. Digitalización de la Base Topográfica obtenida de la Plancha 172-I-B-4, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
2. A partir de la digitalización de las curvas de nivel, y utilizando la función “Crear TIN”, se obtuvo la superficie TIN. La superficie TIN es una representación espacial de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos.
3. A partir de la superficie TIN, y utilizando la función “Convertir de TIN a Ráster”, se obtuvo la superficie Ráster. La superficie Ráster representa entidades geográficas dividiendo el mundo en pixeles discretos cuadrados o rectangulares dispuestos en una cuadrícula. Cada pixel tiene un valor que se utiliza para representar alguna característica de dicha ubicación, en nuestro caso, es la cota de cada punto del mapa.
4. A partir de la superficie Ráster, y utilizando la función “Pendiente”, se obtuvo la superficie el Mapa de Pendientes (Ver el Plano No. 1).

   A partir del Mapa de Pendientes, y utilizando la función “Reclasificar” se reclasificó el mapa para diferentes rangos de pendiente según la Tabla No. 22 propuesta por Van Zuidam 1986.

Tabla No. 22 – Clasificación de pendientes

CLASE	RANGO DE PENDIENTE (GRADOS)
Pendiente baja	< 8°
Pendiente moderada	8° - 16°
Pendiente fuerte	16° - 35°
Pendiente muy fuerte	> 35°

Fuente: Van Zuidam 1986

7.3.2 Unidades geológicas

Se digitalizó el mapa de unidades geológicas obtenida del “Estudio Geológico y Geomorfológico de la Microcuenca de la Quebrada La Chapa. Municipios Paz de Río - Socha – Tasco” realizado para el CREPAD (Ver el Plano No. 2).

7.3.3 Mapa geomorfológico

Se digitalizó el mapa geomorfológico obtenido del “Estudio Geológico y Geomorfológico de la Microcuenca de la Quebrada La Chapa. Municipios Paz de Río - Socha – Tasco” realizado para el CREPAD (Ver el Plano No. 3).

7.3.4 Mapa de cobertura vegetal

Para la generación del mapa de cobertura vegetal de la cuenca con el programa ArcGIS ® se utilizó el siguiente procedimiento:

1. Se obtuvo el mapa de cobertura vegetal del: “Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca Media del Río Chicamocha” realizado por Corpoboyacá en el año 2010.
2. Se obtuvieron fotografías satelitales: Landsat – 7 y Google Earth.
3. Se hizo interpretación de las imágenes satelitales con el fin de obtener unidades homogéneas de cobertura del suelo y luego integrarlas al mapa de cobertura vegetal obtenida del POMCA del Río Chicamocha.
4. Se digitalizó el mapa de cobertura vegetal (ver el Plano No. 4).

7.3.5 Mapa de inventario de movimientos de remoción en masa

Se digitalizó el mapa de inventario de movimientos de remoción en masa a partir inventario realizado por Chaparro (2005) (Ver el Plano No. 5).

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.1
MAPA DE PENDIENTES DE LA CUENCA
ESCALA: 10.000
ELABORÓ: ING. JORGE UPARELA
REVISÓ: ING. MANUEL GARCÍA
APROBÓ: ING. MANUEL GARCÍA
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
Km
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1
N
S
E
W
Leyenda
0-8°
8-16°
16-35°
>35°
Leyenda catográfica
Drenaje secundario
Curvas de nivel
Vías
Drenaje primario
1147000
1147500
1148000
1148500
1149000
1149500
1150000
1154500
1154000
1153500
1153000
1152500
1152000
1151500
1151000
1150500

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.2
MAPA GEOLOGICO DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA
ESCALA: 10.000
FUENTE:
PEREZ (2004)
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1 Km
N
S
E
W
Falla de Paz de Río
Anticlinal de La Chapa
Falla 1A
Falla Central
Falla 4B
Falla de La Chapa
Falla de Mesa Alta
Ke
Kg
Qc
Qal
Qh
Tsi
Tss
Qd
Tpi
Tps
Tc
Qfg
Qm
Geología estructural
Tipo
Anticlinal
De rumbo dextral
De rumbo sinestral
Inversa
Inversa inferida
Normal
Leyenda cartográfica
Drenaje secundario
Curvas de nivel
Vías
Drenaje primario
Cuenca La Chapa
Unidades geológicas
Nombre
Ke - Formación Ermitaño
Kg - Formación Guaduas
Qal - Depósito aluvial
Qc - Depósito coluvial
Qd - Depósito de derrubio
Qfg - Depósito fluvio-glaciar
Qh - Depósito de derrumbe
Qm - Depósito glaciar
Tc - Formación Concentración
Tpi - Formación Picacho inferior
Tps - Formación Picacho superior
Tsi - Formación Socha inferior
Tss - Formación Socha superior
1147000
1147500
1148000
1148500
1149000
1149500
1150000
1154500
1154000
1153500
1153000
1152500
1152000
1151500
1151000
1150500

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.3
MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA
ESCALA: 10.000
FUENTE:
PÉREZ (2004)
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
Km
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1
N
S
E
W
Unidades geomorfológicas
Geomorfología
Nombre
IIa
IIb
IId
IVa
IVb
Ia
Ib
Ic
Id
Va
Vc
Leyenda cartográfica
Drenaje secundario
Curvas de nivel
Vías
Drenaje primario
Cuenca La Chapa

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.4
COBERTURA Y USO DEL SUELO
ESCALA: 10.000
FUENTE:
POMCAS CUENCA MEDIA DEL RÍO CHICAMOCHA
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
Km
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1
N
S
E
W
Leyenda
Cobertura
Nombre
Arbustal Abierto
Arbustal Denso
Herbazal Denso
Herbazal Ligero
Mosaico de pastos y cultivos
Plantación Forestal
Zona de Extracción Minera
Leyenda cartográfica
Drenaje secundario
Drenaje primario
Curvas de nivel
Vías
1147000
1147500
1148000
1148500
1149000
1149500
1150000
1154500
1154000
1153500
1153000
1152500
1152000
1151500
1151000
1150500

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.5
MAPA DE INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE REMOCION EN MASA
ESCALA: 10.000
FUENTE:
CHAPARRO (2005)
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
Km
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1
N
S
E
W
1147000
1147500
1148000
1148500
1149000
1149500
1150000
1154500
1154000
1153500
1153000
1152500
1152000
1151500
1151000
1150500
Leyenda
Movimientos de remoción en masa
Drenaje primario
Drenaje secundario
Cuenca La Chapa

7.4 GENERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA CUENCA

7.4.1 Aplicación del Método de relación de frecuencias

El método probabilístico (Fr) denominado relación de frecuencias se define como el cociente entre el área o número de pixeles de la clase que es efectivamente afectada por flujos de lodos y el área total de la clase, de la variable considerada (Bonham-Carter, 1994). Si el valor de Fr es mayor a 1, la relación entre la ocurrencia de movimientos de remoción en masa y las variables consideradas es alta, mientras que si Fr es menor a 1 la relación es baja.

$$F_r = \frac{\frac{N_{pix}\,(MR)}{N_{pix}(MRt)}}{\frac{N_{pix}(A)}{N_{pix}(A_t)}} \qquad \text{Ecuación 53}$$

Donde:

Fr = valor de la relación de frecuencias

Npix(MR) = Número de pixeles que contienen movimientos de remoción en masa en la clase de la variable temática.

Npix(MRt) = Número de pixeles totales que contienen movimientos de remoción en masa.

Npix(A) = Número total de pixeles para la clase de la variable considerada

Npix(At) = Número de total pixeles dentro de la zona de estudio.

El índice de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de remoción en masa (ISFD) de cada celda, se obtiene mediante la ecuación (Esper, 2014):

$$ISFD = Pendiente_r + Litología_r + Geomorfología_r + Cobertura_r \qquad \text{Ecuación 54}$$

(donde $litología_r$ es el Fr de la variable litología x su peso; $pendiente_r$ es el Fr de la variable pendiente x su peso; $geomorfologia_r$ es el Fr de la variable geomorfología x su peso; $cobertura_r$ es el Fr de la variable cobertura x su peso)

El procedimiento para la zonificación de la susceptibilidad de la Cuenca fue el siguiente:

1. Se obtuvieron los 4 mapas de factores condicionantes y el mapa de inventario de movimientos de remoción en masa.

2. Se hizo el cruce de mapas. El cruce de los mapas fue el siguiente:

   - Mapa de pendientes vs Mapa de inventario de movimientos de remoción en masa,
   - Mapa de unidades geológicas vs Mapa de inventario de movimientos de remoción en masa,
   - Mapa geomorfológico vs Mapa de inventario de movimientos de remoción en masa,
   - Mapa de cobertura vegetal vs Mapa de inventario de movimientos de remoción en masa.

3. De los nuevos mapas obtenidos de los 4 cruces se hizo el conteo de pixeles.

   Npix(FD) = Número de pixeles que contienen movimientos de remoción en masa en la clase de la variable temática.

   Npix(FDt) = Número de pixeles totales que contienen movimientos de remoción en masa.

   Npix(A) = Número total de pixeles para la clase de la variable considerada.

   Npix(At) = Número de total pixeles dentro de la zona de estudio.

4. Se utilizó el método de relación de frecuencias para determinar la frecuencia de ocurrencia de movimientos de remoción en masa (Ver la Tabla No. 23).

Tabla No. 23 - Aplicación del método de relación de frecuencias

$N_{pix}(A_t)$	Total de pixeles en el área de estudio	62323
$N_{pix}(FLt)$	Total de pixeles con movimientos de remoción en masa en el área de estudio	1239

FACTOR	CLASE	DESCRIPCIÓN	$N_{pix}(FL)$	% Pixeles con FL	$N_{pix}(A)$	% Pixel	Fr
Pendiente	0-8°	Baja	68	5.493	24,120	0.128	0.14
	8-16°	Moderada	246	19.871	52,825	0.280	0.23
	16°-32°	Fuerte	836	67.528	94,281	0.500	0.45
	>32	Muy fuerte	88	7.108	17,391	0.092	0.25
Geología	1	Ke	76	6.134	2,275	0.041	1.68
	2	Kg	195	15.738	9,205	0.168	1.07
	3	Qal	16	1.291	2,045	0.037	0.39
	4	Qc	489	39.467	14,600	0.266	1.68
	5	Qd	46	3.713	2,092	0.038	1.11
	6	Qfg	132	10.654	1,289	0.023	5.15
	7	Qh	2	0.161	921	0.017	0.11
	8	Qm	73	5.892	6,275	0.114	0.59
	9	Tc	0	0.000	1,984	0.036	0.00
	10	Tpi	0	0.000	3,666	0.067	0.00
	11	Tps	0	0.000	2,641	0.048	0.00
	12	Tsi	0	0.000	3,529	0.064	0.00
	13	Tss	210	16.949	4,420	0.080	2.39
Geomorfología	1	IIa	358	28.526	5,847	0.106	3.08
	2	IIb	114	9.084	7,852	0.143	0.73
	3	IId	46	3.665	2,096	0.038	1.10
	4	IVa	16	1.275	3,412	0.062	0.24
	5	IVb	73	5.817	2,828	0.052	1.30
	6	Ia	0	0.000	1,265	0.023	0.00
	7	Ib	0	0.000	1,656	0.030	0.00
	8	Ic	632	50.359	27,648	0.504	1.15
	9	Id	0	0.000	468	0.009	0.00
	10	Va	16	1.275	1,417	0.026	0.57
	11	Vc	0	0.000	418	0.008	0.00
Cobertura vegetal	1	Arbustal abierto	623	50.282	22,098	0.355	1.42
	2	Arbustal denso	0	0.000	2,356	0.038	0.00
	3	Herbazal denso	248	20.016	9,307	0.149	1.34
	4	Herbazal ligero	28	2.260	14,473	0.232	0.10
	5	Mosaico de pastos y cultivos	125	10.089	8,450	0.136	0.74
	6	Plantación forestal	111	8.959	4,524	0.073	1.23
	7	Zona de extracción minera	104	8.394	1,114	0.018	4.70

Fuente: Elaboración propia

5. Se le asignó un nuevo atributo (Fr) a cada clase de cada uno de los mapas de factor condicionante.
6. Utilizando la función Algebra de mapas, se obtuvo el mapa de susceptibilidad.
7. Se reclasificó el mapa de susceptibilidad en categorías Alta, Media y Baja utilizando el método del cuantil de ArcGIS.

