

Creación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa aplicando el método estadístico bivariado y su implementación en la generación de eventos de avenidas torrenciales en la cuenca del río Playonero, departamento de Santander.

Escala 1:25.000.

Fabián Andrés Ave Flórez

**Trabajo de grado para optar por el título de
Geólogo**

Director

**Jorge Leonardo Camargo Daza
Ms. C Geofísica**

Co-director:

**Joaquín Andrés Valencia Ortiz
Ms. C Geología Ambiental**

**Universidad industrial de Santander
Facultad de ingeniería físico-química
Escuela de geología
Bucaramanga
2017**

Dedicatoria

A mi familia que me ha brindado un apoyo incondicional en cada uno de los momentos más importantes de mi vida, e hicieron posible todo esto.

A mis padres Graciela Flórez y Salvador Ave, a mis hermanos Camilo y Juliana, que son el motor que rigen mi vida y la razón para alcanzar todos mis sueños y metas.

Agradecimientos

A Dios, infinitas gracias por poner en mi camino este gran proyecto y por colmarme de sabiduría para la realización del mismo.

A mis padres Graciela Flórez y Salvador Ave, y a mis hermanos Camilo y Juliana por su apoyo incondicional.

Agradezco a la universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología por haberme acogido en sus aulas académicas, donde me fomentó la investigación y los conocimientos científicos.

A los directores Jorge L. Camargo y Joaquín A. Valencia por su compromiso, sus conocimientos, su exigencia y por ser una guía para ser de este un excelente proyecto.

A todos mis amigos y compañeros que durante el curso de la carrera me acompañaron, me brindaron apoyo y conocimiento.

Agradezco al fondo CORRIGAN de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, por el financiamiento que me proporcionaron para el desarrollo de este trabajo de investigación.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo General.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
4. JUSTIFICACIÓN	14
5. LOCALIZACIÓN.....	14
6. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1 Movimientos en Masa	17
7.2 Método Estadístico Bivariado	19
7.3 Avenidas Torrenciales	19
7.3.1 Características generales de las avenidas torrenciales	20
7.3.2 Mecanismos de formación de avenidas torrenciales	21
7.4 Método Racional.....	22
7.5 Distribución de Gumbel.....	23
8. METODOLOGIA	24
8.1 Recopilación bibliográfica y análisis de información	24
8.2 Delimitación de la Cuenca.....	25
8.3 Generación del Mapa de Susceptibilidad	26
8.3.1 Geología	26
8.3.2 Geomorfología	27
8.4 Mapa de Susceptibilidad.....	33
8.5 Generación del Mapa de Amenaza por Avenidas Torrenciales.....	33
8.5.1 Procesamiento en HEC- GeoRAS.....	35
8.5.2 Simulación en HEC-RAS.....	36
9. RESULTADOS.....	37
9.1 Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa.....	37
9.1.1 Susceptibilidad Muy Baja	39
9.1.2 Susceptibilidad Baja.....	39
9.1.3 Susceptibilidad Moderada	40

9.1.4	Susceptibilidad Alta	40
9.1.5	Susceptibilidad Muy Alta	41
9.2	Relación de Movimientos en Masa y las Avenidas Torrenciales	41
9.3	Modelo Avenidas torrenciales	43
10.	CONCLUSIONES	45
11.	RECOMENDACIONES	47
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Tabla de datos pluviométricos para la cuenca del rio Playonero IDEAM, 2017.	I
ANEXO B. Tabla de variables geológicas y geomorfológicas ponderadas.	III
ANEXO C. Tabla caudales calculados para cada uno de los años que se tuvo registro, en cada subcuenca definida.	IX
ANEXO D. Datos de Isóbatas e Isótacas para cada escenario evaluado.	XI

RESUMEN

TITULO: CREACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA APLICANDO EL MÉTODO ESTADÍSTICO BIVARIADO Y SU IMPLEMENTACIÓN EN LA GENERACIÓN DE EVENTOS DE AVENIDAS TORRENCIALES EN LA CUENCA DEL RIO PLAYONERO, DEPARTAMENTO DE SANTANDER. ESCALA 1:25.000.

AUTOR: FABIÁN ANDRÉS AVE FLÓREZ

PALABRAS CLAVE: Movimientos en Masa, Susceptibilidad, Método Estadístico Bivariado, Avenidas Torrenciales, Periodo de Retorno, Amenaza, Rio Playonero.

DESCRIPCIÓN

La cuenca del rio Playonero se encuentra ubicada en la provincia de Soto, departamento de Santander. Esta cuenca presenta características geológicas, geomorfológicas y pluviométricas, además de, registros históricos de la eventualidad de movimientos en masa y avenidas torrenciales, los cuales han causado efectos catastróficos en las actividades socioeconómicas y humanas de la región. Esta investigación contribuye al control y prevención de los desastres ocasionados por estos fenómenos, donde se generó el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para la cuenca del rio Playonero a escala 1:25.000, aplicando el método estadístico bivariado, evaluando las variables de geología y geomorfología. El mapa de susceptibilidad se clasifico en cinco rangos, siendo la susceptibilidad baja la que mayor área ocupa con un 36% del área total. Con la cartografía de la susceptibilidad realizada, se establecieron diez zonas críticas a la ocurrencia de movimientos en masa, donde se consideraron las regiones con susceptibilidad alta y muy alta, que estén en cercanías a los cauces. Su relación con las avenidas torrenciales se manifiesta por la acción de la obstaculización del cauce (Diques), que crean zonas de restricción del flujo, produciendo una acumulación momentánea del cauce, el cual al llegar a su punto crítico rompe la superficie manifestando una avenida torrencial. Además, se modelaron varios periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años) con los caudales obtenidos por el método racional y la distribución de Gumbel. El máximo de inundación (isóbata) que se obtuvo es de 6.07 m con una velocidad (isótaca) de 7.46 m/s^2 , afectando un 30.30% del área del municipio del Playón. Los resultados obtenidos, se toman como aporte para la realización de futuros estudios, que permitan un mejoramiento en la planeación y ejecución de proyectos de infraestructura y desarrollo local.

ABSTRACT

TITLE: CREATION OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAP APPLYING THE BIVARIATE STATISTICAL METHOD AND IMPLEMENTING IT IN EVENTS OF GENERATION OF TORRENTIAL FLOODS IN THE PLAYONERO RIVER BASIN, SANTANDER DEPARTMENT. SCALE 1: 25,000.

Author: Fabián Andrés Ave Flórez

Key Words: Landslides, Susceptibility, Bivariate Statistical Method, Torroential Floods, Return Period, Hazard, Playonero River.

Descripción:

The Playonero river basin is located in the province of Soto, placed in the department of Santander. Playonero river basin has geological, geomorphological and pluviometric characteristics, it also has historical records of landslides eventualities and torrential floods which have caused negative effects in the region related to the socio economic and human activities. This research contributes to control and prevent disasters caused by these phenomena, a map of susceptibility of landslides has been developed for the Playonero river basin at 1:25.000 scale applying the bivariate statistical method, evaluating geological variables and the geomorphology. The susceptibility map was classified into five ranges, where the lowest susceptibility is the largest area with 36% of the whole area. Ten areas were established as critical to the occurrence of landslides by the mapping of susceptibility that was made, we take into consideration regions with high and very high susceptibility that were near to the channels. The relation with torrential floods is manifested by the obstructions of the channels (Dykes), which create zones without flow, that produces a momentary accumulation in the channel until a critical point where it breaks the surface causing a torrential flood. Additionally, several return periods (2, 5, 10, 25, 50, 100 and 500 years) were modeled with the flows obtained by the rotational method and the Gumbel distribution. The maximum flooding (isobata) obtained was 6.07 m with speed (isotaca) od 7.46 m / s, affecting 30.30% of the area in the municipality of Playón. The results obtained are taken as input for the development of future studies to allow an improvement in the planning and execution of infrastructure and local development projects.

1. Introducción

Históricamente los fenómenos naturales como los movimientos en masa y las avenidas torrenciales han sido fenómenos muy destructivos a los que la humanidad se ha enfrentado. Casi todas las grandes civilizaciones han crecido asentándose en zonas potencialmente inundables, ya que la cercanía a un gran río las dotaba de grandes ventajas (Días de la Cruz, 2012). Estas zonas inundables pueden permanecer varios años sin sufrir este fenómeno ya que dependen de los periodos de recurrencia de las crecientes máximas (Flórez & Suavita, 1997). Sin embargo, la tendencia actual de migraciones de población de las zonas rurales a urbanas ha generado un constante crecimiento de las ciudades. Este progresivo aumento de la densidad de población, genera un panorama crítico en el uso de servicios, originando el aumento de asentamientos humanos en tierras costeras, a lo largo de laderas inestables, zonas inundables y en sectores propensos al riesgo (González J. , 2014).

El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). La ocurrencia de estos es el producto de las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas. El efecto de procesos geodinámicos, ambientales, de usos de la tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad ha traído consigo un aumento de los factores de inestabilidad en las laderas ((PMA:GCA), 2007). Según la Corporación OSSO & Universidad EAFIT en un estudio realizado en el (2011), muestra que de las 190 mil unidades residenciales destruidas por desastres en el país, durante el periodo comprendido entre 1970 y 2011, los deslizamientos fueron responsables de la destrucción de casi 18 mil unidades. Este fenómeno afectó gran parte del sector agropecuario, originando grandes pérdidas económicas y daños en la infraestructura (vías y puentes). Un ejemplo claro de este fenómeno de movimientos en masa fue el presentado en San Cayetano, el 12 de mayo de 1999, donde se generó un movimiento en masa tipo reptación causando la evacuación y reubicación de la totalidad de la población del casco urbano (IDEAM, 2000).

En contraste, las avenidas torrenciales son una amenaza natural muy común y posiblemente la menos estudiada en Colombia (INGEOMINAS, 1996). Tienen una ocurrencia relativamente baja, pero cuando se presentan genera un gran potencial destructivo, además son, de particular interés

para la evaluación de los riesgos naturales a los que se encuentra sometida una determinada cuenca (Montoya et al., 2009). Este fenómeno es responsable de pérdidas humanas, económicas y sociales. Solamente entre 1985 y 1995, más de 40 avenidas torrenciales altamente destructivas ocurrieron en el país, con más de 200 pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños a viviendas, infraestructura y cultivos (INGEOMINAS, 1996).

Un ejemplo de esto, es la avenida torrencial del río Tapartó (Antioquia) ocurría en 1993, la cual dejó 120 muertos, 320 damnificados y más de 1.000 millones de pesos en pérdidas (Piedrahita & Hermelin, 2005). Otro evento de gran magnitud que se presentó fue la ruptura del Canal del Dique (diciembre 17 de 2010), que afectó a los pobladores y zonas cultivables en cercanías al canal, provocando desbordamiento de las ciénagas El Totumo y El Guájaro, y a los municipios de Luruaco y Repelón, en el Atlántico (Cepal & BID, 2012). También se tiene el registro del evento ocurrido el 25 de noviembre de 1979, en el municipio del Playón, Santander, el cual cobró la vida de más de 400 personas, y dejó cuantiosos daños materiales (Vanguardia-Liberal, 1979).

Estas condiciones de movimientos en masa y avenidas torrenciales para la cuenca del río Playonero se evalúan mediante modelos de simulación matemática y proyecciones en diferentes periodos de retorno a partir de diferentes bases de datos, obteniendo una cartografía de susceptibilidad por movimientos en masa y un modelo de avenidas torrenciales que se correlacionan de forma indirecta. La susceptibilidad se evalúa mediante el método estadístico bivariado, a partir de las características geológicas y geomorfológicas presentes en la zona de estudio. El evento de avenidas torrenciales está condicionado a los datos de precipitación. La relación de los datos de precipitación para la zona de estudio ha manifestado una influencia con los eventos de movimientos en masa tipo deslizamiento los cuales pueden obstaculizar los cauces generando diques momentáneos que al romper genera un evento de avenida torrencial.

Con los datos obtenidos de las condiciones de precipitación que aumentan los caudales y que ocasionan el desbordamiento de río Playonero, se generará el mapa de amenaza por avenidas torrenciales mediante la aplicación del programa HEC-RAS 5.0 y su extensión en ArcGIS 10.1 (HEC- GeoRAS), la cual permite elaborar y determinar diferentes escenarios (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años) para este fenómeno.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Generar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa aplicando el método estadístico bivariado, a escala 1:25.000 y su implementación en la generación de avenidas torrenciales en la cuenca del Rio Playonero, Departamento de Santander.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los atributos y sus variables en la temática geológica, geomorfológica, climática y de usos del suelo responsables en la ocurrencia de deslizamientos y avenidas torrenciales para la cuenca del Rio Playonero.
- Realizar el inventario de movimientos en masa para la cuenca del rio Playonero, a partir movimientos en masa registrados en el SIMMA y los cartografiados en la campaña de campo.
- Generar el mapa de susceptibilidad a Movimientos en Masa, bajo una estructura SIG y modelado a partir del método estadístico Bivariado.
- Obtener los parámetros morfométricos de la cuenca del rio Playonero a partir del procesamiento digital de datos en ArcGIS 10.1.
- Obtener los caudales máximos para el rio Playonero en cada uno de los periodos de retorno a evaluar (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años) a partir de los métodos Racional y Gumbel.
- Generar el mapa de amenaza por avenidas torrenciales para la cuenca del rio Playonero, mediante el programa HEC-RAS 5.0.

3. Planteamiento del problema

La suma de las condiciones geológicas, geomorfológicas y climatológicas en Colombia han influido en la ocurrencia de eventos de movimientos en masa y avenidas torrenciales, que se presentan últimamente con mayor frecuencia, ejemplo claro de esta situación se refleja en la ola invernal que se presentó en el país durante septiembre de 2010 y mayo de 2011 (Cepal 2012).

Eventos ocurridos como el deslizamiento de Villatina, el 27 de septiembre de 1987, en la ciudad de Medellín, generado por un movimiento súbito del material, que removió alrededor de 20.000 m³, causando la muerte de 500 personas y dejando 1700 damnificados y alrededor de 100 viviendas destruidas (García, 2005). Otro evento, es la avenida torrencial del río Tapartó (Antioquia) ocurrida en el año 1993, la cual dejó 120 muertos, 320 damnificados y más de 1.000 millones de pesos en pérdidas (Piedrahita & Hermelin, 2005). Estos fenómenos se correlacionan debido a que los eventos de movimientos en masa tienen gran influencia en los de avenidas torrenciales, ya que los deslizamientos pueden obstruir el cauce de los afluentes, un ejemplo de ello, es la avenida torrencial ocurrida en la cuenca del río Páez, el 6 de junio de 1994 (Wilches-Chaux, 2005).

En Santander esta problemática se evidencia en varios sectores del departamento, pero se toma en consideración la región del municipio del Playón por describir condiciones históricas, geográficas y geológicas propicias para generación de este tipo de fenómenos naturales. Con el conocimiento y evaluación de estos eventos se es necesario crear un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para determinar aquellas zonas más críticas donde se puedan presentar grandes deslizamientos, los cuales se correlacionen con posibles eventos de avenidas torrenciales para la cuenca del Río Playonero, ya que esta cuenca presenta un alto porcentaje de precipitación según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) lo que aumenta la posibilidad de movimientos en masa y aumentos en los caudales de sus vertientes principalmente en las épocas de invierno ocasionando innumerables avenidas torrenciales, como la ocurrida el 25 de Noviembre del año 1979. Debido a esto, se evaluaron estos fenómenos naturales, con el fin de identificar los factores causantes y con ello, modelar en diferentes escenarios dependiendo de la influencia climática en diferentes periodos de retorno, y de esta forma caracterizar y zonificar las áreas que puedan presentar una amenaza para la comunidad e infraestructura.

4. Justificación

Según la ley 1523 de 2012, por la cual, se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, menciona que es responsabilidad de todas las autoridades y de los habitantes del territorio colombiano la gestión del riesgo, como un proceso social para la reducción y manejo de desastres, con el propósito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida y el desarrollo sostenible del país. En el artículo 6 de esta ley, se establecen tres procesos importantes: conocimientos del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres.

Con este fin se desarrolla un análisis estadístico bivariado para la generación del mapa de susceptibilidad a movimiento en masa para la cuenca del río Playonero, donde cada factor cartográfico (e.j. geología, geomorfología), se relaciona con los movimientos en masa para determinar las zonas más susceptibles a estos eventos, los cuales se puedan relacionar con eventos de avenidas torrenciales. Entre las razones que existen para que este tipo de evento sea tan destructivo, está su naturaleza casi impredecible, la rapidez a la cual ocurre, su corta duración y su largo período de retorno, así como su distribución poco uniforme en el espacio y el tiempo (Montoya *et al.*, 2009). Teniendo en cuenta la información registrada, se evalúa la actividad de este fenómeno y así determinar la amenaza por avenidas torrenciales en la cuenca del río Playonero, para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años). La información generada a escala 1:25.000 servirá de base para futuros estudios detallados que servirán como parte de la planeación de proyectos de infraestructura, mitigación de riesgo y manejo de desastres generados a partir de eventos de inundación que afecten el desarrollo sostenible de la región y el país.

5. Localización

La cuenca del Río Playonero se ubica en municipio del Playón, en el flanco Occidental de la Cordillera Oriental, al Norte del departamento de Santander, en la provincia administrativa de planificación metropolitana (Fig. 1). La cuenca presenta un área de 282.65 Km², con un rango de altura desde 393 a 3095 m.s.n.m. La región presenta un régimen de precipitación bimodal, en los meses de Abril – Mayo y otro en Octubre – Noviembre. Presenta una temperatura media

multianual de 21 °C (IDEAM, 2017). Está constituida por 4 microcuencas (La Sardina, Rio Betania, La Negreña y La Naranjera), presenta una red de drenaje que incluye 564 tributarios caracterizados por ser estrechos y tener un alto gradiente longitudinal con patrón de drenaje sub-detrítico a sub-paralelo.

