



¡Tod@s construimos el futuro  
de nuestro municipio!

# ESTUDIOS BÁSICOS DE, RIESGO CHÍA, CUNDINAMARCA AVENIDA TORRENCIAL

Mayo de 2022  
Versión Final



ALCALDÍA  
MUNICIPAL  
DE CHÍA

Secretaría de  
**Planeación**



## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. OBJETIVOS.....	7
2.1 Objetivo General.....	7
2.2 Objetivos Específicos.....	7
3. MARCO CONCEPTUAL Y NORMATIVO.....	8
4. EVALUACIÓN DE AMENAZA POR PROCESOS DE AVENIDA TORRENCIAL 1:25.000	13
4.1 Identificación de amenazas.....	13
4.2 Metodología de amenazas por avenidas torrenciales .....	14
4.2.1 Morfometría de Cuencas .....	22
4.2.1.1 Densidad de Drenaje .....	22
4.2.1.2 Pendiente media de la Cuenca .....	24
4.2.1.3 Pendientes generales del municipio.....	24
4.2.1.4 Coeficiente de compacidad.....	26
4.2.2 Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales - IVET.....	27
4.3 Evaluación de la Susceptibilidad.....	29
4.4 Evaluación de la Amenaza por Avenidas Torrenciales 1:25.000.....	30
4.4.1 Caracterización de aportes de sedimentación.....	30
4.4.1.1 Geomorfología.....	30
4.4.2 Caracterización de Coberturas .....	39
4.4.3 Caracterización de aportes de sedimentación.....	41
4.4.4 Zonificación de amenazas por avenidas torrenciales.....	43
5. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN CAUCES PRIORIZADOS.....	43
5.1 Producción de sedimentos en la cuenca de las quebradas priorizadas.....	43
5.1.1 Erosión pluvial o erosión de la lluvia (r).....	44
5.1.2 Susceptibilidad de erosión del suelo o de erodabilidad (k) .....	45
5.1.3 El factor topográfico (LS) .....	48
5.1.4 Longitud de pendiente (L) .....	48
5.1.5 Factor de la pendiente (S).....	48
5.1.6 Factor topográfico (LS) .....	48
5.1.7 Índice de cobertura vegetal del suelo (C).....	49
5.1.8 Factor de prácticas de cultivo o de conservación (P) .....	52

5.1.9	Pérdida de suelo en la cuenca.....	53
5.1.9.1	Pérdida de suelo máxima y mínima cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón	53
5.1.10	Producción de sedimentos.....	54
5.1.10.1	Producción de sedimentos máxima y mínima cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón .....	54
5.2	Metodología para la evaluación a detalle de los cauces priorizados .....	56
5.2.1	Identificación y diagnóstico de zonas de inicio .....	57
5.2.2	Caracterización de zonas de transporte.....	62
5.2.3	Análisis de zonas de depósito.....	65
5.2.3.1	Planicie o llanuras de inundación (Fpi) .....	66
6.	ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR AVENIDA TORRENCIAL EN SUELO RURAL...	68
7.	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN EL CASCO URBANO .....	68
7.1.1	Análisis de zonas de inicio.....	69
7.1.2	Caracterización de zonas de transporte.....	70
7.1.3	Análisis de zonas de depósito.....	73
7.2	Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales centros poblados .....	78
8.	CONCLUSIONES .....	79
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
10.	NOTA LEGAL – MEMORIAL DE RESPONSABILIDAD .....	81

VERSIÓN FINAL

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Normativas Aplicables a la Gestión del Riesgo en Colombia .....	9
<b>Tabla 2.</b> Escalas de trabajo Decreto 1807 de 2014 .....	13
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de amenazas .....	14
<b>Tabla 4.</b> Ponderación de factores de la clasificación morfométrica .....	16
<b>Tabla 5.</b> Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET) .....	17
<b>Tabla 6.</b> Características hidrográficas menores municipio de Chía.....	20
<b>Tabla 7.</b> Características hidrográficas menores municipio de Chía.....	21
<b>Tabla 8.</b> Resumen de categorización y clasificación de la Densidad de Drenaje .....	24
<b>Tabla 9.</b> Resumen de categorización y clasificación de la Pendiente Media de la Cuenca (%) .....	24
<b>Tabla 10.</b> Rangos establecidos de la variable pendiente .....	26
<b>Tabla 11.</b> Resumen de categorización y clasificación del Coeficiente de Compacidad .....	26
<b>Tabla 12.</b> Ponderación de factores de susceptibilidad por avenida torrencial .....	42
<b>Tabla 13.</b> Valores de Factor K .....	46
<b>Tabla 14.</b> Magnitud general del factor K de erodabilidad del suelo .....	47
<b>Tabla 15.</b> Valores del parámetro C .....	51
<b>Tabla 16.</b> Valor del Factor C en función del tipo de cobertura vegetal y de la vegetación en contacto con el suelo .....	51
<b>Tabla 17.</b> Porcentaje de cubrimiento del suelo por vegetación natural del suelo para la determinación del factor C .....	52
<b>Tabla 18.</b> Factor P de acuerdo con las prácticas de conservación, según la FAO .....	52
<b>Tabla 19.</b> Prácticas específicas de control de la erosión.....	52
<b>Tabla 20.</b> Pérdida de suelo mínima y máxima de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón .....	54
<b>Tabla 21.</b> Producción de sedimentos mínima y máxima de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón.....	55
<b>Tabla 22.</b> Parámetros de suelos utilizados para el modelo .....	59
<b>Tabla 23.</b> Rangos de valores para susceptibilidad a iniciación flujo de detritos.....	61
<b>Tabla 24.</b> Cálculo de zonas de iniciación por avenida torrencial .....	62
<b>Tabla 25.</b> Cálculo de volúmenes para las quebradas Rincón y Santiamén .....	63
<b>Tabla 26.</b> Cálculo de volumen para la quebrada Honda .....	63
<b>Tabla 27.</b> Esfuerzo cortante y viscosidad como función de la concentración de sedimentos .....	64
<b>Tabla 28.</b> Categorías de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo.....	65
<b>Tabla 29.</b> Cálculo de volúmenes para el casco urbano y zonas de expansión.....	71
<b>Tabla 30.</b> Mapa de amenaza por AVT en centros poblados.....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Variables de amenaza de torrencialidad.....	15
<b>Figura 2.</b> Microcuencas escala 1:25000 jurisdicción del municipio .....	18
<b>Figura 3.</b> Precipitación microcuencas jurisdicción del municipio escala 1:25000 .....	19
<b>Figura 4.</b> Índice de variabilidad jurisdicción del municipio escala 1:25000.....	19
<b>Figura 5.</b> Relaciones entre variables para el índice morfométrico jurisdicción del municipio. ....	22
<b>Figura 6.</b> Mapa de densidad de drenaje escala 1:25000 .....	23
<b>Figura 7.</b> Mapa de pendientes de toda la jurisdicción del municipio .....	25
<b>Figura 8.</b> Mapa de pendiente media de las cuencas escala 1:25000.....	25
<b>Figura 9.</b> Mapa de coeficiente de compacidad escala 1:25000 .....	27
<b>Figura 10.</b> Valoración morfológica cuencas escala 1:25000.....	27
<b>Figura 11.</b> Mapa de IVET para las Cuencas del municipio .....	28
<b>Figura 12.</b> Mapa de las unidades geomorfológicas superficiales escala 1:25000.....	38
<b>Figura 13.</b> Calificación de la susceptibilidad a los procesos de torrencialidad de acuerdo a criterios morfogénicos Unidades IDEAM escala 1:25000 .....	39
<b>Figura 14.</b> Mapa de coberturas escala 1:25000.....	40
<b>Figura 15.</b> Mapa de índice de protección del suelo escala 1:25000.....	41
<b>Figura 16.</b> Mapa de aporte de sedimentos escala 1:25000 .....	42
<b>Figura 17.</b> Matriz de variables para zonificación de amenaza por avenida torrencial .....	43
<b>Figura 18.</b> Nomograma permite calcular de manera rápida el Factor K de erodabilidad del suelo .....	46
<b>Figura 19.</b> Nomograma permite calcular de manera rápida el Factor K de erodabilidad del suelo .....	46
<b>Figura 20.</b> Diagrama de USDA (1978) para la determinación del factor LS combinado.....	49
<b>Figura 21.</b> Variación de la erosión de acuerdo con la altura de la planta o cobertura vegetal desde el suelo. (FAO, 1996) .....	50
<b>Figura 22.</b> Pérdida de suelo (A) de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón .....	53
<b>Figura 23.</b> Relación pérdida de suelo vs área total cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón .....	54
<b>Figura 24.</b> Producción de sedimentos de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón .....	55
<b>Figura 25.</b> Relación producción de sedimentos vs área total de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón.....	56
<b>Figura 26.</b> Esquema metodológico para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales .....	56
<b>Figura 27.</b> Esquema de comportamiento de una avenida torrencial .....	57
<b>Figura 28.</b> Aporte de detritos por zonificación de PRM.....	58
<b>Figura 29.</b> Aporte de detritos por zonificación de PRM para los cauces priorizados.....	58
<b>Figura 30.</b> Ubicación de puntos de muestreo de suelo en cauces priorizados.....	60
<b>Figura 31.</b> Mapas de Pendientes para los cauces priorizados.....	60
<b>Figura 32.</b> Mapas de DEM para los cauces priorizados.....	61
<b>Figura 33.</b> Iniciación flujo de detritos para los cauces priorizados. ....	61
<b>Figura 34.</b> Zonas de inicio por avenidas torrenciales para los cauces priorizados.....	62

<b>Figura 35.</b> Cálculo de la intensidad de eventos de flujo de detritos .....	65
<b>Figura 36.</b> Zonificación de susceptibilidad por transporte de avenida torrencial cauces priorizados .....	65
<b>Figura 37.</b> Mapa de las unidades geomorfológicas superficiales para cauces priorizados y ajustado en campo.....	66
<b>Figura 38.</b> Calificación de la susceptibilidad a los procesos de torrencialidad de acuerdo a criterios morfogénicos.....	67
<b>Figura 39.</b> Mapa de amenaza por avenidas torrenciales para cauces priorizados.....	67
<b>Figura 40.</b> Amenaza avenida torrencial suelo rural Chía .....	68
<b>Figura 41.</b> Aporte de detritos por zonificación de PRM para los cauces priorizados.....	70
<b>Figura 42.</b> Mapa de pendiente zona escala 1:2000 .....	72
<b>Figura 43.</b> Zonificación de susceptibilidad por transporte de avenida torrencial zona escala 1:2000.....	72
<b>Figura 44.</b> Geomorfología zona escala 1:2000 .....	77
<b>Figura 45.</b> Calificación de la susceptibilidad a los procesos de torrencialidad de acuerdo con criterios morfogénicos escala 1:2000 .....	77
<b>Figura 46.</b> Mapa de amenaza por avenidas torrenciales escala 1:2000 .....	78

VERSIÓN FINAL

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene la zonificación de la amenaza por procesos de avenidas torrenciales en las áreas rural y urbana del municipio de Chía, mediante la evaluación técnica realizada de acuerdo con la metodología que reúne las evaluaciones del componente geológico, geomorfológico, inventario de procesos, uso del suelo y cobertura vegetal, comportamiento de las cuencas y aporte de sedimentos, las cuales actuando de una manera integrada permiten establecer el mapa de amenaza ante un evento de torrencialidad. La escala de trabajo de la cartografía base utilizada para la aplicación de dicha metodología fue 1:25000 para las áreas rurales y 1:2000 para zona urbana y centros poblados, así como para cauces activos por torrencialidad identificados y zonificados en el componente de riesgos del POMCA del río Bogotá. La zonificación de estos cauces corresponde a las quebradas el Rincón, Honda y Santiamén que se encuentran en el cerro oriental del municipio de Chía.

El tema de la incorporación de la prevención y reducción de riesgos en la Planificación del Desarrollo Territorial, se viene abordando desde la aplicación de Ley 9ª de 1989, cuando por primera vez se dispuso la obligatoriedad de incluir en los Planes de Desarrollo, acciones concretas para la intervención del territorio, y la definición de responsabilidades y competencias con respecto a la visión de futuro de los municipios y por el Decreto ley 919 de 1989 que ordena a través de su artículo 6º a las entidades territoriales incorporar el componente de prevención de desastres en los procesos de planificación territorial, sectorial y de desarrollo.

Esto parte de la necesidad de mejorar las condiciones de seguridad de los asentamientos generados en el municipio, disminuyendo la influencia negativa de aspectos ambientales en el desarrollo del territorio.

Es por esto por lo que en el desarrollo del presente documento se buscará hacer una caracterización de los factores que representan amenaza por avenidas torrenciales dentro del territorio del municipio de Chía y de acuerdo con su categorización se adelantará la incorporación del riesgo en el Ordenamiento Territorial, teniendo en cuenta lo establecido en el Decreto 1807 de 2014 compilado en el Decreto 1077 de 2015.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Evaluar la amenaza por procesos de avenida torrencial de las áreas rurales y urbana del municipio de Chía.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar geomorfológicamente el territorio municipal de acuerdo a la reciente metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano.
- Encontrar las variables de cobertura, usos del suelo, drenajes, pendiente, inventario de procesos, clima en las zonas de la jurisdicción del municipio.

- Evaluar las condiciones hidroclimatológicas, estabilidad relativa, índices de protección total de suelo y condiciones morfológicas de las cuencas aferentes del municipio para poder determinar la amenaza por avenidas torrenciales.
- Evaluar las condiciones climáticas propias del municipio a partir de una regionalización con datos multianuales.
- Obtener los mapas de zonificación de amenaza, condición de amenaza y condición de riesgo por procesos de avenidas torrenciales en las áreas de suelo rural y urbana del municipio de Chía con el objeto de incorporarlo en los procesos de ordenamiento territorial.

### 3. MARCO CONCEPTUAL Y NORMATIVO

La gestión del riesgo es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento, la reducción del riesgo y el manejo de desastres (Ley 1523 de 2012). Por lo tanto, se constituye en una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo. Asimismo, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental territorial sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población. La gestión del riesgo se fundamenta en los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres.

A través de la Ley 1523 de 2012 se promulga la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, con el fin de contrarrestar los graves efectos e impactos sociales, económicos y ambientales que causó la oleada invernal que se desató durante el año 2010 y los eventos históricos registrados en el territorio nacional. Con esta normativa se pretende introducir en todos los niveles gubernamentales una cultura organizacional que pueda responder a dinámicas que afecten a la población, considerando aspectos como la gestión ambiental sostenible, la participación comunitaria, la reducción del riesgo, entre otras.

Así mismo el Decreto 1807 de 2014, “Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones” establece las condiciones para realizar la evaluación de la gestión del riesgo y establece:

- “Delimitación, consiste en la identificación del límite de un área determinada, mediante un polígono. Debe realizarse bajo el sistema de coordenadas oficial definido por la autoridad cartográfica nacional y su precisión estará dada en función de la escala de trabajo.
- Zonificación, es la representación cartográfica de áreas con características homogéneas. Debe realizarse bajo el sistema de coordenadas oficial definido por la autoridad cartográfica nacional y su precisión estará dada en función de la escala de trabajo”.

En la **Tabla 1** se presentan los antecedentes normativos sobre la gestión del riesgo consignados en: Documentos CONPES, Decretos, Decretos Ley, Directiva Ministerial, Leyes, Resoluciones y algunos instrumentos de normatividad internacional a partir del año 1988 hasta el 2013, resaltando la expedición de varios Decretos Nacionales en 2010 debido a la emergencia invernal que afrontó el país, pues se hace evidente la implementación de la gestión de riesgo como el enfoque necesario para fortalecer el actual Sistema para la Gestión del Riesgo ante las consecuencias del cambio climático.

**Tabla 1. Normativas Aplicables a la Gestión del Riesgo en Colombia**

Norma	Descripción
Decreto Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Título IV sobre Protección Forestal (Art. 241 a-245). Por los cuales se organizan medidas de prevención y control de incendios forestales y el cuidado forestal en general.
Ley 9 de 1989	Ley de Reforma Urbana. Determina los parámetros de planificación y gestión urbana en Colombia. Obliga a incorporar en los Planes de Desarrollo aspectos de gestión del riesgo para la reubicación de asentamientos en zonas de alto riesgo.
Artículo 7 Decreto 919 de mayo 1989	Corresponde a la Oficina Nacional para la Atención de Desastres, organizar y mantener un sistema integrado de información que permita conocer y ubicar territorialmente los riesgos existentes en el país, así como los correspondientes análisis de vulnerabilidad. Para estos efectos, el Gobierno Nacional dispondrá que las entidades correspondientes establezcan los sistemas y equipos necesarios para detectar, medir, evaluar, controlar, transmitir y comunicar las informaciones, así como realizar las acciones a que haya lugar.
Artículo 5 Ley 02 de 1991	Por el cual se modifica la Ley 9 de 1989. Entre otras modifica el plazo para los inventarios de zonas de alto riesgo.
Ley 99 de 1993	Por el cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y define su articulación con el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (SNPAD), entre otros. Define la prevención de desastres y las medidas de mitigación como asunto de interés colectivo y de obligatorio cumplimiento. Obliga a las CAR a realizar actividades de análisis, seguimiento, prevención y control de desastres, y a asistir a las autoridades competentes en los aspectos en la prevención y atención de emergencias y desastres.
Resolución 7550 de 1994	Por la cual se regulan las actuaciones del Sistema Educativo Nacional en la prevención de emergencias y desastres. La Resolución obliga a las Secretarías de Educación a nivel Departamental y Municipal a incorporar la prevención y atención de desastres dentro del Proyecto Educativo Institucional, según el conocimiento de las necesidades y riesgos de la región, entre otras disposiciones.
Ley 165 de 1994	Por la cual se aprueba la adopción del Convenio de las Naciones Unidas sobre Diversidad Biológica. El Estado Colombiano como parte contratante se ve obligado a inventariar y monitorear la biodiversidad, establecer áreas protegidas, fomentar la rehabilitación y restauración de ecosistemas degradados en colaboración con la población local y promover el respeto del conocimiento tradicional e indígena sobre la biodiversidad, entre otras disposiciones.
Decreto 969 de 1995	Por el cual se organiza y reglamenta la Red Nacional de Centros de Reserva para la Atención de Emergencias.
Ley 322 de 1996	Mediante la cual se crea el Sistema Nacional de Bomberos el cual formará parte del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y se dictan otras disposiciones.
Ley 388 de 1997	Denominada Ley de ordenamiento territorial. Instrumento básico para desarrollar el proceso de ordenamiento del territorio municipal. Obliga a todos los municipios del país a formular planes de ordenamiento territorial teniendo en cuenta la zonificación de amenazas y riesgos.  Obliga a todos los departamentos del país a prestar asistencia técnica para la formulación de los planes de ordenamiento municipal.

Norma	Descripción
	Promueve el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes.
Ley 400 de 1997	Por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismos resistentes. Establece criterios y requisitos mínimos para el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones nuevas y de aquellas indispensables para la recuperación de la comunidad posterior a un sismo que puedan verse sometidas a fuerzas sísmicas y otras fuerzas naturales, con el fin de que sean capaces de resistirlas, incrementar sus resistencia a los efectos que éstas producen, reducir al mínimo el riesgo de pérdida de vidas humanas y defender el patrimonio del Estado y de los ciudadanos, entre otras disposiciones.
Decreto 2340 de 1997	Por el cual se dictan unas medidas para la organización en materia de prevención y mitigación de incendios forestales y se dictan otras disposiciones.
CONPES 2948 de 1997	Estrategias de actuación y coordinación para reducir las afectaciones ante la eventual ocurrencia de un fenómeno de variabilidad climática: el niño 2018 - 2019.
Decreto 93 de 1998	Por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres. El Decreto orienta las acciones del Estado y de la sociedad civil para la prevención de desastres como la atención y reconstrucción posterior al mismo.  Determina todas las políticas, acciones y programas, tanto de carácter sectorial como del orden nacional, regional y local, igualmente, prioriza el conocimiento sobre riesgos de origen natural y antrópico y la incorporación de la prevención y reducción de riesgos en la planificación.  De igual forman, promueve la incorporación de criterios preventivos y de seguridad en los Planes de Desarrollo y la recuperación rápida de zonas afectadas, evita duplicidad de funciones y disminuye los tiempos en la formulación y ejecución de proyectos.
Decreto 879 de 1998	Reglamenta las disposiciones referentes al ordenamiento del territorio municipal y distrital y a los planes de ordenamiento territorial.
Decreto 350 de 1999	Dicta disposiciones para hacer frente a la emergencia económica, social y ecológica causada por el terremoto ocurrido el 25 de enero de 1999. El Decreto dicta entre otras disposiciones que las Corporaciones Autónomas Regionales con jurisdicción en la zona de desastre apoyarán y asistirán técnicamente a los municipios afectados en el área de su jurisdicción, en la incorporación de los determinantes y criterios ambientales en sus planes de ordenamiento
Decreto 2015 de 2001	Reglamenta la expedición de licencias de urbanismo y construcción con posterioridad a la declaración de situación de desastre o calamidad pública. El Decreto constituye un régimen especial que se aplica para la expedición de licencias de urbanismo y construcción por parte de las autoridades competentes únicamente para los proyectos inmobiliarios que se pretendan desarrollar con posterioridad a la declaración de desastre o calamidad pública y mientras la declaratoria subsista.
CONPES 3146 de 2001	Define las estrategias y recursos para la ejecución del Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.
Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2001	Elabora el primer inventario nacional de Gases de Efecto Invernadero. Identifica los ecosistemas más susceptibles al cambio climático y se plantean las primeras medidas de adaptación para el país.
Lineamientos de Política de Cambio Climático 2002 Ministerio de Medio Ambiente y Departamento nacional de Planeación	Buscan mejora la capacidad de adaptación a los impactos del cambio climático al tiempo que promueve la reducción de emisiones por fuente y absorción por sumideros de GEI, la investigación, divulgación y concientización pública y el fortalecimiento del Sistema de Información en Cambio Climático. Adicionalmente, busca desarrollar mecanismos financieros que apoyen el programa.
CONPES 3242 de 2003	Establece y reglamenta la venta de Servicios Ambientales de Mitigación de Cambio Climático