En la Figura No. 14 se presenta un esquema general del procedimiento para obtener el mapa de susceptibilidad y en el Plano No. 6 se presenta el Mapa de Susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa de la cuenca de la Quebrada La Chapa.

Figura No. 14 - Esquema general del procedimiento para la generación del mapa de susceptibilidad de la Cuenca de la Quebrada La Chapa (Fuente: Elaboración propia)

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.6
MAPA DE SUCEPTIBILIDAD DE LA CUENCA A MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA
ESCALA: 10.000
ELABORÓ: ING. JORGE UPARELA
REVISÓ: ING. MANUEL GARCÍA
APROBÓ: ING. MANUEL GARCÍA
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
Km
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1
N
S
E
W
1147000
1147500
1148000
1148500
1149000
1149500
1154500
1154000
1153500
1153000
1152500
1152000
1151500
1151000
1150500
Nivel de Susceptibilidad
Baja
Media
Alta
Leyenda cartográfica
Drenaje secundario
Drenaje primario

7.5 ANÁLISIS DE LA LLUVIA COMO FACTOR DETONANTE

7.5.1 MARCO HIDROLOGICO REGIONAL

De acuerdo con registros históricos de las Estaciones Pluviométricas más cercanas a la cuenca de la Quebrada La Chapa, se obtuvieron los siguientes histogramas de precipitación media mensual:

Figura No. 15 – Lluvia promedio mensual Estación Curital (Fuente: Elaboración propia)

Figura No. 16 - Lluvia promedio mensual Estación Tasco (Fuente: Elaboración propia)

Figura No. 17 - Lluvia promedio mensual Estación Tutasá (Fuente: Elaboración propia)

Se observa en los histogramas que los periodos más lluviosos cerca de la cuenca en estudio corresponden a los de abril y mayo, y octubre y noviembre, lo cual corresponde al régimen bimodal de la región.

La precipitación media anual de cada estación pluviométrica es: Curital, 977 mm; Tasco, 741 mm; y Tutasá, 996 mm.

7.5.2 CARACTERIZACION HIDROLOGICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA

Los parámetros morfométricos de la cuenca se presentan en la Tabla No. 24.

Tabla No. 24 – Parámetros morfométricos de la cuenca de la Quebrada La Chapa

Área (Km^2)	7.58
Perímetro (Km)	16.77
Cota superior (msnm)	3655
Cota inferior (msnm)	2197
Cota media (msnm)	3095
Ancho máximo (m)	2300
Longitud de la cuenca (m)	4837
Cota máxima del cauce principal (msnm)	3595
Cota mínima del cauce principal (msnm)	2199
Longitud del cauce principal (Km)	6.4
Longitud del cauce donde viajan los flujos (Km)	4.83

Fuente (Chaparro, 2005)

Para el estudio hidrológico de la cuenca se adquirieron registros de precipitación máxima de 24 horas histórica en el IDEAM desde 1974 hasta el 2015 de las estaciones más cercanas. En la Tabla No. 25 se presenta la información de las estaciones.

Tabla No. 25 - Información de las estaciones pluviométricas analizadas

NOMBRE	CODIGO	ELEVACION (msnm)	COORDENADAS	
			N	W
Curital	2303065	3052	5°59'	72°38'
Tasco	2403016	2486	5°54'	72°47'
Tutasá	2403069	2083	6°02'	72°51'

Fuente: IDEAM

En la Figura No. 18 se presenta la localización de las Estaciones Pluviométricas analizadas.

Figura No. 18 – Localización de las Estaciones Pluviométricas analizadas (Fuente: Google Earth)

7.5.3 SELECCIÓN DE LA LLUVIA DE DISEÑO

Para la selección de la lluvia de diseño de la cuenca de la Quebrada La Chapa se utilizó el siguiente procedimiento:

1. Se completaron los datos faltantes de precipitación máxima 24 horas multianual de los últimos 40 años de las estaciones pluviométricas más cercanas a la cuenca (Tabla No. 25) Los datos faltantes se obtuvieron mediante métodos estadísticos (promedio aritmético y método de bloques).

2. Se obtuvo la precipitación máxima probable utilizando la distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel estableciendo períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 verificando la bondad del ajuste por medio la prueba de Kolmogórov-Smirnov.

3. Se determinaron las precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración para cada estación pluviométrica.

4. Con los datos obtenidos de las precipitaciones máximas de las diferentes estaciones se procedió a utilizar el método de los Polígonos de Thiessen por medio del software ArcGIS®.

La curva IDF de la cuenca de la Quebrada La Chapa se puede observar en la Figura No. 19.

Figura No. 19 – Curva IDF de la Cuenca de la Quebrada La Chapa (Fuente: Elaboración propia)

7.5.4 SELECCIÓN DE EVENTO HISTORICO Y DETERMINACION DE SU LLUVIA CRÍTICA Y PERIODO DE RETORNO

Tal como se explicó en el numeral 6.6.1.1, los flujos de lodos que se presentan en la quebrada La Chapa se forman de un gran deslizamiento traslacional activo en el páramo de Mesa Alta.

Como los deslizamientos están asociados a una lluvia crítica acumulada (Ver el numeral 5.1.4), se propone determinar la lluvia critica acumulada y su respectivo periodo de retorno para una avalancha ocurrida en el pasado.

Para el caso del estudio de la Cuenca de la Quebrada La Chapa se seleccionaron dos avalanchas ocurridas en las siguientes fechas:

- 9 de noviembre de 1986
- 6 de diciembre de 2011

Aunque no se logró obtener ningún tipo de información técnica sobre estas avalanchas, si fue posible tener acceso a un video filmado por un habitante de la zona.Del video se extrajeron las fotos No.1 a 4 de la Tabla No. 26, que reproducen el momento exacto de la llegada de la avalancha del 6 de diciembre de 2011 al río Chicamocha(Ver la Tabla No. 26).

Tabla No. 26 -Descripción del momento justo de ocurrencia de la avalancha de 6 de diciembre de 2011

Captura del video	Descripción
1	Aproximación de la avalancha a la desembocadura de la Quebrada La Chapa en el Río Chicamocha.
2	Instante en el cual la avalancha impacta una vivienda del barrio Santa Teresa, destruyéndola completamente.
3	Instante después de que la avalancha arrasó la vivienda.
4	Instante en el cual la avalancha desemboca en el Río Chicamocha. Se logra apreciar el acarreo de grandes fragmentos de roca.

Fuente: YouTube

7.5.4.1 Procedimiento

El procedimiento utilizado para la determinación del periodo de retorno y la lluvia crítica de los eventos fue la siguiente:

1. Se utilizó la información suministrada por el IDEAM para la lluvia máxima de 24 horas multianual, para los 40 años de registro de las tres estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca de la Quebrada La Chapa. A continuación, se procedió a obtener los datos faltantes de las estaciones pluviométricas por métodos estadísticos (promedio aritmético y método de bloques).
2. Se construyó la curva de Precipitación Diaria Acumulada vs. tiempo de ocurrencia, para las tres estaciones pluviométricas relacionadas en la Tabla No. 25, con referencia a los eventos seleccionados, como se muestra en la Figura No. 20 y la Figura No. 21.

Figura No. 20 - Precipitación Acumulada de la Quebrada La Chapa entre septiembre y noviembre de 1986. (Fuente: Elaboración propia)

Figura No. 21 - Precipitación Acumulada de la Quebrada La Chapa entre octubre y diciembre de 2011. (Fuente: Elaboración propia)

3. Se seleccionan los umbrales más probables de lluvia crítica de acuerdo a la variación de la pendiente de las curvas de precipitación acumulada vs días. Los umbrales seleccionados se presentan en la Tabla No. 27 y la Tabla No. 28.

Tabla No. 27 - Umbrales de lluvia critica seleccionados para el evento del 9/11/86

Umbrales	Días
1	7
2	30
3	40
4	49
5	63
6	73
7	83

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 28 - Umbrales de lluvia critica seleccionados para el evento del 6/12/11

Umbrales	Días
1	9
2	18
3	23
4	35
5	50
6	58
7	66
8	85

Fuente: Elaboración propia

4. Se construyeron las series parciales de la información diaria (con el período completo de registro) con los valores de la duración de los umbrales, y con ellas, las series de máximos multianuales (Ver la Tabla No. 29 y la Tabla No. 30).

Tabla No. 29 -Series de máximos multianuales de los umbrales posibles para el evento del 9/11/86

PRECIPITACIÓN ACUMULADA POR AÑO Y UMBRAL - EVENTO 9/NOV/86								
AÑO	UMBRAL 1	UMBRAL 2	UMBRAL 3	UMBRAL 4	UMBRAL 5	UMBRAL 6	UMBRAL 7	UMBRAL 8
1974	28	85	117	163	208	216	245	267
1975	26	110	124	130	177	206	230	233
1976	61	169	247	279	286	288	293	311
1977	110	174	200	232	258	260	269	276
1978	54	172	186	226	266	304	310	315
1979	50	204	218	222	264	301	360	376
1980	80	105	194	225	250	276	296	308
1981	6.8	51.8	71.1	72.9	105.4	147.9	176.3	187.3
1982	39	123.4	139.1	160.3	183.2	191.3	206.9	214.6
1983	1.4	60.8	61.6	67	83.4	93.1	107.6	117.8
1984	20.5	54.1	66.1	88.7	131.9	137	174.8	181.9
1985	6.1	83.2	101.4	146.6	190.5	201.1	205.9	208.7
1986	38.5	211.2	278.7	305.3	310.7	322.2	325.1	326

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 30 - Series de máximos multianuales de los umbrales posibles para el evento del 6/12/11