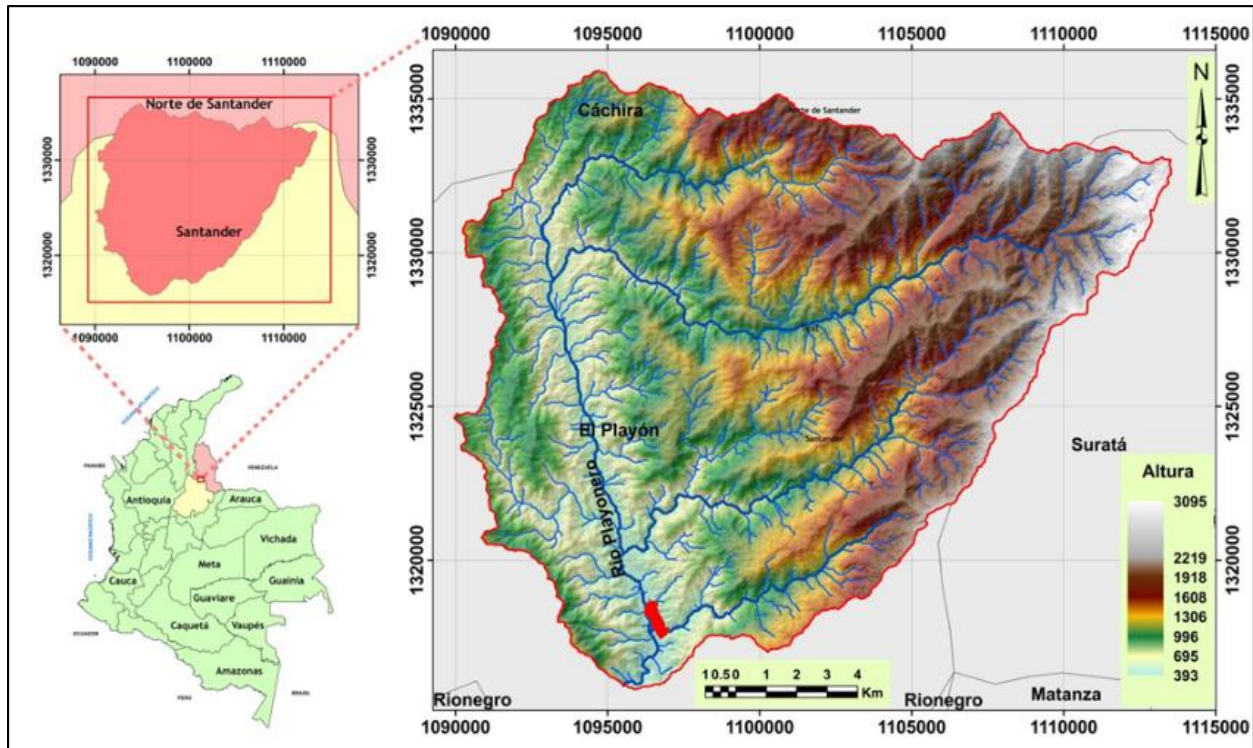


Figura 1. Mapa de localización de la Cuenca del Río Playonero.

6. Contexto geológico

La cuenca del río Playonero se encuentra ubicado en el Sistema Andino de Colombia, dentro de la Cordillera Oriental, enmarcada bajo la acción tectónica de las placas de Nazca, Caribe y Sur Americana, en la parte Norte de la Provincia Geotectónica del Macizo de Santander (Toussaint & Restrepo, 1976). Está constituida por materiales del protolito de corteza continental que posteriormente fueron metamorfizados e intruidos por magmas félsicos, acompañado de rocas sedimentarias del Jurásico inferior, donde posteriormente se presenta la depositación de los materiales del Cuaternario de origen aluvial y coluvial (Tabla 1). La tendencia estructural es compresional, produciendo una serie de fallas principalmente de tipo normal e inverso (Royero & Clavijo, 2001).

Tabla 1. Unidades Aflorantes en la zona.

UNIDADES LITOLÓGICAS			
Edad	Unidad	Autor	Descripción
Holoceno	Depósitos (Qal, Qc)	(Royer & Clavijo, 2001)	Depósitos no consolidados de origen, aluvial, coluviales, derrubios, glaciares y fluvioglaciares.
Pleistoceno	Depósitos (Qtf)	(Royer & Clavijo, 2001)	Depósitos no consolidados de origen aluviales en abanicos y terrazas.
Jurásico Inferior – Medio	Cuarzomonzonita del Batolito de Rionegro	(INGEOMINAS, 1973)	Cuarzomonzonita biotítica, de grano medio, equigranular a subporfirítica, rosada a gris claro, que consiste de un 5% de biotita negra y cantidades aproximadamente iguales de cuarzo gris, plagioclasa blanca y feldespato potásico rosado naranja a rosado pálido.
Jurásico Inferior	Formación Bocas	(Ward <i>et al.</i> , 1973)	Unidad constituida por alternancia de limolitas, areniscas y arcillolitas calcáreas, limolitas con nódulos calcáreos, conglomerados y arcillolitas fosilíferas, limolitas levemente calcáreas. En la parte superior capas delgadas de rocas volcánicas. Se depositó en un ambiente continental.
Cámbrico - Ordovícico	Formación Silgará	(Ward <i>et al.</i> , 1973)	Secuencia de rocas clásticas metamorfizadas de estratificación delgada, compuestas por filitas, cuarcitas, esquistos, metareniscas y menores cantidades de pizarra y filita calcárea.

El aspecto estructural de la cuenca es muy complejo y dinámico, debido a que encuentra en una zona de influencia, entre los límites de las placas tectónicas del Caribe y la suramericana, conocido como bloque Andes del Norte o bloque Norandino (Ganser, 1973). La cuenca se encuentra entre las provincias tectónicas del Macizo de Santander en el Bloque Ocaña y la de la Cordillera Oriental, de conformidad con el esquema tectónico, presentado por Clavijo, et al. (1993). El bloque de Ocaña se caracteriza tectónicamente por presentar un estilo estructural de fallamiento en bloques menores, separados por fallas inversas de dirección predominantemente SW-NE. La provincia cordillera oriental se caracteriza por pliegues anticlinales y sinclinales amplios, limitados por fallas inversas y de cabalgamiento, de direcciones NE y NW, con inclinación predominante hacia el oriente (Toussaint & Restrepo, 1976).

En la cuenca del río Playonero se encuentran las fallas, Bucaramanga-Santa Marta que es el rasgo estructural más evidente y de gran extensión que cruza la región centro-oriental del Departamento de Santander, en dirección aproximada N20°W. Es considerada un sistema de

fallas de rumbo (Royero & Clavijo, 2001) con movimiento sinestral, cuyo desplazamiento es calculado por Campell (1965), y Tschanz et al. (1969), en unos 100 a 110 km, como también una componente vertical importante (Julivert & Téllez 1963). Esta falla atraviesa la cuenca en sentido NW-SE, controlando el cauce del Rio Playonero y marcando el contacto entre las rocas ígneas y sedimentarias presentes en la cuenca. La falla del Rio Cáchira también se hace presente en la zona, el trazo de la falla se encuentra ubicado en su extremo occidental, es de tipo inverso con dirección NE-SW, en donde corta rocas del Jurásico. La falla Sardina es una falla definida que se encuentra en la parte norte de la cuenca, donde inicia el rio Playonero, esta controla el cauce de la quebrada que lleva el mismo nombre, presenta un lineamiento NE-SW y corta las rocas cuarzomonzoníticas.

7. Marco teórico

La construcción del modelo conceptual toma como base elementos definidos para la generación de una cartografía de susceptibilidad para movimientos en masa y la simulación de un modelo de avenidas torrenciales. Dentro de su finalidad estas temáticas muestran la predicción de las zonas críticas en la cuenca del rio Playonero y para su desarrollo se describen los parámetros teóricos aplicados para este estudio, donde se conceptualiza los movimientos en masa, el método estadístico bivariado y sus aplicaciones y las avenidas torrenciales (características y mecanismos).

7.1 Movimientos en Masa

El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como los deslizamientos puede desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Glade & Crozier, 2005). Varnes (1978) emplea como criterio principal para la clasificación, el tipo de movimiento y, en segundo lugar, el tipo de material. Así, divide los movimientos en masa en cinco tipos: caídas que son uno o varios bloques de suelo o roca que se desprenden de una ladera y su movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Fig. 2a), vuelcos que es la rotación de uno o varios

bloques de roca o suelo, alrededor de un punto y pueden ser lentos y graduales (Fig. 2b), deslizamientos que se presentan de dos tipos, los traslacionales que son cuando la masa se mueve a lo largo de una superficie plana, donde su velocidad puede variar desde rápida a extremadamente rápida (Fig. 2c) y los rotacionales donde la masa se mueve a lo largo de una superficie curva o cóncava, y pueden ocurrir lenta a rápidamente (Fig. 2d). Las propagaciones que son el desplazamiento lateral que ocurre por la deformación interna (expansión) del material, su movimiento es extremadamente lento (Fig. 2e), la reptación que se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla (Fig. 2f) y los flujos se evidencia de varias formas, como flujos de lodo flujos de tierra y flujos de detritos (Fig. 2g, h, i).

Los materiales se clasifican en dos clases: rocas y suelos, éstos últimos subdivididos en detritos y tierra. De esta manera, presenta definiciones para varias posibles combinaciones de tipo de movimiento y material.

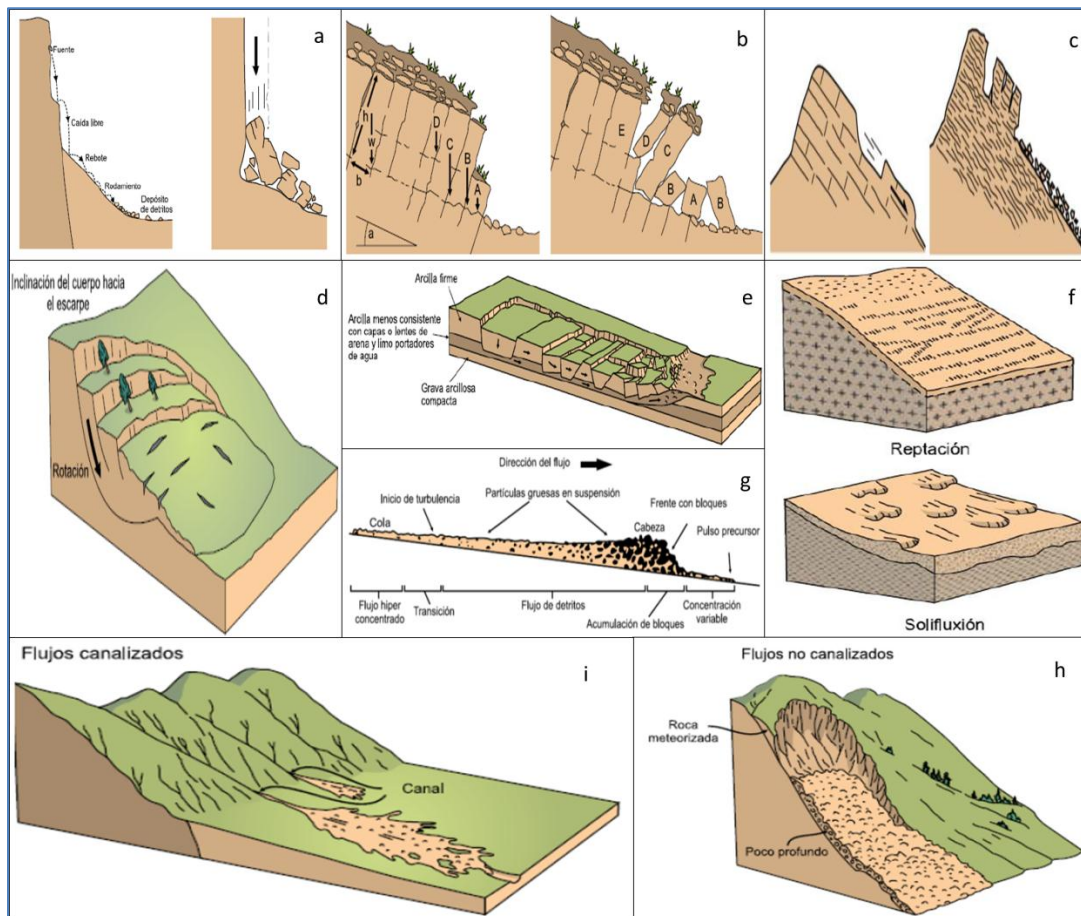


Figura 2. Tipos de movimientos en masa. **(a)** Caidas, **(b)** Vuelcos, **(c)** Traslacional, **(d)** Rotacional, **(e)** Propagación Lateral, **(f)** Reptación, **(g)** Flujo de Lodo, **(h)** Flujo de Tierra y **(i)** Flujo de Detritos. Modificado de (González M. , 2015).

7.2 Método Estadístico Bivariado

En el análisis estadístico bivariado cada factor cartografiado se combina con la distribución de los movimientos en masa y se calculan valores ponderados de densidades de movimientos en masa para cada clase. Este método asigna un valor de peso determinado W_i a cada clase del parámetro. Van Westen (1997), define el valor W_i como el logaritmo natural de la densidad de deslizamientos dentro de la clase, dividido por la densidad de deslizamientos de todo el mapa. Su función se expresa por la ecuación estadística para el cálculo de ponderación de cada una de las clases (Eq. 1).

$$W_i = \ln\left(\frac{Densclas}{Densmap}\right) = \ln\left[\frac{\frac{Npix(Si)}{Npix(Ni)}}{\frac{\sum Npix(Si)}{\sum Npix(Ni)}}\right] \quad (1)$$

Dónde, **Wi** es el peso asignado a la clase de una capa temática (factor condicionante), **Densclas** es la densidad del evento dentro de la clase temática, **Densmap** es la densidad del evento dentro de toda la capa temática (factor condicionante), **Npix (Si)** es el número de píxeles del evento en una clase temática determinada y **Npix (Ni)** es el número total de píxeles de una clase temática determinada temática.

7.3 Avenidas Torrenciales

Se puede definir una avenida torrencial como el aumento del caudal en un cauce con volúmenes excepcionales, en el cual, el fluido además de agua, contiene una mezcla de escombros compuesta por suelo, roca y material vegetal (Montoya *et al.*, 2009). Este fenómeno se da por la ocurrencia súbita de caudales pico de corta duración y gran velocidad, que transitan a lo largo de canales en cuencas hidrográficas de montaña, normalmente de tamaño reducido (USGS, 1984). Aunque la duración de estos eventos varía entre pocos minutos a varios días, su rápida manifestación y altas velocidades le confieren una alta peligrosidad debido a que no dan tiempo de reacción a las personas que se encuentran en el área de influencia del evento, generando así, situaciones desastrosas con pérdidas de vidas humanas y económicas (Piedrahita & Hermelin, 2005; Flórez & Suavita, 1997). Este fenómeno constituye una amenaza, que el Servicio Geológico Colombiano en el 2013 la define como un evento, fenómeno o actividad

humana que puede causar daño, pérdida de vidas, daños a la propiedad, interrupción de las actividades sociales y económicas o degradación ambiental.

Las principales causas de generación de las avenidas torrenciales son hidrometeorológicas (lluvias concentradas), sísmicas (enjambres de deslizamientos cosísmicos), de inestabilidad de vertientes (bloqueo de un cauce por un deslizamiento y posterior ruptura del dique), erupciones volcánicas, deshielo o por acumulación de capas gruesas de cenizas sueltas (Montoya *et al.*, 2009). A continuación, se presentan las características de las avenidas torrenciales y sus mecanismos de formación, conceptos descritos en el capítulo 5 del libro “Erosión en Masa - Flujos y Avalanchas” (Suárez, 2001).

7.3.1 Características generales de las avenidas torrenciales: En el caso de las avenidas torrenciales de materiales saturados, cuando las concentraciones de sedimentos exceden un cierto valor crítico, o la disponibilidad de agua disminuye la concentración, las propiedades del flujo cambian en forma significativa no solamente en cuanto a las características del flujo sino también en la forma como los sedimentos son transportados. Un flujo de detritos puede convertirse en flujo hiperconcentrado al disminuir la concentración de partículas sólidas o el flujo hiperconcentrado puede convertirse en flujo de detritos al aumentar la concentración (Suárez, 2001).

En un evento de avenida torrencial se pueden establecer tres etapas. La primera es la formación que ocurre cuando un evento anómalo como lluvias extraordinarias, sismos fuertes o deshielos rápidos generan procesos de deslizamiento o erosión, los cuales producen una concentración de sedimentos o partículas, la segunda etapa es el aumento en la velocidad del caudal originando el transporte de estas partículas a lo largo de los cauces estrechos y con altas pendientes y la tercera etapa cuando finaliza su velocidad por la pérdida de pendiente y aumento del ancho del canal, en las llanuras de inundación por depositar material transportado. También se toma en cuenta el movimiento de carga de fondo, el cual consiste en un movimiento de partículas muy gruesas en el fondo del cauce, empujadas por un Slurry que es un fluido con mayor peso específico y viscosidad que el agua limpia y de menor turbulencia que esta (Chien & Wan, 1999).

Otra particularidad que se tiene en cuenta en la evaluación de estos eventos, es el transporte de grandes bloques que son cuerpos de roca o material sólido que viajan encima del flujo, debido a fuerzas dispersivas e hidrodinámicas (Fig. 3a). La magnitud del caudal con el que se presenta este evento depende de los volúmenes de agua y sólidos disponibles para fluir y de la concentración de los sedimentos. Este caudal depende de tres factores (disponibilidad de agua, disponibilidad de partículas sólidas y la morfología y tamaño de la cuenca). El tamaño y distribución granulométrica de los sedimentos depende principalmente de las características geológicas de las áreas de aportes de materiales a los flujos y de las características morfológicas de las cuencas.

7.3.2 Mecanismos de formación de avenidas torrenciales: Existen varios procesos mecánicos que generan avenidas torrenciales, como las generadas por lluvias intensas, en donde ocasionan deslizamientos de tierra generalizados, ocasionados por los factores de permeabilidad del perfil de suelo, altas pendientes en las laderas, propiedades de la cuenca de drenaje, magnitud de la anomalía climática, intensidad de lluvia crítica, porcentaje de área denudada, profundidad de denudación e intensidad de sedimentos aportados al flujo (Fig. 3b). Cuando estos deslizamientos de tierra de gran magnitud alcanzan un cauce de agua o un canal de agua lluvias de alta pendiente, los materiales aportados por el deslizamiento pueden fluir por el cauce alcanzando velocidades importantes y avanzando distancias considerables o generar un **represamiento de cauces de agua**, la cual al desbordarse puede generar una avenida torrencial de grandes proporciones (Fig. 3c).

La ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud y poca profundidad de foco genera una gran cantidad de deslizamientos cosísmicos, los cuales pueden convertirse en avenidas torrenciales. Las erupciones explosivas magmáticas o freáticas de los volcanes causan avenidas torrenciales a veces acompañadas de flujos piroclásticos o explosiones laterales dirigidas. Las intrusiones magmáticas pueden deformar y fracturar las rocas que conforman el cono volcánico al empujar hacia arriba y hacia fuera, induciendo aumento de fuerzas cortantes y disminución de la resistencia al corte de la masa (García, 1986). El deshielo de nevados por acción de erupciones volcánicas puede generar avenidas de gran magnitud, debido a que la colada derrite con rapidez grandes volúmenes de nieve superficial, hielo y la rotura súbita de glaciares. La mezcla resultante de agua y piroclastos es conducida hacia las quebradas formando flujos, los cuales erodan

depósitos no consolidados en el manto de roca meteorizada y se transforman en flujos de lodo a pocos kilómetros de su fuente (Fig. 3d).