Norma	Descripción
CONPES 3318 del 2004	Autorización a la nación para contratar operaciones de crédito externo con la banca multilateral hasta por \$260 millones de dólares para financiar parcialmente el programa de reducción de la vulnerabilidad fiscal del Estado frente a los desastres naturales.
Resolución 3580 de 2007	Por la cual se expide el reglamento general administrativo, operativo y técnico del Sistema Nacional de Bomberos de Colombia.
Directiva Ministerial N.12 de 2009	Prohíbe a las Secretarías de Educación de las entidades territoriales interrumpir la prestación del servicio educativo en situaciones de emergencia.
Política Nacional de Biodiversidad	Busca comunicar la forma en que Colombia orientará a largo plazo las estrategias nacionales sobre la biodiversidad y definir los encargados de las diferentes tareas de acción. Sus objetivos son: conservar, conocer y utilizar la biodiversidad. Hace énfasis en la distribución justa y equitativa de los beneficios derivados de la utilización de la biodiversidad.
Segunda Comunicación Nacional ante CMNUCC 2010	Presenta el inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero 2000 y 2004. Identifica oportunidades de reducción y captura de gases efecto invernadero a la vez que determina la alta vulnerabilidad de Colombia ante los efectos adversos del cambio climático. Expone acciones que se han adelantado en materia de adaptación y determina prioridades de acción.
Tercera comunicación nacional ante CMNUCC	Presenta la información crítica para entender la vulnerabilidad del país, la capacidad y opciones para adaptarnos al cambio climático, así como nuestras opciones para manejar las emisiones de Gases Efecto Invernadero.  Presenta el análisis de los riesgos tanto para la población como para los territorios asociados a los efectos de cambio climático (ocurrencia de eventos climáticos extremos, cambios graduales en la temperatura y la precipitación, pérdida de servicios ecosistémicos, entre otros)
Decreto 3888 del 10 de octubre de 2007	Por el cual se adopta el Plan Nacional de Emergencia y Contingencia Para Eventos de Afluencia Masiva de Público y se Conforman la Comisión Nacional Asesora de Programas Masivos y se Dictan Otras Disposiciones.
Decreto 4580 de 2010	Por el cual se declara el Estado de Emergencia Económica, Social Ecológica por razón de grave calamidad pública
Decreto 4628 de 2010	Dicta normas para la expropiación por vía administrativa con indemnización previa, la adquisición del derecho de dominio y de los demás derechos reales indispensables para la ejecución de los planes específicos encaminados a solucionar los eventos ocurridos por la ola invernal en el territorio nacional y se adoptan otras medidas.
Decreto 4629 de 2010	Modifica transitoriamente el Art 45 de la Ley 99 de 1993 y se dicta otras disposiciones para atender la situación de desastre nacional y de emergencia.
Decreto 4673 de 2010	Adiciona el artículo 38 de la Ley 1333 de 2009 y dicta más disposiciones para atender la situación de desastre nacional, con directrices específicas para las autoridades ambientales
Ley 1454 de 2011	Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial (LOOT). Por la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y se modifican otras disposiciones. La LOOT pone en marcha las Zonas de Inversión para la superación de la pobreza y la marginalidad, define la aplicación de recursos de regalías (Fondos de Compensación Territorial y de Desarrollo Regional), establece Regiones de Planeación y Gestión y de las Regiones Administrativas y de Planificación al tiempo que posibilita la conformación de provincias como instancias administrativas y de planificación, facilita la conformación de áreas metropolitanas y fortalece su régimen fiscal.  Igualmente flexibiliza competencias entre nación y entidades territoriales mediante la figura del “contrato plan”.
Decreto 020 de 2011	Por el cual se declara el Estado de Emergencia Económica, Social y Ecológica por razón de grave calamidad pública.
Decreto 141 de 2011	“Por medio del cual se modifican los artículos 24, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 37,41,44,45,65 y 66 de la Ley 99 de 1993, y se adoptan otras determinaciones”
CONPES 3700 de 2011	Define la estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático. El documento dicta la creación del Sistema Nacional Cambio Climático; define el plan de acción de la estrategia financiera y ordena la

Norma	Descripción
	creación del Comité de Gestión Financiera para el Cambio Climático; propone la generación de información sobre cambio climático en las estadísticas oficiales (DANE) y anuncia el Estudio de Impactos Económicos de Cambio Climático para Colombia – EIECC; entre otras estrategias.
Decreto 510 de 2011	Por el cual se adoptan las directrices para la formulación del Plan de Atención para la Atención de Emergencia y Mitigación de sus efectos. El decreto adopta las directrices que deben adoptar las CAR para la formulación del PAAEM.
Decreto Ley 019 de 2012 (art 189)	Establece el procedimiento de la revisión de los POT en la línea de Gestión del Riesgo y obliga a realizar el análisis de riesgo en los POT.
Ley 1523 de 2012	Por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Esta Ley permite establecer medidas directas para la prevención y mitigación de riesgos por medio de la planeación Nacional, Departamental y Municipal. Establece la corresponsabilidad de los sectores públicos privados y de la comunidad frente a los riesgos naturales por medio del conocimiento del riesgo, la prevención de riesgos y el manejo de desastres.
Ley 1617 de 2013	Por la cual se expide el régimen para los distritos especiales. El objeto de esta ley es el de dotar a los distritos de las facultades, instrumentos y recursos que les permiten cumplir sus funciones y prestar los servicios a su cargo, así como promover el desarrollo integral de su territorio para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes, a partir del aprovechamiento de sus recursos y ventajas derivadas de las características, condiciones y circunstancias especiales que estos presentan.
Decreto 1807 de 2014	Por el cual se establecen las condiciones y escalas de detalle para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo en la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial municipal y distrital o en la expedición de un nuevo plan.
Decreto 1076 de 2015	“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y desarrollo sostenible”
Decreto 1077 de 2015	“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio”
Ley 2079 de 2021	Tiene por objeto reconocer la política pública de hábitat y vivienda como una política de Estado que diseñe y adopte normas destinadas a complementar el marco normativo dentro del cual se formula y ejecuta la política habitacional urbana y rural en el país, con el fin de garantizar el ejercicio efectivo del derecho a una vivienda y hábitat dignos para todos los colombianos.
Decreto 1232 de 2020	Por medio del cual se adiciona y modifica el artículo 2.2. 1.1 del Título 1, se modifica la Sección 2 del Capítulo 1 del Título 2 y se adiciona al artículo 2.2.4.1.2.2 de la sección 2 del capítulo 1 del Título 4, de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015 Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con la planeación del ordenamiento territorial
Decreto 824 de 2021	Por medio del cual se modifica el Decreto 1077 de 2015 Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con la cartografía para el ordenamiento territorial”.

**Fuente:** Guía para la elaboración de los planes departamentales de gestión de riesgo, UNGRD

El Decreto 1077 de 2015 compila todos los temas relacionados con gestión del riesgo en su **SECCIÓN 3. Incorporación de la gestión del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial** dictando lineamientos fundamentales para el desarrollo de los estudios básicos, detallados e incorporación del riesgo. En el desarrollo del contrato será la carta de navegación de este para el desarrollo de las actividades.

De acuerdo con lo establecido en el Decreto 1807 de 2014, las escalas de trabajo para la elaboración de los estudios básicos se presentan en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Escalas de trabajo Decreto 1807 de 2014

Tipo de estudio	Clase de suelo	Escala
Estudio Básico	Urbano	1 :5.000
	Expansión Urbana	1 :5.000
	Rural	1 :25.000
Estudio Detallado	Urbano	1 :2.000
	Expansión Urbana	1 :2.000
	Rural Suburbano	1 :5.000

Fuente: Decreto 1807 de 2014

#### 4. EVALUACIÓN DE AMENAZA POR PROCESOS DE AVENIDA TORRENCIAL 1:25.000

La metodología para la realización de evaluaciones de amenazas dirigido a un uso técnico administrativo en el municipio contiene la identificación, tipificación y caracterización de las amenazas. El énfasis de este documento está en los peligros asociados a avenidas torrenciales.

A continuación, se describe la metodología para evaluar el grado de amenaza, que corresponden a la primera fase de la Gestión del Riesgo y se enfoca en la etapa de Conocimiento del Riesgo.

##### 4.1 Identificación de amenazas

Se debe cuantificar el nivel de amenaza, a través del análisis, identificación y evaluación de los fenómenos hidrológicos que afectan al municipio, con el fin de obtener información valiosa sobre zonas a priorizar, eventos desastrosos ocurridos, (ubicación, daños causados etc.). Se pretende efectuar el levantamiento de la información histórica sobre desastres ocurridos en la zona o sus alrededores. El análisis de amenazas se realiza a través de inventarios de fenómenos ocurridos y de incidencia en el municipio, también es realizado mediante observaciones y mediciones de campo, para el caso se desarrollaron modelos digitales de terreno (MDT) y modelos hidrológicos e hidráulicos, con el fin de conocer la probable ubicación y severidad de estos fenómenos naturales peligrosos asociados a crecientes e inundaciones, así como la probabilidad de que ocurran en un tiempo y área específica.

Este análisis tiene como resultado la elaboración de un mapa de amenazas, el cual representa un elemento clave para la planificación del uso del territorio y constituye un insumo imprescindible para la evaluación de los riesgos actuales y potenciales.

En una evaluación cuantitativa, la amenaza en un sitio específico se podría caracterizar determinando para cada evento posible (i):

- mi: magnitud del evento [definida por profundidad, velocidad, volumen, energía, ...]
- p(mi): frecuencia o probabilidad de ocurrencia del evento [en % / año]

Con estos datos se clasificarán las amenazas según lo establecido en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Clasificación de amenazas

Tipo de amenaza	mi: Magnitud del evento	p(mi): Frecuencia o probabilidad
Zona de amenaza alta	Alto	Alta
	Alto	Media
	Medio	Alta
Zona de amenaza media	Alto	Baja
	Medio	Medio
	Medio	Baja
Zona de amenaza baja	Bajo	Alta
	Bajo	Media
	Bajo	Baja

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

## 4.2 Metodología de amenazas por avenidas torrenciales

Las avenidas o flujos torrenciales muchas veces denominadas crecientes, avalanchas, crecidas, borrasca o torrentes, son una amenaza muy común en cuencas de alta montaña y debido a sus características pueden causar grandes daños en infraestructura y pérdida de vidas humanas.

Estos fenómenos se originan comúnmente en ríos de montaña o en ríos cuyas cuencas presentan fuertes vertientes por efecto de fenómenos hidrometeorológicos intensos cuando en un evento de lluvias se superan valores de precipitación pico en pocas horas. Esto genera la saturación de los materiales de las laderas facilitando el desprendimiento del suelo, produciéndose de esta manera numerosos desgarres superficiales y deslizamientos cuyo material cae al cauce y es transportado inmediatamente aguas abajo o queda inicialmente represado y luego, una vez que se rompe el represamiento, es transportado violentamente de forma repentina (Urrea, 1996, Rendón, 1997; OSSO – La Red, 2003; Castro, 2007). En otros casos puede que no haya desgarres en las vertientes originados por la lluvia, simplemente el material que ya se encontraba en el cauce con mucha anterioridad es arrastrado aguas abajo por la creciente. (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2016)

El estudio de la amenaza por avenida torrencial toma como muestra de análisis cerca de 52 cuencas; es decir que se tomó una muestra bastante representativa de microcuencas, las cuales en su gran mayoría poseen áreas inferiores a los 25 km<sup>2</sup> por lo que se consideran muy pequeñas.

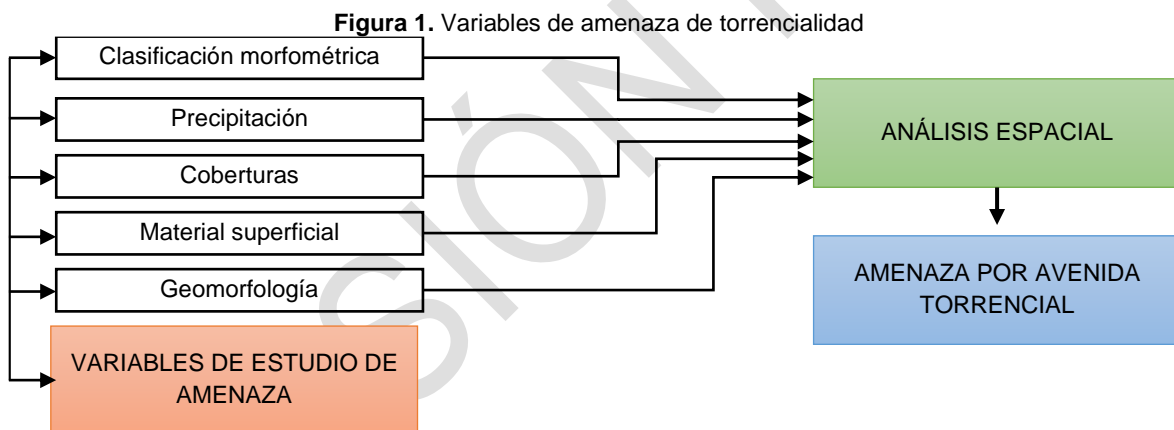
Una cuenca susceptible ante una avenida torrencial tiene varias características:

- Cuencas jóvenes y pequeñas menores a 200 Km<sup>2</sup>.
- Cuencas en regiones montañosas y escarpadas.
- Alta pendiente del canal central y de la pendiente media de la cuenca.
- Gran capacidad de socavación e incisión del cauce.
- Abundante material detrítico a ser arrastrado.
- Capacidad de transporte de material heterométrico.
- Cuencas con valles o cañones estrechos en V.

- Gran Variabilidad del caudal máximo y mínimo en la cuenca.
- Geoforma alargada de la cuenca.
- Variaciones extremas en los valores pico de precipitación.
- Alta susceptibilidad ante procesos de remoción en masa.

Con base en estas características es claro que múltiples factores concurren para la calificación de torrencialidad de una cuenca, principalmente en este análisis confluyen dos características. La primera relacionada con los parámetros morfométricos propios de una cuenca y la segunda con los factores geológicos y geomorfológicos regionales, cabe anotar también que los factores climáticos, como lluvias intensas en un tiempo corto, juegan como agentes desencadenantes de estos fenómenos. En la **Figura 1** se muestran las variables utilizadas y con las que se cuenta para el estudio de la amenaza por torrencialidad.

El análisis morfométrico está constituido por un sin número de índices y coeficientes; en este estudio se utilizaron el Índice de Compacidad o de forma de Gravelius, la pendiente media y la densidad de drenaje, que en conjunto definen la facilidad para concentrar la esorrentía, la oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos, la eficiencia o rapidez de la esorrentía y de los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación y con ello inferir cual podría ser el nivel de susceptibilidad a las crecidas.



**Fuente:** Tomado de estudios AVR-2013 CAR.

Inicialmente, se realizaron ajustes a los valores establecidos por Henao (1998) donde se asignaron 6 clases que a su vez se agruparon en tres niveles a cada uno de los índices morfométricos calculados. Al integrar los índices, se generó un conjunto de posibles combinaciones a partir de las cuales se definieron 6 clases morfométricas basadas en la posible respuesta de los torrentes ante un evento de precipitación, inicialmente por la influencia que tiene la densidad de drenaje en el comportamiento y en la respuesta de los cauces a generar esorrentía superficial, seguido por la pendiente y el coeficiente de forma de la cuenca. En síntesis, las clases morfométricas vienen definidas por la integración de la densidad de drenaje, la pendiente media de los torrentes y su coeficiente de forma, las cuales generan características muy particulares que permiten evaluar la respuesta de los torrentes, desde muy lenta hasta muy rápida y violenta, para generar crecidas torrenciales.

En la **Tabla 4** se muestra los factores utilizados y la ponderación establecida.

**Tabla 4.** Ponderación de factores de la clasificación morfométrica

Índices morfométricos	Categorías					
	1	2	3	4	5	6
Densidad de drenaje (km/km)	< 1.00	1.00 - 1.50	1.51 - 2.00	2.01 - 2.50	2.51 – 3.00	>3
	Muy baja	Baja	Moderada	Moderadamente alta	Alta	Muy alta
Pendiente media de la cuenca (%)	<12	12 - 20	21 - 35	36 - 50	51 – 75	>75
	Suave	Accidentado	Fuerte	Muy fuerte	Escarpado	Muy escarpado
Coeficiente de compacidad	<1.625	1.501 - 1.625	1.376 – 1.500	1.251 - 1.375	1.126 – 1.250	100 - 1.125
	Oval-oblonga a rectangular oblonga		Oval-redonda a oval-oblonga		Casi redonda a oval-redonda	

Fuente: Rivas & Soto, 2009 – citado por IDEAM, 2011

El Coeficiente de Compacidad KC, es una relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia con la misma superficie de la cuenca. Una cuenca tiende a ser alargada si el índice de compacidad es mayor a 1.5, mientras que su forma es redonda, en la medida que el índice tiende a 1. Este factor es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca, teniendo en cuenta que aquellas cuencas con formas alargadas tienden a presentar un flujo de agua más veloz, a comparación de las cuencas redondeadas, logrando una evacuación de la cuenca más rápida, mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base.

La Densidad de Drenaje DD, se refiere a la cantidad de drenajes expresada en términos de longitud, en la superficie de una cuenca en unidades de área. Principalmente se utiliza para determinar la disponibilidad hídrica de la cuenca en cada uno de sus sectores, asumiendo directa proporcionalidad entre la densidad, la disponibilidad de agua y la energía de arrastre en un área determinada.

Una vez valorada la información para las cuencas del municipio se efectuó una tabla consolidada de los rangos de las microcuencas para luego integrar los resultados en niveles de 1 a 3 según la clase morfométrica.

Como primer paso para determinar la susceptibilidad de las áreas frente a eventos de tipo torrencial se determinó el Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales IVET, definido en el documento “Enfoque conceptual y metodológico para determinar la vulnerabilidad de fuentes abastecedoras de acueductos” (IDEAM, 2011), para las áreas montañosas de los afluentes principales de las subcuencas y a las microcuencas abastecedoras. Posteriormente estos resultados se usaron como insumo inicial para el desarrollo del mapa de amenaza. Enseguida se describen los pasos seguidos para el cálculo de este índice para el municipio de Chía.

Según el IDEAM la vulnerabilidad se expresa en relación con los índices morfométricos de torrencialidad e índice de variabilidad tal como enseguida se definen:

El índice morfométrico de torrencialidad es la relación entre los parámetros morfométricos como el coeficiente de compacidad o de forma, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje, los cuales son indicativos de la forma como se concentra la escorrentía, la

oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos en una cuenca, la eficiencia o rapidez de la escorrentía y de los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación y con ello inferir cual podría ser el nivel de susceptibilidad a procesos torrenciales (Rivas y Soto, 2009, en IDEAM, 2011).

Una condición muy alta para el índice morfométrico corresponde a áreas que se caracterizan por ser inestables y potencialmente inestables que responden rápida y violentamente a lluvias de alta intensidad y corta duración, generando avenidas torrenciales de forma frecuente. La categoría alta muestra áreas con una respuesta hidrológica rápida con una cobertura de suelo que permite procesos torrenciales que se presentan frecuentemente en períodos lluviosos. La condición media, en cambio, presenta una respuesta a procesos hidrológicos de moderada a rápida y los eventos se presentan generalmente en las épocas de las mayores precipitaciones al año.

El índice de variabilidad se obtiene de la curva de duración de caudales, muestra como es la variabilidad de los caudales en una determinada cuenca. Una cuenca torrencial es aquella que presenta una mayor variabilidad, es decir, existen diferenciales grandes entre los caudales mínimos y los valores máximos. Cuencas con variabilidades pequeñas muestran que los caudales tienden a mantenerse y los cauces por los que existe flujo, generalmente tienen la capacidad para transportar estos caudales. El comportamiento con variabilidad pequeña es típico de cauces de llanura, los cuales generalmente no presentan procesos torrenciales.

Cuencas de áreas pequeñas con pendientes altas, por lo general presentan caudales de creciente, alternado de caudales medios y bajos con magnitudes muy inferiores a las de los caudales máximos, que hacen que la curva de duración de caudales muestre una gran variabilidad.

El índice de vulnerabilidad (IVET) frente a eventos torrenciales, indica la relación existente entre las características de la forma de una cuenca que son indicativos de la torrencialidad en la misma, en relación con las condiciones hidrológicas en dicha cuenca. La **Tabla 5**, muestra la clasificación de la vulnerabilidad frente a eventos torrenciales una vez se estima cada uno de los índices mencionados. Este índice se expresa en relación con los índices morfométricos y de variabilidad para estimar una sola vulnerabilidad frente a eventos torrenciales, teniendo en cuenta los rangos y las clasificaciones de cada uno de ellos.

**Tabla 5.** Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET)

Índice de variabilidad	Índice morfométrico de torrencialidad				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Baja	Muy baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	Muy baja	Media	Alta	Alta	Muy alta
Alta	Media	Media	Alta	Muy Alta	Muy alta

Fuente: Rivas & Soto, 2009 – citado por IDEAM, 2011

Caudal por microcuenca

$$Q_c = \frac{Ac}{8,64 \cdot 10^{10}} (P - EVT)$$

- Qc: Caudal de la cuenca en (m<sup>3</sup>/s)
- Ac: Área de la celda (m)
- P: Precipitación (mm/día)
- EVT: Evapotranspiración real (mm/día)

Con los datos de caudal se entra a la formula (ii) establecida en la metodología obteniendo el índice de variabilidad.

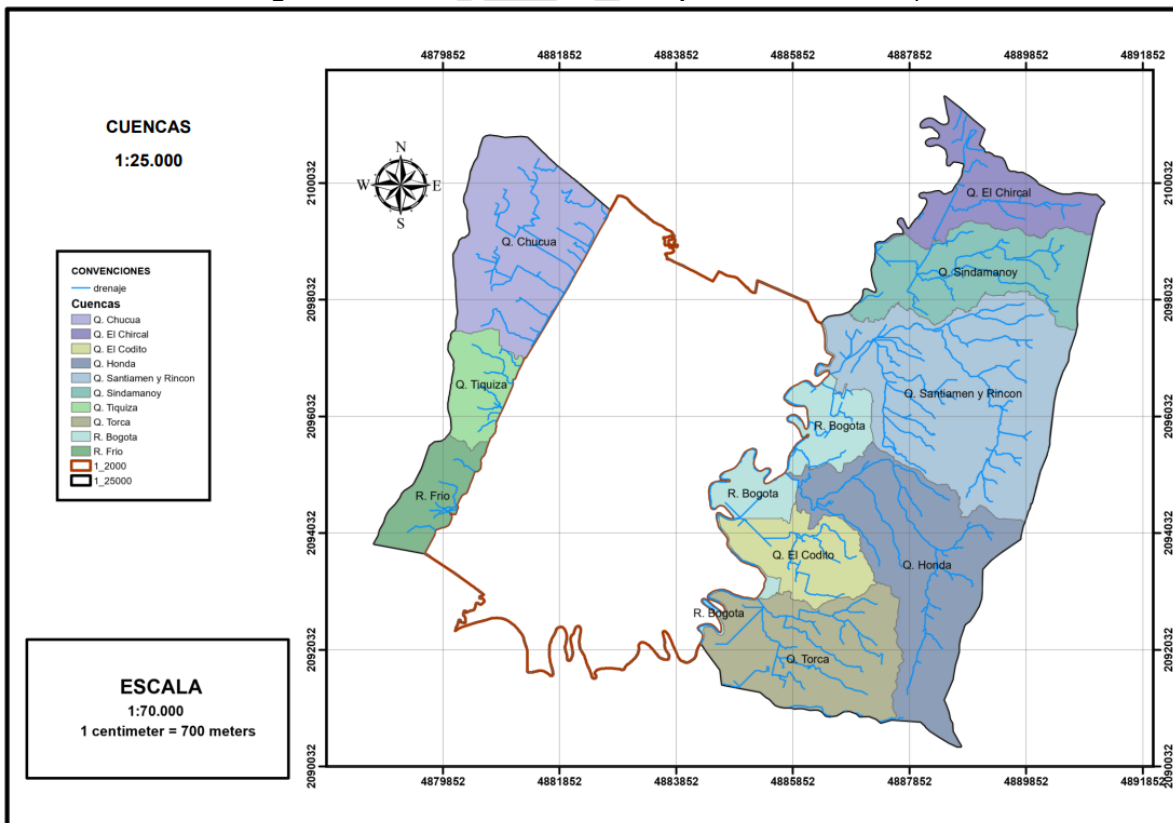
$$IV = \frac{\text{Log}(Q_i) - \text{Log}(Q_f)}{\text{Log}(X_i) - \text{Log}(X_f)}$$

Donde Qi y Qf son los caudales que corresponden a tiempos de excedencia Xi y Xf. En ciertas ocasiones no se logra obtener una linealidad continua de la gráfica en escala logarítmica, por lo que conocer la pendiente de dicho gráfico resulta difícil. Dada la dificultad del desarrollo de la curva de duración de caudales para conocer el índice de variabilidad, y basado en el Tomo I, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM - sugiere el cálculo del Índice de Variabilidad mediante el uso de información pluviométrica mediante la siguiente expresión:

$$IV = \frac{Dvs}{\overline{Pm}}$$

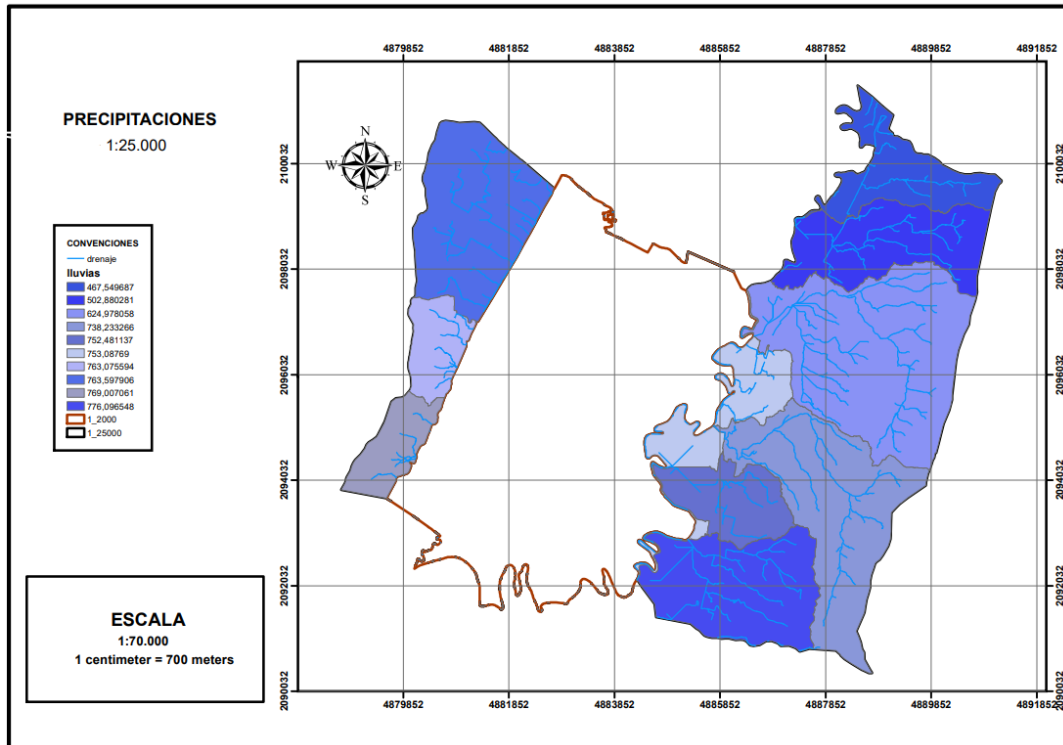
Donde hace referencia a la desviación estándar de los registros anuales de precipitación y Pm a la precipitación promedio anual.