PRECIPITACIÓN ACUMULADA POR AÑO Y UMBRAL - EVENTO 6/DIC/11									
AÑO	UMBRAL 1	UMBRAL 2	UMBRAL 3	UMBRAL 4	UMBRAL 5	UMBRAL 6	UMBRAL 7	UMBRAL 8	UMBRAL 9
1974	2.0	72.0	72.0	145.0	190.0	202.0	234.0	315.0	325.0
1975	30.0	43.0	44.0	84.0	139.0	175.0	182.0	232.0	235.0
1976	8.0	10.0	25.0	87.0	165.0	203.0	273.0	312.0	312.0
1977	0.0	0.0	30.0	161.0	219.0	233.0	251.0	308.0	309.0
1978	12.0	30.0	36.0	96.0	134.0	214.0	228.0	296.0	308.0
1979	3.0	25.0	100.0	180.0	291.0	334.0	348.0	387.0	394.0
1980	2.0	3.0	9.0	89.0	110.0	124.0	203.0	239.0	259.0
1981	23.6	41.7	49.4	75.1	84.9	123.1	139.4	172.0	173.7
1982	11.1	44.7	48.8	89.5	154.6	187.8	189.6	213.6	233.7
1983	23.9	34.4	66.3	75.1	125.5	135.3	135.3	151.5	157.1
1984	11.1	19.3	19.7	52.0	85.4	85.6	97.6	152.4	163.4
1985	51.6	63.0	72.4	86.4	163.5	163.5	181.7	247.5	270.8
1986	2.8	20.7	21.8	68.3	138.8	241.0	308.5	335.1	340.5
1987	45.3	71.9	81.6	96.7	181.3	226.5	255.7	306.5	307.1
1988	12.1	42.0	80.7	136.3	191.0	217.2	220.2	246.2	265.2
1989	20.0	21.0	25.3	38.1	60.9	69.2	84.0	99.8	105.8
1990	18.4	33.2	59.1	59.5	89.5	116.9	147.8	154.3	154.3
1991	3.5	9.4	86.4	153.4	155.1	173.4	193.1	208.3	210.5
1992	15.8	51.2	90.8	109.9	111.6	112.8	122.7	160.4	160.4
1993	100.4	128.1	146.5	187.7	258.8	294.8	294.8	321.3	346.1
1994	4.0	60.0	67.5	86.3	143.9	218.3	276.5	460.2	460.2
1995	41.5	41.5	41.5	68.5	104.5	155.5	176.5	180.5	194.0
1996	3.9	29.4	38.4	58.1	58.1	58.1	58.1	91.1	100.1
1997	14.8	26.3	34.3	44.3	44.3	66.3	81.6	99.1	116.1
1998	63.8	84.8	86.8	107.5	140.6	153.9	157.9	182.1	194.1
1999	13.0	30.3	33.3	76.8	151.5	151.5	186.6	247.4	272.9
2000	0.0	0.0	0.0	9.0	93.8	117.8	122.5	219.3	222.3
2001	19.7	29.7	29.7	55.7	78.5	102.5	105.6	185.9	187.9
2002	0.0	0.0	0.0	10.0	10.0	17.0	17.0	30.2	30.2
2003	45.3	58.8	58.8	94.9	157.9	192.6	201.8	221.3	246.0
2004	2.0	10.0	15.0	38.5	121.9	128.9	131.9	151.9	154.4
2005	3.0	99.6	201.3	228.9	228.9	229.9	232.4	282.2	317.2
2006	6.1	49.4	118.1	131.1	187.4	244.7	246.1	256.5	268.7
2007	3.0	28.0	28.0	71.7	128.6	155.5	169.4	179.1	179.7
2008	14.8	48.8	108.2	136.6	162.6	207.1	216.8	256.6	260.8
2009	0.0	11.6	36.4	95.1	117.7	134.2	136.3	147.5	147.5
2010	76.2	104.5	118.5	201.3	269.6	281.4	297.3	348.0	383.2
2011	35.9	76.9	105.4	138.6	188.1	248.6	265.3	276.0	295.7
2012	48.0	55.4	66.7	80.2	92.1	154.2	174.9	189.7	194.2
2013	32.2	79.8	89.3	120.0	136.0	150.7	166.3	182.7	187.7
2014	0.5	37.0	44.0	83.2	97.7	106.9	132.8	139.8	141.5
2015	0.0	2.0	15.0	87.4	146.9	151.4	154.7	154.7	154.7

Fuente: Elaboración propia

5. Se calcularon los parámetros de la distribución de Gumbel (a y m) para cada umbral (Ver la Tabla No. 31 y la Tabla No. 32).

Tabla No. 31 - Parámetros de distribución de Gumbel para distintos umbrales o duraciones (Evento 9/11/86)

PARÁMETROS DE DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL PARA DISTINTAS DURACIONES								
	DURACIÓN (DÍAS)							
PARÁMETRO	8	30	39	49	63	73	83	90
a	34.273	62.189	68.899	77.318	73.492	75.071	77.584	78.402
m	26.239	121.840	149.906	179.062	223.526	248.433	269.823	281.360

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 32 - Parámetros de distribución de Gumbel para distintos umbrales o duraciones (Evento 6/12/11)

PARÁMETROS DE DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL PARA DISTINTAS DURACIONES									
	DURACIÓN (DÍAS)								
PARÁMETRO	9	18	23	35	50	58	66	85	90
a	24.21	39.26	50.71	58.48	72.90	79.54	83.96	99.45	105.52
m	14.38	30.93	45.44	94.07	154.94	185.55	208.64	249.86	261.49

Fuente: Elaboración propia

6. Se calculó el periodo de retorno y la lluvia critica del evento.

Tabla No. 33 - Lluvia crítica y periodo de retorno del evento de 09/nov/86

Días antecedentes al evento	Precipitación acumulada (mm)	Yi	F	Tr
8	32	0.16	0.43	1.75
30	177	0.89	0.66	2.96
39	250	1.45	0.79	4.79
49	297	1.52	0.80	5.09
63	300	1.05	0.70	3.38
73	310	0.82	0.64	2.81
83	314	0.57	0.57	2.31
90	314	0.42	0.52	2.08

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 34 - Lluvia crítica y periodo de retorno del evento de 6/11/12

Días antecedentes al evento	Precipitación acumulada (mm)	Yi	F	Tr
18	93.3	1.59	0.82	5.41
23	126.4	1.60	0.82	5.45
35	228.4	2.30	0.90	10.45
50	286.9	1.81	0.85	6.62
58	335.6	1.89	0.86	7.11
66	379.1	2.03	0.88	8.13
85	421.86	1.73	0.84	6.15
90	478.96	2.06	0.88	8.36

Fuente: Elaboración propia

Según lo expuesto por Castellanos (1996), el período de retorno (Tr) está dado por la siguiente ecuación:

$$T_r = \frac{1}{1-f}$$ Ecuación 55

Donde:

$$f = e^{-e^{-y_i}}$$ Ecuación 56

$$y_i = \frac{x - m}{a}$$ Ecuación 57

Donde:

m y a son los parámetros de la distribución de Gumbel
x = Precipitación acumulada antecedente

Los resultados de la Tabla No. 33 muestran que el evento de flujo ocurrido el 09 de noviembre de 1986 se desencadenó por una precipitación acumulada de **297 mm** durante 49 días y su periodo de retorno es de **5 años** aproximadamente.

Mientras que el evento de flujo ocurrido el 06 de diciembre de 2011 se desencadenó por una precipitación acumulada de **228 mm** durante 35 días y su periodo de retorno es de **10 años** aproximadamente (Ver la Tabla No. 34).

7.5.5 ZONIFICACIÓN DE LA LLUVIA COMO FACTOR DETONANTE DE FLUJOS DE LODOS

La zonificación de la lluvia como factor detonante de flujos de lodos se hace bajo la suposición de que los futuros flujos de lodos van a ocurrir en circunstancias similares a los flujos de lodos que han ocurrido en el pasado, en el área en estudio. Es decir, que para el caso de la cuenca de la quebrada La Chapa, la zonificación de la lluvia se hará tomando como referencia el evento ocurrido el 09 de noviembre de 1986, el cual tuvo un periodo de retorno 5 de años según el cálculo realizado en el numeral anterior. El mapa de lluvias mostrará la probabilidad de ocurrencia de un evento similar al estudiado en los próximos años, teniendo en cuenta la proyección de lluvias de acuerdo a los últimos años.

El procedimiento utilizado para la zonificación de la lluvia fue el siguiente:

1. Se construyeron las series parciales de la información diaria (con el período completo de registro) con los valores de la duración del umbral crítico (49 días de duración), y con ellas, las series de máximos multianuales desde el 2000 hasta el 2015 para cada estación pluviométrica.

2. Con las series de máximos multianuales de cada estación pluviométrica, se determinaron los parámetros de distribución de Gumbel (Ver la Tabla No. 35).

Tabla No. 35 - Parámetros de distribución de Gumbel de las 3 estaciones para el umbral de 49 días

ESTACIÓN	a	m
Curital	80.763	167.834
Tasco	49.177	94.236
Tutasá	73.870	87.776

Fuente: Elaboración propia

3. Determinación de la lluvia crítica acumulada para un periodo de retorno de 2 años, usando la metodología de castellanos:

$$p = m - a * \left[\ln\left(-ln\left(\frac{T_r - 1}{T_r}\right)\right)\right] \qquad \text{Ecuación 58}$$

Donde:

m y a son los parámetros de la distribución de Gumbel

Tr = Periodo de retorno (2 años)

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla No. 36.

Tabla No. 36 - Lluvia crítica acumulada para un periodo de retorno de 2 años

Estación	Precipitación acumulada (mm)
Curital	288.97
Tasco	168.00
Tutasá	198.58

Fuente: Elaboración propia

4. Se construyó el mapa de isoyetas utilizando Arcmap (Ver la Figura No. 22).

Figura No. 22 - Creación del mapa de isoyetas en ArcGIS ®

5. Se reclasificó el mapa de isoyetas de acuerdo a los resultados obtenidos por Mayorga (2003), teniendo en cuenta de que cuando la lluvia acumulada está entre el 20 y 50% de la lluvia promedio anual, la probabilidad de ocurrencia del evento es media (ver la Figura No. 23 y la Tabla No. 37.

Figura No. 23 - Mapa de isoyetas definitivo en ArcGIS ®

Tabla No. 37 - Relación de precipitación acumulada y media anual por estación pluviométrica

Estación	Precipitación acumulada (mm) (1)	Precipitación media anual (mm) (2)	(1)/(2)
Curital	288.97	976.975	30%
Tasco	168.00	740.973	23%
Tutasá	198.58	996.477	20%

Fuente: Elaboración propia

7.6 ZONIFICACION DE LA AMENAZA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA

El procedimiento seguido para la zonificación de la amenaza en la cuenca de la Quebrada La Chapa fue el siguiente:

1. Se subió al Sistema de Información Geográfica ArcGIS ® el mapa de susceptibilidad de ocurrencia de flujo de detritos y el mapa de precipitación acumulada como detonador de flujo de lodos en la cuenca de estudio. Los mapas mencionados anteriormente deben estar en formato ráster.

2. Se utilizó la herramienta de ArcGIS ® correspondiente al álgebra de mapas en ráster para sumar los mapas de los mapas de susceptibilidad y precipitación acumulada y el mapa resultante corresponde al mapa de amenaza para ocurrencia de flujo de detritos.

3. Se reclasificó el mapa de amenaza, estableciendo la zonificación por medio del método de los Cuantiles disponible en el Sistema de Información Geográfico.

En el Plano No. 7 se presenta el mapa de Amenaza de la Cuenca.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.7
MAPA DE AMENAZA DE LA CUENCA POR MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA
ESCALA: 10.000
ELABORÓ: ING. JORGE UPARELA
REVISÓ: ING. MANUEL GARCÍA
APROBÓ: ING. MANUEL GARCÍA
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
Km
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1
N
S
E
W
Amenaza
Baja
Media
Alta
Leyenda cartográfica
Drenaje primario
Drenaje secundario
1147000
1147500
1148000
1148500
1149000
1149500
1150000
1154500
1154000
1153500
1153000
1152500
1152000
1151500
1151000
1150500
1150000

7.7 CUANTIFICACIÓN DE LA LLUVIA COMO FACTOR DETONTANTE DE LA AMENAZA DEL CASCO URBANO

Para la cuantificación de los factores que inciden en la amenaza en el casco urbano se parte de la suposición de que los eventos de flujos, se presentan como respuesta a una lluvia de corta duración, y como la cuenca tiene un área considerablemente pequeña (menor de 8 Km^2) se asume una lluvia distribuida uniformemente sobre el área de la misma. Por lo tanto, para el cálculo del caudal líquido que circula sobre el cauce principal de la quebrada, se debe tener en cuenta los aportes al cauce principal de los afluentes más significativos por donde transita la avalancha.