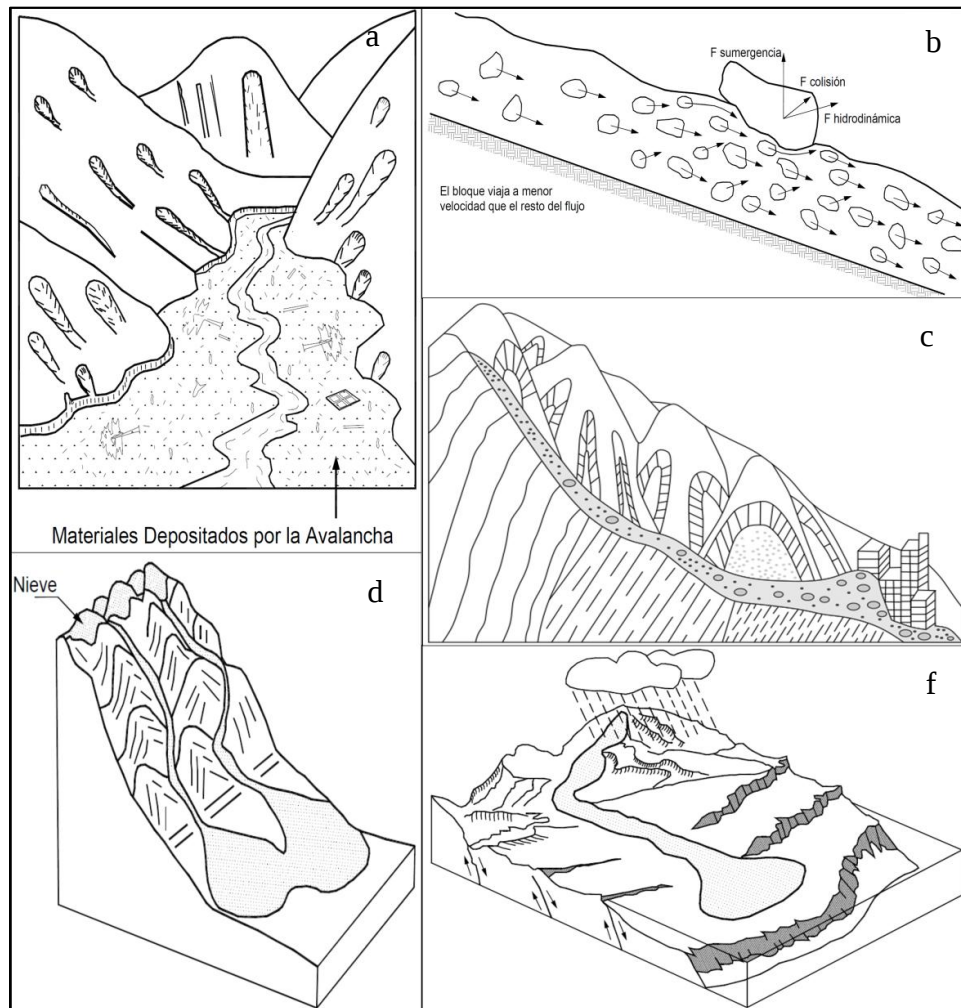


Figura 3. (a) Materiales depositados por un evento de avenida torrencial, (b) Transporte de grandes bloques sobre el fluido, (c) Esquema de una avalancha producida por un gran deslizamiento, (d) Esquema de avalanchas por deshielo de nevados, (e) Avalancha por deslizamientos múltiple. Tomado de (Suárez, 2001).

7.4 Método Racional

El método racional es una formula empírica muy sencilla, con la cual se puede aproximar una creciente sobre la base de una intensidad de lluvia promedio en milímetros por hora (Eq. 2), para una determinada frecuencia y por un tiempo igual al del tiempo de concentración de la corriente (Suárez, 2001). Recibe este nombre a la primera aproximación, la más sencilla, para evaluar el caudal que producirá una precipitación (Sánchez, 2016).

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6} \quad (2)$$

Dónde, **Q** es el caudal en (m³/seg), **C** es el coeficiente de escorrentía, **I** es la intensidad de precipitación (mm/hora) y **A** es el área de la cuenca en km². El parámetro de coeficiente de escorrentía se determinó a partir de los datos propuestos por Benítez en 1980 (Lemus & Navarro, 2003) (Tabla 2).

Tabla 2. Coeficientes de escorrentía

Cobertura del suelo	Tipo de Suelo	Pendiente (%)				
		>50	20 - 50	5 - 20	1 - 5	0 – 1
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.45	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

7.5 Distribución de Gumbel

La distribución de Gumbel se utiliza para modelar la distribución de valores extremos. Gumbel demostró que, si el número de caudales máximos anuales tienden al infinito, la probabilidad (P) de descarga es superada por un valor determinado (e), dada por la siguiente ecuación (Eq. 3), para un número infinito de elementos (DINT, 2005).

$$P = e^{-e^{-y}} \quad (3)$$

Dónde, **P** es la probabilidad de la ocurrencia de descargas mayores para un periodo de retorno establecido, **e** es la base de logaritmos neperianos y **y** es la variable reducida.

8. Metodología

Para la generación del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa y el mapa de amenaza por avenidas torrenciales para la cuenca del río Playonero, se emplearon variables cualitativas y cuantitativas. Estas variables se crearon a partir de una metodología, donde se describe las dos líneas de trabajo (Fig. 4).

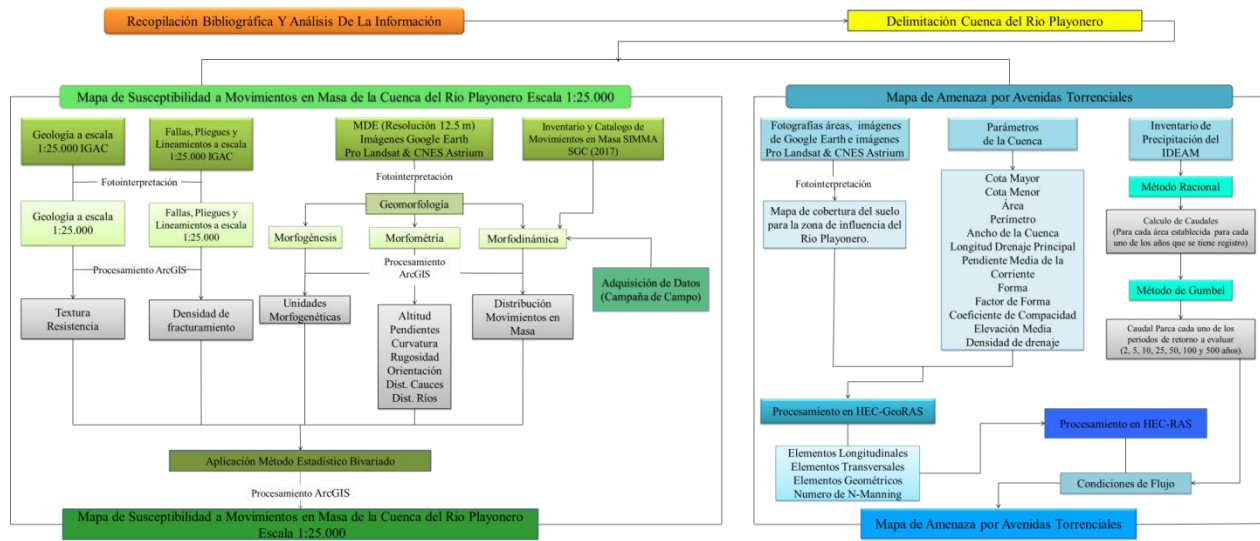


Figura 4. Esquema metodológico.

8.1 Recopilación bibliográfica y análisis de información

Se consultaron varias bases de datos dispuestas por la Universidad Industrial de Santander, donde se adquirió, recopiló y analizó información secundaria, para el área de estudio. Esta información toma en cuenta artículos nacionales e internacionales, proyectos de grado, bases de datos gubernamentales y el plan de ordenamiento para la cuenca del río Cachíra. De esta información se crea una línea de tiempo de eventos para la cuenca del río Playonero (Fig. 5).

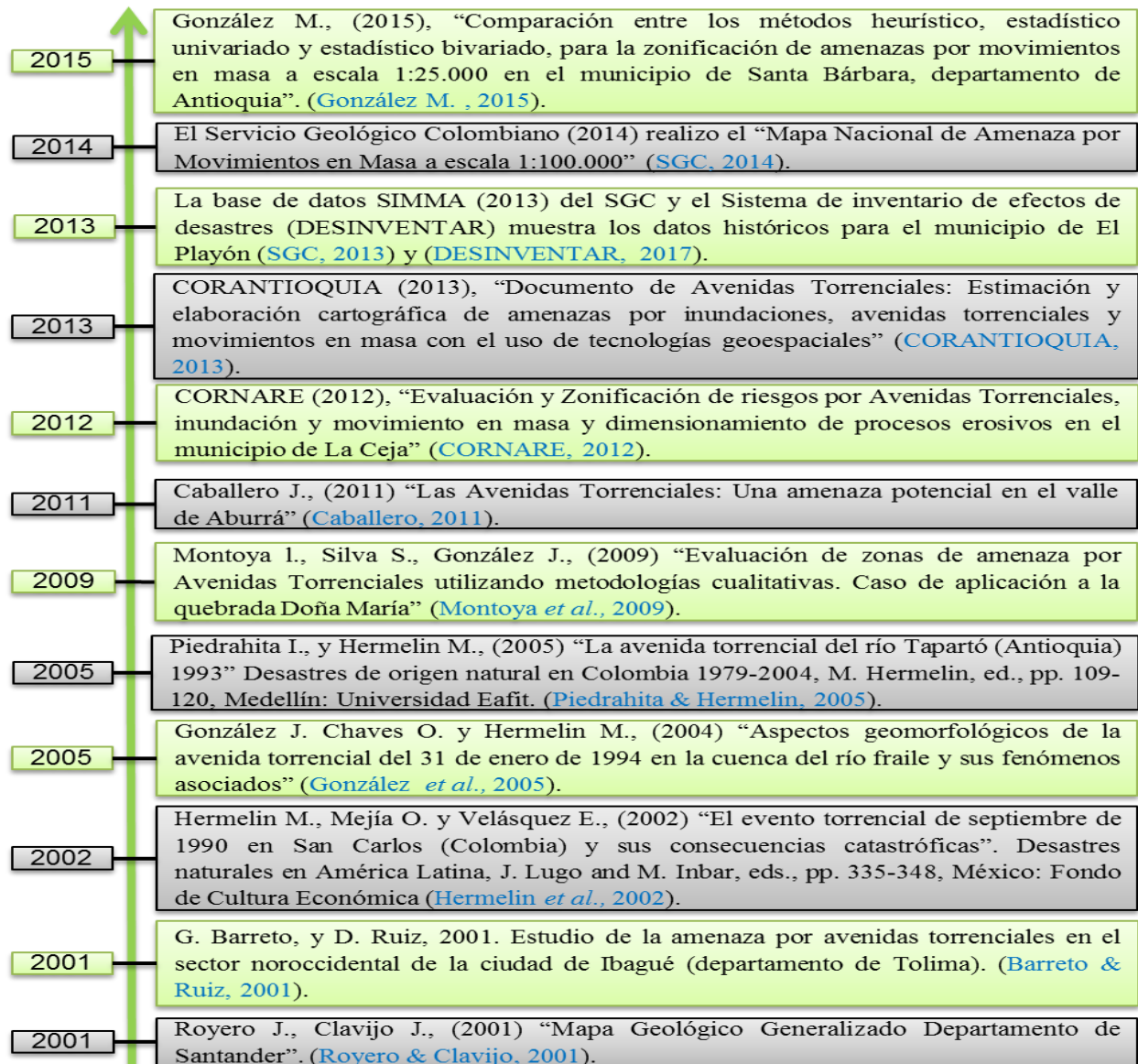


Figura 5. Línea de tiempo de estudios realizados.

8.2 Delimitación de la Cuenca

La delimitación y otros atributos son procesados por medio de un sistema de información geográfica (SIG) en el cual se procesa el modelo digital de elevación (MDE). El MDE se obtuvo de la base de datos ALOS PALSAR, este presenta una resolución de 12.5 m (ASF, 2017). Con el SIG utilizado (ArcGIS 10.1) y el MDE se procesaron las variables geológicas, geomorfológicas y los atributos morfométricos para la cuenca.

8.3 Generación del Mapa de Susceptibilidad

Para la generación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para la cuenca del río Playonero, se tomaron en cuenta las variables geológicas y geomorfológicas de la zona. Dentro de las variables geológicas que se tomaron en cuenta esta la textura, la resistencia y la densidad de fracturamiento. Las variables geomorfológicas tenidas en cuenta fueron las unidades morfogenéticas, la altura, la pendiente, la rugosidad, la curvatura, la orientación, la distancias a cauces y la distancia a vías. Estas variables fueron el insumo para la aplicación del método estadístico bivariado, y con este se determinó la cartografía para este evento.

8.3.1 Geología: El mapa geológico de la cuenca del río Playonero a escala 1:25.000 (Fig. 6a) se obtuvo mediante un proceso actualización por fotointerpretación, tomando como base la plancha geológica El Playón a escala 1:25.000 del IGAC 2005. Con el mapa geológico y su procesamiento en ArcMap se obtuvieron las variables de textura, resistencia y densidad de fracturamiento. La textura (fabrica) que Folk (1974) la define como el arreglo de partículas y espacios vacíos en una roca (Fig. 6b). Esta variable se clasifica según la metodología del servicio geológico para la susceptibilidad de movimientos en masa de acuerdo a texturas cristalinas masivas, cristalinas bandeadas, clásticas cementadas, clásticas consolidadas y cristalinas foliadas y/o rocas de falla. La resistencia que es la capacidad de las rocas, minerales y materiales de oponerse a la deformación ante los diferentes tipos de esfuerzos, tales como erosivos, cortantes, elásticos (Hoek & Brown, 1997) (Fig. 6c). Su clasificación se describe en extremadamente dura (R6), muy dura (R5), dura (R4), moderadamente dura (R3), blanda (R2) muy blanda (R1) y extremadamente blanda (R0).

Por otro lado, la **densidad de fracturamiento** se generó a partir de las estructuras de deformación presentes en el área de estudio (fallas, pliegues y lineamientos), mediante la aplicación de la herramienta densidad de línea de ArcGIS, con un área de influencia de 500 metros. Su clasificación se realiza a partir de los rangos de densidad presentes en la propuesta metodológica para movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano 2013, mediante un procesamiento en ArcMap (Fig. 6d). Esta clasificación se da en rangos de muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto.

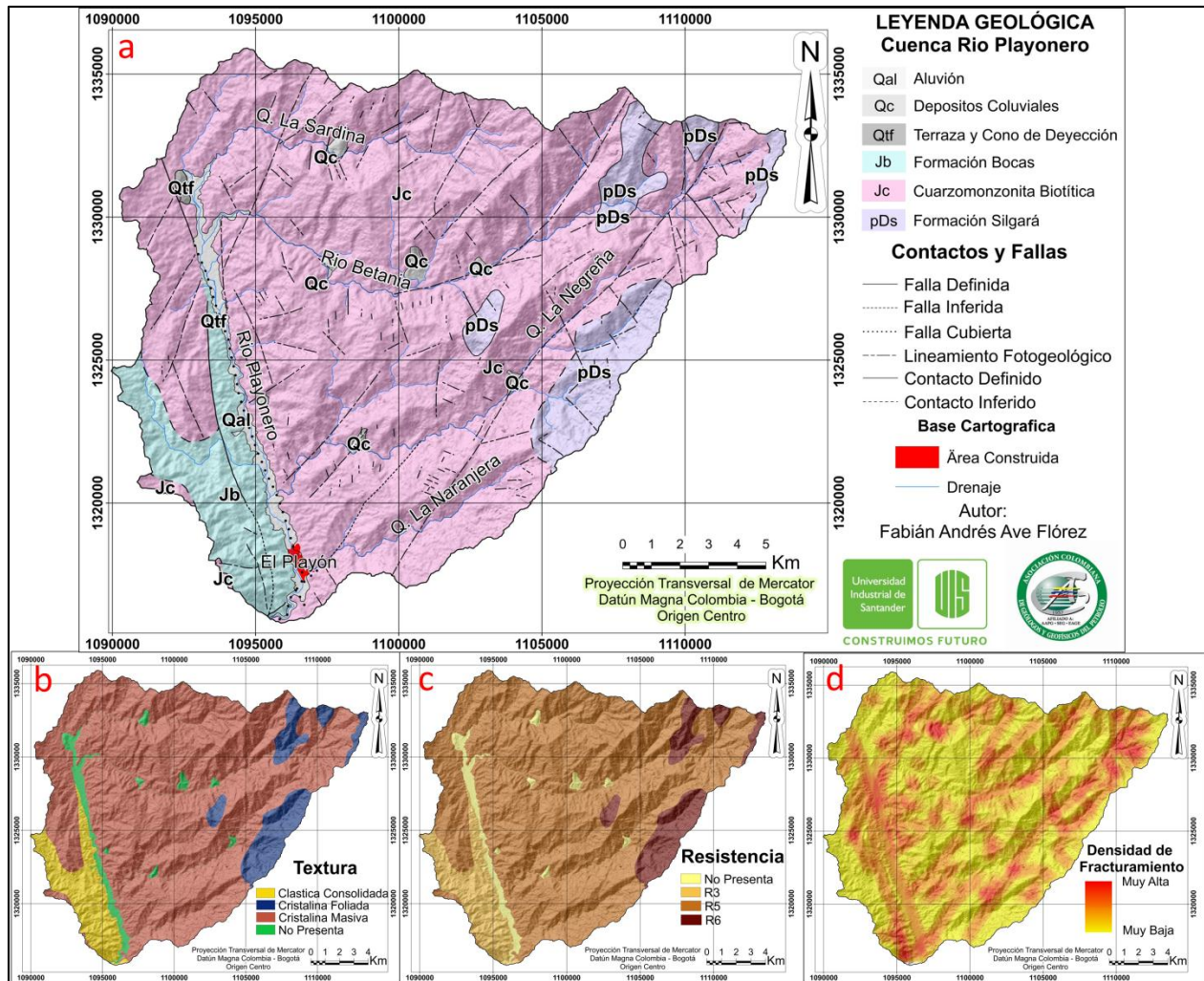


Figura 6. (a) Mapa Geológico cuenca rio Playonero, (b) Textura, (c) Resistencia, (d) Densidad de fracturamiento.

8.3.2 Geomorfología: La geomorfología es la disciplina científica que tiene como objeto el reconocimiento, la clasificación y la explicación de las diferentes configuraciones que presenta la superficie externa de la litosfera, de cuya combinación resulta el relieve terrestre (Muñoz, 1995). Involucra y relaciona el paisaje con los procesos que le dieron origen y sus condiciones ambientales (INGEOMINAS, 2005). Para la elaboración de la geomorfología, se partió del MDE, topografía, geología y movimientos en masa. Este atributo se constituye por tres aspectos importantes: la morfogénesis, morfometría y morfodinámica.

La morfogénesis corresponde al origen de las formas del terreno, es decir, las causas y procesos que dieron la forma al paisaje. La información morfogenética es representada en forma

de unidades morfológicas que presentan características de orden espacial individual y de su entorno para ser clasificadas y ponderadas (SGC, 2013).

El mapa de unidades morfogenéticas se obtuvo mediante fotointerpretación, mapa de sombras y de pendientes, creados por el modelo MDE, imágenes satelitales de Google Earth, reconocimiento de campo y metodología propuesta para la generación de mapas geomorfológicos del Servicio Geológico Colombiano. De esta interpretación para el área de estudio se obtuvo cuatro ambientes geomorfológicos, denudacional, estructural, fluvial y antrópico, donde el ambiente denudacional representa el 56% del área de estudio, sus unidades morfogenéticas más influyentes son los escarpes de erosión menor y las laderas erosivas. El ambiente estructural representa el 39% de la cuenca del río Playonero, sus unidades morfogenéticas más representativas son las laderas estructurales y los lomos estructurales. El ambiente fluvial representa el 4% de la zona, su unidad morfogenética predominante es la planicie de inundación. El ambiente antrópico representa el 1% de la cuenca del río Playonero, y está determinado por el casco urbano y zonas industriales. Estas unidades son ponderadas a partir de parámetros dispuestos en el documento metodológico para la susceptibilidad por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (Fig. 7).