**Figura 2.** Microcuencas escala 1:25000 jurisdicción del municipio



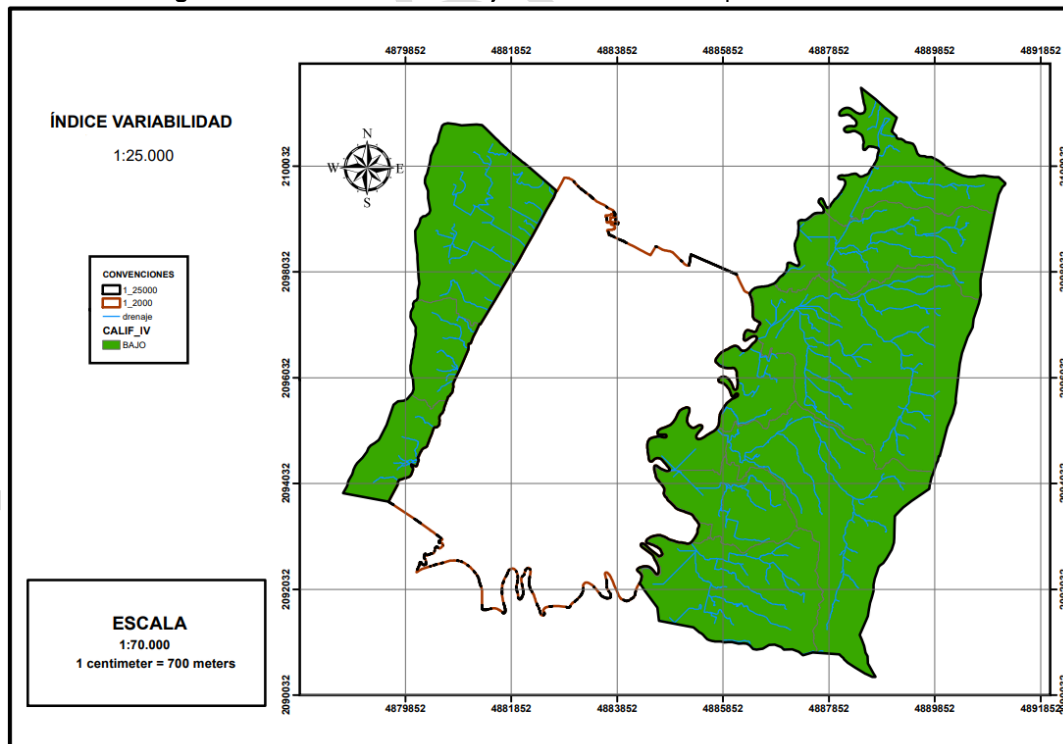
Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

**Figura 3.** Precipitación microcuencas jurisdicción del municipio escala 1:25000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

**Figura 4.** Índice de variabilidad jurisdicción del municipio escala 1:25000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

**Tabla 6.** Características hidrográficas menores municipio de Chía

CARACTERÍSTICAS HOYAS HIDROGRÁFICAS MENORES MUNICIPIO DE CHÍA																							
HOYA No.	NOMBRE	ÁREA CUENCA (km²)	ÁREA CUENCA (m²)	LONGITUD DEL CAUCE (m)	LONGITUD DEL CAUCE (km)	H (m)	PENDIENTE DEL CAUCES (m/m)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SCS (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN KIRPICH (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN TEMEZ (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN GIANDOTTI (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN VT CHOW (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CUERPO DE INGENIEROS (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN WILLIAMS (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN JOHNSTON E Y CROSS (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SCS-RANSER (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN VENTURAS-HERAS (minutos)	TIEMPO EN CONCENTRACIÓN HATHAWAY (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN MEDIANA (minutos)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SELECCIONADO (minutos)	CN	Lag time	abstracción inicial Po
1	Q. Honda	7.919	211009.047	6896.000	6.90	104.29	0.015	432.90	88.30	70.88	158.62	215.54	161.62	187.46	207.73	88.32	70.88	155.73	158.62	158.62	68.70	259.74	23.14
2	Q. Santiamen y Rincon	10.700	192005.751	5767.000	5.77	163.28	0.028	308.59	60.44	55.11	127.56	157.29	125.24	134.19	162.41	60.45	55.11	123.71	125.24	125.24	64.20	185.15	28.32
3	Q. El chircal	3.338	273860.764	2970.000	2.97	179.79	0.061	79.82	27.06	29.05	65.79	80.66	65.47	66.70	96.38	27.07	29.05	75.96	65.79	65.79	80.00	47.89	12.70
4	Q. Chucua	10.093	191600.674	6327.000	6.33	208.34	0.033	224.79	61.24	57.43	115.34	159.02	130.58	143.68	163.81	61.26	57.43	124.69	124.69	124.69	75.81	134.87	16.21
5	R. Frio	11.553	326049.856	8673.000	8.67	193.38	0.022	309.96	90.72	78.27	143.48	220.45	178.71	210.07	211.42	90.74	78.27	158.28	158.28	158.28	80.00	185.98	12.70
6	R. Bogota	20.275	306817.975	7738.000	7.74	174.38	0.023	324.36	82.75	71.71	168.20	204.23	163.54	176.80	199.17	82.77	71.71	149.69	163.54	163.54	75.26	194.62	16.70
7	Q. Sindamano	4.802	111018.0624	3459.000	3.46	252.81	0.073	82.06	28.30	31.44	65.82	83.72	70.92	72.14	99.23	28.31	31.44	78.04	70.92	70.92	80.00	49.24	12.70
8	Q. Torca	5.831	638124.418	2509.000	2.51	298.12	0.119	79.71	18.33	22.56	58.30	58.35	50.66	46.57	74.84	18.34	22.56	59.96	50.66	50.66	63.06	47.82	29.75
9	Q. El Codito	2.755	498707.999	1248.000	1.25	274.80	0.220	35.18	8.44	11.90	38.50	30.63	26.50	22.07	45.24	8.45	11.90	37.45	26.50	26.50	61.14	21.11	32.29
10	Q. Tiquiza	2.906	290295.035	1453.000	1.45	256.17	0.176	42.34	10.34	13.91	42.16	36.25	31.03	26.72	51.60	10.34	13.91	42.36	31.03	31.03	63.00	25.40	29.83

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

**Tabla 7. Características hidrográficas menores municipio de Chía**

SUB CUENCA	ÁREA TOTAL KM2	LONGITUD AXIAL KM	PERÍMETRO KM	PENDIENTE MEDIA %	ANCHO W KM	COEFICIENTE DE FORMA K	COEFICIENTE DE COMPACIDAD GRAVELUS C	TENDENCIA A PRESENTAR INUNDACIONES	FORMA DE LA CUENTA	ÍNDICE DE ALARGAMIENTO	LONGITUD DE CUENCAS KM	DENSIDAD DE DRENAJE
Q. chucua	10.106	6.33	17.05	22	11.60	0.25	1.5	Grado de inundación moderado	Oval-oblonga a rectangular oblonga	4.0	30.58	2.90
Q. el chircal	3.343	2.97	14.61	24	1.13	0.38	1.22	Grado de inundación bajo	Rectangular	2.6	8.42	2.52
Q. el codito	2.759	1.25	9.26	16	2.21	1.77	1.6	Grado de inundación moderado	Oval oblonga a rectangular oblonga	0.6	7.15	2.59
Q. honda	7.929	6.90	18.75	23	1.15	0.17	1.9	Grado de inundación bajo	Rectangular	6.0	19.29	2.43
Q. santiamén y rincón	10.840	5.77	18.24	18	1.88	0.33	1.6	Grado de inundación moderado	Oval oblonga a rectangular oblonga	3.1	32.19	2.97
Q. sin damanoy	4.808	3.46	14.08	14	1.39	0.40	1.8	Grado de inundación bajo	Rectangular	2.5	14.11	2.93
Q. tiquiza	2.909	1.45	8.68	11	2.00	1.38	1.4	Alto Grado de inundación	Oval redonda a oval oblonga	0.7	9.16	3.15
Q. torca	5.838	2.51	12.39	14	2.33	0.93	1.4	Alto Grado de inundación	Oval redonda a oval oblonga	1.1	17.44	2.99
R. Bogotá	20.301	7.74	42.04	28	2.62	0.34	2.6	Grado de inundación bajo	Rectangular	2.9	72.56	3.57
R. frío	11.567	8.67	33.57	25	1.33	0.15	2.8	Grado de inundación bajo	rectangular	6.5	41.73	3.61

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

**Figura 5.** Relaciones entre variables para el índice morfométrico jurisdicción del municipio.

		Pendiente mediana de la cuenca					
		1	2	3	4	5	
densidad de drenaje	1	111	121	131	141	151	1
		112	122	132	142	152	2
		113	123	133	143	153	3
		114	124	134	144	154	4
		115	125	135	145	155	5
	2	211	221	231	241	251	1
		212	222	232	242	252	2
		213	223	233	243	253	3
		214	224	234	244	254	4
		215	225	235	245	255	5
	3	311	321	331	341	351	1
		312	322	332	342	352	2
		313	323	333	343	353	3
		314	324	334	344	354	4
		315	325	335	345	355	5
	4	411	421	431	441	451	1
		412	422	432	442	452	2
		413	423	433	443	453	3
		414	424	434	444	454	4
		415	425	435	445	455	5
	5	511	512	531	541	551	1
		512	522	532	542	552	2
		513	523	533	543	553	3
		514	524	534	544	554	4
		515	525	535	545	555	5

	Muy alta
	Alta
	Moderada
	Baja
	Muy baja

coeficiente de forma

Fuente: Rivas & Soto, 2009 – citado por IDEAM, 2011

#### 4.2.1 Morfometría de Cuencas

La descripción morfométrica de una cuenca está encaminada al estudio cuantitativo, e interpretación de los resultados obtenidos, de diversos parámetros de interés que otorgan al profesional que realiza el estudio, una orientación de la respuesta física de una hoya de drenaje a un evento de precipitación, permitiendo así, inferir las posibles tendencias que posee una cuenca a generar elevados y bajos volúmenes de escorrentía. Esta tipología de estudios fue iniciada por Robert E. Horton con su texto denominado “*Drainage Basins Characteristics*” (1932) y “*Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*” (1945).

##### 4.2.1.1 Densidad de Drenaje

Este parámetro es el cociente de la división entre la suma de la longitud (Km) de cada uno de los drenajes de una cuenca determinada y el área de la hoya hidrográfica (Km<sup>2</sup>).

$$D=I/A$$

Se considera que la densidad de drenaje de una cuenca refleja la influencia de la geología, relieve, tipología de suelos y vegetación en la cuenca de estudio, infiriendo, por tanto, la

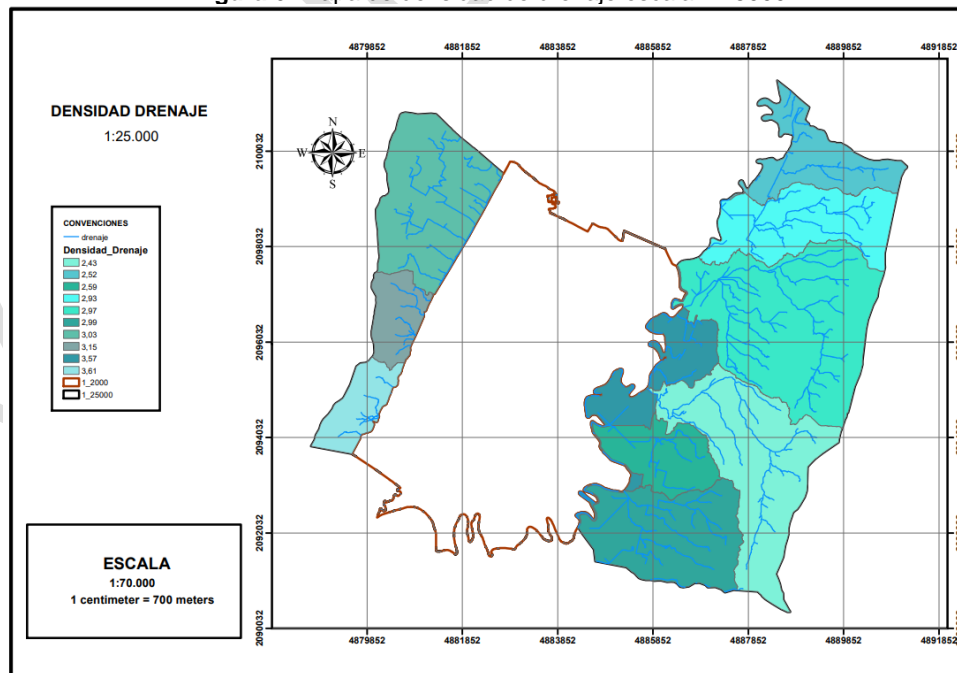
posible magnitud de la rapidez de la respuesta hidrológica de la hoya de drenaje en su totalidad.

Lo anterior implica que elevadas densidades de drenaje concurren en cuencas de alta y rápida respuesta física a los procesos hidrológicos que se registran en la zona de estudio, cortos tiempos de concentración, elevadas magnitudes en los volúmenes de escorrentía. Otras características de una densidad de drenaje alta son las siguientes:

- Suelos fácilmente erosionables
- Poca y esparcida cobertura vegetal
- Suelos impermeables
- Relieve de altas pendientes

Según Ruiz (2001), una cuenca bien drenada da poco tiempo a la percolación del flujo superficial en subterráneo, por lo que se considera que, en estas regiones, los volúmenes de recarga de los acuíferos son bajos. Contrario a lo dicho anteriormente, bajos coeficientes de densidad de drenaje infieren suelos bien a excesivamente cubiertos por una diversa capa de vegetación, bajas pendientes y, de acuerdo con Linsley (1977), cuencas pobremente drenadas y respuesta hidrológica muy lenta, de tal manera que, en regiones húmedas, de presentarse las condiciones ideales y de acuerdo con Chow 1994, no es factible encontrar el flujo superficial Hortoniano. En la **Tabla 8** se puede apreciar la clasificación dada a esta variable por el Anexo Técnico del presente estudio. De igual manera se puede observar la categoría asignada, para el cálculo del Índice Morfométrico de Torrencialidad, a la densidad de drenaje.

**Figura 6.** Mapa de densidad de drenaje escala 1:25000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

**Tabla 8.** Resumen de categorización y clasificación de la Densidad de Drenaje

Categoría				
1	2	3	4	5
Menor a 1.2	1.2 – 1.8	1.8 – 2.0	2.0 – 2.5	Mayor a 2.5
Baja	Moderada	Moderada Alta	Alta	Muy Alta

Fuente: Elaboración propia con base en el Anexo Técnico de la CAR.

#### 4.2.1.2 Pendiente media de la Cuenca

Este parámetro permite conocer la posibilidad o tendencia de una cuenca a generar una crecida súbita. A medida que dicho parámetro incrementa, la probabilidad de ocurrencia de caudales picos crece mucho más rápido y con ello las posibilidades de incrementos en las velocidades de la corriente al momento de la crecida, al igual que su capacidad de arrastre o transporte de un caudal sólido. Por otro lado, cuando se encuentran pendientes bajas, traducen en zonas de deposición de sedimentos transportados por las crecidas y poca probabilidad de generación de crecientes máximas o súbitas, por lo que estas zonas se pueden encontrar dentro de grandes planicies aluviales y las de áreas de alta pendiente como causante de eventos torrenciales.

Para el cálculo de este parámetro existe una variedad de metodologías, encontrándose las siguientes:

- Método de Isotangentes
- Método de coordenadas al azar
- Método de la red cuadrada
- Método de Horton
- Índice de Pendiente

La metodología usada, mediante Software de Sistemas de Información Geográfica, es la de Isotangentes, obteniendo así mapas con la distribución espacial del relieve presentada en la zona de estudio. En la **Tabla 9** se puede apreciar la clasificación dada a esta variable. De igual manera se puede observar la categoría asignada, para el cálculo del Índice Morfométrico de Torrencialidad, a la pendiente media de cuenca.

**Tabla 9.** Resumen de categorización y clasificación de la Pendiente Media de la Cuenca (%)

Categoría				
1	2	3	4	5
Menor a 20	21 - 35	36 - 50	51 - 75	Mayor a 75
Accidentado	Fuerte	Muy Fuerte	Escarpado	Muy Escarpado

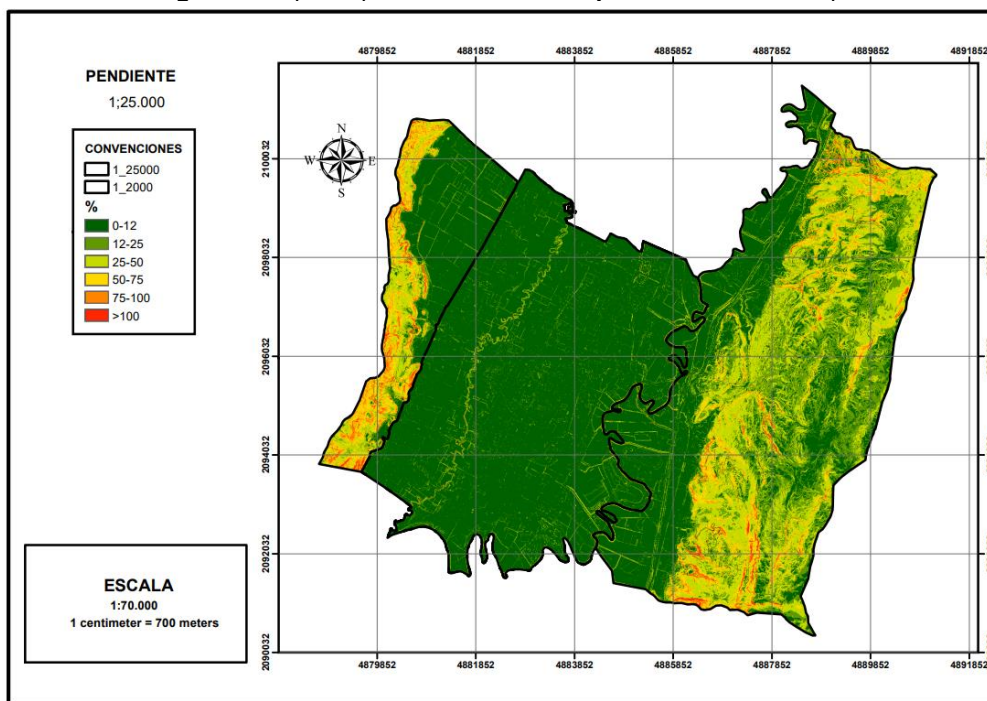
Fuente: Elaboración propia con base en el Anexo Técnico de la CAR.

#### 4.2.1.3 Pendientes generales del municipio

Como se observa en la **Tabla 10** el municipio presenta principalmente pendientes planas sobre la mayor extensión territorial, también se presentan en menor proporción los rangos de pendiente abrupta a escarpada. El rango de pendiente plana a suavemente inclinada se presenta en el casco urbano y las veredas La Balsa y Bojacá; las cuales se caracterizan por tener una inclinación de 0 a 25%, lo que disminuye los efectos de desarrollarse movimientos

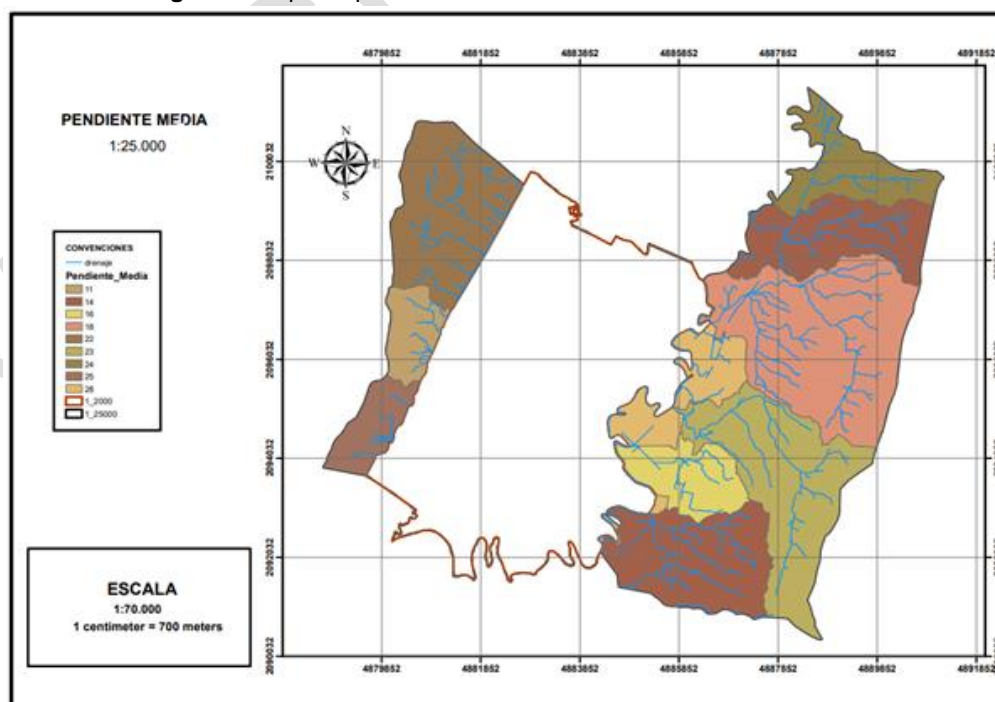
en masa. El rango de pendiente muy inclinada a abrupta se observa en algunos puntos localizados en las veredas Yerbabuena y Fusca entre otras; se caracteriza por presentar una inclinación entre 25 a >75%, lo que las hace más susceptible a presentar procesos de remoción en masa.