La cuenca en estudio se dividió en cuatro subcuencas, afluentes al cauce principal, y en una subcuenca aportante de caudal líquido donde se supone inicia el proceso de movilización de la roca meteorizada que aporta al inicio del flujo de lodos. Utilizando la herramienta Arc Hydro Tools del software ArcGIS ® se obtuvo la dirección del flujo de la cuenca, continuando con el flujo acumulado, las sub-cuencas, los drenajes de las sub-cuencas, y los puntos de entrega de los drenajes de las sub-cuencas a la quebrada La Chapa, tal como se observa en la Figura No. 24.

Figura No. 24 - Delimitación de subcuencas y localización de los puntos de entrada de caudal al cauce principal, por donde viajan los flujos de lodo (Fuente: Elaboración propia)

En la Tabla No. 38 y la Tabla No. 39 se presenta el cálculo de los parámetros morfológicos y tiempo de concentración respectivamente.

Tabla No. 38– Parámetros morfológicos de las subcuencas de la Quebrada La Chapa

Subcuenca	Área (km^2)	Perímetro (km)	Longitud del cauce principal de la subcuenca (m)	Cota maxima (m)	Cota minima (m)	Pendiente (%)
1	0.77	3.87	685.99	3414.27	3266.62	21.52
2	0.88	4.97	1793.77	3392.63	2801.90	32.93
3	2.14	6.87	2572.62	3366.07	2585.62	30.34
4	0.78	3.71	637.31	2635.98	2465.20	26.80
5	1.28	6.67	1465.84	2609.74	2303.88	20.87

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 39 – Cálculo del tiempo de concentración de las subcuencas de la Quebrada La Chapa

Subcuenca	MÉTODO			
	Témez	Kirpich	CCP	Promedio
1	7.63	5.35	8.27	7.08
2	14.49	9.52	12.36	12.13
3	19.28	12.98	17.23	16.50
4	6.93	4.65	6.64	6.07
5	13.57	9.72	14.96	12.75

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del caudal líquido se utilizará el software HEC-HMS, el cual utiliza la metodología del Sol Conservation Service (SCS), el cual utiliza el Numero de Curva. Por lo tanto, se debe calcular el Número de Curva para cada una de las subcuencas.

Con la herramienta Generate CN Grid de ArcGIS se obtuvo el número de curva para las distintas subcuencas. Los parámetros de entrada para el cálculo del Número de Curva fueron los siguientes:

- Modelo Digital de Elevaciones (DEM)
- Mapa de cobertura vegetal.
- Mapa de Grupo Hidrológico de Suelos, creado a partir del mapa geológico y según la Tabla No. 4 (Ver la Figura No. 25).

Figura No. 25 – Mapa de Grupo Hidrológico de Suelos (Fuente: Elaboración propia)

- Mapa de uso del suelo, obtenido a partir del mapa de cobertura vegetal.

Figura No. 26 – Mapa de uso del suelo (Fuente: Elaboración propia)

El mapa de Numero de Curva obtenido con la herramienta se presenta en la Figura No. 27.

Figura No. 27 - Mapa de Numero de Curva (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, el número de curva de una subcuenca será el sumatorio del nuevo campo creado, para todos los polígonos que pertenezcan a la subcuenca y divido entre el área de esa subcuenca:

$$CN = \frac{\sum CN_i * A_i}{\sum A_i} \qquad \text{Ecuación 59}$$

En la Tabla No. 40 se presenta el Numero de Curva de las subcuencas de la Quebrada La Chapa.

Tabla No. 40 – Numero de Curva de las subcuencas

Subcuenca	CN
1	68
2	76
3	73
4	79
5	59

Fuente: Elaboración propia

7.7.1 CAUDAL LÍQUIDO

Para la determinación del caudal liquido de la quebrada La Chapa se debe contar el hietograma de diseño. Un hietograma es un gráfico que representa la precipitación en función del tiempo para un lugar determinado.

Cuando no se cuenta con registros pluviográficos para establecer la duración y distribución temporal de la tormenta sobre la cuenca, se debe utilizar una metodología sintética para determinar las propiedades de las tormentas, como es el caso del Bloque Alterno, tratado por Chow, et al (1994) teniendo en cuenta la lluvia evento.

En el estudio de caso de la Quebrada La Chapa no existen mediciones de caudales de creciente. Por lo tanto, se propone el uso del método del Bloque Alterno.

Teniendo en cuenta que Chaparro (2005) citando a Takahashi (1991) afirma que los flujos de detritos son detonados por lluvias intensas de corta duración y debido a la ausencia de información sobre duración de lluvias en el momento que ocurrieron avalanchas en la cuenca, para el presente trabajo se propone utilizar una lluvia con una duración de 30 minutos.

Al aplicar el método del Bloque Alterno se asumieron intervalos de precipitación cada 2 minutos, suponiendo que la intensidad máxima se presenta justamente en la mitad de la tormenta.

Con base en los valores de intensidad de precipitación según la duración de la misma y frecuencia de repetición correspondiente a los periodos de retorno, se elaboró el hietograma de diseño de la Quebrada La Chapa para diferentes periodos de retorno (ver la Figura No. 28).

Figura No. 28 – Hietogramas de diseño para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años (Fuente: Elaboración propia)

Para la determinación del caudal líquido en la Quebrada La Chapa se utilizó el programa HEC – HMS, ya que es un programa aceptado mundialmente por la comunidad científica.

Los parámetros de entrada requeridos por el programa son los siguientes:

- Subcuencas: Área, método de pérdidas (se escogió el Numero de Curva del SCS), el método de transformación (Se escogió el hidrograma unitario del SCS).
- Información de los datos de precipitaciones: A través de los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años.
- Del modelo meteorológico se escogen los pluviómetros para cada período de retorno.
- Especificaciones de control como lapso e intervalo de tiempo a incrementar.

En la Figura No. 29 se presenta un esquema de la cuenca de la Quebrada La Chapa para la modelación en HEC – HMS.

Figura No. 29 – Modelación de la quebrada la Chapa en HEC – HMS

Los resultados obtenidos de la modelación con HEC – HMS se presentan en la Figura No. 30, Figura No. 31, Figura No. 32 y Figura No. 33.

Figura No. 30– Hidrogramas de las subcuencas de la quebrada La Chapa para un periodo de retorno de 5 años elaborado en HEC – HMS

Figura No. 31 - Hidrogramas de las subcuencas de la quebrada La Chapa para un periodo de retorno de 10 años elaborado en HEC – HMS

Figura No. 32 - Hidrogramas de las subcuencas de la quebrada La Chapa para un periodo de retorno de 25 años elaborado en HEC – HMS

Figura No. 33 - Hidrogramas de las subcuencas de la quebrada La Chapa para un periodo de retorno de 50 años elaborado en HEC – HMS

7.7.2 CONCENTRACION VOLUMETRICA DE SEDIMENTOS

Para la determinación de la concentración volumétrica de sedimentos se tomó como referencia el trabajo realizado por Chaparro (2005) y Cuervo et al. (1989).

En ambos trabajos, se hizo un análisis de la granulometría de las matrices de depósitos de flujos de lodos recuperadas para sus estudios. Mediante correlaciones con el tamaño medio D_{50} de la matriz se llegó a la conclusión de que los flujos de lodos requieren entre 35% y 45% de concentración en volumen para transportar bloques en suspensión soportados por la matriz.

Se siguieron las instrucciones del numeral 5.1.6.2, es decir, se asumió una función lineal de aumento de concentración, con un máximo en el tiempo de la descarga pico, y con un decremento también lineal después de este. Con respecto a la concentración máxima de sedimentos por periodo de retorno, teniendo en cuenta que las concentraciones de sedimentos crecen al aumentar el periodo de retorno (ya que aumenta el caudal y por ende la velocidad de arrastre), se aumentó arbitrariamente la concentración tomando como referencia el máximo valor de concentración de 45%. Los valores picos de concentración de sedimentos por periodo de retorno se presentan en la Tabla No. 41.

Tabla No. 41 – Concentración de sedimentos máxima por periodo de retorno

PERIODO DE RETORNO (T_r)	CONCENTRACIÓN VOLUMETRICA MAXIMA (C_v)
5	0.30
10	0.35
25	0.40
50	0.45

Fuente: Elaboración propia

7.8 MODELACIÓN DE FLUJOS DE LODOS CON EL SOFTWARE FLO 2D

Para el caso en estudio se realizó la modelación de flujos de lodos con el software FLO-2D, el cual simula flujos hiperconcentrados tales como flujos de lodos y detritos en topografías complejas, cascos urbanos, terrazas y conos de deyección.

La ventaja de software FLO-2D es su interfaz amigable, además de su nivel de detalle en la predicción de profundidad de flujo, velocidad, hidrogramas de descarga, presión estática y dinámica, energía específica y área de inundación del flujo de lodos.

7.8.1 PARÁMETROS DE ENTRADA

- **Topografía del terreno**

  A partir del Modelo Digital de Elevaciones obtenido con ArcGIS ® en el numeral 7.3.1 se exporta al software FLO 2D.

- **Hidrogramas de caudal líquido**

  Se deben ingresar los hidrogramas de caudal liquido de cada uno de los aportes de la quebrada La Chapa. Estos hidrogramas fueron obtenidos en el numeral 7.7.1 con el Software HEC HMS para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años. No se consideraron periodos de retorno mayores porque las series de datos hidrometeorológicos que existen en la zona de estudio no son lo suficientemente extensas (menor que 50 años) y consistentes para poder extrapolar a periodos de retorno mayores.

- **Concentración volumétrica de sedimentos**

  La concentración volumétrica de sedimentos fue determinada en el numeral 7.7.2.

- **Parámetros para estimar esfuerzos cortantes y viscosidad en el flujo**

  Chaparro (2005), realizó el análisis comparativo de los valores de viscosidad y esfuerzo cortante obtenidos por Cuervo et al. (1989). en la Quebrada la Chapa y los resultados obtenidos por O´Brien (1988), en diferentes eventos de avalancha en los Estados Unidos de Norte América (Glenwood), donde se les ejecutaron pruebas reológicas para determinar los coeficientes, para establecer la viscosidad y los esfuerzos cortantes en el flujo de detritos.

  Con base en lo anterior Chaparro (2005) encontró que los parámetros para valorar tanto los esfuerzos cortantes y la viscosidad del flujo fueron los siguientes:

  $\alpha_1 =$ 0.0291 poises

  $ß_1 =$ 14.3

  $\alpha_2 =$ 0.000291 dinas/cm^2

  $ß_2 =$ 33.1

- **Coeficiente de rugosidad**

  Chaparro (2005) realizó ensayos de granulometría a 11 muestras de depósitos de flujos de lodo a lo largo del cauce y en los márgenes de la Quebrada La Chapa. Los resultados de los ensayos de laboratorio permitieron concluir que el tamaño medio de partículas (D_{50}) es de 0.04525 mm.

  Para calcular el n de Manning del cauce principal de la Quebrada La Chapa, se utilizó la fórmula de Strickler, la cual correlaciona el n de Manning con el diámetro medio de la partículas (Páez, 2016).

$$n = 0.0474{D_{50}}^{1/6} \qquad \text{Ecuación 60}$$

  Al aplicar la Ecuación 60 se tiene que el n de Manning es 0.028.

- **Gravedad específica**

  El valor de la gravedad especifica de los sólidos es de 2.65, según ensayos realizados por Chaparro (2005).

- **Condiciones de frontera para la modelación**

  Para el caso de la cuenca de la Quebrada La Chapa se establecieron las siguientes condiciones de frontera para el programa:

✓ Condición de borde aguas arriba de la Quebrada La Chapa y los hidrogramas de entrada (INFLOW) de las subcuencas aportantes al cauce principal de la quebrada.

✓ Condición de borde aguas abajo en la salida del flujo (OUTFLOW), la cual corresponde a la desembocadura de la quebrada en el Río Chicamocha.