La morfometría comprende la caracterización y el análisis digital de las superficies topográficas continuas, abarcando los rasgos dimensionales de las geoformas, los cuales derivan de una representación numérica de la topografía (Rincón, 2014). Mediante un procesamiento digital de datos en ArcMap que toma en cuenta el MDE se obtuvo altura, pendiente, curvatura, rugosidad, orientación, distancia a cauces y distancia a vías.

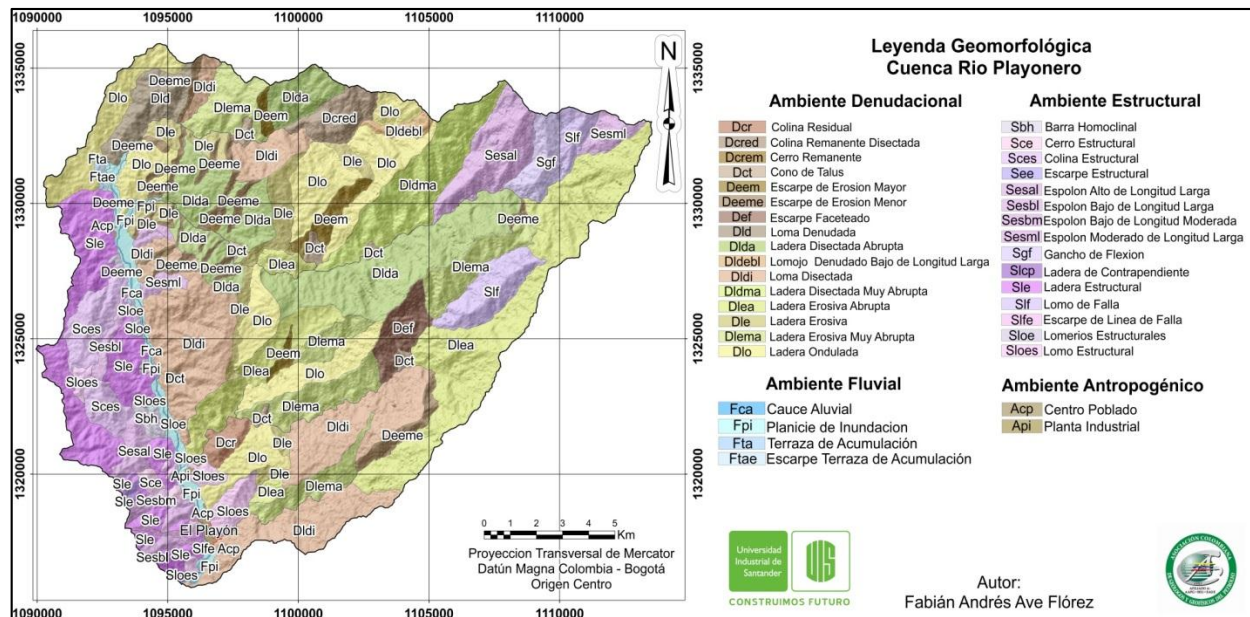


Figura 7. Mapa geomorfológico cuenca río Playonero.

La **altura** es definida como una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud en la superficie terrestre (Felicísimo, 2008). Esta variable se clasifico en 10 rangos, donde se evidencia que entre las alturas de 1800 y 2300 m.s.n.m se evidencia la mayor concentración de movimientos en masa (Fig. 8a).

La **pendiente** se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal (SGC, 2013). La cuenca del río Playonero, presenta pendientes altas a escarpadas hacia el norte y oriente, también se observa la mayor concentración de movimientos en masa en pendientes que van desde los 50° hasta los 77° (Fig. 8b).

La **curvatura** indica el grado de una superficie en su aspecto geométrico de concavidad, convexidad o superficie plana, en la dirección de la pendiente (Londoño, 2006). La distribución de esta variable morfométrica en la cuenca del río Playonero muestra un predominio de zonas cóncavas y convexas, donde las zonas convexas presentan la mayor cantidad de movimientos en masa en la regio de estudio (Fig. 8c).

La **rugosidad** del terreno se define como la variación de la pendiente en un área representada por la desviación del vector normal a la superficie en cada celda (Felicísimo, 2008). Esta variable presenta una distribución muy homogénea a lo largo de la cuenca de río Playonero. La rugosidad alta a muy alta se encuentra distribuida en los cauces de los afluentes y en las cimas

o zonas planas de las montañas, como también los movimientos en masa se distribuyen en las zonas con rugosidad media (rango 3) (Fig. 8d).

La **orientación** identifica la dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máxima en un valor desde cada celda hacia sus celdas vecinas (Burrough & McDonell, 1998). Esta variable muestra una dirección predominante hacia el NW y su relación con los movimientos en masa esta dado hacia las laderas con orientación NE (Fig. 8e).

La **distancia a cauces** muestra la distribución de los cauces que cubren la cuenca, esta evalúa las superficies adyacentes al cauce, las cuales son debilitadas por la acción del flujo (Gokceoglu & Aksoy, 1996). Se determina mediante una densidad por interpolación de los cauces presentes. El área de estudio se observa que entre los 280 m adyacentes a los cauces se evidencian la mayor cantidad de movimientos en masa (Fig. 8f).

La **distancia a vías** muestra la distribución de las vías que cubren el área de estudio, esta evalúa las obras de infraestructura que debilitan los taludes naturales adyacentes a estas (Ayalew & Yamagishi, 2005). Se determina mediante una densidad por interpolación de las vías presentes en la zona, con un área de influencia de 15 metros a lado y lado de las vías. En la cuenca se observa que a lo largo de las vías, hay cortes que debilitan la estabilidad del talud natural, ocasionando movimientos en masa (Fig. 8g).

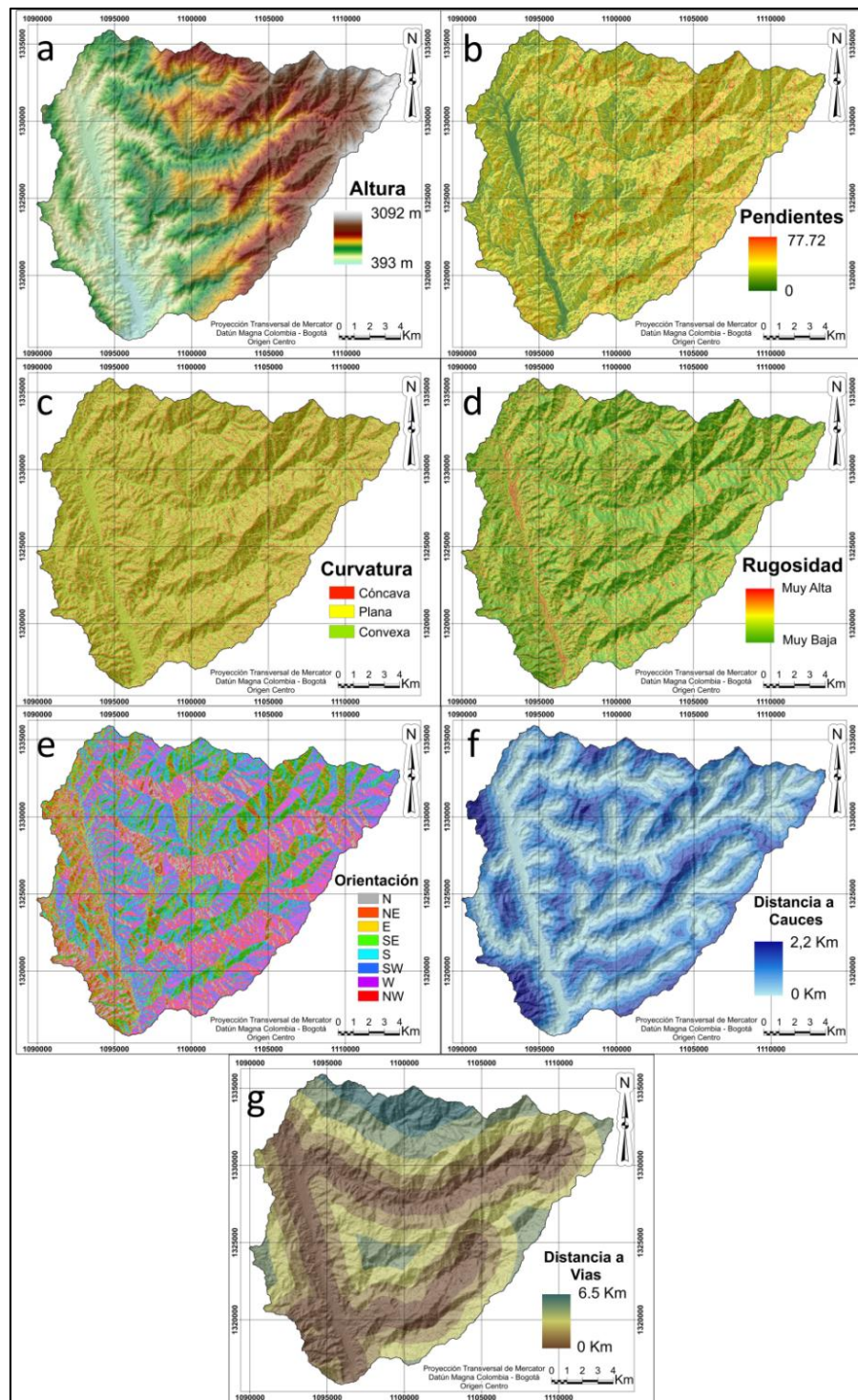


Figura 8. Mapa de variables morfométricas para la cuenca río Playonero. (a) Altura, (b) Pendiente, (c) Curvatura, (d) Rugosidad, (e) Orientación, (f) Distancia a cauces, (g) Distancia a vías.

La morfodinámica se encarga de registrar y sintetizar los procesos geodinámicos externos (principalmente denudativos) tanto antiguos, como recientes que han modelado y continúan

modelando el relieve, siendo responsables del estado actual de las geoformas. Este atributo se construyó con base a un inventario de movimientos en masa, este inventario contiene información de localización, clasificación, volumen, actividad, fecha de ocurrencia y otras características de los movimientos en masa (Fell *et al.*, 2008). Este inventario de movimientos en masa para la cuenca del río Playonero, se estableció a partir de los movimientos en masa registrados en la base de datos del sistema de información de movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (SIMMA), más los movimientos en masa inventariados en la campaña de campo, donde se registraron 80 eventos, con un total de para la zona de estudio de 90 movimientos en masa. Estos movimientos se clasificaron en deslizamientos traslacional (79), reptación (4), deslizamiento rotacional (3), flujo de detritos (4) y caída de roca (2) (Fig. 9).

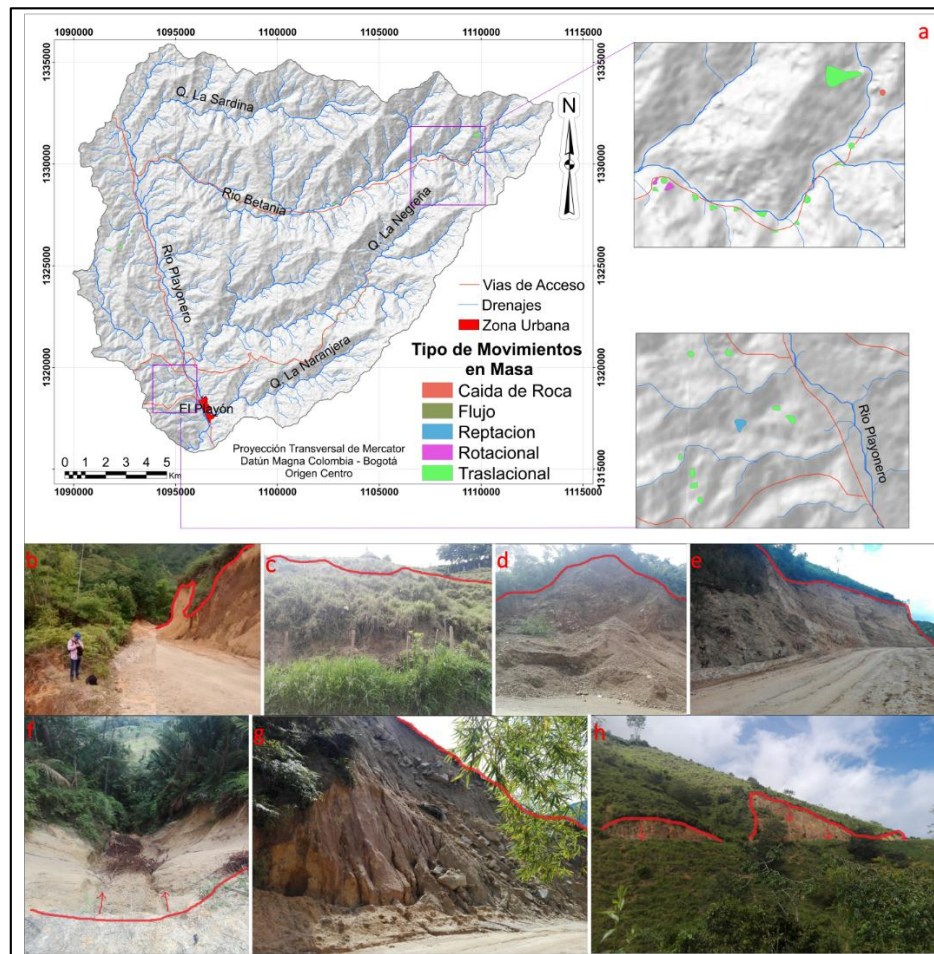


Figura 9. (a) Mapa morfodinámico, (b) Deslizamiento traslacional, (c) Reptación, (d) Deslizamiento traslacional con flujo de detritos, (e) Deslizamiento traslacional planar, (f) Deslizamiento rotacional con flujo de detritos, (g) Deslizamiento traslacional con caídas de roca y meteorización tipo surcos, (h) Deslizamiento traslacional planar.

8.4 Mapa de Susceptibilidad

Con las variables de geología y geomorfología clasificadas se construye la cartografía de susceptibilidad a movimientos en masa. Este mapa toma en cuenta cada clase combinada con la distribución de los movimientos en masa registrados para la región de estudio. Su construcción se realiza a partir del modelo estadístico bivariado propuesto por Van Westen 1997 (Eq.1). Con la generación a partir de esta ecuación se crean los pesos de cada variable (Anexo B), con la suma de ellos se obtiene el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para la cuenca del río Playonero. (Remitirse al capítulo de resultados sección 9.1).

8.5 Generación del Mapa de Amenaza por Avenidas Torrenciales

Dentro del planteamiento metodológico y a partir de la información adquirida de la base de datos del IDEAM se genera el modelo de avenidas torrenciales para la cuenca del río Playonero. Este modelo involucra parámetros morfométricos y geométricos de la cuenca, donde los parámetros morfométricos se describen en la Tabla 3 y los parámetros geométricos se discriminan en dos fases, un procesamiento con la extensión Hec-GeoRas para ArcMap y una simulación para avenidas torrenciales en HEC-RAS.

Tabla 3. Parámetros morfométricos para la cuenca del Río Playonero.

Parámetro Morfométrico	Cuenca Río Playonero
Cota Mayor (m.s.n.m)	3092
Cota Menor (m.s.n.m)	393
Área (km ²)	282.65
Perímetro (km)	82.9
Ancho de la Cuenca (km)	23
Longitud Drenaje Principal (km)	18
Pendiente Media de la Corriente %	5.92
Forma	Forma oval redonda a oval oblonga
Factor de Forma (Gravelius)	0.429
Coeficiente de Compacidad (Gravelius)	1.427
Elevación Media (m.s.n.m)	1050
Densidad de Drenaje	1.55

Siguiendo con la línea de trabajo, se crea el mapa de usos del suelo para la zona de influencia del río Playonero. Este se construye por fotointerpretación y reconocimiento en campo, tomando en cuenta el modelo de Brunner 2016, el cual hace una homologación a los usos del suelo definidos por la metodología CORINE Land Cover, con el fin de agregarle un valor de

numero de N_Manning, y con ello poder realizar la simulacion de avenidas torrenciales en el programa HEC-RAS. El cual define una característica de la corriente sobre una superficie, indicando la resistencia que ofrece sobre esta misma dependiendo su grado de rugosidad (N_Manning), se realizo como una interpretacion de estas superficies en el programa ArcMap (Tabla 4 y Fig. 10).

Tabla 4. Numero de Maninng's para Usos del Suelo (Brunner, 2016).

Uso	N_Manning's
Agrícola Cultivos	0.05
Agrícola Pastos	0.045
Arbolado o Arbustos	0.09
Cauce	0.04
Industrial	0.1
Residencial	0.08
Urbano	0.09

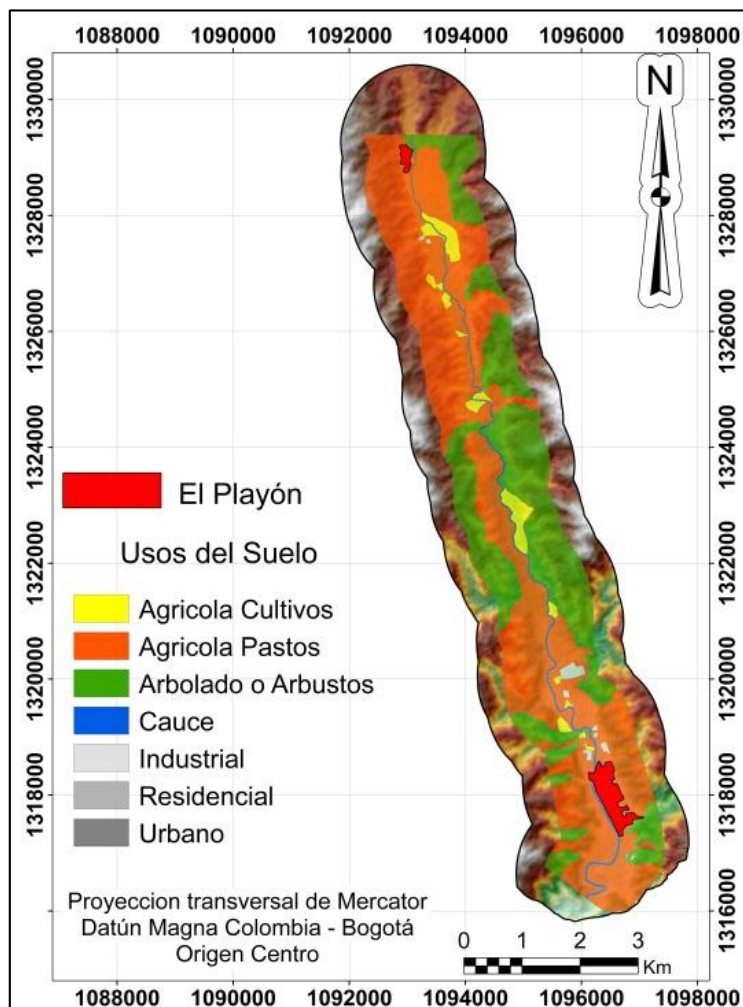


Figura 10. Mapa de usos del suelo para la zona de influencia del río Playonero.