Figura 7. Mapa de pendientes de toda la jurisdicción del municipio



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

Figura 8. Mapa de pendiente media de las cuencas escala 1:25000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

**Tabla 10.** Rangos establecidos de la variable pendiente

Descripción	Porcentaje (%)
Plana	0-12
Suavemente inclinada	12-25
Inclinada	25-50
Muy inclinada	50-75
Abrupta	75-100
Escarpada	>100

Fuente: Tomado y ajustado de SGC (INGEOMINAS) 2011.

#### 4.2.1.4 Coeficiente de compacidad

Esta variable permite obtener una descripción general de la respuesta de una cuenca a eventos de precipitación. De acuerdo con diferentes textos bibliográficos, si un coeficiente de compacidad o índice Gravelius se encuentra entre el rango 1 y 1.25, es una cuenca redonda-oval redonda, entre 1.25 y 1.5 oval redonda-oval oblonga, entre 1.5 y 1.75 oval oblonga-rectangular oblonga y mayor a 1.75 rectangular-muy lobuladas, reflejando entonces una mayor tendencia a crecidas o eventos torrenciales en las cuencas con coeficientes de compacidad cercanos a uno, con tiempos de concentración menores y por ende alcanzando el caudal pico mucho más rápido, caso contrario a aquellas cuencas cuyo índice de Gravelius es más alejado de uno.

De acuerdo con Londoño (2001) este parámetro se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$K_C = 0.2321 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

P: Perímetro de una cuenca o longitud total de la línea de divorcio de la cuenca delimitada.

A: Área de la superficial de la hoya de drenaje.

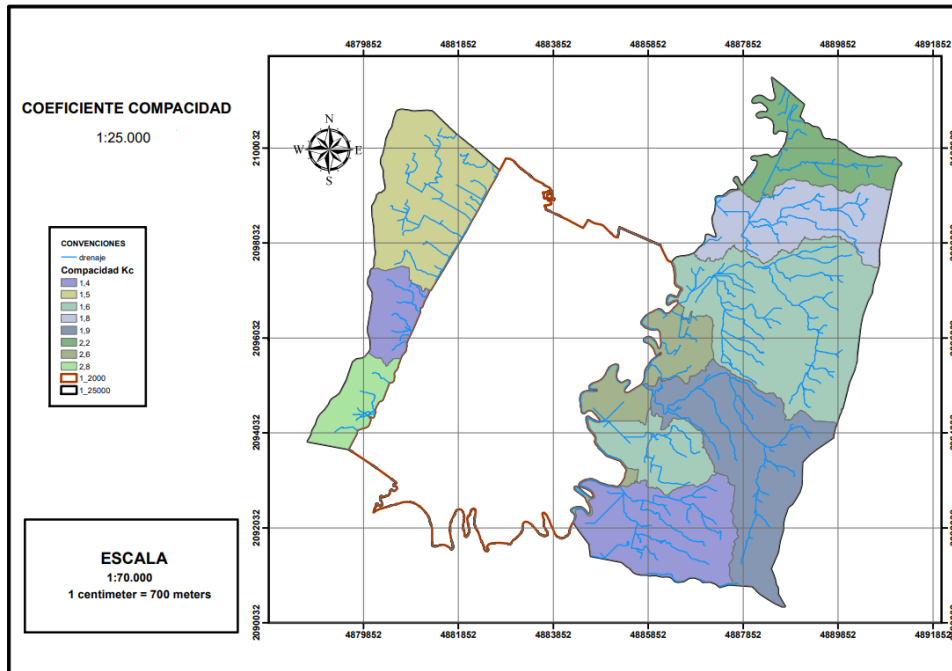
En la **Tabla 11** se puede observar la clasificación dada, aunque diferente a la mencionada anteriormente, por el Anexo Técnico del presente estudio. De igual manera se puede apreciar la categoría asignada, para el cálculo del Índice Morfométrico de Torrencialidad, al coeficiente de compacidad.

**Tabla 11.** Resumen de categorización y clasificación del Coeficiente de Compacidad

Categoría				
1	2	3	4	5
Menor a 1.625	1.500 - 1.376	1.376 – 1.251	1.251 – 1.126	1.125 – 1.000
Oval-Oblonga a Rectangular Oblonga	Oval-Redonda a Oval-Oblonga	Casi Redonda a Oval-Redonda		

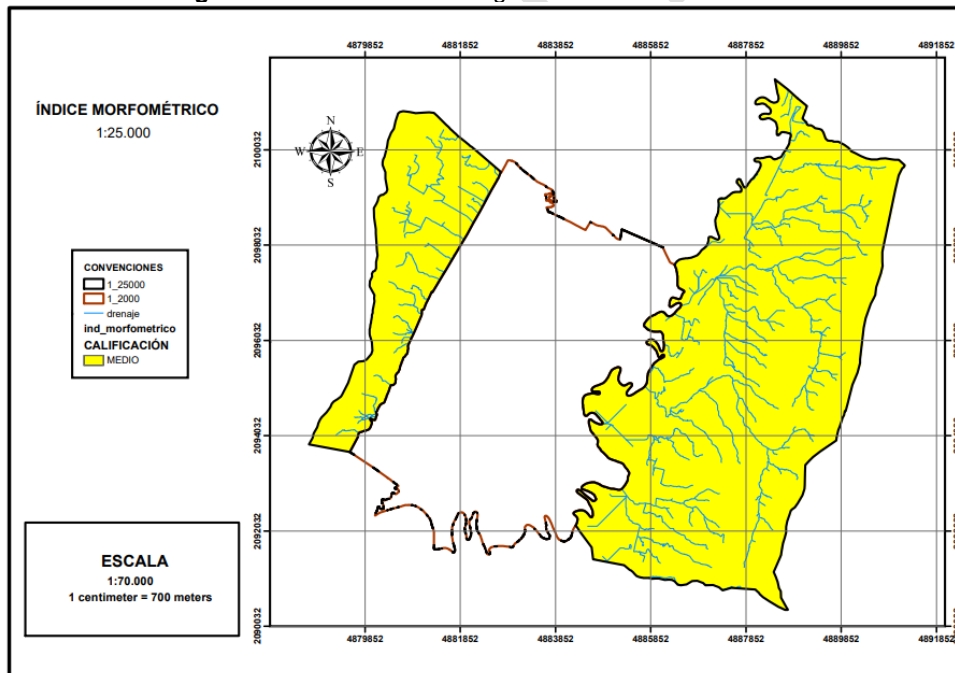
Fuente: Elaboración propia con base en el Anexo Técnico de la CAR.

**Figura 9.** Mapa de coeficiente de compacidad escala 1:25000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

**Figura 10.** Valoración morfológica cuencas escala 1:25000

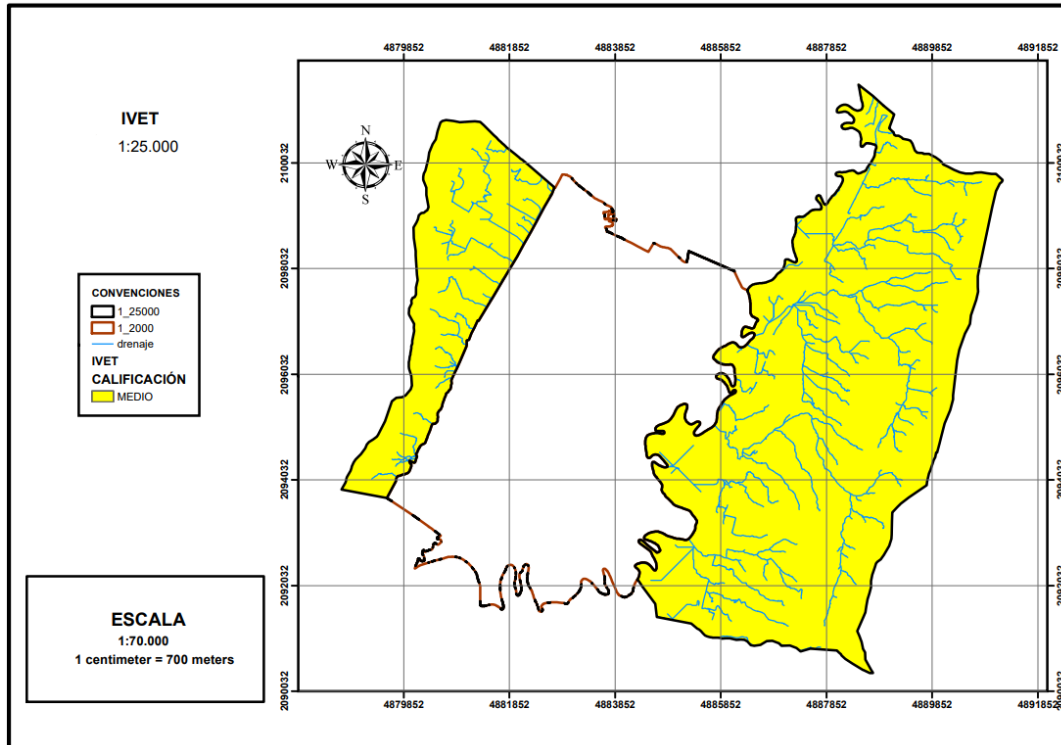


Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

#### 4.2.2 Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales - IVET

Una vez conocida la categoría del Índice Morfométrico de Torrencialidad y del Índice de Variabilidad, se determinó el IVET siguiendo los lineamientos establecidos en el Anexo Técnico, obteniendo el mapa de IVET presentado en la **Figura 11**.

**Figura 11.** Mapa de IVET para las Cuencas del municipio



**Fuente:** Hydraulic and Environmental Design SAS.

La **Figura 11** representa la valoración morfológica hecha a cada una de las microcuencas, tipificándolas en categorías de 1 a 6 y unificándolas en tres categorías alta media y baja con valores 1 para baja 2 para media y 3 para alta, siendo 1 la asignación para cuencas con categorías de 1 a 2, valores 2 o medio para cuencas con categorías 3 y 4, y alto con valor 3 para categorías 5 y 6.

Una vez analizada la condición morfométrica se procedió a analizar los índices de precipitación en las cuencas, luego, sus unidades de estabilidad relativa y finalmente los índices de protección total asociados a las coberturas vegetales. A cada una de las variables se les da un peso con la información tomada en campo y de manera indirecta, para así generar a escala 1:2000 el ráster de morfología, precipitación, estabilidad relativa y protección total, valorados de 1 a 3 siendo 1 bajo, 2 medio, y 3 alto. Cada ráster con un peso específico que se presenta más adelante y finalmente a través de un álgebra de ráster generar el ráster definitivo de amenazas por avenida torrencial con niveles alto, medio y bajo.

La precipitación es un factor de gran importancia para determinar la potencialidad torrencial que presentan los cursos de agua, ya que constituye un agente activador de fenómenos torrenciales. Por cuanto la metodología está orientada a la identificación y zonificación de áreas potencialmente torrenciales y no al diseño de obras de control de crecidas o establecimiento de medidas en vertientes, resultó pertinente evaluar este parámetro a través de la generación del mapa de isoyetas anuales, considerando varias estaciones de influencia en el área, con un registro histórico de más de 15 años para cada una de ellas; de esta manera se obtuvo la distribución de la precipitación en el área del municipio.

### 4.3 Evaluación de la Susceptibilidad

- Integrar los eventos de avenidas torrenciales identificados en el análisis de eventos históricos generando un mapa de localización de los eventos que hayan sido identificados a nivel del municipio.
- Realizar análisis de eventos históricos considerando que los que se puedan utilizar para el análisis de la amenaza se requiere que puedan ser localizados cartográficamente. Por lo tanto, la identificación de sitios se efectuó con base en el control de campo.
- Realizar el análisis geomorfológico con base en los mapas desarrollados para este trabajo.
- Se considera de especial importancia que la caracterización geomorfológica desarrollada ha hecho énfasis en las geoformas y rasgos morfodinámicos que definen e inducen a la ocurrencia en las cuencas y microcuencas del fenómeno de torrencialidad. Las unidades geomorfológicas o formas del terreno están relacionadas con el relieve (fuerzas internas) y/o con el modelado (agentes externos que modifican el relieve); y las subunidades geomorfológicas referencian los tipos de rocas y/o depósitos que soportan los relieves o modelados del paisaje (materiales superficiales asociados con procesos morfodinámicos) Carvajal (2012) Zinck (2012).

Al realizar el análisis de las imágenes satelitales disponibles se encontró que las cuencas del área en estudio del municipio de Chía se caracterizan por presentar un relieve con vertientes inclinadas y un fondo de valle profundo. Se aprecia que gran parte de las cuencas presentan una pendiente inclinada en la parte alta, en el límite municipal y que confluyen hacia la parte central del municipio, disminuyendo su pendiente y conformando una zona de acumulación.

En los sectores superiores de las cuencas aledañas al municipio de Chía la probabilidad de que se genera una amenaza por avenidas torrenciales es media a baja, esto se debe principalmente a la morfología de estas, teniendo en cuenta que en general los cauces presentan meandros de la corriente, pero el sector central del municipio debido a sus características presenta una probabilidad muy grande a inundaciones y estas generalmente ocurren cuando se producen lluvias persistentes y generalizadas.

Al revisar las principales unidades geomorfológicas que se encuentran presentes en el municipio de Chía, se observa que dentro de las más susceptibles a ser transportadas y generadoras de avenidas torrenciales por los eventos de lluvia extremos corresponden generalmente a depósitos de materiales finos, sin embargo, las geoformas fluviales son las de mayor afectación teniendo en cuenta que sobre estas unidades se transporta los flujos que se originan en las partes más altas de la cuenca.

#### 4.4 Evaluación de la Amenaza por Avenidas Torrenciales 1:25.000

Las zonas críticas para evaluar la amenaza son las identificadas en el anterior paso. La definición de las zonas de amenaza se efectuará con base en los datos geomorfológicos obtenidos en campo y con base en la fotointerpretación, en la siguiente forma:

- Textura de los depósitos torrenciales formados por diferentes mecanismos de transporte (depósitos formados por flujos de detritos, flujos de lodo, flujos de tierra o depósitos de origen fluviotorrencial).
- Morfologías superficiales: presencia de diques o muros naturales de material de arrastre (“levees”), lóbulos frontales, bloques de más de 1 m de diámetro, daños a la vegetación, canal trapezoidal. Este análisis debe tener como soporte la información de la cartografía geomorfológica y geológica del área en evaluación.

Los trabajos de campo de control se han direccionado a considerar algunos aspectos adicionales a partir de una adaptación de la propuesta de Parra (1995), respecto a la cronología de los eventos:

- Años: Huellas en el cauce, sin vegetación o rastrojo bajo en márgenes, depósito y cicatrices de movimientos en masa asociados, afectación de la corteza de árboles mayores, ausencia de líquenes en bloques de roca, ausencia de horizontes A y B de suelo. Coronas de cicatrices agudas.
- Decenas de años: Rastrojo alto o árboles mayores en márgenes, depósito y cicatrices de movimientos en masa asociados, líquenes en bloques, matriz fresca, coronas de cicatrices subredondeadas.

##### 4.4.1 Caracterización de aportes de sedimentación

El aumento de carga de sedimentos dentro de una cuenca torrencial puede generar la ocurrencia de una avenida torrencial, es por lo anterior que es necesario un análisis de dichos procesos para identificar cuencas torrenciales con aporte de materiales significantes que permitan identificar posibles eventos torrenciales. Los aportes de sedimentación son originados principalmente por los procesos de inundaciones presentes dentro de la cuenca, asumiendo que no existen aportes antrópicos. Se consideran dos procesos fundamentales: erosión y movimientos en masa, estos últimos también se consideran como variables detonantes, por lo que su análisis se abarcará en el capítulo 5. Dado lo anterior, se considera dentro de este capítulo la realización de un análisis de los procesos de erosión y también su proceso de especialización.

##### 4.4.1.1 Geomorfología

A continuación, se presenta la calificación de las geoformas a los procesos de remoción de acuerdo con la cartografía geomorfológica 1:25000 propuestas principalmente por el SGC con algunas unidades definidas en la metodología IDEAM.

Este componente incluye las variables de morfometría, morfogénesis y morfodinámica, con las cuales se calificará las unidades geomorfológicas.

#### 4.4.1.1.1 Morfogénesis

Se tuvo en cuenta la clasificación y definición de unidades geomorfológicas definidas por el IDEAM. Así mismo, a continuación, se hará una descripción de la **UNIDAD** de acuerdo con su subambiente y se describirán la génesis y algunos atributos relacionados con la morfometría y la dinámica teniendo en cuenta la pendiente, depósitos superficiales, litología, drenaje disección y los procesos actuales en su orden.

- Geoformas de Origen Denudativo

Se incluyen las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que han remodelado y dejado remanentes de las geoformas morfoestructurales preexistentes y además crean nuevas geoformas por acumulación de sedimentos.

Su origen obedece a los procesos de plegamiento y deformación intensa, durante la formación de las sierras homoclinales y la afectación posterior por procesos de meteorización y de denudación diferenciales intensos que generaron la formación local de suelos residuales y conos coluviales con los que generalmente se asocian.

Morfológicamente presentan las siguientes características generales:

- Deslizamiento translacional (Dcdtr – Dcdta)

Deslizamiento de rocas o tierra que involucra movimiento a lo largo de una superficie de falla más o menos planar. El movimiento es controlado por planos someros de debilidad (Planos de estratificación o el contacto entre un plano rocoso y los detritos suprayacentes). De acuerdo con su edad relativa pueden ser recientes (Dcdtr) o antiguo (Dcdta).

La masa deslizada o Cono de deslizamiento translacional (Dcdtr – Dcdta) es alomado de aspecto planar y lobular hacia la base, de longitud corta, de forma irregular a compleja y abrupta a muy abrupta de aspecto caótico y asociado con bloques rocosos separados por grietas donde el drenaje es ausente o desordenado y localmente deflectado por el lóbulo frontal de tierra.

Se encuentran localmente sobre laderas estructurales de sierras homoclinales en la región de Chía. En general los recientes son de tamaño reducido y localmente no cartografiables, y su origen se asocia a actividad antrópica.

Se evidenciaron deslizamientos de carácter regional en este mismo tipo de ladera, generalmente asociado con pliegues de gravedad que involucra como zonas de despegue rocas muy fracturadas de la Formación Pleaners e involucrando, bloques de 100 a 200 m de

areniscas de la Formación Areniscas de Labor y Tierna. Esta tectónica de gravedad fue estudiada anteriormente por Julivert particularmente en la sierra homoclinal de Cota y al oriente del casco urbano de Bogotá (cuena media), (Julivert, 1961a, 1962 y 1963).

– Glacis de acumulación (Dga)

Superficie de acumulación de longitudes moderadamente largas de formas cóncavas y suavemente inclinadas. Su génesis se asocia a la acumulación del material fino en zonas bajas por procesos de erosión laminar. Se incluyen igualmente los planos adyacentes, formados por rellenos de material coluvial fino con bloques, producto de la erosión laminar de las laderas circundantes y presentan espesores de 3 - 10 m.

Presentan su máxima expresión en la región de Chía. Se constituyen de material arenoso y arcilloso y no se descarta la interdigitación con sedimentos de origen lagunar en los bordes de la sabana.

– Lomas (DI)

Prominencia topográfica de morfología alomada o colinada, cimas redondeadas y amplias, de laderas cortas a muy cortas, convexas y pendientes muy inclinadas a muy abruptas, constituida por suelo residuales, con una altura menor de 300 metros sobre su nivel de base local. Su origen es relacionado a procesos intensos de meteorización y erosión diferencial.

– Laderas estructurales denudadas y residuales (Dled)

Superficie en declive localizadas en zonas de piedemonte, de morfología alomada con la inclinación de los estratos en favor de la pendiente del terreno, son de longitud corta a larga, de forma cóncava y con pendientes abruptas. El origen está asociado con procesos erosivos y de disección intensa en rocas blandas con desarrollo de suelos residuales y coluviales gruesos.

Se encuentran en toda la Sabana de Bogotá (cuencas media y alta), en franjas de 1– 3 km de amplitud en sectores como Chía, donde están en general asociadas con rocas de composición predominantemente arcillolítica de las formaciones Bogotá y localmente Guadas.

Se presentan con inclinaciones entre 10° y 30°, localmente menores que la disposición estructural de las rocas donde se encuentran. Es igualmente característico el alto grado de disección relacionado con la formación de surcos y la cobertura de conos y lenguas coluviales.

– Laderas de contrapendiente estructural Denudada (Dlcp)

Superficies en declive localizadas en zonas de piedemonte, con la inclinación de los estratos en contra de la pendiente del terreno. Son de longitud corta a larga, de forma cóncavo convexa y de pendientes abruptas, cuyo origen está relacionado con rocas blandas erosionadas intensamente y asociadas con depósitos de coluvión gruesos.

Este tipo de ladera de morfología alomada se presenta localmente como franjas de 1–2 km en la zona de piedemonte asociada a laderas de contrapendientes de sierra homoclinal. Presentan laderas cóncavas muy erosionadas y asociadas a conos y lóbulos coluviales.

Se encuentran en Chía, relacionadas con rocas de litología arcillosa de la Formación Guaduas.

Cuando las características litológicas se caracterizan por presentar intercalaciones de rocas duras y blandas por procesos de erosión diferencial se presentan:

- Planchas estructurales denudadas – Espolones estructurales (Dlpd)

Laderas y crestas simétricas de cimas agudas de morfología alomada y dispuestas transversales a las estructuras geológicas. Están constituidas por estratos delgados duros y blandos disectados profundamente en dirección perpendicular al rumbo de las capas, y que localmente definen salientes o crestas a manera de puentes entre espinazos estructurales.

Geoformas de estas características tiene una amplia distribución en la Sabana de Bogotá (cuencas media-alta) y se encuentran principalmente en los flancos de las grandes estructuras tales como sierras homoclinales y anticlinales que se disponen por lo general en dirección NNE a lo largo de la sabana. Las planchas estructurales denudadas se presentan tanto como espolones estructurales y como crestas perpendiculares entre espinazos estructurales.

Los espolones estructurales se presentan como salientes de morfología alomada, dispuestas perpendiculares a las laderas estructurales de sierra homoclinal o anticlinal.

Las crestas son irregulares de formas agudas a redondeadas, y asociadas a un drenaje subparalelo denso definido por la estratificación de capas areníticas y arcillolíticas, delgadas a gruesas principalmente de las formaciones Labor y Tierna del Grupo Guadalupe.

Su conformación está definida por la disección acentuada de los drenajes naturales y están asociados con conos de deyección, coluviones y localmente conos de deslizamiento. Las planchas estructurales cuando se encuentran confinadas entre espinazos se presentan como crestas de morfología alomada con fuerte disección y dispuestos a manera de puentes entre los espinazos estructurales.

Litológicamente están constituidas por intercalaciones de arcillolitas y areniscas de las formaciones Guaduas y Bogotá. En zonas donde las condiciones climáticas fueron diferentes a las actuales se encuentran en la sabana de Bogotá geoformas con las siguientes características:

- Cerros residuales (Dcr)

Cerros de morfología alomada o colinada de cimas redondeadas de laderas cortas convexas muy inclinadas asociadas con suelos residuales gruesos. Su origen se debe posiblemente a

procesos de meteorización diferencial intensa en climas húmedos tropicales diferentes a los actuales. Este tipo de geoformas se presenta principalmente en el sector suroccidental de la Sabana.

Se encuentran asociados a rocas de las formaciones Labor y Tierna, localmente con suelos residuales y con desarrollo de drenaje radial poco denso. Son cerros irregulares de 2 – 4 Km<sup>2</sup> de extensión y 50 100 m de elevación, desarrollado en rocas arcillolíticas blandas de la formación Guaduas con suelos residuales arcillosos y localmente arenosos. Presentan drenaje radial denso y localmente con procesos de carcavamiento.