7.8.2 PROCEDIMIENTO

1. Se exporta el Modelo Digital de Elevaciones al GDS (Grid Developer System), el cual es una extensión de FLO 2D que permite la creación del sistema de malla de diferencias finitas y permite la edición de sus atributos y componentes.

2. En la extensión GDS se procede a definir el tamaño de los elementos del sistema malla de diferencias finitas, la cual se estableció en celdas cuadradas de 10 m x 10m.
3. Se delimitó la zona de estudio de la cuenca de la quebrada, en la cual se prevé que puedan extenderse los flujos de lodos.
4. Se interpolaron las elevaciones del DEM al sistema de malla de diferencias finitas.
5. Se ingresaron las condiciones de bordes aguas arriba y aguas abajo.
6. Se ingresaron los parámetros de flujo (n de Manning, gravedad específica, parámetros para estimar esfuerzos cortantes y viscosidad).
7. Se corrió el modelo.

7.8.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para verificar la credibilidad del modelo en lo referente a la simulación de flujos de lodos, se debe hacer la calibración tomando como referencia alturas de depositación de avalanchas.

De acuerdo con lo consultado, no existen registros de altura de depositación de avalanchas ocurridas en el pasado en la cuenca de la quebrada La Chapa. Sin embargo, durante la visita realizada en la zona, se logró identificar algunas evidencias de alturas de depositación de la última gran avalancha ocurrida en quebrada (06 de diciembre de 2011), tal como se observa en las fotografías No.13 y No.14 del registro fotográfico de la Tabla No. 18.

Siguiendo el procedimiento del numeral 7.5.4, propuesto por Mayorga, se logró determinar que probablemente la lluvia crítica acumulada que desencadenó ese evento fue de 35 días, y el periodo de retorno fue de 10 años.

Con los datos de alturas de depositación y periodo de retorno de la avalancha, se hizo la calibración del modelo. En la Figura No. 34 se presenta una imagen de la modelación en FLO 2D y en la Figura No. 35 se presenta una imagen de la altura de depositación final.

Figura No. 34 - Modelación del evento del 06 de diciembre de 2011 para verificar calibración (Elaborado con FLO 2D)

Figura No. 35 - Altura de depositación final del evento del 06 de diciembre de 2011 para verificar calibración (Elaborado con FLO 2D)

Los puntos en los cuales se verificaron las alturas de depositación son denominados en la Figura No. 35 como PUNTO 1 y PUNTO 2. Las alturas observadas en campo fueron y 1.2 metros y 1.5 metros respectivamente. Los resultados de la modelación del evento arrojan como resultado 1.3 y 1.6 respectivamente. Por lo tanto, el modelo predice con un buen grado de credibilidad el evento del 06 de diciembre de 2011.

7.8.4 RESULTADOS DEL MODELO

Se modelaron flujos de lodos para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años. Los resultados se observan en la Figura No. 36, Figura No. 37, Figura No. 38, Figura No. 39, Figura No. 40, Figura No. 41, Figura No. 42 y Figura No. 43.

Figura No. 36 - Altura de depositación final para el periodo de retorno de 5 años (Elaborado con FLO2D)

Figura No. 37- Presión de impacto del flujo para el periodo de retorno de 5 años (Elaborado con FLO2D)

Figura No. 38 - Altura de depositación final para el periodo de retorno de 10 años (Elaborado con FLO2D)

Figura No. 39 - Presión de impacto del flujo para el periodo de retorno de 10 años (Elaborado con FLO2D)

Figura No. 40 - Altura de depositación final para el periodo de retorno de 25 años (Elaborado con FLO2D)

Figura No. 41 - Presión de impacto del flujo para el periodo de retorno de 25 años (Elaborado con FLO2D)

Figura No. 42 - Altura de depositación final para el periodo de retorno de 50 años (Elaborado con FLO2D)

Figura No. 43 - Presión de impacto del flujo para el periodo de retorno de 50 años (Elaborado con FLO2D)

7.9 ZONIFICACION DE LA AMENAZA EN EL AREA RURAL Y URBANA

La zonificación de la Amenaza en el área urbana y rural del municipio de Paz de Río se realizó utilizando el postprocesador “Mapper”, el cual hace parte del software FLO 2D y que permite hacer la clasificación del grado de Amenaza tomando como referencia los valores de presión y altura de depositación que se presentaron en la Tabla No. 7 del numeral 5.1.9.

Los resultados se presentan en el Plano No. 8, Plano No. 9, Plano No. 10 y Plano No. 11.

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

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

PLANO No.8
MAPA DE AMENAZA EN EL ÁREA RURAL Y URBANA POR FLUJOS DE LODOS Tr= 5 AÑOS

ESCALA: 10.000

ELABORÓ:	REVISÓ:	APROBÓ:
ING. JORGE UPARELA	ING. MANUEL GARCÍA	ING. MANUEL GARCÍA

Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna

DEFINICION DE LA INTENSIDAD DE FLUJOS DE LODOS O DETRITOS

Intensidad del evento	Máxima profundidad (m)		Producto de máxima profundidad h (m) y la máxima velocidad v (m^2/s)
Alta	h>1.0 m	O	v*h >1.0 m^2/s
Media	0.2 m <h<1.0 m	Y	0.2 m^2/s <v*h<1.0 m^2/s
Baja	0.2 m <h<1.0 m	Y	v*h <0.2 m^2/s

Fuente: (R. García et al., 2003)

Amenaza

- Baja
- Media
- Alta

Leyenda cartográfica

- Drenaje primario
- Drenaje secundario
- Curvas de nivel
- Cuenca La Chapa
- Área construida

DEFINICION DE LA INTENSIDAD DE FLUJOS DE LODOS O DETRITOS

Intensidad del evento	Máxima profundidad (m)		Producto de máxima profundidad h (m) y la máxima velocidad v (m^2/s)
Alta	h>1.0 m	O	v*h >1.0 m^2/s
Media	0.2 m <h<1.0 m	Y	0.2 m^2/s <v*h<1.0 m^2/s
Baja	0.2 m <h<1.0 m	Y	v*h <0.2 m^2/s

Fuente: (R. García et al., 2003)

DEFINICION DE LA INTENSIDAD DE FLUJOS DE LODOS O DETRITOS

Intensidad del evento	Máxima profundidad (m)		Producto de máxima profundidad h (m) y la máxima velocidad v (m^2/s)
Alta	h>1.0 m	O	$v^*h > 1.0\ m^2/s$
Media	0.2 m <h<1.0 m	Y	$0.2\ m^2/s < v^*h < 1.0\ m^2/s$
Baja	0.2 m <h<1.0 m	Y	$v^*h < 0.2\ m^2/s$

Fuente: (R. Garcia et al., 2003)

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.11
MAPA DE AMENAZA EN EL ÁREA RURAL Y URBANA POR FLUJOS DE LODO
Tr= 50 AÑOS
ESCALA: 10.000
ELABORÓ: ING. JORGE UPARELA
REVISÓ: ING. MANUEL GARCÍA
APROBÓ: ING. MANUEL GARCÍA
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
Km
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1
RIO CHICAMOCHA
N
S
E
W
1147000
1147500
1148000
1148500
1149000
1149500
1154500
1154000
1153500
1153000
1152500
1152000
1151500
1151000
1150500
DEFINICION DE LA INTENSIDAD DE FLUJOS DE LODOS O DETRITOS
Intensidad del evento | Máxima profundidad (m) | | Producto de máxima profundidad h (m) y la máxima velocidad v (m²/s)
Alta | h>1.0 m | O | v*h >1.0 m²/s
Media | 0.2 m <h<1.0 m | Y | 0.2 m²/s <v*h<1.0 m²/s
Baja | 0.2 m <h<1.0 m | Y | v*h <0.2 m²/s
Fuente: (R. García et al., 2003)
Amenaza
Baja
Media
Alta
Leyenda cartográfica
Drenaje primario
Drenaje secundario
Curvas de nivel
Cuenca La Chapa
Área construida

7.10 ANALISIS DE LA VULNERABILIDAD

7.10.1 INVENTARIO DE VIVIENDAS

Se realizó dentro del estudio, un inventario de viviendas para la evaluación de la vulnerabilidad, mediante visita de campo, utilizando Google Street View y complementando con el inventario realizado por Chaparro (2005). La información que se obtuvo del inventario fue: número de pisos, sistema estructural y abertura de fachada. Todos tendientes a establecer la exposición y la resistencia de las construcciones y la capacidad de reacción de los habitantes en caso de presentarse alguna avalancha.

El Inventario se realizó en las viviendas ubicadas en la zona de amenaza alta (de acuerdo con el Decreto 1807 de 2015). Finalmente, el inventario total fue de 17 edificaciones, tanto en el área rural (Vereda La Chapa), como en zonas semi – urbanas (Barrio Santa Teresa – Socha, Barrio Libertador – Tasco) las cuales ocupan las áreas de mayor percepción de riesgo. Según el inventario realizado, la mayoría de las viviendas son de uno y dos pisos siendo el sistema estructural predominante el de mampostería simple. En la Tabla No. 42 se presentan las características de las viviendas.

Tabla No. 42 – Características de las viviendas en zona de Amenaza Alta

Unidad	No. De pisos	Tipo de ventanas	Sistema estructural
1	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
2	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
3	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
4	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
5	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
6	Uno	De seguridad	Mampostería no reforzada
7	Uno	De seguridad	Mampostería no reforzada
8	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
9	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
10	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
11	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
12	Dos	De seguridad	Mampostería estructural
13	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
14	Uno	Sin protección	Mampostería no reforzada
15	Uno	De seguridad	Mampostería no reforzada
16	Uno	De seguridad	Mampostería no reforzada
17	Dos	De seguridad	Mampostería estructural

Fuente: Elaboración propia y adaptado de Chaparro (2005)

7.10.2 VULNERABILIDAD FÍSICA

Se aplicó la metodología expuesta en el 5.2 para determinar el grado de vulnerabilidad de las viviendas localizadas en la zona de Amenaza Alta. Los cálculos y resultados se presentan en la Tabla No. 43, Tabla No. 44, Tabla No. 45 y Tabla No. 46.