8.5.1 Procesamiento en HEC- GeoRAS: Con este procedimiento realizado en ArcMap, se determinaron los elementos geométricos para la simulación del modelo de avenidas torrenciales. Se trazaron los elementos longitudinales (cauce, orillas, líneas de flujo y transversas). El cauce se define como la línea de flujo del afluente, el cual tiene una extensión de 18 km (Fig. 11a). Las orillas son los límites horizontales del cuerpo de agua su trazado se realiza dibujando primero la orilla izquierda y luego la derecha en sentido de la corriente aguas abajo (Valencia, 2017) (Fig. 11b). Las líneas de flujo se realizan a partir de la interpretación de las llanuras de inundación del río Playonero, que son los máximos de inundación, en un régimen normal de lluvias (Fig. 11c).

Las secciones transversales se crean de forma perpendicular al cauce, interceptando las líneas de flujo definidas. Estas secciones transversales modelan el cauce extrayendo la información altitudinal del terreno, la información del flujo y las superficies de usos del suelo, donde extrae el $N_{\text{de Manning}}$ (Valencia, 2017). Se crearon 688 secciones transversas, con una separación de 16 m aprox., y de longitud de 620 m aprox. (Fig. 11d).

Como también, se construye las zonas que presentan elementos geométricos tipo polígono, como los puentes, zonas de flujo inefectivo y las obstrucciones. La construcción de los puentes consta de dos elementos geométricos para la zona de estudio, el primero se encuentra sobre la vía principal al norte del casco urbano, con una altura de 15 m, una longitud de 60 m y un ancho de 12 m, el segundo se encuentra metros abajo de la primera estructura, donde comunica viviendas del casco urbano, presenta una altura de 10 m, su longitud es de 30 m, y un ancho de 6 m. (Fig. 11e). Las zonas de flujo inefectivo se presentan alrededor de los puentes y se describen como las áreas en las que no hay movimiento de aguas, esto es, donde hay acumulación de agua, pero la velocidad de flujo es cero (Fig. 11e). Por último, las obstrucciones son elementos geométricos que obstaculizan el flujo sobre la corriente y su construcción se basa en mostrar las áreas donde se presentan viviendas, edificaciones y zonas de inestabilidad de laderas (Fig. 11f).

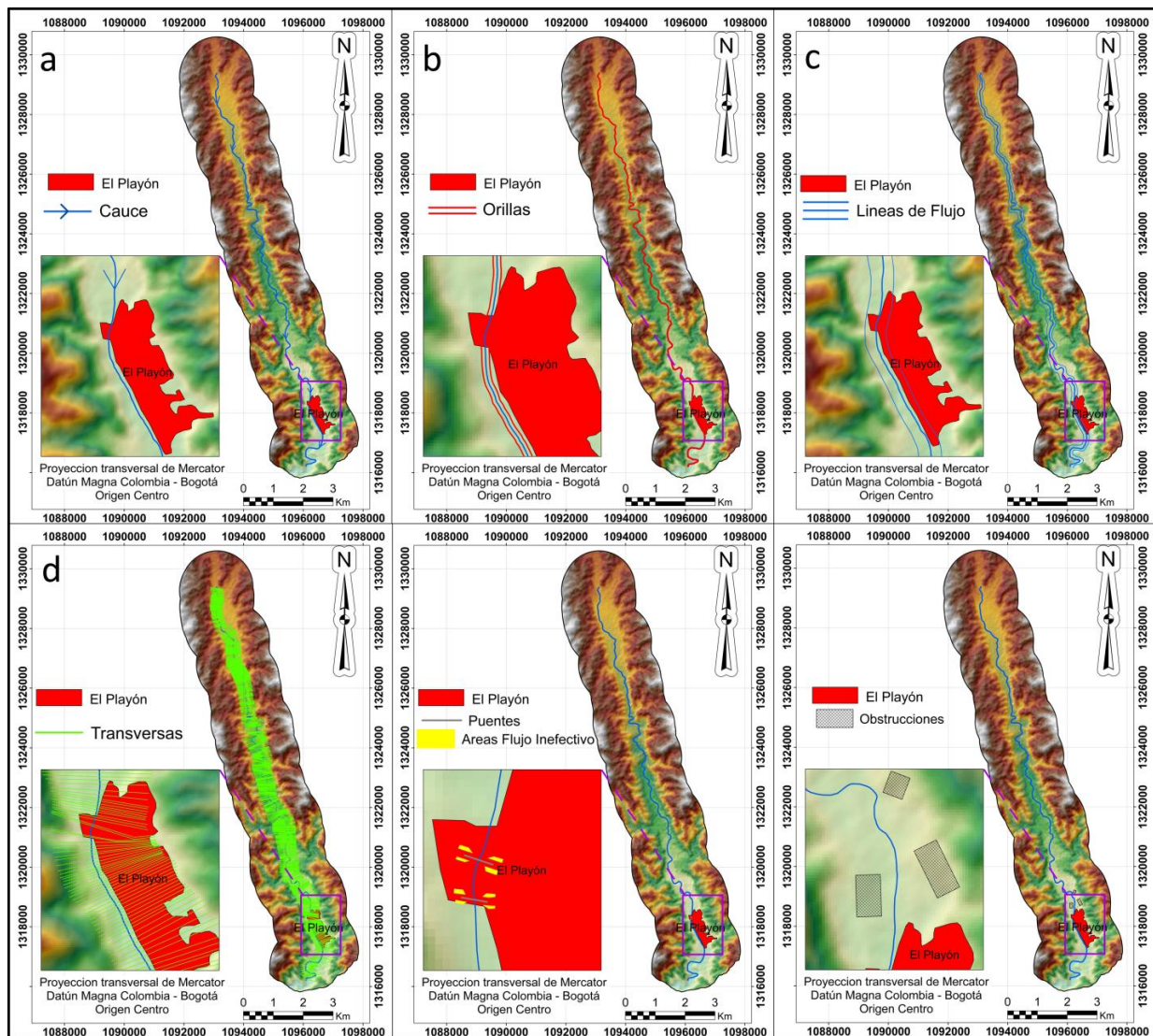


Figura 11. Construcción geométrica por medio del de la extensión HEC-GeoRAS en el software ArcGIS, (a) Cauce, (b) Orillas, (c) Líneas de flujo, (d) Secciones transversas, (e) Puentes y zonas sin flujo, (f) Obstrucciones.

8.5.2 Simulación en HEC-RAS: Con la información geométrica de la cuenca y los datos pluviométricos, se realiza la simulación de los diferentes escenarios de avenidas torrenciales creados por los periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, y 500 años). Esta información es procesada en el programa HEC-RAS.

Los datos pluviométricos obtenidos del IDEAM a partir de la estación meteorológica 23090140 El Playón, permitieron realizar el cálculo de los caudales. Este cálculo se realizó utilizando el **método racional** donde se obtuvo el caudal para cada uno de los años que se tiene

registro pluviométrico (Anexo C). La construcción de estas tablas tomo en cuenta una subdivisión realizada para el área de estudio, esta subdivisión delimita cuatro regiones que aportan caudal al río Playonero, que son la subcuenca del río Betania, La Sardina, La Negreña y La Naranjera. Posteriormente se utiliza la distribución estadística de Gumbel para obtener los caudales en los diferentes periodos de retorno (Tabla 5).

Tabla 5. Caudales calculados para cada periodo de retorno.

TR (años)	2	5	10	25	50	100	500
Q. La Sardina	44.77	58.38	67.40	78.79	87.24	95.63	115.01
Rio Betania	71.71	93.52	107.96	126.20	139.74	153.17	184.22
Q. La Negreña	58.36	76.12	87.87	102.72	113.74	124.67	149.94
Q. La Naranjera	21.41	27.92	32.24	37.68	41.73	45.74	55.01
Caudal Total (m/s ²)	196.25	255.94	295.47	345.39	382.45	419.21	504.18

9. Resultados

Con el procesamiento de las variables geológicas y geomorfológicas se obtuvo el mapa de susceptibilidad y con la construcción de los elementos morfométricos, geométricos y el cálculo de los caudales se generó el modelo de avenidas torrenciales. De la información aquí procesada se describe el resultado para el mapa de susceptibilidad de movimientos en masa, las zonas que relacionan los movimientos en masa con las avenidas torrenciales y el modelo de avenidas torrenciales.

9.1 Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa

La susceptibilidad a movimientos en masa para la cuenca del río Playonero, se determinó a partir de las variables geológicas y geomorfológicas, procesadas mediante el método estadístico bivariado, este modelo presenta un porcentaje de validación del 83.7%, donde toma las zonas de susceptibilidad alta y muy alta en contraste con el inventario de movimientos en masa (Choi *et al.*, 2010). El mapa de susceptibilidad se clasificó en los rangos: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto (Fig. 12) y su distribución por rango de clasificación (Fig. 13).

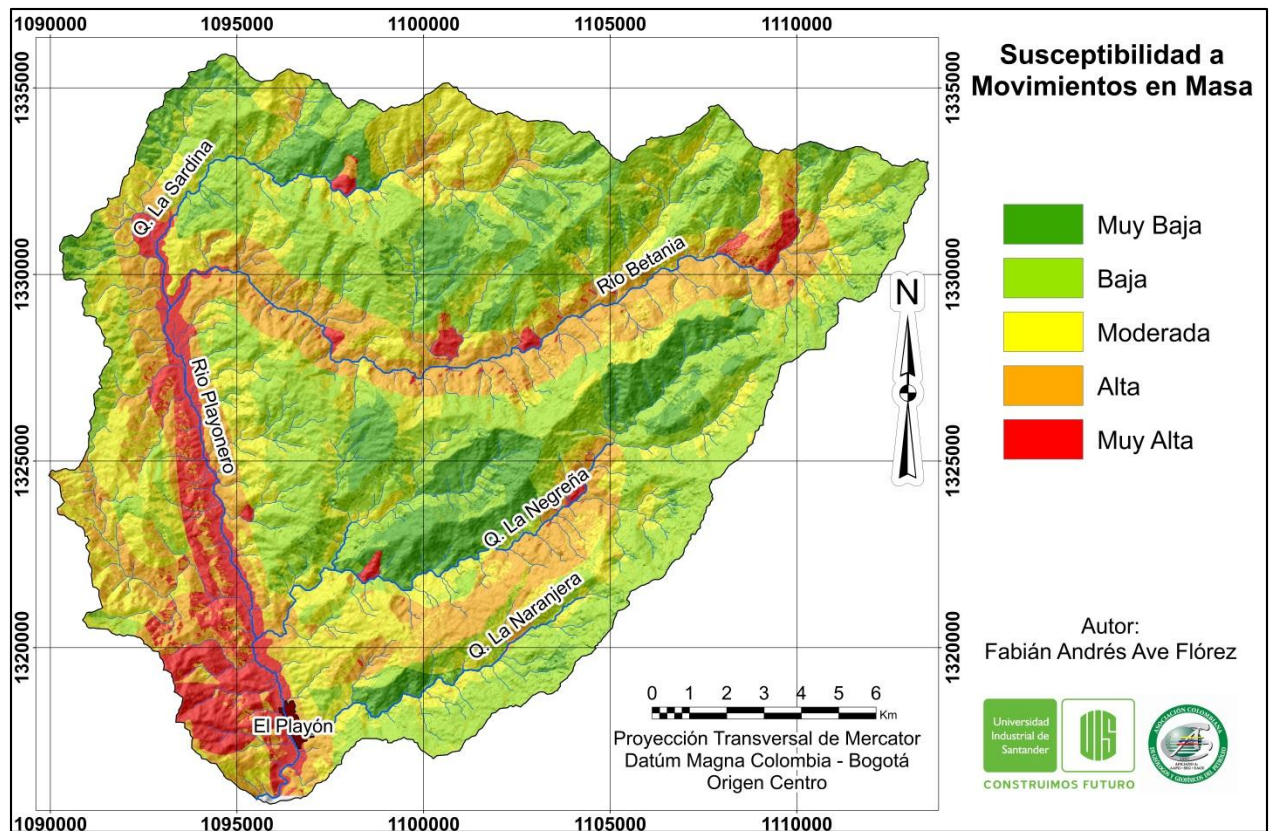


Figura 12. Mapa Susceptibilidad a Movimientos en Masa en la cuenca del río Playonero.

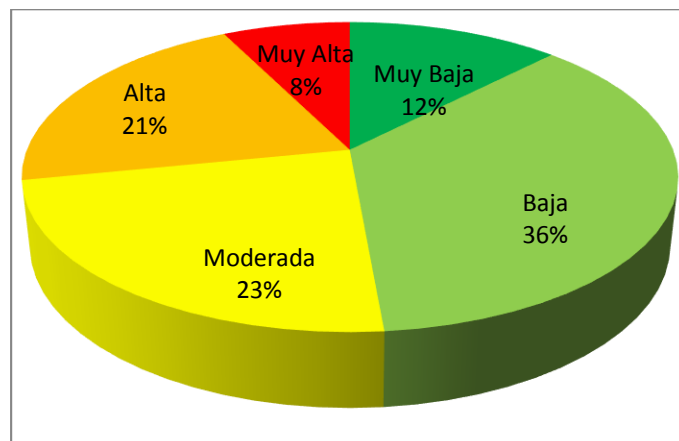


Figura 13. Diagrama que muestra el área que ocupa cada clasificación de susceptibilidad a movimientos en masa, en la cuenca del Río Playonero.

9.1.1 Susceptibilidad Muy Baja: Las zonas de susceptibilidad baja a movimientos en masa ocupan el 12.42% del área total de la cuenca del río Playonero. Se encuentran distribuidas principalmente en la parte central de la cuenca, entre el río Betania y la quebrada La Negreña en la vereda San Benito, y en menor proporción en la región Norte, en la vereda Planadas y hacia el filo de San Francisco al norte de la quebrada La Sardina.

Presenta laderas erosivas muy abruptas y laderas onduladas, que están asociadas litológicamente a rocas cuarzomonzoníticas biotíticas del batolito de Rionegro las cuales se clasifican con una textura cristalina masiva lo que le ofrece una resistencia muy buena a la deformación de eventos erosivos y presenta una baja densidad de fracturamiento. Estas zonas se encuentran en alturas que oscilan entre los 1000 y 2450 m.s.n.m., con pendientes moderadas a altas con orientación hacia el sur, estas zonas presentan curvatura de tipo convexo, por encontrarse en las laderas. En cuanto a la rugosidad, estas zonas presentan en un rango bajo a medio y se encuentran en las cercanías de los cauces y lejos de vías de acceso.

9.1.2 Susceptibilidad Baja: Las zonas de susceptibilidad baja a movimientos en masa ocupan el 36.17 % del área total de la cuenca, siendo esta clasificación predominante. Se encuentra distribuida principalmente en la parte central de la cuenca, entre el río Betania y la quebrada La Negreña, como también en las veredas El Playón, San Benito, Betania y Río Blanco, y en la parte norte, se encuentran en las veredas Planadas, Miraflores y el Pino, se encuentra un pequeño porcentaje en la región noroeste en la vereda Límites.

Las regiones con susceptibilidad baja presentan una morfología con unidades de tipo denudacional y estructural como lomos denudados, laderas erosivas, escarpes de erosión menor, laderas onduladas y disectadas, laderas erosivas abruptas y muy abruptas, lomos denudados bajos de longitudes largas, laderas disectadas abrupta, espolones altos de longitudes largas, lomos de falla, espolones moderados de longitudes largas y lomos estructurales, que están asociadas litológicamente a rocas cuarzomonzoníticas biotíticas del batolito de Rionegro y la formación Silgara las cuales se clasifican con una textura cristalina masiva y cristalina foliada respectivamente, ofreciendo una buena resistencia a la deformación de eventos erosivos. A su vez, presenta una moderada densidad de fracturamiento.

Estas zonas de susceptibilidad se encuentran en alturas desde los 600 hasta los 3000 m.s.n.m, con pendientes bajas a escarpadas, con orientación hacia el sureste. Estas zonas presentan curvatura convexa y cóncava. La rugosidad se presenta en un rango moderado a alto y se ubica en cercanía a los cauces, como el río Betania y las quebradas La Sardina, La Negreña y La Naranjera., y también en algunas vías de comunicación de la región.

9.1.3 Susceptibilidad Moderada: La susceptibilidad moderada abarca un 23.29%, del área total de la cuenca del río Playonero, siendo la segunda clasificación con mayor área. Se encuentra distribuida principalmente al oeste del río Playonero en la vereda el Playón. En menor proporción se localiza al margen izquierdo otras zonas se encuentra localizadas al margen izquierdo del cauce principal en la vereda el Playón y Río Blanco, como también al norte del flanco oriental del filo de San Francisco entre las veredas Planadas y Limites.

Estas zonas presentan unidades morfogénicas como laderas erosivas, onduladas, laderas estructurales, disectadas y disectadas abruptas, escarpes de erosión menor y escarpes faceteados, colinas remanentes disectadas y colinas estructurales, lomos estructural, espolones bajos de longitud moderada y como de longitud larga, que están asociadas litológicamente a rocas cuarzomonzoníticas biotíticas del batolito de Rionegro y la formación Bocas, las cuales se describen con una textura cristalina masiva y clástica consolidada lo que les ofrece, dos tipos de resistencia (buena y moderada) a la deformación de eventos erosivos, como también presenta una alta densidad de fracturamiento. Estas zonas presentan alturas entre los 600 y 1700 m.s.n.m. con pendientes moderadas a altas, con orientación hacia el suroeste. La curvatura es de tipo convexo, la rugosidad se presenta en rangos moderados y altos, se encuentran cerca a los cauces y medianamente cerca de las vías de acceso.

9.1.4 Susceptibilidad Alta: La susceptibilidad alta abarca un 20.67 %, del área total de la cuenca. del río Playonero, siendo la tercera clasificación con mayor área. Se encuentra distribuida principalmente en las vías de acceso que se encuentran a los márgenes del río Betania, y las quebradas La Sardina, La Naranjera y la Negreña, sobre el cauce de los afluentes anteriormente mencionados y sus llanuras de inundación, como también se encuentran al occidente de la cuenca en las veredas El Playón y Río Blanco.

Estas zonas presentan unidades morfogenéticas como laderas erosivas y estructurales, laderas disectadas y disectadas abruptas, escarpes de erosión menor, lomeríos estructurales, espolones altos de longitud larga, cerros remanentes, ganchos de flexión y cauces aluviales que están asociadas litológicamente a rocas cuarzomonzoníticas biotíticas del batolito de Rionegro y la formación Bocas, las cuales se describen con una textura cristalina masiva y clástica consolidada lo que les ofrece, dos tipos de resistencia (buena y moderada) a la deformación de eventos erosivos, presentan una alta densidad de fracturamiento. Estas zonas presentan alturas entre los 600 y 2400 m.s.n.m, con pendientes bajas a altas, con orientación hacia el sur. La curvatura es de tipo convexa y cóncava, la rugosidad se presenta en rangos altos, se encuentra cerca a los cauces y a las vías de comunicación.