– Conos de Talus (Dct)

Geoforma localizados al pie de zonas escarpadas en forma de cono o lóbulos, de longitud muy corta a corta, de formas rectas a convexas, inclinadas a muy inclinadas. Se forman esencialmente por acumulación mecánica de bloques angulares desprendidos por meteorización acentuada del escarpe adyacente. Se incluyen igualmente las acumulaciones de bloques caídos por la acción de actividad sísmica y volcamiento. Se constituye de bloques angulares a subangulares de variado tamaño (0.5 – 3 m), clastosoportados y localmente con matriz arenosa o arcillosa. Presentan espesores de 5- 35 m.

Hacia el sureste de Zipaquirá y en flanco oeste que limita el valle de Teusacá (Suroeste de Sopó) igualmente se encuentran conos de estas características con bloques de arenisca subredondeados y meteorizados de 1 – 2 m clastosoportados y con matriz arenoarcillosa. Presentan pendientes del orden de los 15° – 20° y se encuentran hacia la base de un escarpe de línea de falla de 150 m de altura y 25° – 30° de inclinación.

– Conos y lóbulos coluviales y de soliflucción (Dco)

Geoforma en forma de cono o lóbulos de longitudes cortas a largas, de formas convexas e inclinaciones suaves a abruptas. Se originan respectivamente por acumulación de materiales sobre las laderas tanto por procesos de escorrentía superficial como por flujo lento y viscoso de suelo saturado y no saturado. Se constituyen de bloques angulares a subangulares de diferentes tamaños embebidos en material arcilloso en espesores del orden de 5 – 35 m.

Este tipo de geoforma son de amplia distribución en la base de las laderas de las sierras homoclinales que atraviesan de sur a norte la sabana de Bogotá. Presentan forma de cono en general de 3 – 5 ha y 5° – 15° de inclinación, que se interdigitan conformando franjas de 100 - 500 m en la base de las laderas. Hacia las zonas más elevadas, en los bordes de la sabana donde la humedad es muy alta desarrollan tamaños kilométricos y se asocian con procesos de soliflucción de suelos. Los conos coluviales se constituyen de bloques de variado tamaño (areniscas, arcillolitas) embebidos en una matriz arcillosa o arcilloarenosa que cubre parcialmente la base de las laderas.

Es importante notar la existencia de acumulaciones de estas mismas características, localmente sobre las laderas de cerros residuales y remanentes, sin embargo, su morfología ha sido modificada por levantamientos del terreno y procesos denudativos posteriores. Este rejuvenecimiento del paisaje indica los cambios sucedidos durante el levantamiento de la

cordillera oriental, lo cual se ha comprobado igualmente con la presencia de suelos rojos típicos de climas tropicales diferentes a los actuales.

- Geoformas de Origen Antrópico

Son formas del terreno cuyo origen está ligado a las actividades humanas de explotación de recursos del subsuelo y al acondicionamiento del terreno tanto para la construcción de obras civiles como para la disposición de desechos tanto orgánicos como inorgánicos. En general se evidencian en la Sabana de Bogotá las siguientes formas:

- Canteras (Acn)

Excavación escarpada de 5 – 20 de altura de formas irregulares o en terrazas hechas en laderas para la extracción de materiales de construcción como piedra, arena y grava. Se incluyen en esta definición las excavaciones realizadas para la extracción de arcillas comúnmente llamadas chircales.

Las canteras se presentan en general a la ciudad de Bogotá y en cercanías de poblaciones principales de la sabana, donde se explotan arenas, recebo, gravas y arcillas (INGEOMINAS, 1995 - 1997). Las arcillas se obtienen de las formaciones Bogotá y Guaduas mientras los recebos y arenas se extraen de rocas de las formaciones Arenisca Dura, Pleaners, Labor y Tierna. Las gravas e igualmente arenas se obtienen de los sedimentos fluviales de las formaciones Tilatá y Tunjuelito.

- Promontorios de desecho de cantera (Acl)

Acumulaciones alomadas de 3 – 10 m de altura, formadas por la acumulación de materiales extraídos de una cantera por lo general bloques, arenas y gravas. Estas geoformas de poca extensión y en general no cartografiables a la escala de este trabajo se presentan localmente como una serie de montículos de baja altura y constituidos tanto por materiales procesados y listos para su distribución como por materiales de desecho producto del descapote de las canteras.

Como se indicó anteriormente localmente se han dispuesto en las zonas de drenaje que posteriormente por procesos denudativos y de socavación se deslizan.

- Geoformas de Origen Fluvial y Lagunar

Las geoformas de origen fluvial y lagunar están originadas por el efecto erosivo y acumulativo de las corrientes de los ríos y la sedimentación de materiales en cuencas restringidas respectivamente. Estas geoformas están definidas principalmente en la parte central de la sabana de Bogotá, y particularmente asociadas a la acumulación de sedimentos de los cursos de los ríos.

– Cauce Activo (Fca)

Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Los cauces rectos se restringen a valles estrechos en forma de V, generalmente relacionados al control estructural de fallas o diaclasas. Estos cauces cuando recorren grandes distancias pueden formar lagunas y rápidos. Cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), los cauces son de tipo meándrico o divagante, como producto del cambio súbito de la dirección del flujo. Dependiendo la cantidad de carga de sedimentos, la pendiente y caudal pueden llegar a formar sistemas anastomosados, trenzados, divergentes y otras unidades asociadas.

– Planicies y Deltas Lacustrinos (Fpla)

Planicies extensas de aspecto aterrazado y morfología ondulada suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por escarpes de 2 – 20 m de altura.

Se constituyen de arcillas grises con locales intercalaciones de arenas finas y delgados niveles de gravas y turbas en capas paralelas producto de la acumulación de materiales transportados por las corrientes locales hacia la cuenca ocupada por el antiguo lago de la Sabana de Bogotá. Espesores de 20 – 300 m.

Estas geoformas son las de mayor expresión en la sabana de Bogotá con una cobertura de aproximadamente 2700 km<sup>2</sup>. Son de morfología plana y de aspecto aterrazado, suavemente ondulada de 3° – 5° de inclinación y con forma lobulada o de abanico principalmente en la desembocadura de los grandes cursos de agua que entregaron sus aguas en la antigua laguna de la sabana de Bogotá.

Estas geoformas están limitadas por escarpes de 0.5 – 20 m de altura y 15° – 35° de inclinación, encontrándose las máximas alturas en los bordes de la cuenca y particularmente en la zona de la salida del río Bogotá en el sector suroeste de Soacha.

Las planicies lacustrinas de la Sabana de Bogotá localizadas en la parte central de la cuenca están constituidas predominantemente de arcillas grises con delgadas intercalaciones de arcillas turbosas. Las arcillas son de características plásticas y localmente expansivas lo cual se evidencia en la deformación de las vías particularmente en la vía que conduce hacia Tenjo. Hacia los bordes de la cuenca como se indicó previamente la con figuración es localmente en forma de abanico, definiendo los lóbulos de deltas lacustrinos constituidos de arcillas con intercalaciones frecuentes de arenas finas, arenas arcillosas y es igualmente evidente el incremento de arcillas turbosas y ligníticas (VANDER HAMMEN Y HELMENS, 1990).

Las planicies lagunares e igualmente planicies fluviales más antiguas han sido disectadas, dejando amplias planicies de inundación y terrazas fluviales.

– Planicie o llanuras de inundación (Fpi)

Franja de terreno plana baja de morfología ondulada de 0.05 – 5 km de extensión, eventualmente inundable. Se presenta bordeando los cauces fluviales y se limita localmente por escarpes de terraza. Se constituye de 3 - 5 m de arcillas y limos producto de la sedimentación durante eventos de inundación fluvial. Se incluyen los planos fluviales menores en formas de “U” o “V” y conos coluviales menores, localizados en los flancos de los valles intramontanos.

Las planicies o llanuras de inundación presentan un amplio desarrollo en la sabana de Bogotá y están asociadas evolutivamente a los últimos eventos de secado y los procesos de disección de las planicies lagunares por los principales ríos que la drenaron. Se destacan por su amplitud las llanuras de inundación de los ríos Bogotá y Frío.

Se constituyen de arcillas grises de inundación, localmente con intercalaciones de arenas muy finas a limosas de colores claros, dispuestos en capas delgadas horizontales de la llamada formación Chía.

– Geoformas de origen Morfoestructural Denudativo

Corresponde a las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la litología y la disposición estructural de las rocas aflorantes en la cuenca de estudio. Se presentan afectadas por procesos erosivos de maderada a baja intensidad y se caracterizan por su relieve montañoso a colinado de pendientes abruptas y escarpadas localmente.

Conforman el armazón estructural en dirección NNE de la CRB, dejando valles amplios colmatados posteriormente por sedimentos fluviales y lagunares que constituyen en la actualidad las amplias planicies, hoy localmente colonizadas. Entre las Unidades y Subunidades geomorfológicas se presentan:

– Ladera en contrapendiente de sierra homoclinal denudada (Sshcp)

Laderas de contrapendiente denudadas (**Sshcp**), definida por la inclinación de los estratos en contra de la pendiente, de longitud moderada a larga, de formas cóncavas a irregulares escalonadas y con pendientes escarpadas a muy escarpadas.

Las laderas de contrapendiente de las sierras homoclinales mencionadas son moderadas a largas de formas irregulares que en general son escarpadas y presentan forma festoneada asociada con la formación de espolones estructurales por efecto de procesos erosivos diferenciales intensos, definidos por un drenaje subparalelo profundo que disecta las laderas, afectadas por su base por fallamiento inverso y cuyo rumbo es paralelo a la estructura.

– Ladera estructural de sierra homoclinal denudada (Sshle)

Sierra simétrica o ligeramente simétrica elongada de morfología generalmente montañoso de cimas agudas y definida por una secuencia estratos o capas apilados e inclinados (> 35°) en

una misma dirección por efecto de plegamiento intenso asociado localmente con fallamiento inverso.

Se conforman de laderas estructurales denudadas (**Sshle**), definidas por la inclinación de los estratos en favor de la pendiente ( $> 35^\circ$ ), de longitud corta a moderada larga de formas rectas a convexas y con pendientes escarpadas a muy escarpadas.

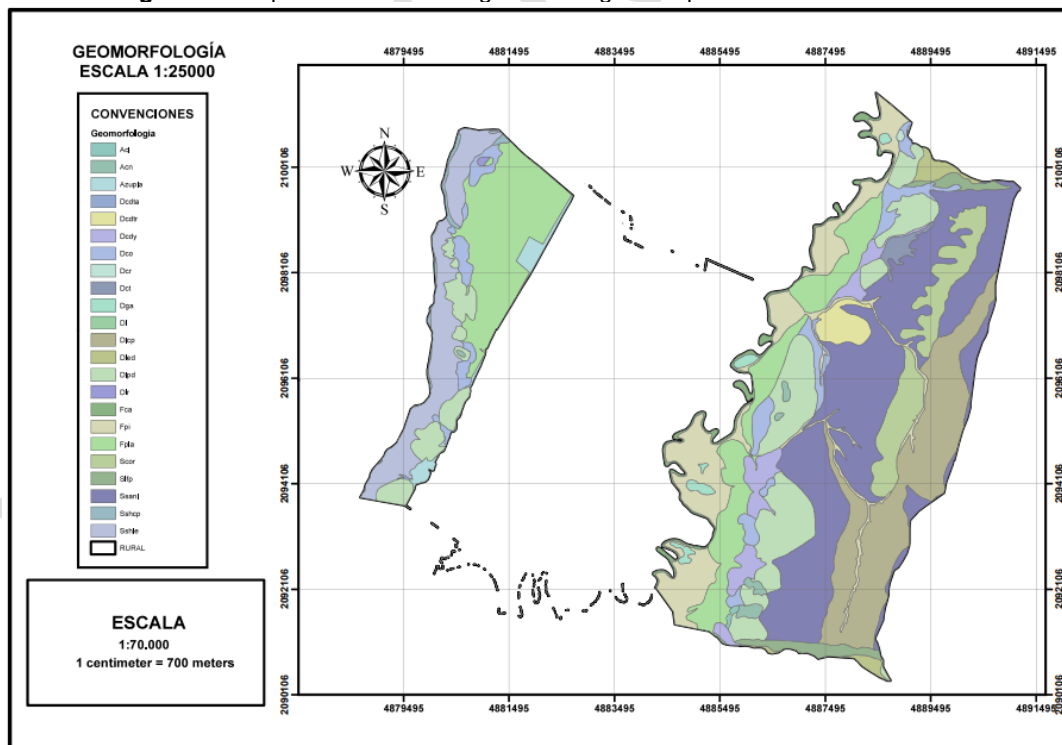
En general se caracterizan por su morfología montañosa y colinada de crestas agudas asociadas con laderas estructurales rectas y localmente convexas con buzamientos de  $30^\circ$ – $45^\circ$  y pendientes variables de  $25^\circ$ – $45^\circ$  que facilitan localmente la generación de procesos de deslizamientos traslacionales en general de suelos rocas de la Formación Pleaners sobre las areniscas de grano fino y consistentes de la Formación Arenisca Dura.

- Escarpe de línea de falla (Slfp)

Escarpe muy corto, abrupto, cóncavo o convexo, originado por erosión acentuada a lo largo de una línea de falla definida por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas.

Se presentan localmente distribuidos tanto en dirección NNE como NW–SE. Se destacan por su expresión geomorfológica al norte de del municipio. Son escarpes abruptos de 10–50 m de altura, localmente con evidencia de drenajes descabezados.

**Figura 12.** Mapa de las unidades geomorfológicas superficiales escala 1:25000

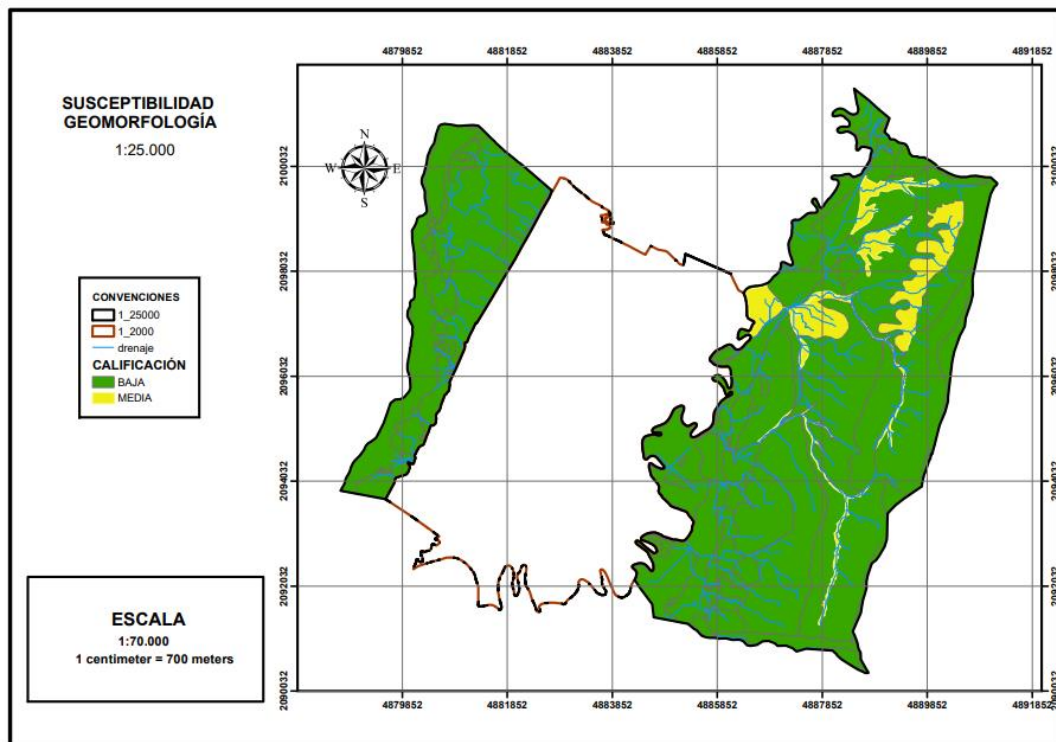


**Fuente:** Tomado y ajustado de POMCA río Bogotá por Hydraulic and Environmental Design SAS

La estabilidad relativa se basó en la evaluación de las diferentes unidades de Estabilidad Relativa establecidas por Duarte (2002), con base en la combinación de aspectos geológicos,

geomorfológicos y de pendiente. Tal investigación analizó las diferentes categorías de áreas estables, potencialmente inestables, e inestables, considerando la influencia que representan cada una de ellas frente a la ocurrencia de crecidas torrenciales. Sin embargo, sólo se consideraron aquellas unidades cuya representación en el plano es área; por tanto, no se incluyeron las unidades potencialmente inestables por cercanía a superficies recientes de ruptura (Pif), por amenaza de aludes sísmico (Pia) y por evidencias de represamiento (Pir), por ser lineales y puntuales. La evaluación de dichas unidades se realizó con base en el mapa de Estabilidad Relativa.

**Figura 13.** Calificación de la susceptibilidad a los procesos de torrencialidad de acuerdo a criterios morfogenéticos Unidades IDEAM escala 1:25000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

#### 4.4.2 Caracterización de Coberturas

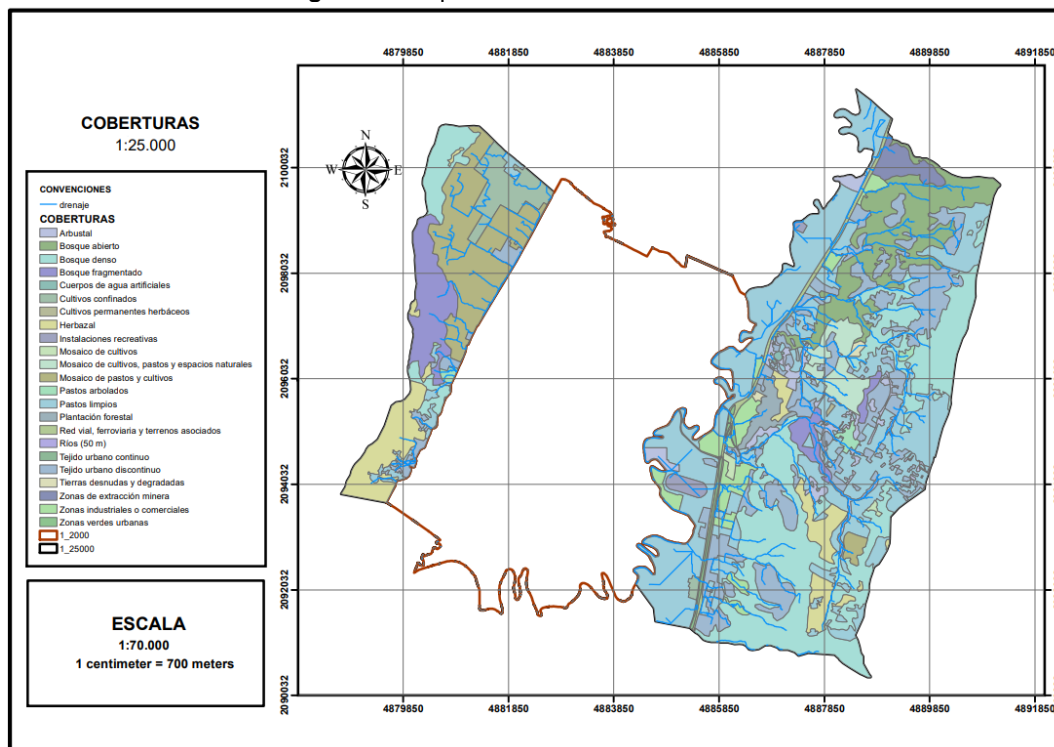
La cobertura y el uso del suelo tienen una gran importancia en la evaluación de fenómenos de movimientos en masa, puesto que la influencia de esta puede generar amenaza o estabilidad en diferentes terrenos de acuerdo con sus características. Esto hace referencia al recubrimiento de la superficie terrestre de origen natural o cultural.

El uso del suelo hace referencia a las actividades y funciones que son desarrolladas por el hombre sobre la superficie del suelo para obtener productos y beneficios. La cobertura del Suelo urbano principal es un factor determinante para identificar la erosión y la infiltración de aguas de escorrentía.

En la evaluación de un terreno es posible identificar una amplia variedad de tipos de vegetación, pero no todos pueden ser tratados debido a la complejidad que tiene cada especie, razón por la cual estas se tienden a generalizar, sin embargo, dado que para el

presente estudio se adquirieron imágenes de muy alta resolución obtenidas por medio de Google Earth, sumado al hecho de que a lo largo del desarrollo del proyecto se realizaron diferentes visitas de campo.

**Figura 14.** Mapa de coberturas escala 1:25000



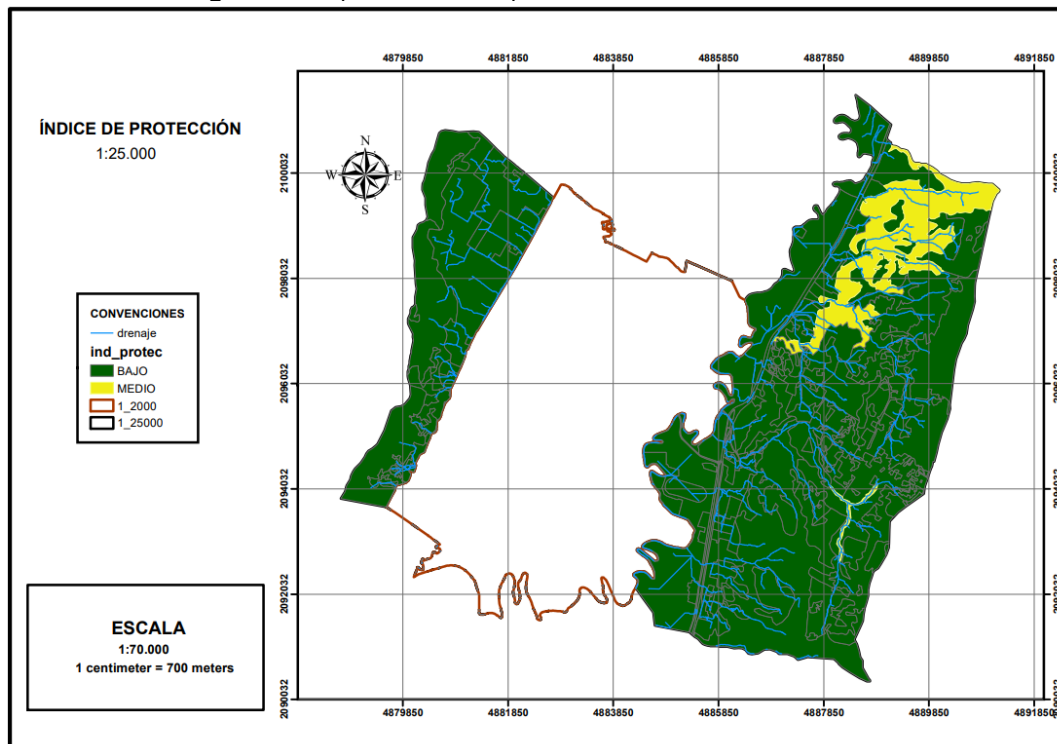
**Fuente:** Hydraulic and Environmental Design SAS.

La modificación de la topografía del terreno mediante cortes o rellenos puede producir la activación de un deslizamiento, un corte en un talud puede potencialmente producir varios cambios sustanciales en el estado de la formación residual, además este tipo de cortes y rellenos antrópicos generan cambios topográficos y concentración de esfuerzos de cortante y en ocasiones descubren superficies críticas para efectos de movimientos en masa como estratificación, fracturas y planos de cambio de meteorización (Suarez J., 2001).