Tabla No. 43 – Categorización de la vulnerabilidad para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 5 años)

Unidad	FP	FF	FSE	IR	h (m)	P (kPa)	IE	IVF	Categoría
1	0.50	0.33	0.60	0.53	0.35	5.78	0.29	0.29	Media
3	0.50	0.33	0.60	0.53	0.25	1.39	0.03	0.02	Baja
4	0.50	0.33	0.60	0.53	0.25	94.48	1.00	1.00	Alta
6	0.50	0.66	0.60	0.59	0.34	24.64	1.00	1.00	Alta
7	0.50	0.66	0.60	0.59	0.50	8.82	1.00	1.00	Alta
9	0.50	0.33	0.60	0.53	0.28	8.00	1.00	1.00	Alta
15	0.50	0.66	0.60	0.59	0.25	4.00	0.12	0.09	Baja

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 44 - Categorización de la vulnerabilidad para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 10 años)

Unidad	FP	FF	FSE	IR	h (m)	P (kPa)	IE	IVF	Categoría
1	0.50	0.33	0.60	0.53	0.40	7.50	1.00	1.00	Alta
3	0.50	0.33	0.60	0.53	0.28	1.66	0.04	0.03	Baja
4	0.50	0.33	0.60	0.53	0.34	57.00	1.00	1.00	Alta
6	0.50	0.66	0.60	0.59	0.44	27.36	1.00	1.00	Alta
7	0.50	0.66	0.60	0.59	0.56	10.60	1.00	1.00	Alta
9	0.50	0.33	0.60	0.53	0.33	11.00	1.00	1.00	Alta
10	0.50	0.33	0.60	0.53	0.47	4.30	0.34	0.34	Media
11	0.50	0.33	0.60	0.53	0.19	0.00	0.00	0.00	Baja
14	0.50	0.33	0.60	0.53	0.19	0.02	0.00	0.00	Baja
15	0.50	0.66	0.60	0.59	0.47	5.00	0.39	0.36	Media
16	0.50	0.66	0.60	0.63	0.42	25.00	1.00	1.00	Alta

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 45 - Categorización de la vulnerabilidad para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 25 años)

Unidad	FP	FF	FSE	IR	h (m)	P (kPa)	IE	IVF	Categoría
1	0.50	0.33	0.60	0.53	0.43	7.50	1.00	1.00	Alta
3	0.50	0.33	0.60	0.53	0.33	1.66	0.06	0.04	Baja
4	0.50	0.33	0.60	0.53	0.38	57.00	1.00	1.00	Alta
6	0.50	0.66	0.60	0.59	0.63	29.00	1.00	1.00	Alta
7	0.50	0.66	0.60	0.59	0.63	10.60	1.00	1.00	Alta
9	0.50	0.33	0.60	0.53	0.45	17.00	1.00	1.00	Alta
10	0.50	0.33	0.60	0.53	0.58	5.00	0.51	0.53	Alta
11	0.50	0.33	0.60	0.53	0.19	0.00	0.00	0.00	Baja
14	0.50	0.33	0.60	0.53	0.19	0.02	0.00	0.00	Baja
15	0.50	0.66	0.60	0.59	0.47	6.00	0.45	0.43	Alta
16	0.50	0.66	0.60	0.63	0.48	25.00	1.00	1.00	Alta

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 46 - Categorización de la vulnerabilidad para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 50 años)

Unidad	FP	FF	FSE	IR	h (m)	P (kPa)	IE	IVF	Categoría
1	0.50	0.33	0.60	0.53	0.47	10.50	1.00	1.00	Alta
2	0.50	0.33	0.60	0.53	0.19	0.02	0.00	0.00	Baja
3	0.50	0.33	0.60	0.53	0.45	1.66	0.09	0.07	Baja
4	0.50	0.33	0.60	0.53	0.63	129.00	1.00	1.00	Alta
5	0.50	0.33	0.60	0.53	0.28	1.50	0.04	0.03	Baja
6	0.50	0.66	0.60	0.59	1.30	31.00	1.00	1.00	Alta
7	0.50	0.66	0.60	0.59	0.95	12.37	1.00	1.00	Alta
8	0.50	0.33	0.60	0.53	0.28	2.02	0.06	0.05	Baja
9	0.50	0.33	0.60	0.53	0.47	32.00	0.74	1.00	Alta
10	0.50	0.33	0.60	0.53	0.79	6.40	0.83	0.86	Alta
11	0.50	0.33	0.60	0.53	0.19	0.02	0.00	0.00	Baja
12	1.00	0.66	0.85	0.84	0.09	3.20	0.02	0.00	Baja
13	0.50	0.33	0.60	0.53	0.93	7.60	1.00	1.00	Alta
14	0.50	0.33	0.60	0.53	0.46	6.90	1.00	1.00	Alta
15	0.50	0.66	0.60	0.59	1.20	25.70	1.00	1.00	Alta
16	0.50	0.66	0.66	0.63	1.10	28.00	1.00	1.00	Alta
17	1.00	0.66	0.85	0.84	0.80	15.00	1.00	1.00	Alta

Fuente: Elaboración propia

Donde:

Unidad = Identificación de la vivienda.

FP = Factor asignado según el número de pisos de la vivienda (Ver la Tabla No. 8).

FF = Factor asignado según la abertura de la fachada de la vivienda (Ver la Tabla No. 9).

FSE = Factor asignado según el sistema estructural de la vivienda (Ver la Tabla No. 10).

IR = Índice de Resistencia obtenido con la Ecuación *38*.

h y P= Valores de altura de depositación y presión de impacto de flujo respectivamente obtenidos del software FLO 2D.

IE = Índice de Exposición obtenido con la Ecuación *44* y Ecuación 45.

IVF = Índice de Vulnerabilidad Física obtenido con la Ecuación 46.

La Categoría se definió según la Tabla No. 11.

También se elaboró un plano de Vulnerabilidad Física para el periodo de retorno de 50 años. Solo se elaboró un plano ya que, dada la baja densidad de viviendas en la cuenca de la quebrada, no se logra apreciar muy bien la categorización (Ver el Plano No. 12).

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.12
MAPA DE VULNERABILIDAD FÍSICA DE VIVIENDAS Tr= 50 AÑOS
ESCALA: 10.000
ELABORÓ: ING. JORGE UPARELA
REVISÓ: ING. MANUEL GARCÍA
APROBÓ: ING. MANUEL GARCÍA
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
Km
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1
N
S
E
W
RIO CHICAMOCHA
1147000
1147500
1148000
1148500
1149000
1149500
1154500
1154000
1153500
1153000
1152500
1152000
1151500
1151000
1150500
Vulnerabilidad
Baja
Media
Alta
Leyenda cartográfica
Drenaje primario
Drenaje secundario
Curvas de nivel
Cuenca La Chapa

7.11 ANÁLISIS DEL RIESGO

El cálculo del riesgo se hizo utilizando la Ecuación 47, asumiendo una vida útil de las viviendas de 50 años. En la Tabla No. 47, Tabla No. 48, Tabla No. 49 y Tabla No. 50 se presentan los resultados y en el Plano No. 13 se presenta la categorización del riesgo para un periodo de retorno de 50 años.

Tabla No. 47 - Categorización del riesgo para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 5 años)

Unidad	IVF	H	R	Categoría
1	0.29	0.999986	0.285	Media
3	0.02	0.999986	0.020	Baja
4	1.00	0.999986	1.000	Alta
6	1.00	0.999986	1.000	Alta
7	1.00	0.999986	1.000	Alta
9	1.00	0.999986	1.000	Alta
15	0.09	0.999986	0.088	Baja

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 48 - Categorización del riesgo para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 10 años)

Unidad	IVF	H	R	Categoría
1	1.00	0.99485	0.995	Alta
3	0.03	0.99485	0.033	Baja
4	1.00	0.99485	0.995	Alta
6	1.00	0.99485	0.995	Alta
7	1.00	0.99485	0.995	Alta
9	1.00	0.99485	0.995	Alta
10	0.34	0.99485	0.339	Media
11	0.00	0.99485	0.000	Baja
14	0.00	0.99485	0.000	Baja
15	0.36	0.99485	0.357	Media
16	1.00	0.99485	0.995	Alta

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 49 - Categorización del riesgo para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 25 años)

Unidad	IVF	H	R	Categoría
1	1.00	0.8701	0.870	Alta
3	0.04	0.8701	0.039	Baja
4	1.00	0.8701	0.870	Alta
6	1.00	0.8701	0.870	Alta
7	1.00	0.8701	0.870	Alta
9	1.00	0.8701	0.870	Alta
10	0.53	0.8701	0.463	Media
11	0.00	0.8701	0.000	Baja
14	0.00	0.8701	0.000	Baja
15	0.43	0.8701	0.372	Media
16	1.00	0.8701	0.870	Alta

Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 50 - Categorización del riesgo para las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta (Tr = 50 años)

Unidad	IVF	H	R	Categoría
1	1.00	0.64	0.636	Alta
2	0.00	0.64	0.000	Baja
3	0.07	0.64	0.047	Baja
4	1.00	0.64	0.636	Alta
5	0.03	0.64	0.018	Baja
6	1.00	0.64	0.636	Alta
7	1.00	0.64	0.636	Alta
8	0.05	0.64	0.030	Baja
9	1.00	0.64	0.636	Alta
10	0.86	0.64	0.549	Media
11	0.00	0.64	0.000	Baja
12	0.00	0.64	0.002	Baja
13	1.00	0.64	0.636	Alta
14	1.00	0.64	0.636	Alta
15	1.00	0.64	0.636	Alta
16	1.00	0.64	0.636	Alta
17	1.00	0.64	0.636	Alta

Fuente: Elaboración propia

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PLANO No.13
MAPA DE RIESGO POR FLUJOS DE LODO
Tr= 50 AÑOS
ESCALA: 10.000
ELABORÓ: ING. JORGE UPARELA
REVISÓ: ING. MANUEL GARCÍA
APROBÓ: ING. MANUEL GARCÍA
Sistema de referencia: Magna Sirgas Colombia Bogotá
Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1.000.000
Falso Norte: 1.000.000
Meridiano Central: -74.07750791666666
Factor de escala: 1.0
Datum: Magna
Km
0 0.125 0.25 0.5 0.75 1
N
S
E
W
RIO CHICAMOCHA
1147000
1147500
1148000
1148500
1149000
1149500
1154500
1154000
1153500
1153000
1152500
1152000
1151500
1151000
1150500
Riesgo
Bajo
Medio
Alto
Leyenda cartográfica
Drenaje primario
Drenaje secundario
Curvas de nivel
Cuenca La Chapa

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 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 utiliza 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, siendo los movimientos en masa más frecuentes 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: El mapa geológico o litológico evidencia que los movimientos en masa más frecuentes se presentan en los depósitos coluviales del Cuaternario. La razón es que éstos 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 unidad geomorfológica II_a, nomenclatura asociada al relieve ondulado que se describe como 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, tal 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.

Finalmente, se concluye, de acuerdo con los resultados del método de Relación de Frecuencias, que la inestabilidad de las laderas en la cuenca de la Quebrada La Chapa está asociado a la presencia de coluviones en la mayor parte de la cuenca y a la escasa cobertura vegetal en algunas zonas.

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

Para la evaluación de 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 2 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 abrupto de la pendiente de la gráfica (Ver la Figura No. 20 y la Figura No. 21) se logra evidenciar la lluvia que detonó ambos eventos.

El análisis realizado para los 2 eventos históricos permite concluir que ambos se produjeron en una temporada de intensas lluvias (entre octubre y diciembre) y que los deslizamientos se detonaron probablemente por lluvias acumuladas entre 30 y 45 días de duración.

8.3 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.

8.4 Amenaza del casco rural y urbano

La amenaza en el casco 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. Para 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 ha sido utilizado en numerosas investigaciones y ha sido aceptado como válido por la comunidad científica.

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), Barrio Santa Teresa y Barrio Libertador (área urbana).

Anteriormente existían mayor cantidad de viviendas en zona de Amenaza Alta. Pero muchas de ellas fueron abandonadas ante el peligro 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.

8.5 Análisis de la vulnerabilidad

El grado de afectación que puedan sufrir las viviendas ubicadas en la zona de Amenaza Alta se realiza a través del análisis de vulnerabilidad física, la cual depende de la calidad de las edificaciones y su grado de exposición.

En total fueron 17 viviendas localizadas en la zona de Amenaza Alta y a las cuales se les hizo un inventario para poder evaluar la vulnerabilidad.

Se realizó el análisis de vulnerabilidad para los periodos de retorno de 5, 10 y 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.

8.6 Calculo 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 y 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.

9 CONCLUSIONES

9.1 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 perdidas económicas millonarias. Se considera necesario incrementar y profundizar las investigaciones suficientes que permitan predecir mejor el comportamiento de los flujos, y lograr 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 realizar 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 realizar una revisión bibliográfica de estudios de riesgo a nivel 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 permitirá 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 Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual es una de las características destacadas de la metodología. Los SIG's 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. Además, se puede realizar operaciones matemáticas con los mapas cuyos resultados pueden ser analizados de una forma rápida, racional y fácilmente inteligible para el usuario, permitiendo así una evaluación ágil y sencilla.

- Para la modelación de flujos de lodos 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.