9.1.5 Susceptibilidad Muy Alta: La susceptibilidad alta abarca un 7.45 %, del área total de la cuenca del río Playonero, siendo la clasificación de menor área. Se encuentra distribuida principalmente a lo largo del cauce del río Playonero, como también en las zonas de depósitos coluviales y en la parte occidental de la cuenca, en la vereda el Playón.

Estas zonas presenta unidades morfogenéticas como espolones altos de longitud larga y bajos de longitud larga, lomeríos estructurales, barras homoclinales, cauces aluviales, planicies de inundación, conos de talus, terrazas de acumulación, escarpes de terrazas de acumulación, escarpes estructurales y escarpe de línea de falla, que están asociadas litológicamente a rocas cuarzomonzoníticas biotíticas del batolito de Rionegro y la formación Bocas, las cuales se describen con una textura cristalina masiva y clástica consolidada, lo que le ofrece, dos tipos de resistencia (buena y moderada) a la deformación de eventos erosivos, presentan una densidad de fracturamiento muy alta. Estas zonas presentan alturas entre los 600 y 1000 m.s.n.m, con pendientes bajas a moderadas, con orientación hacia el sur. La curvatura es de tipo convexa y cóncava, la rugosidad se presenta en un rango muy alto, se encuentra sobre las vías de acceso y sobre los cauces de los principales afluentes de la cuenca.

9.2 Relación de Movimientos en Masa y las Avenidas Torrenciales

Con la cartografía de susceptibilidad a movimientos en masa creada, se establecieron las zonas críticas a la ocurrencia de movimientos en masa. Donde se consideraron las regiones con susceptibilidad alta y muy alta, que estén en cercanías a los cauces. Esta actividad se realiza al

describir el comportamiento que presenta la inestabilidad de las laderas, producto de los factores geológicos y geomorfológicos del área. Su relación con las avenidas torrenciales se manifiesta por la acción de la obstaculización del cauce, generado por el descalce de la ladera (diques). Este evento crea unas zonas de restricción del flujo, produciendo una acumulación momentánea del cauce, el cual al llegar a su punto crítico rompe la superficie que lo obstaculiza manifestando un evento extemporáneo de la corriente (avenida torrencial). El caudal torrencial generado por esta ruptura se propaga por el cauce encañonado de las quebradas, aumentando su velocidad debido a las pendientes abruptas, generando procesos de socavación los cuales van aumentando el material transportado. Este material es depositado en las llanuras de inundación, que en este caso es la zona donde se encuentra el municipio del Playón, producto de este evento se crea condiciones críticas sobre áreas con actividad antrópica.

La zona más crítica que se presenta en la cuenca, está marcada por la franja de clasificación de susceptibilidad muy alta, que enmarca el cauce del río Playonero, está condicionada por una alta densidad de fracturamiento, por depósitos no consolidados, corta distancia a la vía principal, cerca al río principal, usos del suelo de mosaico de pastos y cultivos. Todo esto aumenta la posibilidad de ocurrencia a movimientos en masa, que puedan generar dichos eventos de avenidas torrenciales.

Otras zonas críticas que se presentan en la cuenca están marcadas por grandes deslizamientos de tipo traslacional ubicadas en la vereda el Pino al margen derecho de la quebrada que lleva el mismo nombre (1.109.719 N, 1.330.873 E) (Fig. 14a), está quebrada conecta con río Betania, en donde se encuentra depósitos de tipo coluvial (conos de talus), uno en la vereda Miraflores (1.102.787N, 1.328.33E) (Fig. 14b) y el otro en la vereda Planadas (1.100.670N, 1.328.069E) (Fig. 14c), así mismo en la vereda Planadas al margen derecho del río Betania se encuentra un deslizamiento de tipo traslacional (1.097.707N, 1.328.439E) (Fig. 14d).

Otras zonas críticas establecidas son, un depósito coluvial ubicado en el margen derecho de la quebrada la Sardina, en la vereda Limites (1.097.866.347N, 1.332.434E) (Fig. 14e), y unos depósitos aluviales (terrazas) encontradas a margen derecho de la misma quebrada, en el límite de la vereda Limites y Río Blanco (1.092.527N, 1.331.108E) (Fig. 14f).

En el sector de la vereda Betania al margen derecho de la quebrada La Negreña se estableció una zona crítica (1.104.104N, 1.324.201E) (Fig. 14g) determinada por un depósito

coluvial. También sobre este cauce aguas abajo en la región de la vereda El Playón se establece una zona crítica al margen derecho del cauce (1.098.635N, 1.322.034E) (Fig. 14h). En el sector de la quebrada La Naranjera se establece una zona crítica enmarcada por un deslizamiento de tipo traslacional a margen derecho de este afluente (1.097.487N, 1.318.040E) (Fig. 14i). También, al margen izquierdo del río Playonero se establece otra zona crítica, donde se evidencian un depósito coluvial (cono de talus) en las coordenadas 1.095.300N, 1.323.677E (Fig. 14j).

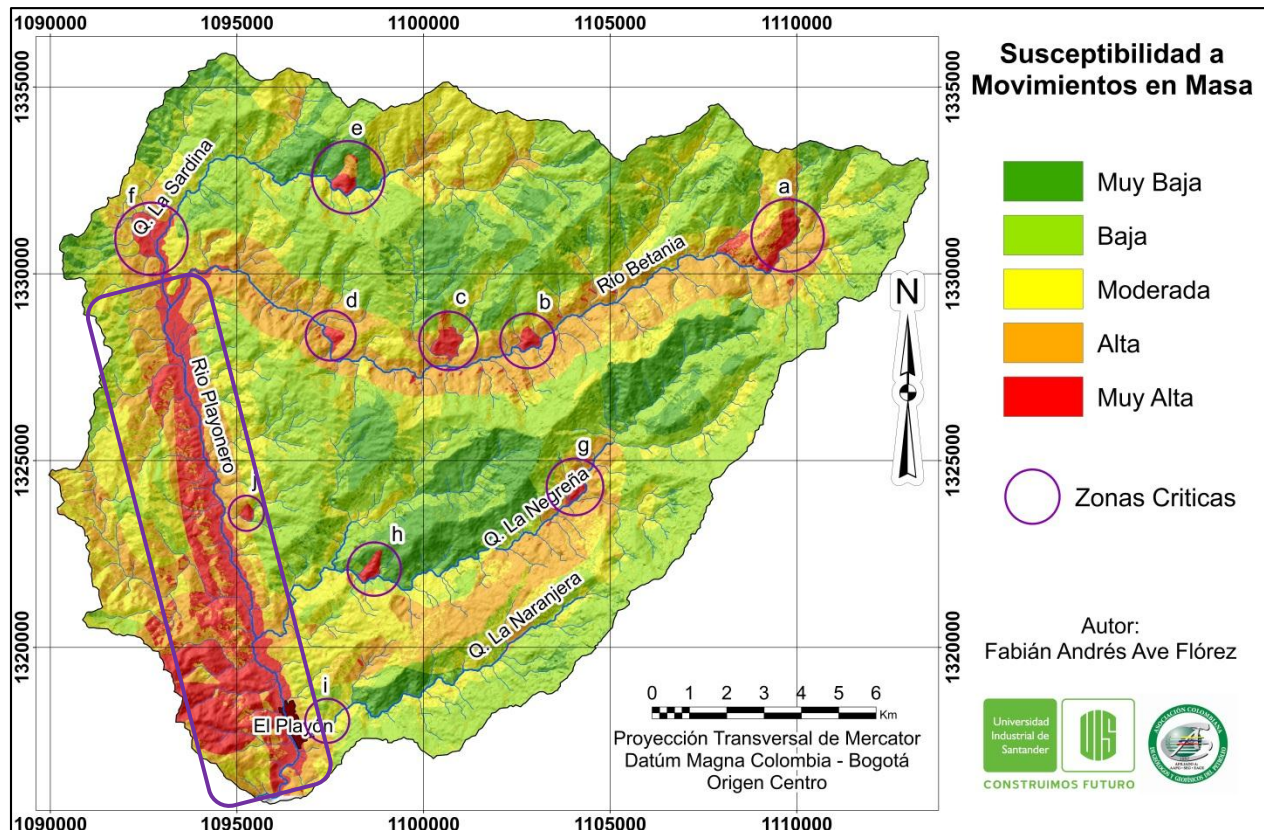


Figura 14. Zonas críticas a movimientos en masa que puedan ocasionar eventos de avenidas torrenciales.

9.3 Modelo Avenidas torrenciales

El modelo de avenidas torrenciales que se generó en el programa HEC-RAS, para la cuenca del río Playonero, muestra una amenaza latente ante este evento, para la población del municipio del Playón. En donde se evaluaron varios escenarios en los diferentes periodos de retorno, obteniendo las curvas isóbatas e isotacas (inundación y velocidad).

Para un periodo de retorno de 2 años la isóbata es de 3.21 m con una isotaca de 5.57 m/seg^2 , afectando el 24.98 % del casco urbano (Fig. 15). Para un periodo de retorno de 5 años la isobata es de 3.73 m con una isotaca de 6.02 m/seg^2 , afectando el 26.03% del municipio del Playón. En el periodo de retorno de 10 años el modelo presenta una isobata de 4.05 m con una isotaca de 6.22 m/seg^2 , presentando una afectación del 26.65 % del casco urbano.

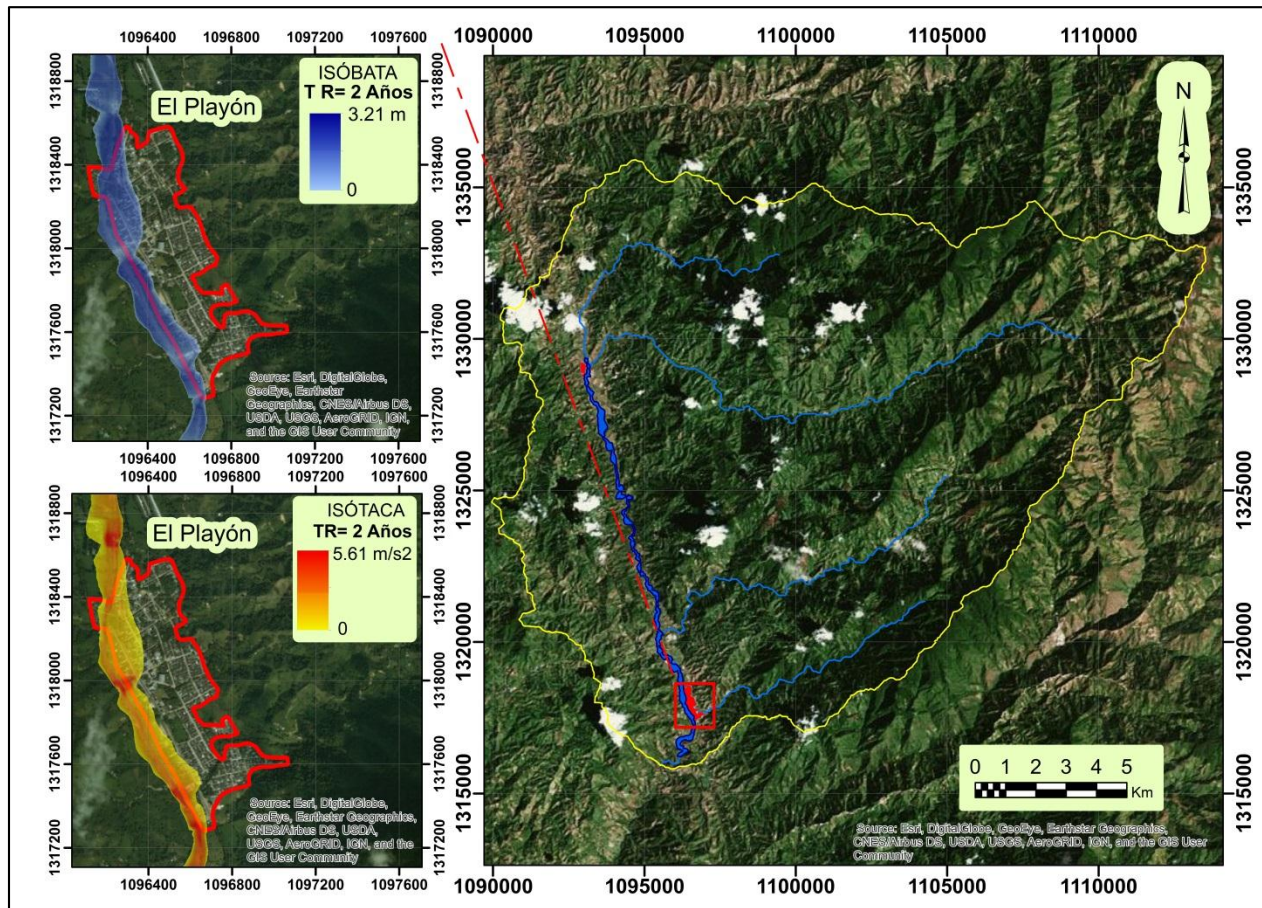


Figura 15. Modelo de inundación para un periodo de retorno de 2 años para la cuenca del rio Playonero.

Para un periodo de retorno de 25 años este presenta una isobata de 4.44 m y una isotaca de 6.34 m/seg^2 , afectando un 27.39 % del casco urbano. Para un periodo de retorno de 50 años el modelo evidencia una isobata de 4.72 m y una isotaca de 6.29 m/seg^2 , cubriendo el 27.93% del área total del casco urbano del Playón. El modelo para un periodo de retorno de 100 años muestra una isobata de 4.98 m y una isotaca de 6.43 m/seg^2 , en donde afecta el 28.36% del área total del municipio. Para un periodo de retorno de 500 años el modelo de inundación muestra una isobata

de 6.07 m y una isotaca de 7.46 m/seg², en donde afecta el 30.30% del área total del municipio del Playón (Fig. 16).

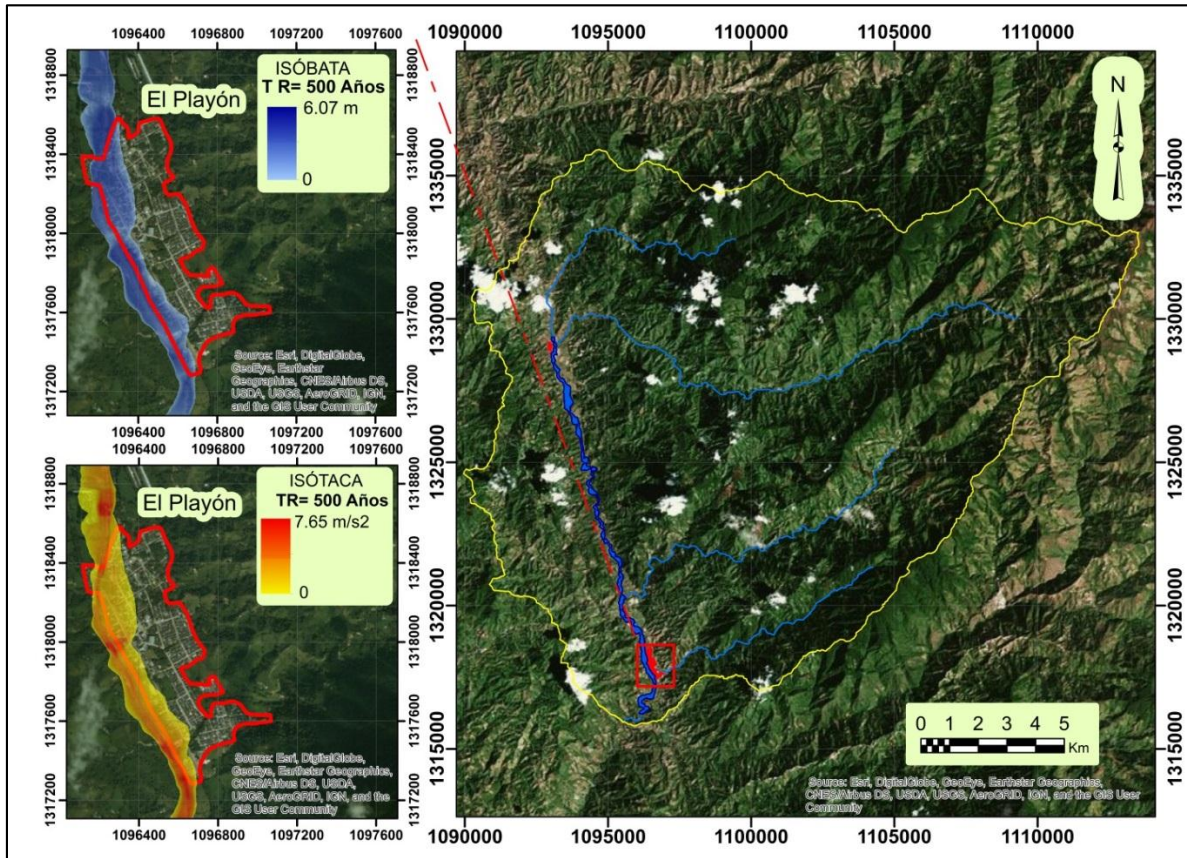


Figura 16. Modelo de inundación para un periodo de retorno de 500 años para la cuenca del río Playonero.

El modelo de avenidas torrenciales para la cuenca del río Playonero, en cada uno de los escenarios evaluados está afectando de forma crítica los sectores comprendidos para la carrera 7 entre las calles 13 y 17. Como también en la calle 1 con carrera 8. Que afecta el sector comercial del municipio, el estadio municipal y malecón turístico. Mostrando una amenaza latente para los pobladores del municipio. Los mapas para cada periodo evaluado se presentan en el Anexo D.

10. Conclusiones

- Con el análisis de las variables temáticas, como la geología, la geomorfología, climáticas y de usos del suelo, se creó el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa y el mapa de amenaza por avenidas torrenciales para la cuenca del río Playonero. Para el cual

se determinó que el atributo que más influencia tiene en la generación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa es la densidad de fracturamiento en la geología, la pendiente, la distancia a cauces y vías en la geomorfología. Mientras que para las avenidas torrenciales el factor climático (pluviométrico) es el principal desencadenante en la generación de estos eventos.

- La cartografía geomorfológica permitió caracterizar los diferentes ambientes morfogenéticos, donde se evidencia ambientes de origen denudacional, estructural, fluvial y antrópico. De esta caracterización de unidades se observa un predominio en el ambiente denudacional, donde las unidades morfogenéticas que prevalecen son los escarpes de erosión menor y laderas erosivas, en segundo orden se presentan unidades morfogenéticas de tipo estructural como las laderas estructurales y lomos estructurales. Con esta caracterización se construyó y mejoró algunas condiciones de las variables geológicas.
- Con la base de datos y el trabajo de campo se inventariaron 90 movimientos en masa de los cuales 10 pertenecen al SIMMA y 80 inventariados en campo. Estos 90 movimientos en masa se describen como 79 deslizamientos traslacionales, 4 movimientos tipo reptación, 3 deslizamientos rotacionales, 2 movimientos en masa tipo caídas de rocas y 2 movimientos de tipo flujos. Con la distribución de estos movimientos, se corrobora la validación del modelo generado.
- El mapa generado de susceptibilidad a movimientos en masa para la cuenca del río Playonero, mediante la aplicación del método estadístico bivariado, permitió una calificación objetiva y una cuantificación de sus factores determinantes. Presenta 5 clasificaciones: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto. Donde la susceptibilidad baja predomina con 36.17% del área total, y esta se presenta en la franja central de la cuenca, en las veredas Miraflores, Planadas, Vegas de Betania y San Benito.
- La susceptibilidad a movimientos en masa muy alta se presenta en las zonas donde la densidad de fracturamiento es muy alta, localizada al este de la cuenca del río Playonero,

en la vereda El Playón, y sobre el cauce principal, encontrándose sobre rocas con una resistencia R1 (baja). Además, la distancia a los cauces y las vías es muy corta, lo cual hace que la susceptibilidad a movimientos en masa sea muy alta.