Adicionalmente se revisaron las coberturas del suelo, las cuales influyen en la generación de los eventos, teniendo en cuenta que hay sectores del municipio que se encuentren descubiertos o expuestos a cambios frecuentes de usos, que contribuyen a la saturación rápida de los suelos, por lo que gran parte de la lluvia no se infiltra y se aumenta considerablemente la cantidad de agua por escorrentía. Dentro de los usos y coberturas de suelo que se analizaron para el municipio de Chía, se tienen los siguientes: drenajes, bosques, cultivos anuales o transitorios, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mosaico de pastos y cultivos, pastos, zonas urbanizadas, áreas agrícolas heterogéneas y áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva.

El Índice de protección del suelo permitió determinar el grado de protección que la vegetación brinda al suelo, donde la vegetación arbórea densa constituye la protección más eficaz.

**Figura 15.** Mapa de índice de protección del suelo escala 1:25000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

#### 4.4.3 Caracterización de aportes de sedimentación

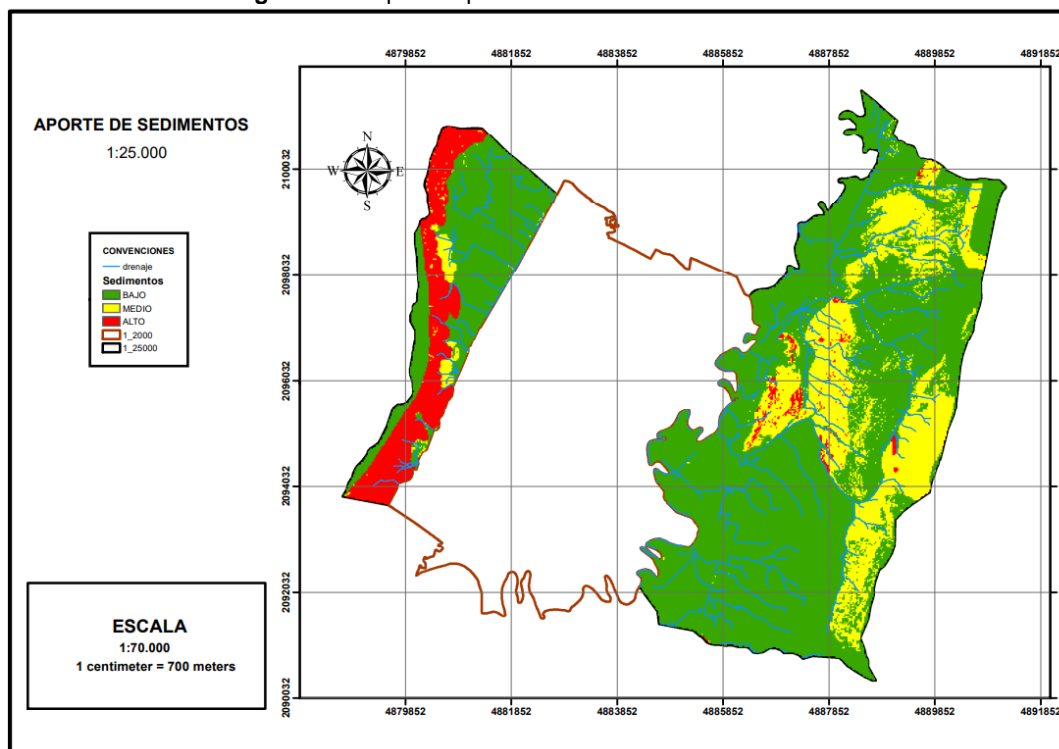
El aumento de carga de sedimentos dentro de una cuenca torrencial puede generar la ocurrencia de una avenida torrencial, es por lo anterior que es necesario un análisis de dichos procesos para identificar cuencas torrenciales con aporte de materiales significantes que permitan identificar posibles eventos torrenciales. Los aportes de sedimentación son originados principalmente por los procesos de denudaciones presentes dentro de la cuenca, asumiendo que no existen aportes antrópicos. Se consideran dos procesos fundamentales: erosión y movimientos en masa, estos últimos también se consideran como variables detonantes, por lo que su análisis se abarcará en ese capítulo. Dado lo anterior, se considera dentro de este capítulo la realización de un análisis de los procesos de erosión y también su proceso de especialización.

El análisis a escala 1:25.000 se realizó mediante el cálculo de la susceptibilidad a amenaza por movimientos en masa que se basa en un método estadístico, donde se han considerado las variables como la geología, geomorfología y particularmente la pendiente del terreno, entre otras; posteriormente se incluyen los detonantes de la aceleración sísmica a nivel de roca, la zonificación climática y la precipitación máxima o niveles de agua para el cálculo final de amenaza.

De esta manera, las causas de las avenidas torrenciales son la combinación de factores geomorfológicos de la cuenca (forma, pendiente, masa o material disponible), usos y cobertura del suelo con factores meteorológicos de lluvias de alta intensidad, que pueden

generar un aumento de escorrentía y activar en laderas de la cuenca, movimientos en masa que caen al cauce.

**Figura 16.** Mapa de aporte de sedimentos escala 1:25000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

Con el fin de generar el mapa de amenaza avenidas torrenciales se realizó el cruce de los anteriores mapas teniendo en cuenta las siguientes ponderaciones: mapa de índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET), mapa de cobertura y uso del suelo, mapa de geomorfología.

**Tabla 12.** Ponderación de factores de susceptibilidad por avenida torrencial

Nivel	Rango de descripción
Bajo 1	Son áreas que se activan como respuesta a lluvias de larga duración cubriendo zonas extensas. Generalmente, son los Interlluvias.
Medio 2	Predominan precipitaciones medias anuales 700 y 900 mm. Presentan una cobertura vegetal variada desde los bosques hasta cultivos, potencialmente inestables por movimientos en masa, pendiente, procesos erosivos y crecientes de los cursos de agua; una respuesta hidrológica moderadamente rápida, generalmente presentan crecidas en las épocas de mayor precipitación.
Alto 3	Áreas potencialmente inestables por pendiente y movimiento en masa; poseen una respuesta hidrológica rápida con una cobertura del suelo que incluye matorrales, asociación de cultivos y Áreas pastizales y vegetación arbustiva. Desde el punto de vista geológico geomorfológico, son áreas inestables y potencialmente caracterizadas por presentar fuertes precipitaciones y condiciones de humedad antecedentes altos, con predominio de cultivos pastizales e inestables que responden rápida y violentamente a lluvias de alta intensidad y corta duración, generando crecidas torrenciales pastizales naturales

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

#### 4.4.4 Zonificación de amenazas por avenidas torrenciales

De acuerdo con la metodología desarrollada en el acápite anterior se presentan los mapas de zonificación de amenaza por avenidas torrenciales para la zona estudiada a escala 1:25000.

Para generar la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales se desarrolla en primera instancia, una zonificación de la susceptibilidad en función de la geomorfología, cobertura, pendiente, que presenta el área de interés. La variable geomorfológica se considera adecuada para la inclusión dentro de la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales, ya que las unidades geomorfológicas son el resultado de la interacción de la atmósfera con la superficie terrestre, la dinámica interna de la tierra y su evolución, cuando se realiza una interpretación geomorfológica con criterios morfogenéticos se tiene en cuenta las características geológicas y estructurales, el clima y la estabilidad de las laderas por lo que su inclusión dentro del modelo aunque sea heurístico contempla indirectamente variables que influyen dentro de los procesos estudiados en este capítulo.

Finalmente, se integra la amenaza por remoción en masa, el grado de aporte de sedimentos por unidad hidrográfica originado por procesos de movimientos de masa y erosión, y la susceptibilidad geomorfológica a eventos torrenciales mediante una matriz de decisión de tres entradas para generar la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales.

Figura 17. Matriz de variables para zonificación de amenaza por avenida torrencial

		Pendiente cobertura e IVET			Amenaza por procesos de remoción en masa
		Baja	Media	Alta	
Geomorfología	Baja	Baja	Baja	Media	Baja
		Baja	Media	Media	Media
		Media	Media	Media	Alta
	Media	Media	Media	Media	Baja
		Media	Media	Media	Media
		Media	Media	Alta	Alta
	Alta	Media	Alta	Alta	Baja
		Media	Alta	Alta	Media
		Media	Alta	Alta	Alta

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

## 5. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN CAUCES PRIORIZADOS.

### 5.1 Producción de sedimentos en la cuenca de las quebradas priorizadas

De acuerdo con Wischmerier y Smith (1978) la ecuación USLE fue desarrollada para predecir el movimiento promedio anual de suelos desde una pendiente específica, bajo condiciones de uso y manejo específicos, para orientar la selección de prácticas de conservación para localidades específicas, estimar la reducción de pérdida de suelo que se puede lograr con cambios de manejo efectuados por el agricultor y determinar el largo máximo de pendiente tolerable para un sistema de cultivo determinado.

La determinación de la pérdida de suelo por medio de la ecuación Universal de pérdida de suelo USLE (Universal Soil Loss Equation) ((Wischmeier & Smith, 1978), utiliza seis (6) factores:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde:

A – Erosión del suelo Tn(ha/año)

R – Factor erosión pluvial o erosión de la Lluvia (R) (J m<sup>-2</sup>, cm hora<sup>-1</sup>).

K – Factor de erodibilidad de suelos (K) (t m<sup>2</sup> hora ha<sup>-1</sup>J<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>)- parámetro que define su mayor o menor capacidad para ser disgregado. Condición de máxima erosión de suelo.

L – Factor de longitud de pendiente (L) (ladera de pendiente máxima).

S – Factor de pendiente (S) como variable condiciona mayor o menor escorrentía del agua.

C – Factor de cultivo y manejo del suelo (C).

P – Factor de prácticas de cultivo (P).

A continuación, se explican cada uno de ellos:

### 5.1.1 Erosión pluvial o erosión de la lluvia (r)

La erosividad de la lluvia refleja la cantidad de energía cinética que tiene las gotas de lluvia que impactan sobre el suelo. Estas tienen un doble efecto sobre el mismo, por un lado, producen un desprendimiento de partículas del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia, por otra parte, producen un taponamiento de los poros del suelo que incide en el aumento de la escorrentía y por tanto de la erosión.

Para el cálculo de la erosividad de la lluvia en un período determinado se requiere información relativa a la cantidad de precipitación caída durante ese tiempo, se puede calcular de diversas maneras, se presentan las dos metodologías:

Cálculo por medio de ecuación FAO-Unesco adaptado de Arnoldus (Tn ha-1 año-1): fue estimado empleando la metodología propuesta por FAO (1984) Y surge del promedio de la sumatoria de los cocientes entre las precipitaciones mensuales (Pi) elevadas al cuadrado y la precipitación total anual (Pt).

$$R = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

Donde:

**R:** índice de erosión pluvial

**P<sub>t</sub>** Precipitación anual (mm)

**P<sub>i</sub>** Precipitación mensual (mm)

Cálculo por medio de hietograma (MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>): Es el número de unidades de índice de erosión Pluvial (EI), más un factor para escurrimiento por derretimiento de nieve o aplicación de agua. El EI para tormenta es el producto de la energía total de una tormenta (E) y su máxima intensidad en 30 minutos (I). Este factor puede ser expresado de dos maneras:

$$R = \sum EI_{30}$$

Para llevar a cabo este cálculo es necesario realizar el siguiente procedimiento:

- Dividir el hietograma en segmentos de intensidad uniforme  $I_i$  (mm h<sup>-1</sup>)
- Calcular la energía cinética de cada segmento  $EC_i$  (Jm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>)  

$$EC_i = 1,213 + 0,89 \log I_i$$

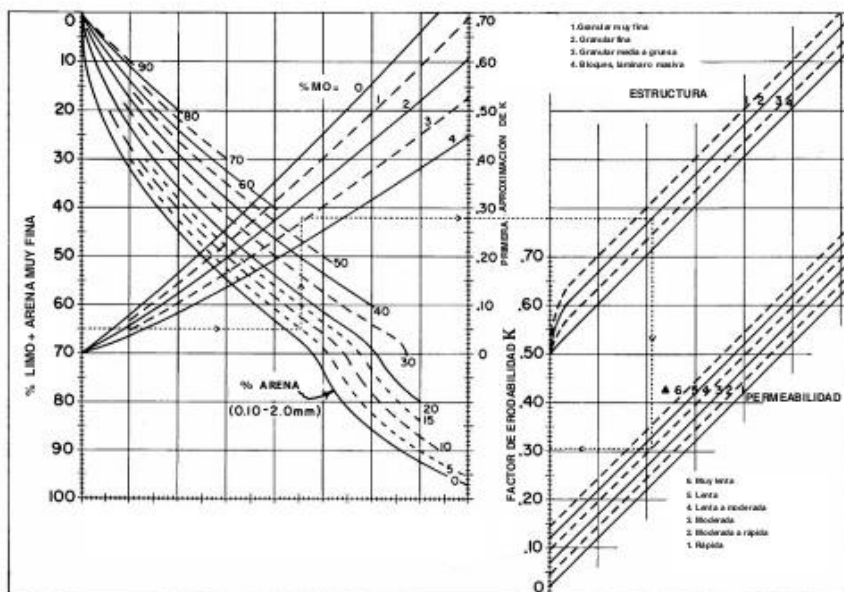
$$I_i \leq 76 \text{ mm h}^{-1}$$
- Multiplicar  $EC_i$  por la cantidad de lluvia  $P_i$  del segmento correspondiente:
- $(EC_i P_i) = (EP)_i$  en Jm<sup>-2</sup>
- Sumar los valores  $(EP)_i$  para obtener el valor de la energía cinética total  $E$  (MJ ha<sup>-1</sup>)
- Calcular la intensidad máxima en 30 minutos a partir del hietograma:  $I_{30}$  (mm h<sup>-1</sup>)
- Calcular el índice de erosividad parcial  $EI_{30}$  de la lluvia estudiada (en MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup>)
- Sumar los índices de erosividad parciales de todas las lluvias del año.

### 5.1.2 Susceptibilidad de erosión del suelo o de erodabilidad (k)

De acuerdo con la FAO, en los Estados Unidos, Wischmeier y Smith definieron la gráfica de referencia desnuda estándar como que tiene una pendiente del 9%, 22.2 m de longitud, cultivada en la dirección de la pendiente y que no ha tenido materia orgánica arada durante tres años. En estas parcelas de referencia, bajo lluvia natural y simulada, Wischmeier y sus colegas calcularon múltiples regresiones entre la erosionabilidad del suelo y 23 parámetros diferentes del suelo.

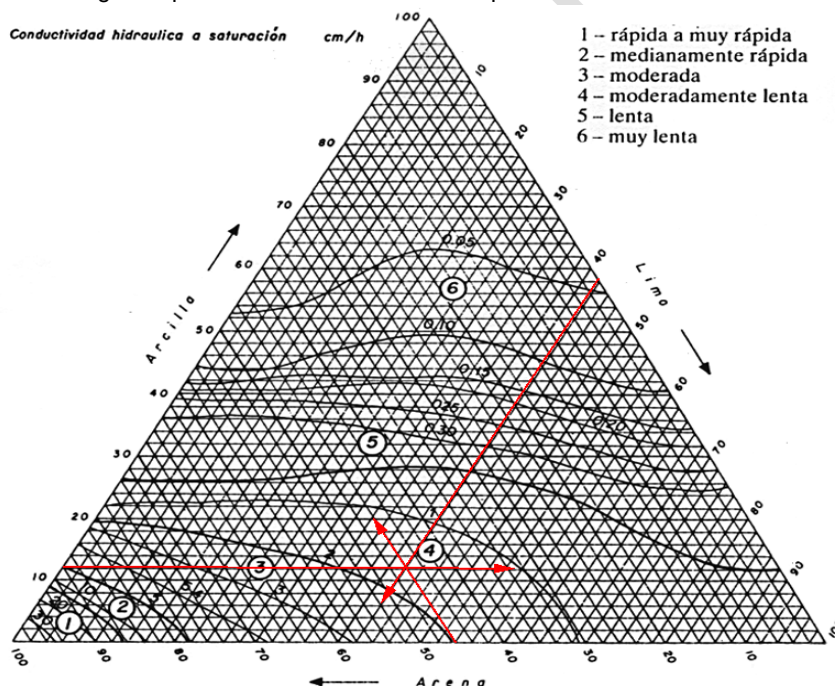
De esta manera, la erosionabilidad depende esencialmente de la cantidad de materia orgánica en el suelo, la textura del suelo, especialmente arena de 100-2000 micras y limos de 2-100 micras, y por último el perfil, la estructura de la superficie horizonte y permeabilidad (Nomograma de erodabilidad). De esta forma, el Factor K es la tasa de pérdida de suelo por unidad, para un suelo específico, medido en una porción de terreno estándar: 22.13 m de largo, 9% de pendiente, en barbecho y labranza continua. Su rango varía desde menos de 0.1 para los suelos menos erosionables hasta cerca de 1.0 en el peor de los casos (FAO, 1992). El factor K está expresado en (t m<sup>2</sup> h ha<sup>-1</sup> hJ<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>).

**Figura 18.** Nomograma permite calcular de manera rápida el Factor K de erodabilidad del suelo



Fuente: Citado por FAO (cf. Wischmeier, Johnson and Cross 1971).

**Figura 19.** Nomograma permite calcular de manera rápida el Factor K de erodabilidad del suelo



Fuente: Citado por FAO (cf. Wischmeier, Johnson and Cross 1971).

El factor K, de acuerdo con los valores obtenidos puede ser interpretado y clasificado de acuerdo con el tipo de suelo, permeabilidad y saturación de la siguiente manera:

**Tabla 13.** Valores de Factor K

Tipo de suelo	Factor k	Descripción del suelo
A	0,16 – 0,23	De bajo potencial de escurrimiento, buena permeabilidad, por lo que la infiltración se mantendrá los valores altos, aun cuando están húmedos. Suelos gravosos, gravo-arenosos, arenosos gruesos.

Tipo de suelo	Factor k	Descripción del suelo
B	0,13 - 0,38	Mantienen moderadas las velocidades de infiltración y mayores los valores de escurrimiento. Suelos arenosos, limo-arenosos con reducida presencia de materia orgánica coloidal.
C	0,13 – 0,18	La infiltración es lenta, es frecuente la presencia de material muy fino, mezclado con partículas gruesas. Suelos franco-arcillosos, arcillo-arenosos.
D	0,07 – 0,012	Mayor potencial de escurrimiento. Forman capas prácticamente impermeables. Suelo arcilloso.

Fuente: (FAO, 1996)

La determinación del factor K, puede realizarse a partir de la siguiente ecuación:

$$100K = [10^{-4}2,7 T^{1,14}(12 - MO) + 4,2(E - 2) + 3,2(P - 3)]$$

Donde:

**T:** parámetro de Textura de los 15 cm superficiales

$$T = [(100 - Ac)(L + Arm)]$$

(L + Arm): Limo + arena muy fina (0.1-0,002 mm)

Ac Arcilla (<0m002 mm)

**MO:** Contenido de Materia Orgánica (%)

**E:** parámetro de estructura

**P:** Parámetros de permeabilidad

Tabla 14. Magnitud general del factor K de erodabilidad del suelo

Clase de textura	Contenido de materia orgánica		
	0.5 %	2%	4%
	K	K	K
Arena	0.07	0.04	0.03
Arena fina	0.21	0.18	0.13
Arena muy fina	0.55	0.47	0.36
Arena franca	0.16	0.13	0.10
Arena fina franca	0.31	0.26	0.21
Arena muy fina franca	0.57	0.49	0.39
Franco arenoso	0.31	0.31	0.25
Franco arenoso fino	0.46	0.39	0.31
Franco arenoso muy fino	0.61	0.53	0.43
Franco	0.49	0.44	0.38
Franco limoso	0.62	0.55	0.43
Franco arcilloso arenoso	0.35	0.33	0.27
Franco arcilloso	0.36	0.33	0.27
Franco arcillo limoso	0.48	0.42	0.34
Limo	0.78	0.68	0.55
Arcilla arenosa	0.18	0.17	0.16
Arcilla limosa	0.33	0.30	0.25
Arcilla		0.17-0.38	

Fuente: (FAO, 1996)

Los valores de K más altos se presentan en suelos de texturas limosas y arenosas finas (suelos muy erosionables) y los valores más bajos son para los suelos arenosos (de arena gruesa).

### 5.1.3 El factor topográfico (LS)

El factor está conformado por dos variables L y S, los cuales pueden ser calculados de manera independiente o en una fórmula única.

### 5.1.4 Longitud de pendiente (L)

Largo de la pendiente o factor de longitud de pendiente (L): es la proporción de pérdida de suelo en el largo de la pendiente específica con respecto a un largo estándar (22.13m).

Factor longitud L:

$$L = \left( \frac{X}{22,13} \right)^m$$

Donde:

<b>L:</b> factor longitud	<b>S</b>	<b>m</b>
<b>X:</b> longitud de la ladera	<b>(%)</b>	
<b>m:</b> constante que depende de la inclinación de la pendiente	≥ 5	0,5
	3-5	0,4
<b>S:</b> inclinación de la pendiente	1-3	0,3
<b>L:</b> Longitud de la pendiente	< 1	0,2

### 5.1.5 Factor de la pendiente (S)

Magnitud de pendiente o factor de pendiente (S): es la proporción de pérdida de suelo de una superficie con una pendiente específica con respecto a aquella en la pendiente estándar de 9%, con todos los factores idénticos.

$$S = \frac{0,43 + 0,3 s + 0,043 s^2}{6,613}$$

Donde:

S= factor de inclinación  
s= inclinación en porcentaje

### 5.1.6 Factor topográfico (LS)

LS: un factor combinado para tener en cuenta la longitud y la pendiente de la pendiente. Cuanto más larga sea la pendiente, mayor será el volumen de escorrentía, cuanto más empinada sea la pendiente, mayor será su velocidad. LS = 1.0 en una pendiente del 9%, 22.1 m de largo.