9.2 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 presenta una gran cantidad de 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 períodos 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 (Ver el Punto A de la Fotografía No.10, Tabla No. 18).

- 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, como puede verse en las Fotografía No.1 a 3 de la Tabla No. 18.

- El material del deslizamiento de Mesa Alta está formado por arcilla arenosas, que envuelven bloques de arenisca de diferentes tamaños. Al movilizarse los flujos por el canal de la quebrada, este se engrosa 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 logró identificar 3 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.

De acuerdo con 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 (Paramo 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 realizar el Mapa de Amenaza para los movimientos en masa que se presentan en toda el área de la cuenca.

- El Mapa de Amenaza del casco rural y urbano permite concluir que no son muchas viviendas las que se encuentran en el grado de Amenaza Alta. Esto se debe a que muchas viviendas que se ubicaron en esa zona durante mucho tiempo, fueron desalojadas 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, en este caso las viviendas, se obtuvieron valores altos de riesgo para la mayoría de las viviendas.

10 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 levantamiento topográfico con curvas de nivel cada 5 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, deber ser utilizado 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.

11 BIBLIOGRAFÍA

Aparicio, F. (1992). Relaciones lluvia-escurrimiento. En *Fundamentos de hidrología de superficie* (pp. 203-237). México, D.F: Limusa. Recuperado a partir de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf

ASALE, R.-. (s. f.). Definición de riesgo. Recuperado 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.

Brunsden, D. (1984). Mudslides. En *Slope Instability* (p. 620). Chichester: John Willey & 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)*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba. Recuperado a partir de http://www.famaf.unc.edu.ar/wp-content/uploads/2014/04/16-Gulich-Cardoso.pdf

Castellanos, R. (1996). *Lluvias críticas en la evaluación de amenaza de eventos de remoción en masa*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Chaparro, O. (2005). *Evaluación de riesgo por flujos de lodo en la Quebrada La Chapa, municipio de Tasco y Socha (Boyacá).* Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada* (Mc Graw 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=es#v=onepage&q&f=false

Contreras, S. (2007, marzo). *Avalúo de edificaciones y construcciones*. Universidad Nacional Experimental de losLlanos Occidentales Ezequiel Zamora ‘’UNELLEZ’’, Guanare.

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 23). Recuperado 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

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

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, Manuel. (1998). *Manual de estabilidad de taludes* (INVIAS). Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito.

García, Marcelo. (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 en Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Dabos, 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* (No. 222-12). Bogotá.

Introducción | Instituto Geográfico Nacional de Argentina. (2016, diciembre 23). Recuperado 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 Willey & Sons.

Languen. (2010, junio 7). ¿Qué es un SIG? Recuperado 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*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Lavell, A. (2001). Sobre la gestión del riesgo : Apuntes hacia una definición. Recuperado 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 del Río Boyacá, Colombia a través de sistemas de información geográfica*. Universidad Nacional de Córdoba, Bogotá.

López, J., González, M., & Scaini, A. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de 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., Drempetic, 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. En *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., & Gonzalez, A. (2001). Evaluación de la acción del hombre en los estudios de amenaza y riesgo por deslizamiento en Bogotá-Colombia. Presentado en III Simposio Panamericano de Deslizamientos, Bogotá.

Ministerio de Viviendo, 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 municial 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 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*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Nuñez, R., & Giraldo, M. (2012). Conceptos Generales sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Contexto del País. En *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, Jim, & 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 degeodinámica 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*. Universidad de los Andes, Bogotá. 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.alcaldiabogota.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*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

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

Rodriguez, 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.

Súarez, 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.

Súarez, 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-zonas-tropicales.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*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

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 18 de mayo de 2017, a partir de http://www.vanguardia.com/historico/26659-los-10-desastres-naturales-que-marcaron-alpais

12 ANEXOS

ANEXO No.1 ENSAYOS DE LABORATORIO

	ENSAYOS DE HUMEDAD NATURAL Y CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA		
	CÓDIGO: FO-EDA-27	**VERSIÓN:** 3.0	**FECHA:** 31.05.2016

PROYECTO N°: Tesis Jorge Uparela - Avalancha Qda. La Chapa
FECHA: 10 de mayo de 2017
ORDENADOR POR: Ing. Manuel García
ELABORADO POR: Henry Vargas

CALCULADO POR: Cristian Zapata
Balanza N° 217
Horno N° 2

PERFORACIÓN	Petrecol - -P1					
MUESTRA N°	1					
PROFUNDIDAD	Superficial					
RECIPIENTE N°	9					
P1: Muestra Húmeda + recipiente (gr)	1150.5					
P2a: Muestra Seca + recipiente (gr)	1038.3					
P2b: Muestra Seca + recipiente (gr)						
Diferencia: ((P2a - P2b)/P2a)*100 <0.1%						
P3: Recipiente (gr)	65.4					
P4: Muestra calcinada + recipiente (gr)	1026.9					
Humedad Wn (%)	**11.5**					
Materia Orgánica (%)	**1.2**					
PERFORACIÓN						
MUESTRA N°						
PROFUNDIDAD						
RECIPIENTE N°						
P1: Muestra Húmeda + recipiente (gr)						
P2a: Muestra Seca + recipiente (gr)						
P2b: Muestra Seca + recipiente (gr)						
Diferencia: ((P2a - P2b)/P2a)*100 <0.1%						
P3: Recipiente (gr)						
P4: Muestra calcinada + recipiente (gr)						
Humedad Wn (%)						
Materia Orgánica (%)						
PERFORACIÓN						
MUESTRA N°						
PROFUNDIDAD						
RECIPIENTE N°						
P1: Muestra Húmeda + recipiente (gr)						
P2a: Muestra Seca + recipiente (gr)						
P2b: Muestra Seca + recipiente (gr)						
Diferencia: ((P2a - P2b)/P2a)*100 <0.1%						
P3: Recipiente (gr)						
P4: Muestra calcinada + recipiente (gr)						
Humedad Wn (%)						
Materia Orgánica (%)						

$$Wn\ (\%) = \frac{(P1-P2)*100.}{(P2-P3)} \qquad MO\ (\%) = \frac{(P2-P4)*100}{(P2-P3)}$$

OBSERVACIONES:

	ENSAYOS DE PESO UNITARIO TOTAL (MUESTRA PARAFINADA)		
	CÓDIGO: FO-EDA-28	**VERSIÓN:** 3.0	**FECHA:** 31.05.2016

PROYECTO N° Tesis Jorge Uparela - Avalancha Qda. La Chapa BALANZA N°: 324
FECHA: 10 de mayo de 2017
ORDENADO POR: Ing. Manuel García
ELABORADO POR: Henry Vargas
CALCULADO POR: Cristian Zapata

PERFORACIÓN	-				
MUESTRA N°	1				
PROFUNDIDAD	Superficial				
Pc: Peso de la cuerda (gr.)	8.13				
Pa: Peso inicial de la muestra (gr.)	63.6				
Ppa: peso muestra parafinada en el aire (gr.)	68.4				
Pps + Pc: Peso muestra parafinada sumergida + peso de la cuerda(gr.)	41.47				
Pps: Peso muestra parafinada sumergida (gr.)	33.34				
ɤt: Peso Unitario Total (gr / cm3)	**2.14**				
PERFORACIÓN					
MUESTRA N°					
PROFUNDIDAD					
Pc: Peso de la cuerda (gr.)					
Pa: Peso inicial de la muestra (gr.)					
Ppa: peso muestra parafinada en el aire (gr.)					
de la cuerda(gr.)					
Pps: Peso muestra parafinada sumergida (gr.)					
ɤt: Peso Unitario Total (gr / cm3)					
PERFORACIÓN					
MUESTRA N°					
PROFUNDIDAD					
Pc: Peso de la cuerda (gr.)					
Pa: Peso inicial de la muestra (gr.)					
Ppa: peso muestra parafinada en el aire (gr.)					
de la cuerda(gr.)					
Pps: Peso muestra parafinada sumergida (gr.)					
ɤt: Peso Unitario Total (gr / cm3)					

$$\gamma t = \frac{Pa}{\dfrac{-Pps + Ppa}{0.9} - Ppa - Pa}$$

OBSERVACIONES:

DETERMINACION DEL INDICE DE PLASTICIDAD Y CLASIFICACION DE SUELOS

PROYECTO: **Tesis Joge Uparela - Avalancha Qda. La Chapa**

PERFORACION	-	**MUESTRA**	1			
	Límite líquido				Límite plástico	
Recipiente	8	50	27	31	E	M
No. Golpes	36	26	19	15		
P1	23.42	24.00	20.48	20.57	17.87	19.30
P2	21.51	21.91	18.77	18.83	16.95	18.39
P3	10.00	10.37	9.81	10.20	8.27	9.99
Wn (%)	16.6	18.1	19.1	20.2	10.6	10.8

LL	**18**
LP	**11**
IP	**7**
USC	**CL**
R^2	0.9988

	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO		
	CÓDIGO: FO-EDA-30	**VERSIÓN:** 3.0	**FECHA:** 31.05.2016

N° TRABAJO	-	NOMBRE:	Tesis Jorge Uparela		FECHA: 15/05/17
PERFORACIÓN:	-	MUESTRA:	1	PROFUNDIDAD (m):	Superficial
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:		Limo arenoso color café claro, humedad media a alta, presencia de raíces y materia orgánica con			
fragmentos subredondeados y subangulares de roca, entre las cuales se observan areniscas, lutittas y limolitas.					
ENSAYADO POR:	Henry Vargas	CALCULADO POR:	Cristian Zapata	GRAFICADO POR:	Cristian Zapata

	MUESTRA LAVADA EN TAMIZ N° 200
RECIPIENTE N°	9.0
PESO SUELO SECO SIN LAVAR + RECIPIENTE (P1)	1026.9
PESO SUELO SECO LAVADO + RECIPIENTE (P2)	772.7
PESO RECIPIENTE (P3)	65.4
PESO SUELO SECO (P2 - P3)	707.3

TAMIZ N°	ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	PESO DEL TAMIZ (Wtmz) gr	PESO DEL TAMIZ MAS SUELO RETENIDO (WR) gr	PESO DEL SUELO RETENIDO (WR-WTMZ) gr	PORCENTAJE RETENIDO %R	PORCENTAJE QUE PASA %P
Recipiente 51		32.9				
1"	25.00		83.8	50.9	5.30	94.70
3/4"	19.00		68.8	35.9	3.74	90.96
1/2"	12.50		69.5	36.6	3.81	87.15
3/8"	9.50		58.4	25.5	2.65	84.50
4	4.75		77.1	44.2	4.60	79.90
10	2.00		92.5	59.6	6.20	73.69
20	0.850		93.9	61.0	6.35	67.34
40	0.425		129.5	96.6	10.06	57.29
60	0.250		167.7	134.8	14.03	43.25
100	0.150		141.9	109.0	11.35	31.91
140	0.106		64.0	31.1	3.24	28.67
200	0.075		48.0	15.1	1.57	27.10
Fondo			39.0	6.1	0.64	26.46
Lavado				254.20		

WLT200 =	$\sum_{I=1}^{N} WR = \Delta wt$
WR=	(Dwt/WLT200)WR
%R=	(WR / wt) x 100
%P=	100- %R

wt =	Peso total de la muestra seca
WLT200	Peso suelo seco lavado sobre tamiz 200
WR =	Peso total de suelo retenido
Δwt =	Diferencia entre el peso total de la muetra seca y la sumatoria de pesos retenidos
ΔWR =	Incremento de peso que se debe sumar al peso retenido en cada tamiz
%R	% Retenido
%P	% que pasa

Curva Granulométrica
% que pasa
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
100.00
10.00
1.00
0.10
0.01
Diámetro (mm)

ANEXO No.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN CON EL SOFTWARE FLO 2D