- El modelo de avenidas torrenciales generado para la cuenca del río Playonero muestra una amenaza latente para el municipio del Playón, ya que para un periodo de retorno de 2 años el casco urbano se ve afectado en 24.98%, exactamente el sector comprendido para la carrera 7 entre las calles 13 y 17. Como también en la calle 1 con carrera 8. Afectando las actividades antrópicas.
- Con la investigación se determinaron 9 zonas críticas, donde la susceptibilidad es intrínseca a la inestabilidad, crean desplazamientos de material a lo largo de las laderas, con la posibilidad de que este material llegue al cauce y lo obstaculice, manifestando una ocurrencia latente a eventos de avenidas torrenciales. Estas zonas se encuentran a los costados de las quebradas La Sardina, La Negreña, La Naranjera y el río Betania.
- La metodología empleada en este proyecto muestra la importancia de la utilización de herramientas SIG y el análisis estadístico para la delimitación de zonas de susceptibilidad a movimientos en masa y amenaza por avenidas torrenciales, cumpliendo con la finalidad de la investigación y las directrices del estado para el estudio de este tipo de eventos.

11. Recomendaciones

- Para obtener un buen modelo de inundación se debe contar con un MDE de buena resolución, el cual permite modelar este evento de una manera precisa, y así obtener buenos resultados, para ello se recomienda aplicar técnicas SIG las cuales permitan construir este MDE, a una escala apropiada para las zonas que se vayan a evaluar.
- Se recomienda calcular el caudal, que se utiliza para el modelado de avenidas torrenciales, con métodos más complejos, los cuales involucren diversas variables, de tal forma que el

caudal obtenido se ajuste a la realidad y así, obtener un modelo más preciso, que ayude a la prevención de desastres ante estos eventos.

- Se recomiendan realizar monitoreo, obras de reforestación y estabilización de taludes con el fin de controlar los movimientos en masa, en donde la susceptibilidad se clasifíco en alta y muy alta, además de las zonas críticas, y con ello prevenir la las zonas de acumulación, donde se puedan generar diques represando el flujo, que posteriormente se puedan romper y generen eventos de avenidas torrenciales los cuales puedan causar pérdidas humanas y económicas.
- Debido a la alta velocidad con la que se presentan los eventos de avenidas torrenciales se recomienda crear sistemas de alerta, con el fin de prevenir pérdidas de vidas humanas. Estos sistemas se deben instalar en la confluencia de la quebrada la Sardina, del rio Betania, de la quebrada la Negreña con el Rio Playonero y otro en la quebrada la Naranjera.
- Se aconseja que este estudio sea tenido en cuenta para la elaboración de los futuros planes de ordenamiento territorial en la zona en estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (PMA:GCA), P. M. (2007). *Movimientos en masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería, publicación Geológica Multinacional No.4, 432p.
- ASF. (2017). *Dataset: ASF DAAC 20015, ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected high_res. Includes Material JAXA/METI 2007. doi:10.5067 / Z97HFCNKR6VA*. Recuperado el 01 de 03 de 2017
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda - Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65, 15-31.
- Barreto, G., & Ruiz, D. (2001). *Estudio de la amenaza por avenidas torrenciales en el sector noroccidental de la ciudad de Ibagué (departamento de Tolima)*. Ibagué.
- Boinet et al. (1989). *La Falla de Bucaramanga (Colombia), su función durante la Orogenia Andina*. Bogotá: Geología Norandina (11); 3-10.
- Brunner, G., & CEIWR-HEC. (2016). HEC-RAS, River Analysis System, User's Manual, V 5.0. Davies, CA.: U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).
- Burrough, P. A., & McDonell, R. A. (1998). *Principles of Geographical information Systems*. New York: Oxford University Press, 190 Pág.
- Caballero, J. H. (2011). Las avenidas torrenciales: Una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 45-50.
- Campell, C. J. (1965). *The Santa Marta wrench fault of Colombia and its regional setting*.
- Castro, J. A. (2007). Deslizamientos y Avenidas Torrenciales. *Cosmos*.
- Cepal, & BID. (2012). *Valoracion de daños y pérdidas:Ola invernal en Colombia 2010 - 2011*. Bogotá: Publicación de las Naciones Unidas.
- Chien, N., & Wan, Z. (1999). Mechanics of Sediment Transport. *ASCE Reston Virginia*, 913.
- Choi, J., Won, J., & Lee, S. (2010). Validation of an artificial neural network model for landslide susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences*, 60(3), 473-483.
- CORANTIOQUIA. (2013). *Documento de Avenidas Torrenciales: Estimación y elaboración cartográfica de amenazas por inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa con el uso de tecnologías geoespaciales*. Medellín.
- CORNARE. (2012). *Evaluación y zonificación de riesgos por Avenidas Torrenciales, inundacion, movimientos en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de La Ceja*. Medellín.

- Corporacion OSSO, & Universidad EAFIT. (2011). *Comportamiento del riesgo en Colombia. Proyecto analisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*. Bogotá: Banco Mundial.
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bull Inter Assoc Engng Geol*, 43, 27-29.
- Dávila, J. (2011). *Diccionario Geológico*. INGEMMET.
- DESINVENTAR. (2017). *Muestra de datos historicos recolectados en el municipio de El Playón pertenecientes a los diferentes eventos ocurridos desde el año 1979 hasta el 2015. Sistema de Inventario de efectos de desastres (DESINVENTAR)*. Recuperado el 20 de Junio de 2017, de https://online.desinventar.org/desinventar/#COL-1250694506-colombia_inventario_historico_de_desastres
- Dias de la Cruz, V. (2012). *Analisis hidrológico e hidráulico mediante técnicas SIG de la peligrosidad por inundaciones en la cuenca del Plat de Sant Jordi (Mallorca)*. Madrid.
- DINT. (2005). *Manual de hidrología básica para estruturas de drenagem -2 ed*. Rio de Janeiro: IRP Publ. 715, 133p.
- Felícísimo, A. (2008). *Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales*.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. *Engineering Geology*, 102: 85-98.
- Flórez, A., & Suavita, M. (1997). Génesis y manifestación de las inundaciones en Colombia. *Cuadernos de Geografía*, 5, 60-110.
- Folk, R. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Texas: Hemphill, Austin.
- Ganser, A. (1973). Facts and theories on the Andes. *Journal geological Society Londón*, 129, 93-131.
- García, C. (2005). El Deslizamientos de Villatina, Medellin, 1987. En M. Hermelín, *Desastres de Origen Natural en Colombia, 1979-2004* (págs. 55-65). Medellin: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Garcia, M. (1986). Eventos Catastróficos del 13 de Noviembre de 1985. *Conferencia Gustavo Maldonado. IV Jornada Geotecnica. Sociedad Colombiana de Ingenieros*, (págs. 2-82). Bogotá.
- Glade, T., & Crozier, M. (2005). *The nature of landslide and hazard impact*. Chicheste, England: John Willey & Sons, p. 43-75.
- Gokceoglu, C., & Aksoy, H. (1996). Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, 44(1), 147-161.

- González, J. (2014). La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: Una mirada crítica. *Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería civil. Bogotá.*
- González, J., Chávez, O., & Hermelin, M. (2005). Aspectos geomorfológicos de la avenida torrencial del 31 de enero de 1994 en la cuenca del río Fraile y sus fenómenos asociados. En M. Hermelin, *Desastres de origen natural en Colombia 1979 - 2004*. Medellín: Universidad Eafit.
- González, M. (2015). *Comparación entre los métodos Heurístico, Estadístico Univariado y Estadístico Bivariado, para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 en el municipio de Santa Bárbara, departamento de Antioquia*. Medellín: Departamento de ciencia de la tierra, Universidad EAFIT.
- Hermelin, M., Mejía, O., & Velásquez, E. (2002). El evento torrencial de septiembre de 1990 en San Carlos (Colombia) y sus consecuencias catastróficas. En J. Lugo, & M. Inbar, *Desastres naturales en América Latina* (págs. 335-348). México: Fondo de Cultura Económica.
- Hoek, E., & Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V 34., 1165-1186.
- Hutchinson, J. (1968). *Mass Movements*, en Fairbridge, R.W., ed., 1968, *The Encyclopedia of Geomorphology*. New York: Reinhold Book Corporation, p. 688–695.
- Hutchinson, J. (1988). *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. en *Memorias, 5th International Conference on Landslides*, Lausanne, p. 3–35.
- INGEOMINAS. (1973). *Geología de las planchas 109 (Rionegro), 120 (Bucaramanga), 110 (Pamplona) y 121 (Cerrito) del Mapa Geológico de Colombia. Memoria Explicativa* . 144 Pág.
- INGEOMINAS. (1977). *Mapa Geológico de la plancha 109 (Rionegro) Escala 1:100.000*.
- INGEOMINAS. (1981). *Mapa Geológico de la plancha 97 (Cácher) Escala 1:100.000*.
- INGEOMINAS. (1996). *Inventario Nacional de Desastres Naturales*. Medellín: INGEOMINAS.
- INGEOMINAS. (2005). *Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (2017). *Sistema de Información Valores Máximos Mensuales de Precipitación (mms) Nacional Ambiental en 24 Horas*. Bucaramanga.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (2000). *Movimientos en Masa dañinos ocurridos en Colombia durante el Fenómeno Frio del Pacífico (La Niña) 1999-2000*. Bogotá DC.

- Julivert, M., & Téllez, N. (1963). *Sobre la presencia de fallas de edad precretácica y post-Girón (Jura-Triásico) en el flanco W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia)*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Boletín de Geología, (12); 5-17.
- Lemus, M., & Navarro, G. (2003). *Manual para el desarrollo de obras de conservación de suelo*. San Fernando (Chile): Corporación Forestal Nacional.
- Londoño, J. P. (2006). *Evaluación Holística del Riesgo frente a deslizamientos en áreas urbanas andinas. Estudio de caso: Manizales. Tesis de Maestría*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. 244 Pág.
- Montoya, L., Silva, S., & González, J. (2009). Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas, caso de aplicación a la quebrada doña María. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8,15,11-29.
- Muñoz, J. (1995). *Geomorfología General*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Piedrahita, I., & Hermelin, M. (2005). La avenida torrencial del río Tapartó (Antioquia). En M. Hermelin, *Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004* (págs. 109-120). Medellín: Fondo Editorial Universidad.
- Rincón, J. (2014). *Contribución a los estudios Geomorfología para la zonificación de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa a escala 1:100.000 en la Sierra Nevada del Cucuy (Planchas 137 y 153)*. Bucaramanga: Escuela de Geología, UIS.
- Royero, J. M. (1994). *Geología de la plancha 65 (Tamalameque (Departamento del Cesar y Bolívar))*. Ingeominas. Memoria explicativa. Bucaramanga: 76 pág.
- Royero, J., & Clavijo, J. (2001). *Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander*.
- Sánchez, F. J. (2016). Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación - Escorrentía. *Departamento de Geología. Universidad de Salamanca (España)*, 22.
- SGC. (2012). *Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza relativa por Movimientos en Masa. Escala 1:100.000*. Bogotá: 135 Pág.
- SGC. (2013). *Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza relativa por Movimientos en Masa. Escala 1:100.000*. Bogotá.
- SGC. (2013). *Sistemas de información de movimientos en masa (SIMMA)*. Recuperado el 20 de Junio de 2017, de <http://simma.sgc.gov.co>
- SGC. (2014). *Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:100.000*.
- Smith, K., & Ward, R. (1998). *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. Chichester, John & Wiley, 382.
- Suárez, J. (2001). Erosión en Masa - Flujos y Avalanchas. En J. Suárez, *Control de Erosión en Zonas Tropicales* (págs. 170 - 190). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

- Toussaint, J., & Restrepo, J. (1976). Modelos orogénicos de tectónica de placas de los Andes Colombianos. *Bol. Cienc. de la Tierra. Univ. Nal. Medellin*, 1: 1-47.
- Tschanz et al. (1969). *Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia*. Bogotá: Ingeominas, informe 1829. Preliminary report 288 pág.
- Urrea, H., & Vásquez, G. (1996). *Caracterización, cartografía y estrategias de manejo de las cuencas hidrográficas torrenciales del municipio de Guatapé (Trabajo de Grado)*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- USGS. (1984). Geological Survey Water-Supply. *Paper 2275*.
- Valencia, J. (2017). *Aplicación de Redes Neuronales y SIG en el Análisis de Riesgos de Inundación y Movimientos de Ladera en el Municipio de Capitanejo (Santander - Colombia)*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Van Westen, C. (1997). Statistical Landslide Hazard Analysis. Ilwis 2.1 for Windows application guide. *ITC Publication*, N. 15: 73-84.
- Vanguardia-Liberal . (26 de 11 de 1979). 300 muertos en "El Playón". *Vanguardia Liberal*.
- Varnes, D. (1958). *Landslides types and processes*, en Eckel, E.B., ed., *Landslides and engineering practice*, Special Report 28. Washington, DC: Highway Research Board, National Academy of Sciences, p. 20–47.
- Varnes, D. (1978). *Slope movements types and processes*, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, *Landslides analysis and control*. Washington D. C: National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 176, p. 9–33.
- Vásquez, G. (1993). *El problema constante de las cuencas torrenciales, a propósito del desastre del río Tapartó (Antioquia)*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., & Restrepo, H. (1973). *Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander*. Bucaramanga: US Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico, 21 (1-3), 1-132.
- Wilches-Chaux, G. (2005). El terremoto, la avalancha y los deslizamientos de la cuenca del río Páez, 1994. En M. Heremlín, *Desastres de origen natural en Colombia, 1974-2004* (págs. 121-135). Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Tabla de datos pluviométricos para la cuenca del río Playonero IDEAM, 2017.

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACION VALORES MAXIMOS MENSUALES DE PRECIPITACION (mm) NACIONAL AMBIENTAL EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO: 2017/05/30								ESTACION: 23190140 EL PLAYON							
LATITUD 0727 N				TIPO EST PM				DEPTO SANTANDER				FECHA- INSTALACION 1958-MAY			
LONGITUD 7312 W				ENTIDAD 01 IDEAM				MUNICIPIO EL PLAYON				FECHA- SUSPENSION			
ELEVACION 0500 m.s.n.m				REGIONAL 08 SANTANDERES				CORRIENTE PLAYONERO							
Año	E S T	E N T	EN ER O	FEB RER O	MA RZ O	AB RI L	M AY O	JU NI O	JU LI O	AG OST O	SEPTI EMBR E	OCT UBR E	NOVI EMBR E	DICIE MBR E	VR. AN UA L
1958	4	2						14	14	18	8	29	35	20	35
1959	4	2	32	0	30	55		25	30		45	53	33	24	55
1960	4	2	25	54	31	25	23	28	24	26	29	36	28	17	54
1961	4	2	16	6	32	32	29	32	32	28					32
1962	4	2			2										2
1963	4	2					80	33	82	57	32	45	75	41	82
1964	4	2	51	32	36	37	45	20	50	19	26	28	75	35	75
1965	4	2	42	60	0	35	75	26	32			47	57	52	75
1966	4	2	27	36	20	30	52	37	45	35	31	85	82	50	85
1967	4	2	30	51	40	70	75	70		16	50				75
1968	4	2				45	30	33	31		32	34	35	13	45
1969	2	1	33	16	34	27	40	22	16	29	56	29	28	21	56
1970	2	1	24	17	18	24	68	*	32	26	25	43	30	58	68
1971	2	1	85	36	19	20	46	11	31	35	31		40	11	85
1972	2	1	44	32	15	19	37	35	25	43	22	110	32	30	110
1973	2	1	33	17	99	38	47	30	40	34	94	24	77	14	99
1974	2	1	14	44	26	36	29	35	43	52	54	70	45	10	70
1975	2	1	12	45	50	40	40	60	64	34	24	30	82	92	92
1976	2	1	11	29	24	30	31	41	27	11	29	41	35	20	41
1977	2	1	50	40	32	70			36	40	45	64	70	14	70
1978	2	1	34	31	113	90	57	22	17	36	53	60	30	31	113
1979	2	1	8	57	25	70	30	37	38	65	60	130	90		130
1980	2	1				39	49	50	17	26	15	62.1	50.4	47	62.1
1981	2	1	8.9	93.9	61.4	41.1	49	39	42.1	62.8	50	13	14	44	93.9

Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales

1982	2	1	5		12	55.4	69	60	55			34	27.4	17.8	69
1983	2	1	11.5	23.8	63.3	78.2	23.8	40	28.4	29.5	31.5	38.1	90.5	43.5	90.5
1984	2	1	70.6	34.9	46	42.8	85.4	40	22	79.1	106	86.9	30	13	106
1985	2	1	34.7	46.6	64.5	26.1	64.1	49.4	31	31.4	52.5	53.3	98.8	11.1	98.8
1986	2	1	38.4	41.2	30.6	58.3	55.4	20.8	27	18	63	71	36	26	71
1987	2	1	16	101	106	58	53	35	37	33	56	76	37	40	106
1988	2	1	11	40	17	29	30	44	29	62	29	61	82	11	82
1989	2	1	19	45	27	23	53	35	32	53	47	28	33	31	53
1990	2	1	46	88	54	101	12	24	17	35	19	54	84	43	101
1991	2	1	20	34	88	25	24	51	47	38	61	78	56	17	88
1992	2	1	6	17	20	46	62	44	31	44	43	53	54	14	62
1993	2	1	19	17	52	98	69	28	46	79	48	19	77	30	98
1994	2	1	49	50	45	45	70	15	42	21	38	32	77	37	77
1995	2	1	18	11	49	92	56	61	83	41	38	38	8	32	92
1996	2	1	24	75	71	77	32	43	38	43	32	75	35	34	77
1997	2	1	45	33	15	60	54	52	34	62	75	69	40	29	75
1998	2	1	55	93	15	44	80	36	44	103	51	37	46	82	103
1999	2	1	59	33	47	53	73	51	16	37	39	43	82	65	82
2000	1	1	36	61	67	49	35	34	36	26	33	36	43	28	67
2001	1	1	19	5	67	51	137	46	36	29	31	112	24	61	137
2002	1	1	3	30	55	60	92	50	104	39	47	67	20	40	104
2003	1	1	6	37	82	35	33	65	27	31	30	60	75	92	92
2004	1	1	85	22	21	66	76	30	30	35	39	65	40	40	85
2005	1	1	45	42	52	70	23	30	15	36	30	83	96	42	96
2006	1	1	58	20	57.2	34.4	48	18	26.2	56	35	63.5	33	21	63.5
2007	1	1	18.6	14	50	50	72	45	45.5	47	77	34.4	22.5	26.5	77
2008	1	1	92	34.4	27.5	43.4	44.4	32.4	26	21.6	29.4	40	73.4	24	92
2009	1	1	36.7	15.2	57.2	32.8	44.5	57.5	11	25	26.4	63	50	51.2	63
2010	1	1	3.2	23	70.5	46.5	54.3	43.4	53.5	22	49.5	36.5	103.2	121	121
2011	1	1	24	45.2	43.5	46.2	97.3	21.5	25.7	50	38	124	48	32	124
2012	1	1	51.5	8.5	82	71	31.7	65.8	32	55.8	34.7	53.2	35	38.2	82
2013	1	1	4	44.3	25	31.1	75.5	32	16.5	31	77	36.5	38	8	77
2014	1	1	22.5	37.5	38	108.5	49.5	35.7	43.5	31	72	34.5	91	10	108.5
2015	1	1	35	84.5	95	29	34	13	13	27.5	25.8	12	62	11.5	95

Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales

			5			5	5								
2016	1	1	12.8	7	12	76	26.5	24.5	12.3	23	38.2	92.5	31.5	16.5	92.5
MEDIOS			31.1	37.9	44.2	49.7	52.2	37	34.7	38.7	42.8	54.4	52.2	34.2	42.4
MAXIMOS			92	101	113	108.5	137	70	104	103	106	130	103.2	121	137
MINIMOS			3	0	0	19	12	11	11	11	8	12	8	8	0

ANEXO B. Tabla de variables geológicas y geomorfológicas ponderadas.