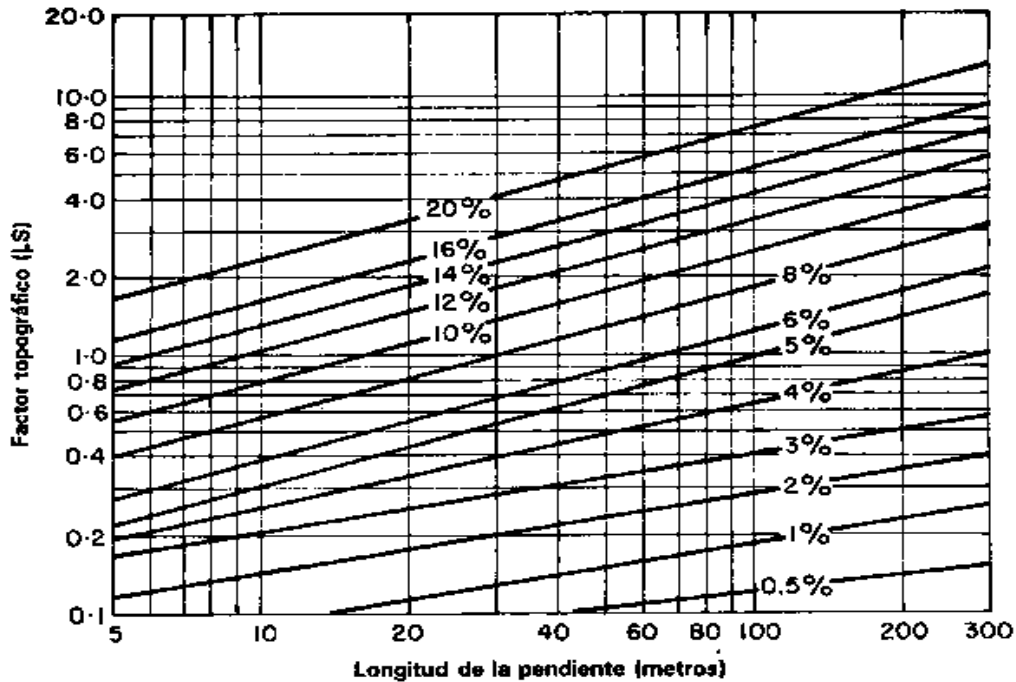
$$LS = \left( \frac{L}{22,13} \right)^m (0,065 + 0,045S + 0,0065S^2)$$

Donde:

- L** - Longitud de ladera expresada en metros
- S** - Pendiente del terreno expresada en forma %
- m=f(S)**
- |     |               |
|-----|---------------|
| 0,5 | $S \geq 5\%$  |
| 0,4 | $3 < S < 5\%$ |
| 0,3 | $1 < S < 3\%$ |
| 0,2 | $S \leq 1$    |

Grupos de pendientes %	LS
0-3	0,3
3-12	1,5
12-18	3,4
18-24	5,6
24-30	8,7
30-60	14,6
50-70	20,2
70-100	25,2
>100	28,5

Figura 20. Diagrama de USDA (1978) para la determinación del factor LS combinado



Fuente: (FAO, 1996)

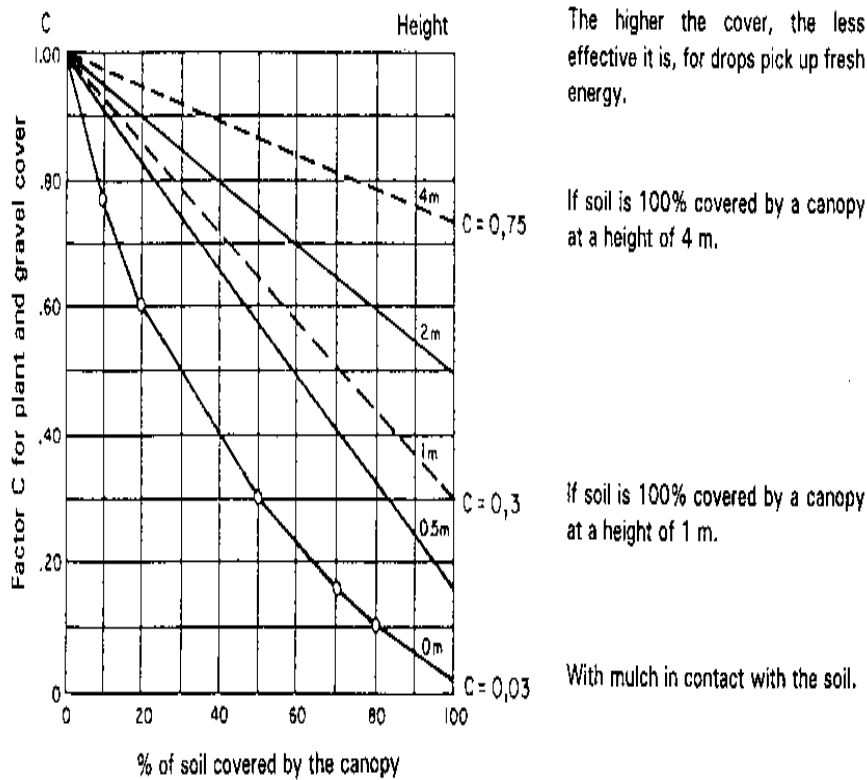
### 5.1.7 Índice de cobertura vegetal del suelo (C)

La cobertura vegetal es efectiva para prevenir la erosión en la medida en que absorbe la energía cinética de las gotas de lluvia, cubre una gran proporción del suelo durante los períodos del año en que la lluvia es más agresiva, disminuye la escorrentía y mantiene la superficie del suelo porosa. Sin embargo, es difícil evaluar la acción protectora de la cobertura vegetal sin mirar de cerca las técnicas de cultivo involucradas. La cobertura vegetal es sin duda el factor más importante para la erosión, ya que la erosión va de 1 a más de 1000

toneladas cuando, en igualdad de condiciones, la cobertura vegetal en una parcela cae del 100% al 0% (FAO, 1996).

La erosión no solamente depende de la cobertura vegetal sino también de la altura de la planta sobre el suelo (**Figura 21**). Cuando la cobertura de la planta es del 100% pero tiene 4 metros de altura, la erosión será aproximadamente el 75% de eso en una parcela desnuda; si la cubierta tiene 2 metros de altura, la erosión será de alrededor del 50%; y si tiene una altura de 50 cm, la erosión seguirá siendo aproximadamente del 18%. Sin embargo, si hay un mantillo, la erosión se reducirá al 3%. Si la reducción de la erosión se refiere al porcentaje de suelo cubierto por el mantillo, se observa una reducción muy rápida para un área relativamente pequeña (FAO, 1996).

**Figura 21.** Variación de la erosión de acuerdo con la altura de la planta o cobertura vegetal desde el suelo. (FAO, 1996)



Fuente: (FAO, 1996)

El índice de cobertura vegetal del suelo: Indica la protección de la cobertura vegetal al suelo, disminuyendo el efecto erosivo. Es la porción de pérdida de suelo en una superficie con cubierta y manejo específico con respecto a una superficie idéntica en barbecho, con labranza continua.

$$C = \frac{\text{pérdida del suelo actual}}{\text{pérdida del suelo sin capa}}$$

**Tabla 15.** Valores del parámetro C

Uso del suelo	Factor C
Arbolado con Fcc: 20% - 70%	0.03
Arbolado con Fcc > 70	0.01
Arbolado con matorral	0.04
Matorral con arbustos, Fcc < 70%	0.020
Matorral con arbustos, Fcc > 70%	0.010
Pastizal con matorral	0.15
Pastizal	0.10
Cultivos arbóreos de secano (almendros, olivos, viñedos, etc)	0.40
Cultivos anuales herbáceos	0.25
Cultivos de regadío	0.04
Improductivo (poblaciones, embalses, canteras, etc)	1.00

Fuente: (FAO, 1996)

El factor C puede variar desde 0.001 a 1.0 dependiendo del tipo de cobertura, por lo tanto, es un factor decisivo en la erosión. De tal forma que un suelo con cobertura vegetal natural bien conservada y desarrollada, la erosión será mínima por muy abrupto que sea el paisaje.

El factor C, también se ha determinado dependiendo tanto al tipo de cobertura, la altura, la vegetación en contacto con la superficie de suelo y el porcentaje de ésta. De esta manera, de acuerdo con la FAO, se han determinado unos valores que se presentan en la **Tabla 16**.

**Tabla 16.** Valor del Factor C en función del tipo de cobertura vegetal y de la vegetación en contacto con el suelo

Cubierta vegetal	Vegetación en contacto con la superficie del suelo							
	% de recubrimiento de la parte aérea	Porcentaje de tierra cubierta						
		Tipo	0	20	40	60	80	95
Hierbas altas o matorral con altura de caída de gota de unos 45 cm	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
Matorral con una altura de caída de gota de unos 165 cm	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.078	0.040	0.011
Árboles sin vegetación baja apreciable. Altura de caída 3,30 m.	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.084	0.041	0.011

Fuente: (FAO, 1996)

- La vegetación se considera distribuida al azar
- La altura se mide como la altura media de la caída del agua

- El porcentaje de recubrimiento se calcula con las proyecciones vertical a vista de pájaro
- **G:** cubierta superficial de gramíneas o plantas similares, con residuos vegetales de al menos 5 cm de profundidad.
- **W:** Cubierta superficial principalmente formada por plantas herbáceas de hoja ancha.

**Tabla 17.** Porcentaje de cubrimiento del suelo por vegetación natural del suelo para la determinación del factor C

Tipo de cobertura natural	Porcentaje de cubrimiento del suelo					
	0-1	1-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Praderas, prados y pastizales	0.45	0.32	0.20	0.10	0.06	0.01
Bosques sin sotobosque apreciable	0.45	0.32	0.20	0.12	0.07	0.02
Bosque con sotobosque apreciable	0.45	0.32	0.16	0.08	0.01	0.006

Fuente: (FAO, 1996)

### 5.1.8 Factor de prácticas de cultivo o de conservación (P)

El factor de prácticas de cultivo o de conservación (P), es la porción de pérdida de suelo con una práctica de apoyo como cultivo en contorno, barreras vivas, cultivos de terrazas, con respecto a aquella labranza en el sentido de la pendiente. De acuerdo con la FAO (1996), se han establecido valores para el factor P de acuerdo con las prácticas de conservación.

**Tabla 18.** Factor P de acuerdo con las prácticas de conservación, según la FAO

Prácticas de conservación	Factor P
Cultivo a nivel S 0-1%	0.6
Cultivo a nivel S 2-5%	0.5
Cultivo a nivel S 6-7%	0.6
Cultivo a nivel S 8-9	0.7
Cultivo a nivel S 10-11%	0.8
Cultivo a nivel S 12-14%	0.9
Bancales a nivel	0.14
Bancales contra pendiente	0.05
Bancales con pendiente	0.35
Bancales a nivel con retención de agua	0.01
Caballones enlazados	0.10-0.20

Fuente: Adaptado de FAO (Wischmeier y Smith, 1978)

P es un factor que tiene en cuenta las prácticas específicas de control de la erosión, como la labranza o el amontonamiento de los contornos, o la formación de bordes. Varía desde 1 en suelo desnudo sin control de la erosión hasta aproximadamente 1/10 con surcos atados en una pendiente suave.

**Tabla 19.** Prácticas específicas de control de la erosión

Pendiente del terreno %	Cultivo en contorno	Cultivo en franjas de contorno y surcos irrigados	Terraceo
1-2	0.60	0.30	0.12
3-8	0.50	0.25	0.10
9-12	0.60	0.30	0.12
13-16	0.70	0.35	0.14
17-20	0.80	0.40	0.16
21-25	0.90	0.45	0.18

Fuente: Adaptado de FAO (Wischmeier y Smith, 1978)

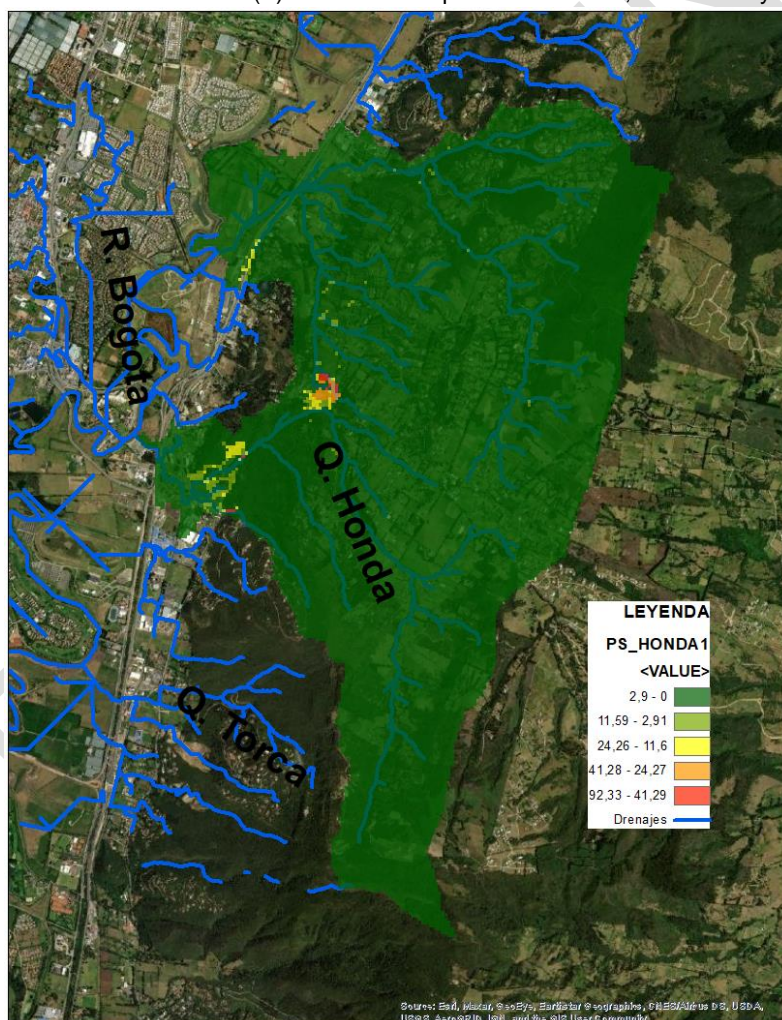
## 5.1.9 Pérdida de suelo en la cuenca

### 5.1.9.1 Pérdida de suelo máxima y mínima cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón

Para la determinación de la pérdida de suelo es necesario utilizar los 6 índices o factores mencionados anteriormente de la ecuación Universal de pérdida de suelo USLE (Universal Soil Loss Equation), el resultado de la ecuación USLE es predecir el movimiento promedio anual de suelos (Pérdida de suelo) desde una pendiente específica, bajo condiciones de uso y manejo específicos.

Para evidenciar la pérdida de suelo anual, se generó un rastreo que representa la pérdida de suelo máxima y mínima en términos del área total de la cuenca de las quebradas Honda, Santiamén y Rincón.

**Figura 22.** Pérdida de suelo (A) de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

El área de estudio corresponde a 1877 Ha donde se identificó un valor de pérdida de suelos máximo de 41.29Tn/(ha\*mes) y una pérdida de suelo mínima de 2.9Tn/(ha\*mes). En la **Tabla 20** se presentan las 5 zonas de clasificación, cada una ilustrando la pérdida de suelo máxima

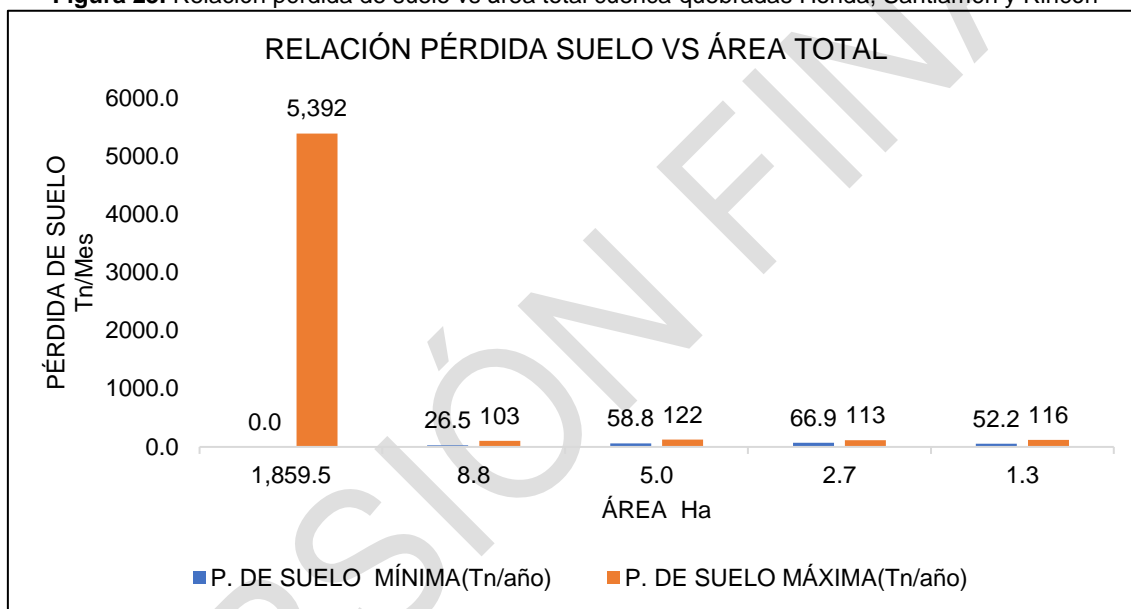
y mínima dentro de un área determinada en la cuenca, representada en términos específicos y absolutos, es decir, en Tn/(ha\*mes) y en Tn/mes, respectivamente.

**Tabla 20.** Pérdida de suelo mínima y máxima de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón

Zonas	Color	Área (Ha)	Área/área total (%)	Pérdida de suelo		Pérdida de suelo	
				Mínima tn/(ha*año)	Máxima tn/(ha*año)	Mínima tn/año	Máxima tn/año
1		1859	99.1%	0	2.9	0.0	5392
2		9	0.5%	3	11.6	26.5	103
3		5	0.3%	12	24.3	58.8	122
4		3	0.1%	24	41.3	66.9	113
5		1	0.1%	41	92.3	52.2	116
Total						204	5847

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

**Figura 23.** Relación pérdida de suelo vs área total cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

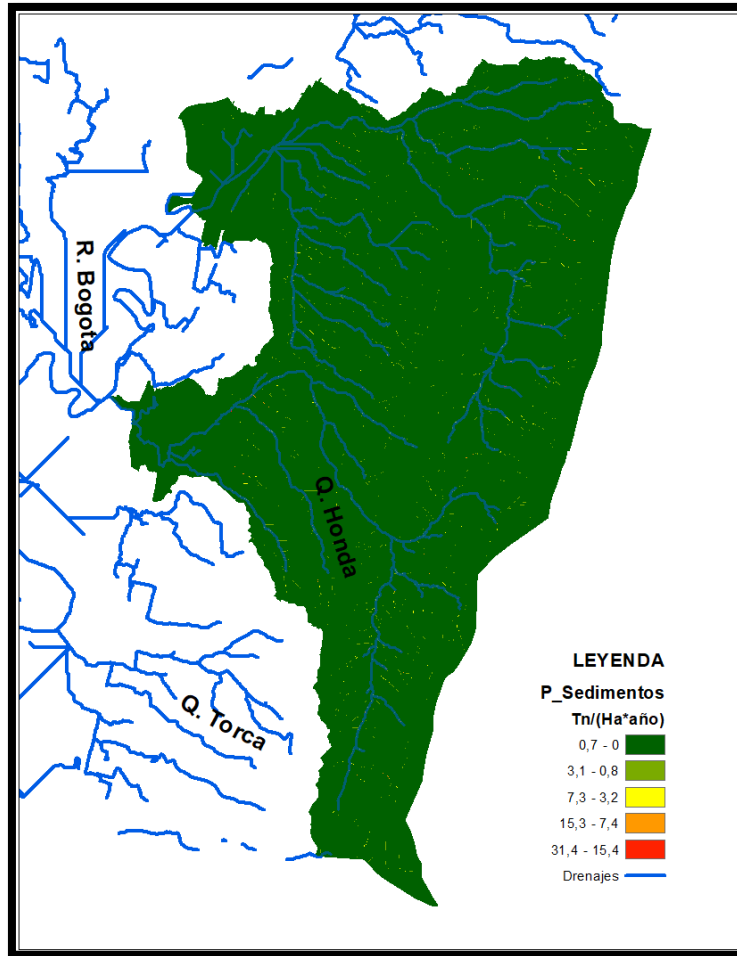
## 5.1.10 Producción de sedimentos

### 5.1.10.1 Producción de sedimentos máxima y mínima cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón

Para la estimación de la producción de sedimento, previamente se debe calcular la pérdida de suelo que se puede producir en la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón. Una vez calculada esta pérdida de suelo se multiplica por los coeficientes de entrega calculados con la formulación de Dickinson y Rudra (1990), de la cual se obtuvo la cantidad de sedimento producido en la cuenca.

Para visualizar la producción de sedimentos, se generó un ráster que ilustra las zonas de mayor y menor producción de sedimentos, dicha producción de sedimentos se representa por medio de líneas de acumulación y dirección de flujo que es la tendencia de los sedimentos producidos a partir de la pérdida de suelo.

**Figura 24.** Producción de sedimentos de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

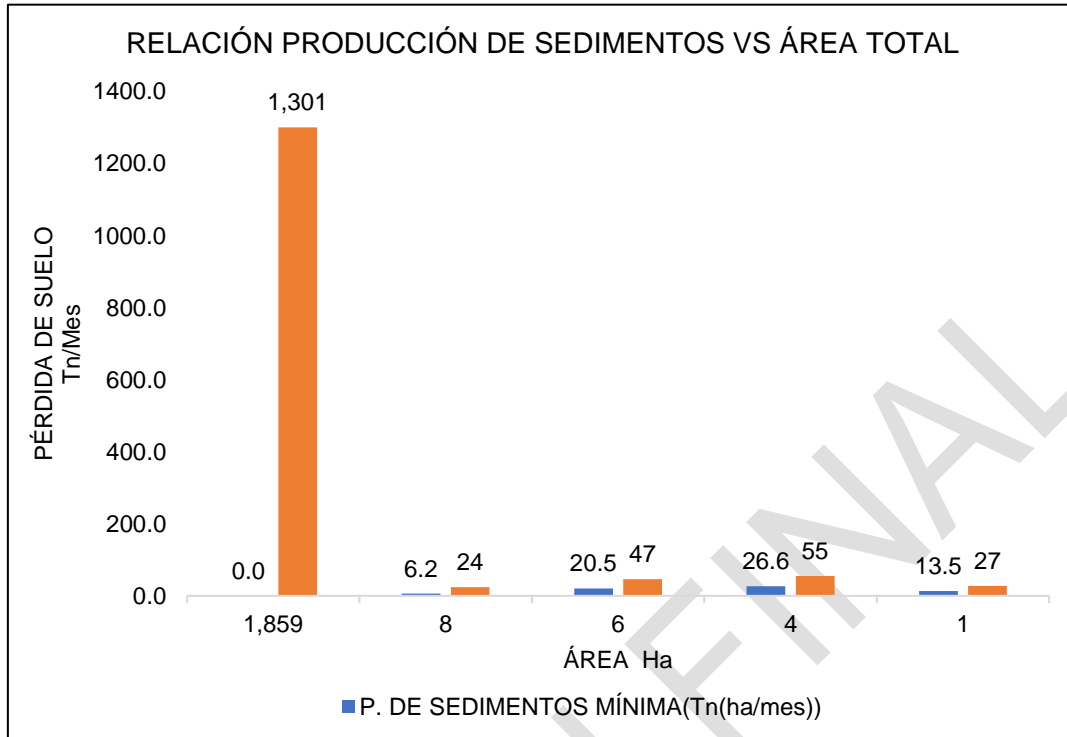
El área de estudio corresponde a 4.267 Ha donde se identificaron valores de producción de sedimentos mínimos de 0.08 Tn(ha\*mes) y una producción de sedimentos máxima de 2.79 Tn(ha\*mes). En la **Tabla 21** se presentan las 5 zonas de clasificación, cada una ilustrando la producción de sedimento máxima y mínima dentro de un área determinada en la cuenca, representada en términos específicos y absolutos, es decir, en Tn(ha\*mes) y en Tn/mes, respectivamente.

**Tabla 21.** Producción de sedimentos mínima y máxima de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón

Zonas	Color	Área (ha)	Área/área total (%)	Pérdida de sedimentos		Pérdida de sedimentos	
				Mínima tn/(ha*año)	Máxima tn/(ha*año)	Mínima tn/año	Máxima tn/año
1		1.859	99,0%	0	0,7	0,0	1.301
2		8	0,4%	1	3,1	6,2	24
3		6	0,3%	3	7,3	20,5	47
4		4	0,2%	7	15,3	26,6	55
5		1	0,0%	15	31,4	13,5	27
TOTAL						67	1.455

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

**Figura 25.** Relación producción de sedimentos vs área total de la cuenca quebradas Honda, Santiamén y Rincón



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

## 5.2 Metodología para la evaluación a detalle de los cauces priorizados

La metodología utilizada para la zonificación de amenaza para avenidas torrenciales tiene en cuenta tres aspectos fundamentales para los cauces priorizados de las quebradas Rincón, Santiamén y Honda; estos se refieren a la identificación, diagnóstico, evaluación y análisis de zonas de inicio a partir del movimiento en masa y de la geotecnia, zonas de transporte con velocidades de flujo de detritos y zonas de depósito teniendo en cuenta la morfogénesis.