SUMARY_Tr=5 AÑOS
NEGATIVE VOLUME CONSERVATION (CUBIC METERS)
INDICATES EXCESS VOLUME (OUTFLOW + STORAGE > INFLOW)

SIMULATION TIME (HOURS)	AVERAGE TIMESTEP (SECONDS)	VOLUME CONSERVATION (CU METERS)	PERCENT OF INFLOW
0.084	5.238	0.000000	0.000000
0.166	5.681	0.000000	0.000000
0.249	6.068	0.000000	0.000000
0.332	4.899	0.000000	0.000000
0.415	1.119	-0.000000	0.000000
0.498	0.683	0.000000	0.000000
0.581	0.490	-0.000000	0.000000
0.664	0.428	-0.000000	0.000000
0.747	0.350	-0.000000	0.000000
0.830	0.375	-0.000000	0.000000
0.913	0.453	0.000000	0.000000
0.996	0.581	-0.000000	0.000000
1.079	0.753	-0.000000	0.000000
1.162	0.797	-0.000000	0.000000
1.245	0.863	-0.000000	0.000000
1.328	0.927	-0.000000	0.000000
1.411	1.007	-0.000000	0.000000
1.494	1.062	-0.000000	0.000000
1.577	1.185	-0.000000	0.000000

SUMMARY.OUT FILE
Pro Model - Build No. 16.06.16

==========

MASS BALANCE INFLOW - OUTFLOW VOLUME

==========

*** INFLOW (CU METERS) ***

	WATER	BULKED W/SEDIMENT
SURFACE WATER INFLOW HYDROGRAPH	179287.472	226884.174

==========

*** SURFACE OUTFLOW (CU METERS) ***

OVERLAND FLOW	WATER	BULKED W/SEDIMENT
FLOODPLAIN STORAGE	23978.357	23978.350
FLOODPLAIN OUTFLOW HYDROGRAPH	202905.817	202905.817
FLOODPLAIN OUTFLOW AND STORAGE	226884.172	226884.167
TOL FLOODPLAIN STORAGE	16216.393	
TOTAL SURFACE OUTFLOW AND STORAGE	226884.172	

==========

*** TOTALS ***

TOTAL OUTFLOW FROM GRID SYSTEM	202905.817	202905.817
TOTAL VOLUME OF OUTFLOW AND STORAGE	226884.172	226884.167

SURFACE AREA OF INUNDATION REGARDLESS OF THE TIME OF OCCURRENCE:
(FOR FLOW DEPTHS GREATER THAN THE "TOL" VALUE TYPICALLY 0.1 FT OR 0.03 M)

THE MAXIMUM INUNDATED AREA IS: 537800.000 SQ. METERS

THE MAXIMUM INUNDATED AREA (DEPTH > 0.15 M) IS: 274300.000 SQ. METERS

==========
==========

COMPUTER RUN TIME IS : 0.03174 HRS

THIS OUTPUT FILE WAS TERMINATED ON: 5/15/2017 AT: 5:41:49

SUMARY_Tr= 10 AÑOS
NEGATIVE VOLUME CONSERVATION (CUBIC METERS)
INDICATES EXCESS VOLUME (OUTFLOW + STORAGE > INFLOW)

SIMULATION TIME (HOURS)	AVERAGE TIMESTEP (SECONDS)	VOLUME CONSERVATION (CU METERS)	PERCENT OF INFLOW
0.084	5.238	0.000000	0.000000
0.166	5.681	0.000000	0.000000
0.249	4.651	0.000000	0.000000
0.332	1.429	0.000000	0.000000
0.415	0.887	0.000000	0.000000
0.498	0.605	0.000000	0.000000
0.581	0.480	0.000000	0.000000
0.664	0.329	0.000000	0.000000
0.747	0.299	0.000000	0.000000
0.830	0.337	-0.000000	0.000000
0.913	0.412	-0.000000	0.000000
0.996	0.516	-0.000000	0.000000
1.079	0.693	0.000000	0.000000
1.162	0.795	0.000000	0.000000
1.245	0.834	0.000000	0.000000
1.328	0.908	-0.000000	0.000000
1.411	1.005	-0.000000	0.000000
1.494	1.097	-0.000000	0.000000
1.577	1.243	-0.000000	0.000000

SUMMARY.OUT FILE
Pro Model - Build No. 16.06.16

==========

MASS BALANCE INFLOW - OUTFLOW VOLUME

==========

*** INFLOW (CU METERS) ***

	WATER	BULKED W/SEDIMENT
SURFACE WATER INFLOW HYDROGRAPH	251393.771	321647.274
	---	---

==========

*** SURFACE OUTFLOW (CU METERS) ***

OVERLAND FLOW	WATER	BULKED W/SEDIMENT
FLOODPLAIN STORAGE	24844.066	24844.041
FLOODPLAIN OUTFLOW HYDROGRAPH	296803.207	296803.207
	---	---
FLOODPLAIN OUTFLOW AND STORAGE	321647.281	321647.248
TOL FLOODPLAIN STORAGE	17620.646	
TOTAL SURFACE OUTFLOW AND STORAGE	321647.281	

==========

*** TOTALS ***

TOTAL OUTFLOW FROM GRID SYSTEM	296803.207	296803.207
TOTAL VOLUME OF OUTFLOW AND STORAGE	321647.281	321647.248

SURFACE AREA OF INUNDATION REGARDLESS OF THE TIME OF OCCURRENCE:
(FOR FLOW DEPTHS GREATER THAN THE "TOL" VALUE TYPICALLY 0.1 FT OR 0.03 M)

THE MAXIMUM INUNDATED AREA IS: 584600.000 SQ. METERS

THE MAXIMUM INUNDATED AREA (DEPTH > 0.15 M) IS: 296700.000 SQ. METERS

==========
==========

COMPUTER RUN TIME IS : 0.03613 HRS

THIS OUTPUT FILE WAS TERMINATED ON: 5/15/2017 AT: 10:26:27

SUMARY_Tr= 25 AÑOS
NEGATIVE VOLUME CONSERVATION (CUBIC METERS)
INDICATES EXCESS VOLUME (OUTFLOW + STORAGE > INFLOW)

SIMULATION TIME (HOURS)	AVERAGE TIMESTEP (SECONDS)	VOLUME CONSERVATION (CU METERS)	PERCENT OF INFLOW
0.084	5.238	0.000000	0.000000
0.166	5.681	0.000000	0.000000
0.249	6.068	0.000000	0.000000
0.332	2.201	-0.000000	0.000000
0.415	0.755	0.000000	0.000000
0.498	0.477	0.000000	0.000000
0.581	0.339	0.000000	0.000000
0.664	0.233	0.000000	0.000000
0.747	0.224	0.000000	0.000000
0.830	0.266	0.000000	0.000000
0.913	0.348	0.000000	0.000000
0.996	0.455	0.000000	0.000000
1.079	0.606	0.000000	0.000000
1.162	0.766	0.000000	0.000000
1.245	0.809	0.000000	0.000000
1.328	0.878	0.000000	0.000000
1.411	0.944	0.000000	0.000000
1.494	1.018	0.000000	0.000000
1.577	1.093	0.000000	0.000000

SUMMARY.OUT FILE
Pro Model - Build No. 16.06.16

==========

MASS BALANCE INFLOW - OUTFLOW VOLUME

==========

*** INFLOW (CU METERS) ***

	WATER	BULKED W/SEDIMENT
SURFACE WATER INFLOW HYDROGRAPH	395642.164	508977.427

==========

*** SURFACE OUTFLOW (CU METERS) ***

OVERLAND FLOW	WATER	BULKED W/SEDIMENT
FLOODPLAIN STORAGE	27032.616	27032.588
FLOODPLAIN OUTFLOW HYDROGRAPH	481944.812	481944.812
FLOODPLAIN OUTFLOW AND STORAGE	508977.438	508977.399
TOL FLOODPLAIN STORAGE	18384.117	
TOTAL SURFACE OUTFLOW AND STORAGE	508977.438	

==========

*** TOTALS ***

TOTAL OUTFLOW FROM GRID SYSTEM	481944.812	481944.812
TOTAL VOLUME OF OUTFLOW AND STORAGE	508977.438	508977.399

SURFACE AREA OF INUNDATION REGARDLESS OF THE TIME OF OCCURRENCE:
(FOR FLOW DEPTHS GREATER THAN THE "TOL" VALUE TYPICALLY 0.1 FT OR 0.03 M)

THE MAXIMUM INUNDATED AREA IS: 610100.000 SQ. METERS

THE MAXIMUM INUNDATED AREA (DEPTH > 0.15 M) IS: 353300.000 SQ. METERS

==========
==========

COMPUTER RUN TIME IS : 0.04272 HRS

THIS OUTPUT FILE WAS TERMINATED ON: 5/15/2017 AT: 11:22:27

SUMARY_Tr= 50 AÑOS
NEGATIVE VOLUME CONSERVATION (CUBIC METERS)
INDICATES EXCESS VOLUME (OUTFLOW + STORAGE > INFLOW)

SIMULATION TIME (HOURS)	AVERAGE TIMESTEP (SECONDS)	VOLUME CONSERVATION (CU METERS)	PERCENT OF INFLOW
0.084	5.238	0.000000	0.000000
0.166	5.575	0.000000	0.000000
0.249	1.284	0.000000	0.000000
0.332	0.639	-0.000000	0.000000
0.415	0.470	-0.000000	0.000000
0.498	0.408	-0.000000	0.000000
0.581	0.302	0.000000	0.000000
0.664	0.210	0.000000	0.000000
0.747	0.210	0.000000	0.000000
0.830	0.241	0.000000	0.000000
0.913	0.326	0.000000	0.000000
0.996	0.429	0.000000	0.000000
1.079	0.566	0.000000	0.000000
1.162	0.743	0.000000	0.000000
1.245	0.796	0.000000	0.000000
1.328	0.861	0.000000	0.000000
1.411	0.929	0.000000	0.000000
1.494	1.007	0.000000	0.000000
1.577	1.072	0.000000	0.000000

SUMMARY.OUT FILE
Pro Model - Build No. 16.06.16

==========

MASS BALANCE INFLOW - OUTFLOW VOLUME

==========

*** INFLOW (CU METERS) ***

	WATER	BULKED W/SEDIMENT
SURFACE WATER INFLOW HYDROGRAPH	495479.713	644586.372
	---	---

==========

*** SURFACE OUTFLOW (CU METERS) ***

OVERLAND FLOW	WATER	BULKED W/SEDIMENT
FLOODPLAIN STORAGE	27807.809	27807.816
FLOODPLAIN OUTFLOW HYDROGRAPH	616778.562	616778.562
	---	---
FLOODPLAIN OUTFLOW AND STORAGE	644586.375	644586.379
TOL FLOODPLAIN STORAGE	18833.801	
TOTAL SURFACE OUTFLOW AND STORAGE	644586.375	

==========

*** TOTALS ***

TOTAL OUTFLOW FROM GRID SYSTEM	616778.562	616778.562
TOTAL VOLUME OF OUTFLOW AND STORAGE	644586.375	644586.379

SURFACE AREA OF INUNDATION REGARDLESS OF THE TIME OF OCCURRENCE:
(FOR FLOW DEPTHS GREATER THAN THE "TOL" VALUE TYPICALLY 0.1 FT OR 0.03 M)

THE MAXIMUM INUNDATED AREA IS: 626200.000 SQ. METERS

THE MAXIMUM INUNDATED AREA (DEPTH > 0.15 M) IS: 372800.000 SQ. METERS

==========
==========

COMPUTER RUN TIME IS : 0.05005 HRS

THIS OUTPUT FILE WAS TERMINATED ON: 5/15/2017 AT: 11:55: 9