RESISTENCIA												
	Actividad con MM	claslide	nclas	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
R5	Con	1883	1515065	1879805	3228	1883	1345	1513182	363395	-0.32376184	0.766245517	-0.30842574
R3	Con	277	147953	1879805	3228	277	2951	147676	1728901	0.086583444	-0.00775522	0.87592029
NP	Con	198	63773	1879805	3228	198	3030	63575	1813002	0.593633342	-0.02883479	1.404049753
R6	Con	105	153014	1879805	3228	105	3123	152909	1723668	-0.91829600	0.051926122	-0.18864050
			1879805									
TEXTURA												
	Actividad con MM	claslide	nclas	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
Cristalina Masiva	Con	1883	1515065	1879805	3228	1883	1345	1513182	363395	-0.32376184	0.766245517	-0.30842574
Clástica Consolidada	Con	277	147953	1879805	3228	277	2951	147676	1728901	0.086583444	-0.00775522	0.87592029
NP	Con	198	63773	1879805	3228	198	3030	63575	1813002	0.593633342	-0.02883479	1.404049753
Cristalina Foliada	Con	105	153014	1879805	3228	105	3123	152909	1723668	-0.91829600	0.051926122	-0.18864050
			1879805									
DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO												

Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales

	Activi dad con MM	classl ide	nclas s	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
_1	Con	610	6368 84	1879 805	322 8	610	261 8	6362 74	1240 303	- 0.58458 370	0.20464 1585	- 0.48681 576
_2	Con	342	3994 59	1879 805	322 8	342	288 6	3991 17	1477 460	- 0.69685 724	0.12713 3685	- 0.52158 140
_3	Con	975	5201 68	1879 805	322 8	975	225 3	5191 93	1357 384	0.08774 841	- 0.03571 003	0.42586 7977
_4	Con	383	2249 97	1879 805	322 8	383	284 5	2246 14	1651 963	- 0.00876 176	0.00118 5412	0.29246 2358
_5	Con	153	9829 7	1879 805	322 8	153	307 5	9814 4	1778 433	- 0.09841 124	0.00515 8884	0.19883 9404
			1879 805									
MORFOGÉNESIS												
	Activi dad con MM	classl ide	nclas s	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
Fpi	Con	0	3807 3	1879 805	322 8	0	322 8	3807 3	1838 504	0	0.02049 7175	0
Dlo	Con	86	2219 72	1879 805	322 8	86	314 2	2218 86	1654 691	- 1.49022 981	0.09883 1878	- 1.34120 384
Sces	Con	344	4624 6	1879 805	322 8	344	288 4	4590 2	1830 675	1.47171 959	- 0.08791 991	1.80749 7348
Def	Con	0	2591 5	1879 805	322 8	0	322 8	2591 5	1850 662	0	0.01390 596	0
Slf	Con	19	5064 6	1879 805	322 8	19	320 9	5062 7	1825 950	- 1.52245 942	0.02144 5585	- 1.29604 716
Sesml	Con	0	2459 2	1879 805	322 8	0	322 8	2459 2	1851 985	0	0.01319 1336	0
Slfe	Con	0	2743	1879 805	322 8	0	322 8	2743	1873 834	0	0.00146 2773	0
Sle	Con	167	1381 80	1879 805	322 8	167	306 1	1380 13	1738 564	- 0.35176 744	0.02326 8797	- 0.12717 839
Sesal	Con	50	6683 1	1879 805	322 8	50	317 8	6678 1	1809 796	- 0.83180 898	0.02062 4559	- 0.60457 569
Sloes	Con	34	3075 3	1879 805	322 8	34	319 4	3071 9	1845 858	- 0.44093 420	0.00591 6462	- 0.19899 282
Sbh	Con	0	4763	1879 805	322 8	0	322 8	4763	1871 814	0	0.00254 1358	0
Sloe	Con	0	8121	1879	322	0	322	8121	1868	0	0.00433	0

Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales

				805	8		8		456		6951	
Deem	Con	0	2240 7	1879 805	322 8	0	322 8	2240 7	1854 170	0	0.01201 2216	0
Dct	Con	173	1458 5	1879 805	322 8	173	305 5	1441 2	1862 165	1.94281 7024	- 0.04737 357	2.23804 8447
Dlda	Con	381	2070 99	1879 805	322 8	381	284 7	2067 18	1669 859	0.06903 0452	- 0.00888 676	0.32577 5061
Dldebl	Con	0	8346	1879 805	322 8	0	322 8	8346	1868 231	0	0.00445 7379	0
Dlea	Con	240	2399 80	1879 805	322 8	240	298 8	2397 40	1636 837	- 0.54132 945	0.05942 5168	- 0.35289 677
Deeme	Con	72	5357 2	1879 805	322 8	72	315 6	5350 0	1823 077	- 0.24542 891	0.00636 6292	- 0.00393 735
Sce	Con	70	6622	1879 805	322 8	70	315 8	6552	1870 025	1.82631 1518	- 0.01842 626	2.09259 5628
Sesbm	Con	70	9196	1879 805	322 8	70	315 8	9126	1867 451	1.49495 4382	- 0.01704 886	1.75986 1091
Dle	Con	60	5857 5	1879 805	322 8	60	316 8	5851 5	1818 062	- 0.51735 194	0.01291 5998	- 0.28241 009
Sesbl	Con	0	1446 9	1879 805	322 8	0	322 8	1446 9	1862 108	0	0.00774 0193	0
Dldi	Con	399	2554 39	1879 805	322 8	399	282 9	2550 40	1621 537	- 0.09487 235	0.01413 545	0.13885 0042
Slcp	Con	0	862	1879 805	322 8	0	322 8	862	1875 715	0	0.00045 9453	0
Sgf	Con	260	2435 8	1879 805	322 8	260	296 8	2409 8	1852 479	1.83613 9404	- 0.07104 979	2.15504 7047
Dlema	Con	13	1380 24	1879 805	322 8	13	321 5	1380 11	1738 566	- 2.90479 741	0.07235 3344	- 2.72929 290
Dcrem	Con	0	952	1879 805	322 8	0	322 8	952	1875 625	0	0.00050 7435	0
Ftae	Con	22	1544	1879 805	322 8	22	320 6	1522	1875 055	2.12860 3816	- 0.00602 731	2.38248 898
Dcred	Con	0	2635 4	1879 805	322 8	0	322 8	2635 4	1850 223	0	0.01414 32	0
Dldma	Con	0	7918 6	1879 805	322 8	0	322 8	7918 6	1797 391	0	0.04311 3204	0
See	Con	0	1675	1879 805	322 8	0	322 8	1675	1874 902	0	0.00089 2981	0
Dld	Con	0	3572 3	1879 805	322 8	0	322 8	3572 3	1840 854	0	0.01921 9778	0
Fca	Con	1	8290	1879 805	322 8	1	322 7	8289	1868 288	- 2.65734 271	0.00411 7032	- 2.41360 189

Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales

Dcr	Con	0	1243 6	1879 805	322 8	0	322 8	1243 6	1864 141	0	0.00664 9015	0
Fta	Con	2	1276	1879 805	322 8	2	322 6	1274	1875 303	- 0.09142 775	5.93555 E-05	0.15637 0738
			1879 805									
ALTURA												
	Activi dad con MM	classl ide	nclas s	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
_1	Con	240	2253 14	1879 805	322 8	240	298 8	2250 74	1651 503	- 0.47820 369	0.05050 5107	- 0.27097 994
_2	Con	484	2717 71	1879 805	322 8	484	274 4	2712 87	1605 290	0.03649 4228	- 0.00630 109	0.30052 418
_3	Con	409	2664 21	1879 805	322 8	409	281 9	2660 12	1610 565	- 0.11223 964	0.01738 3785	0.12810 5431
_4	Con	321	2544 57	1879 805	322 8	321	290 7	2541 36	1622 441	- 0.30884 181	0.04077 6438	- 0.09188 939
_5	Con	332	2276 73	1879 805	322 8	332	289 6	2273 41	1649 236	- 0.16372 950	0.02060 4946	0.07339 441
_6	Con	216	1844 57	1879 805	322 8	216	301 2	1842 41	1692 336	- 0.38337 965	0.03408 1109	- 0.15973 190
_7	Con	188	1789 89	1879 805	322 8	188	304 0	1788 01	1697 776	- 0.49224 487	0.04012 4978	- 0.27464 099
_8	Con	273	1490 11	1879 805	322 8	273	295 5	1487 38	1727 839	0.06487 2048	- 0.00578 622	0.32838 7128
_9	Con	0	9745 3	1879 805	322 8	0	322 8	9745 3	1779 124	0	0.05332 8264	0
_10	Con	0	2425 9	1879 805	322 8	0	322 8	2425 9	1852 318	0	0.01301 1545	0
			1879 805									
PENDIENTE												
	Activi dad con MM	classl ide	nclas s	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
_1	Con	34	5082 2	1879 805	322 8	34	319 4	5078 8	1825 789	- 0.94371 295	0.01684 845	- 0.65817 874
_2	Con	159	1141 83	1879 805	322 8	159	306 9	1140 24	1762 553	- 0.20991 812	0.01217 5072	0.08028 9463
_3	Con	241	1822 79	1879 805	322 8	241	298 7	1820 38	1694 539	- 0.26183	0.02444 5434	0.01610 5328

Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales

										190		
_4	Con	353	2712 36	1879 805	322 8	353	287 5	2708 83	1605 694	- 0.27763 231	0.04008 3235	- 0.01533 288
_5	Con	839	6548 30	1879 805	322 8	839	238 9	6539 91	1222 586	- 0.29329 626	0.12749 3203	- 0.11840 680
_6	Con	793	5510 09	1879 805	322 8	793	243 5	5502 16	1326 361	- 0.17690 108	0.06509 4277	0.06038 7301
_7	Con	44	5544 6	1879 805	322 8	44	318 4	5540 2	1821 175	- 0.77283 943	0.01624 2993	- 0.48669 976
			1879 805									
RUGOSIDAD												
	Activi dad con MM	classl ide	nclas s	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
_1	Con	1064	8003 74	1879 805	322 8	106 4	216 4	7993 10	1077 267	- 0.25637 156	0.15511 7705	- 0.08134 962
_2	Con	745	5701 54	1879 805	322 8	745	248 3	5694 09	1307 168	- 0.27362 814	0.09919 1164	- 0.04267 965
_3	Con	400	2950 13	1879 805	322 8	400	282 8	2946 13	1581 964	- 0.23661 146	0.03848 9257	0.05503 8927
_4	Con	157	1371 91	1879 805	322 8	157	307 1	1370 34	1739 543	- 0.40639 664	0.02596 7429	- 0.10222 442
_5	Con	97	7707 3	1879 805	322 8	97	313 1	7697 6	1799 601	- 0.31119 608	0.01137 4091	0.00756 947
			1879 805									
CURVATURA												
	Activi dad con MM	classl ide	nclas s	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
_1	Con	544	5028 45	1879 805	322 8	544	268 4	5023 01	1374 276	- 0.46266 367	0.12696 7794	- 0.24167 926
_2	Con	1185	8711 50	1879 805	322 8	118 5	204 3	8699 65	1006 612	- 0.23336 830	0.16541 5701	- 0.05083 180
_3	Con	734	5058 10	1879 805	322 8	734	249 4	5050 76	1371 501	- 0.16861 326	0.05556 8709	0.12377 0234
			1879 805									
ORIENTACION												

Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales

	Activi dad con MM	classl ide	nclas s	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
_1	Con	289	1861 47	1879 805	322 8	289	293 9	1858 58	1690 719	- 0.10096 963	0.01050 2127	0.14650 605
_2	Con	553	1593 30	1879 805	322 8	553	267 5	1587 77	1717 800	0.70544 3922	- 0.09950 84	1.06293 013
_3	Con	186	2022 06	1879 805	322 8	186	304 2	2020 20	1674 557	- 0.62503 340	0.05455 3163	- 0.42160 876
_4	Con	276	2156 34	1879 805	322 8	276	295 2	2153 58	1661 219	- 0.29431 427	0.03251 7859	- 0.06885 432
_5	Con	186	2076 01	1879 805	322 8	186	304 2	2074 15	1669 162	- 0.65138 832	0.05778 0112	- 0.45119 062
_6	Con	197	2293 13	1879 805	322 8	197	303 1	2291 16	1647 461	- 0.69343 807	0.06724 3905	- 0.50270 417
_7	Con	265	2289 32	1879 805	322 8	265	296 3	2286 67	1647 910	- 0.39495 034	0.04428 1072	- 0.18125 361
_8	Con	257	2305 81	1879 805	322 8	257	297 1	2303 24	1646 253	- 0.43282 430	0.04798 3422	- 0.22282 992
_9	Con	254	2200 61	1879 805	322 8	254	297 4	2198 07	1656 770	- 0.39782 899	0.04262 4546	- 0.18247 573
			1879 805									
DISTANCIA A RIOS												
	Activi dad con MM	classl ide	nclas s	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wmenus	Wfinal
_1	Con	1163	5845 65	1879 805	322 8	116 3	206 5	5834 02	1293 175	0.14746 8289	- 0.07438 358	0.50074 9398
_2	Con	509	5276 78	1879 805	322 8	509	271 9	5271 69	1349 408	- 0.57748 654	0.15818 481	- 0.45677 382
_3	Con	450	4498 24	1879 805	322 8	450	277 8	4493 74	1427 203	- 0.54102 129	0.12360 1282	- 0.38572 505
_4	Con	257	2689 41	1879 805	322 8	257	297 1	2686 84	1607 893	- 0.58687 326	0.07156 0592	- 0.37953 633
_5	Con	84	4879 7	1879 805	322 8	84	314 4	4871 3	1827 864	0.00245 7486	- 6.5575E -05	0.28142 0584
			1879 805									

Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales

DISTANCIA A VIAS												
	Activi dad con MM	classl ide	nclas s	nmap	nsli de	npi x1	npi x2	npix3	npix4	wplus	wminus	Wfinal
_1	Con	2026	5808 51	1879 805	322 8	202 6	120 2	5788 25	1297 752	0.71040 512	- 0.61906 007	1.35264 3933
_2	Con	244	5193 53	1879 805	322 8	244	298 4	5191 09	1357 468	- 1.29735 903	0.24523 0105	- 1.51941 040
_3	Con	114	4331 10	1879 805	322 8	114	311 4	4329 96	1443 581	- 1.87694 342	0.22636 7863	- 2.08013 254
_4	Con	79	2442 74	1879 805	322 8	79	314 9	2441 95	1632 382	- 1.67093 261	0.11463 1267	- 1.76238 514
_5	Con	0	1022 17	1879 805	322 8	0	322 8	1022 17	1774 360	0	0.05600 9578	0
			1879 805									

ANEXO C. Tabla caudales calculados para cada uno de los años que se tuvo registro, en cada subcuena definida.

Año	Q. La Sardina	Rio Betania	Q. La Negraña	Q. La Naranjera
1958	33.54	53.73	43.73	16.04
1959	52.71	84.43	68.72	25.21
1960	51.75	82.89	67.47	24.75
1961	30.67	49.12	39.98	14.67
1962	1.92	3.07	2.5	0.92
1963	78.58	125.87	102.45	37.59
1964	71.87	115.13	93.71	34.38
1965	71.87	115.13	93.71	34.38
1966	81.46	130.48	106.2	38.96
1967	71.87	115.13	93.71	34.38
1968	43.12	69.08	56.22	20.63
1969	53.67	85.96	69.97	25.67
1970	65.17	104.38	84.96	31.17
1971	81.46	130.48	106.2	38.96
1972	105.42	168.85	137.44	50.42
1973	94.87	151.97	123.69	45.38
1974	67.08	107.45	87.46	32.09
1975	88.17	141.22	114.95	42.17
1976	39.29	62.94	51.23	18.79
1977	67.08	107.45	87.46	32.09
1978	108.29	173.46	141.18	51.79

Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales

1979	124.58	199.55	162.42	59.59
1980	59.51	95.32	77.59	28.46
1981	89.99	144.14	117.32	43.04
1982	66.12	105.92	86.21	31.63
1983	86.73	138.92	113.07	41.48
1984	101.58	162.71	132.44	48.59
1985	94.68	151.66	123.44	45.29
1986	68.04	108.99	88.71	32.54
1987	101.58	162.71	132.44	48.59
1988	78.58	125.87	102.45	37.59
1989	50.79	81.36	66.22	24.29
1990	96.79	155.04	126.19	46.29
1991	84.33	135.08	109.95	40.34
1992	59.42	95.17	77.46	28.42
1993	93.92	150.43	122.44	44.92
1994	73.79	118.2	96.2	35.29
1995	88.17	141.22	114.95	42.17
1996	73.79	118.2	96.2	35.29
1997	71.87	115.13	93.71	34.38
1998	98.71	158.11	128.69	47.21
1999	78.58	125.87	102.45	37.59
2000	64.21	102.85	83.71	30.71
2001	131.29	210.3	171.17	62.8
2002	99.67	159.64	129.94	47.67
2003	88.17	141.22	114.95	42.17
2004	81.46	130.48	106.2	38.96
2005	92	147.36	119.94	44
2006	60.85	97.47	79.34	29.11
2007	73.79	118.2	96.2	35.29
2008	88.17	141.22	114.95	42.17
2009	60.37	96.71	78.71	28.88
2010	115.96	185.74	151.18	55.46
2011	118.83	190.34	154.93	56.84
2012	78.58	125.87	102.45	37.59
2013	73.79	118.2	96.2	35.29
2014	103.98	166.55	135.56	49.73
2015	91.04	145.83	118.69	43.54
2016	88.64	141.99	115.57	42.4

ANEXO D. Datos de Isóbatas e Isótacas para cada escenario evaluado.