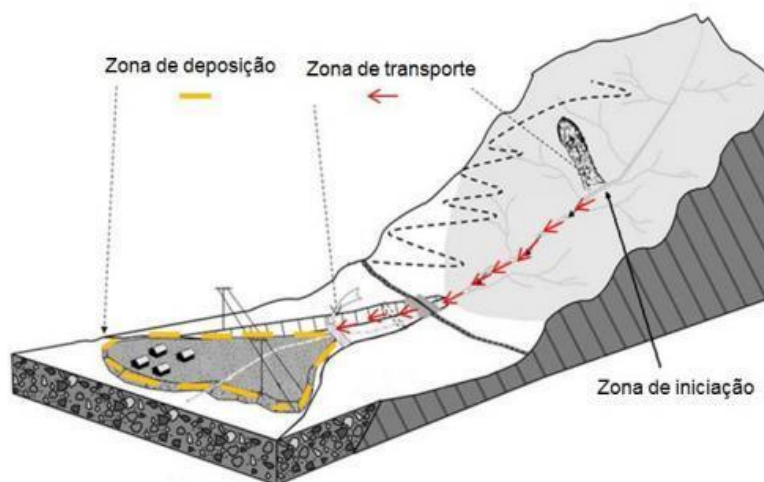
**Figura 26.** Esquema metodológico para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

En la **Figura 27**, se muestra un esquema del comportamiento de un flujo torrencial.

**Figura 27.** Esquema de comportamiento de una avenida torrencial



Fuente: BGC Engineering (Jakob, 2005).

### 5.2.1 Identificación y diagnóstico de zonas de inicio

El análisis de zonas de inicio para procesos de avenidas torrenciales se realizó tomando como base el mapa de movimientos en masa resultado del modelamiento del proceso siguiendo la metodología sugerida por el SGC, en el cual se desarrolló el método estadístico, que se refiere al cálculo de la densidad en los deslizamientos, para cada unidad geomorfológicamente homogénea o para determinados rangos de factores determinantes de la estabilidad. La densidad de los deslizamientos se tomó, como el porcentaje del área que es ocupada por éstos.

El método estadístico superpone mapas de parámetros (geología, fábrica, densidad de fracturamiento, resistencia, morfogénesis, morfometría, densidad de drenaje y coberturas de la tierra, así como el mapa de unidades homogéneas al mapa de inventario de deslizamientos y calcula las densidades del deslizamiento.

Luego el mapa de distribución de deslizamientos se combinó con los diversos parámetros dentro de una grilla o matriz, la cual se analiza mediante el análisis de regresión múltiple o discriminante. Este modelo se basó en la suposición, que un área donde han ocurrido deslizamientos posee un ambiente susceptible para la ocurrencia de nuevos deslizamientos de forma similar a los deslizamientos históricos.

Este método está basado en la siguiente ecuación:

$$\ln W_i = \ln \left( \frac{\text{Densclas}}{\text{Densmap}} \right) = \ln \left( \frac{\frac{\sum \text{Npix}(Si)}{\sum \text{Npix}(Ni)}}{\sum \text{Npix}(Si)} \right)$$

donde,

$W_i$  = La ponderación dada a una cierta clase de parámetro (p.e. un tipo de roca, o una clase de pendiente).

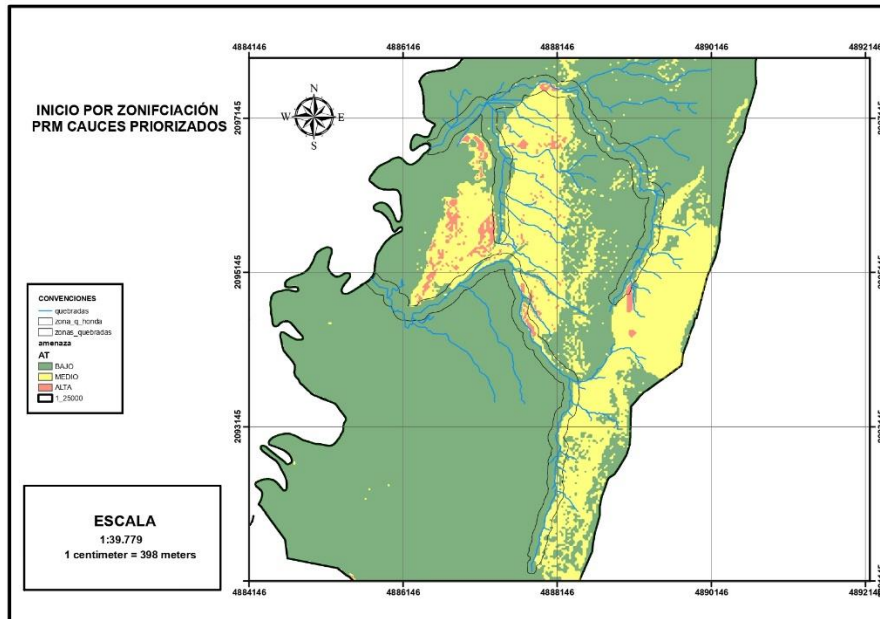
Densclas = el grado de deslizamiento dentro de la clase de parámetro.

Densmap = el grado de pendiente de todo el mapa.

$N_{pix}(S_i)$  = número de pixeles, los cuales contienen los deslizamientos, dentro de una cierta clase de parámetro.

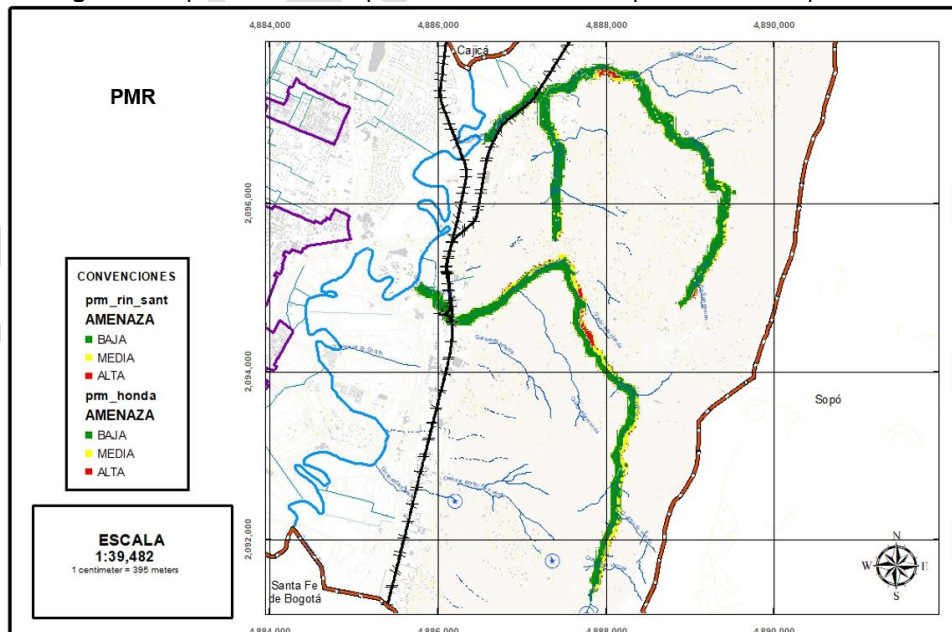
$N_{pix}(N_i)$  = número total de pixeles dentro de una cierta clase de parámetro.

**Figura 28.** Aporte de detritos por zonificación de PRM



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

**Figura 29.** Aporte de detritos por zonificación de PRM para los cauces prioritarios



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

El análisis realizado para determinar las zonas de inicio de flujos de detritos requiere identificar el detonante del flujo de detritos.

Existen otros factores detonantes como la erosión del canal, terremotos, ruptura de diques, los cuales no fueron incluidos en esta análisis.

Lo anterior implica implementar un modelo simple para estimar la susceptibilidad al inicio de flujos torrenciales a través de deslizamientos someros corresponde con el Shalstab, desarrollado por Montgomery y Dietrich en 1994. Este modelo simplificado, calcula la presión de poros asumiendo que las condiciones de estado estacionario se alcanzan después de una lluvia de intensidad constante y duración indefinida y también asume que el material se satura completamente (nivel freático coincide con la superficie del terreno). Estas situaciones permiten obtener una relación muy simple entre la precipitación  $q$  y la transmisividad del suelo  $T$  para cada celda del DEM (Montgomery & Dietrich, 1994).

$$\frac{q}{T} = \frac{\sin \theta}{(a/b)} \left( \left( \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \alpha \tan \varphi} \right) + \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left( 1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi} \right) \right)$$

Donde:

- $Q$  es la precipitación (m/día) no conocida
- $T$  es la transmisividad del suelo ( $m^2/día$ ), no conocida.
- $\alpha$  es la pendiente (DEM)
- $a/b$  es el área acumulada por el ancho del flujo (m)
- $c'$  es la cohesión del suelo (Pa)
- $\varphi$  es el ángulo de fricción interna del suelo.
- $\rho_s$  es la densidad de bulk del suelo saturado ( $kg/m^3$ )
- $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).
- $z$  es el espesor de suelo (m)
- $\rho_w$  es la densidad del agua ( $kg/m^3$ )

Para implementar el modelo se realizaron perforaciones mecánicas en algunos sectores de los cauces y poder obtener los parámetros geotécnicos de los suelos presentes. En la **Figura 30** se muestra la ubicación y los resultados obtenidos.

La **Tabla 22** muestra los parámetros físico-mecánicos de los suelos presentes, los cuales son utilizados en la modelación propuesta.

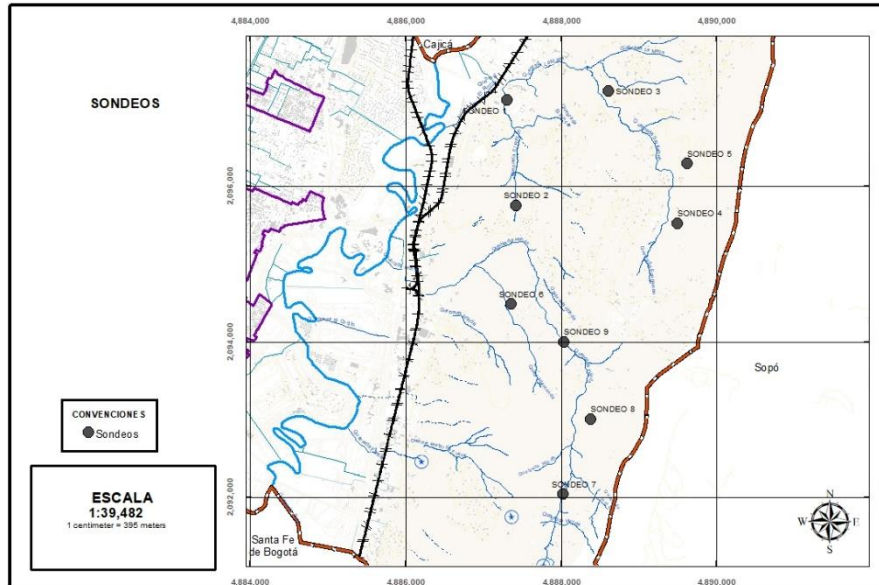
**Tabla 22.** Parámetros de suelos utilizados para el modelo

Sondeo	Peso Unitario $\gamma$ ( $kg/cm^3$ )	Cohesión $C$ ( $kg/cm^2$ )	Ángulo fricción $\phi$ ( $^\circ$ )
S1	1.90	0.41	19
S2	1.89	0.42	28
S3	1.86	0.53	20
S4	1.84	0.13	23
S5	1.82	0.53	24
S6	1.77	0.32	29

Sondeo	Peso Unitario $\gamma$ (kg/cm <sup>3</sup> )	Cohesión C (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo fricción $\phi$ (°)
S7	1.96	0.37	29
S8	1.84	0.50	18
S9	1.86	0.40	25

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

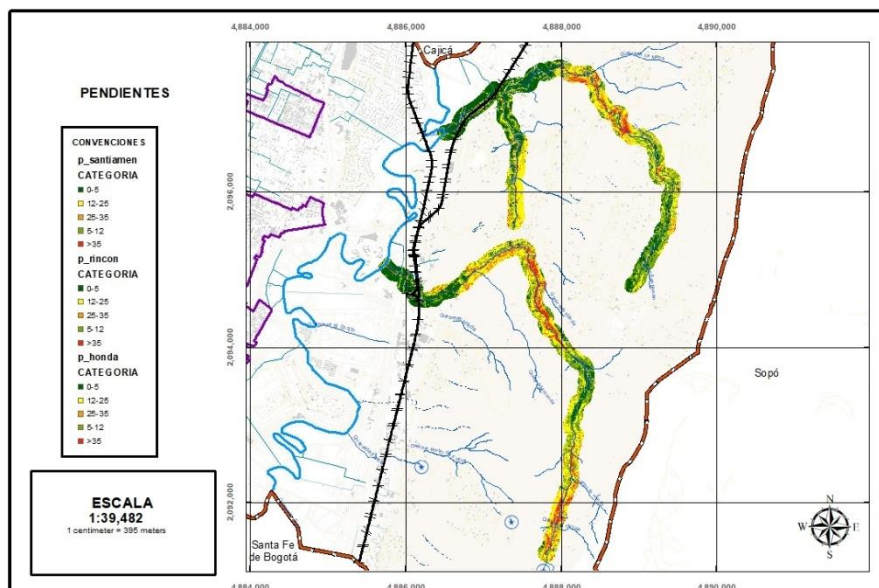
Figura 30. Ubicación de puntos de muestreo de suelo en cauces priorizados



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

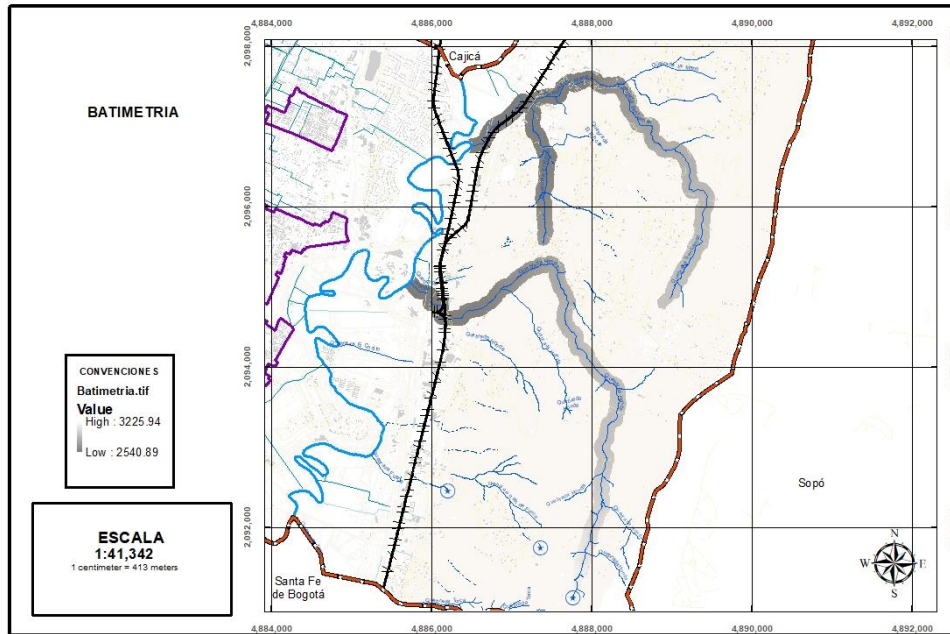
Se utilizó un DEM para los cauces priorizados del cual se obtuvo el mapa de pendientes y se incorporó al modelo de la ecuación (Montgomery & Dietrich, 1994).

Figura 31. Mapas de Pendientes para los cauces priorizados



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

**Figura 32. Mapas de DEM para los cauces prioritizados**



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

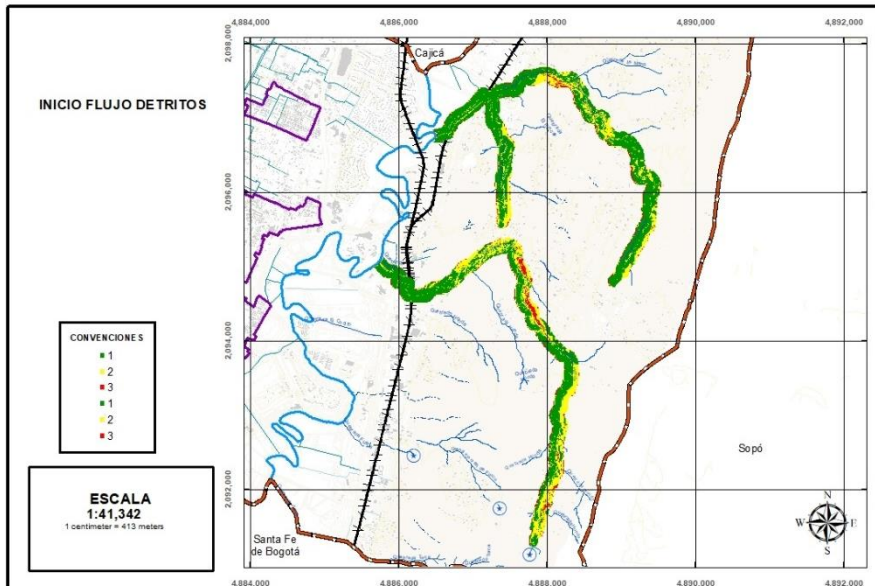
Una vez incorporada la ecuación para iniciación de flujo de detritos, la susceptibilidad es caracterizada como un resultado de la relación **Log (q/T)**.

**Tabla 23. Rangos de valores para susceptibilidad a iniciación flujo de detritos.**

Susceptibilidad	LOG(q/T)
Alto	< -2.9
Medio	< -2.4 y > -2.9
Bajo	> -2.4

Fuente: Bregoli, Medina & Bateman, 2018

**Figura 33. Iniciación flujo de detritos para los cauces prioritizados.**



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

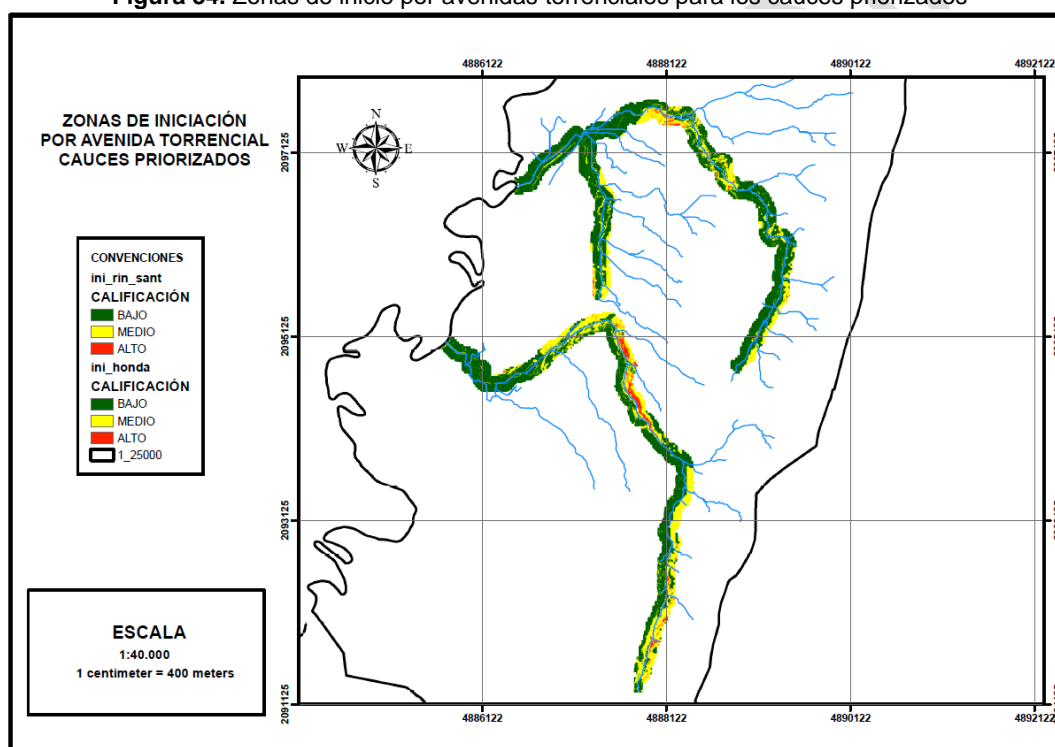
Para tener un resultado confiable de iniciación de avenidas torrenciales se relaciona el mapa de movimientos en masa y la susceptibilidad a iniciar flujo de detritos según lo presentado en la **Tabla 24**.

**Tabla 24.** Cálculo de zonas de iniciación por avenida torrencial

		Log (q/T)	Iniciación avenidas torrenciales
		Amenaza movimiento en masa	Alta
<-2,4 y >-2,9	Alta		
>-2,4	Media		
Media	<-2,9		Alta
	<-2,4 y >-2,9		Media
	>-2,4		Media
Baja	<-2,9		Media
	<-2,4 y >-2,9		Baja
	>-2,4		Baja

Fuente: Ajustado de Bregoli, Medina & Bateman, 2018

**Figura 34.** Zonas de inicio por avenidas torrenciales para los cauces priorizados



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

## 5.2.2 Caracterización de zonas de transporte

Para el análisis de zonas de transporte se utilizó el modelo de DebrisDice desarrollado por el grupo GITS-UPC, el cual se basa en la morfología del terreno y considera un flujo incorporado a una ruta aleatoria para generar trayectorias de flujo de escombros; para lo anterior se requiere incluir la velocidad del flujo local y mecanismos de estacionamiento.

Con los puntos de iniciación encontrados con los modelos de susceptibilidad y datos de los sondeos, es posible obtener una trayectoria de propagación de flujo para cada punto y la

probabilidad de invadir una celda  $X$ , se calcula para todo el DEM usando la siguiente ecuación (Bregoli, Medina, & Bateman, 2018).

$$X = N_a / N_i$$

Donde:

$X$  = Probabilidad de invadir una celda

$N_a$  = Número de trayectorias que pasan a través de una celda

$N_i$  = Número de iteraciones

Para los mecanismos de estacionamiento se tiene en cuenta la detención por enrutamiento mediante el volumen total del flujo de escombros y el ángulo de alcance; para esto se hace el cálculo de el área total susceptible a inicio multiplicado por el espesor de suelo promedio identificado en el análisis de zonas de inicio.

**Tabla 25.** Cálculo de volúmenes para las quebradas Rincón y Santiamén

Quebradas Rincón y Santiamén			
Probabilidad alta			
Celdas	Tamaño celda	Espesor	Volumen
#	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )
4553	2	1,5	27318
Probabilidad alta			
86129	2	1,5	516774
Probabilidad alta			
275871	2	1,5	1655226

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

**Tabla 26.** Cálculo de volumen para la quebrada Honda

Quebrada Honda			
Probabilidad alta			
Celdas	Tamaño celda	espesor	Volumen
#	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )
14851	2	1,5	89106
Probabilidad alta			
118772	2	1,5	712632
Probabilidad alta			
193345	2	1,5	1160070

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

El volumen que puede ser movilizado para la categoría alta, la cual es la de mayor probabilidad puede ser de **27318 m<sup>3</sup>** de sedimento en las quebradas Rincón y Santiamén y de **89106 m<sup>3</sup>** en la quebrada Honda.

El otro mecanismo es de detención del flujo por velocidad mediante la aplicación reológica de Flujo Fluido de Voellmy para Flujo de Escombros Granulares (Voellmy 1955):

$$\frac{1}{2} \frac{dv^2}{dl} = g(\sin \alpha - \mu_m \cos \alpha) - \frac{v^2}{k}$$

Donde:

$V$  = velocidad de la mezcla

$L$  = línea de la trayectoria del flujo

$\mu_m$  = coeficiente de fricción por deslizamiento,  
K= coeficiente de turbulencia

$\mu_m$  y k= deben definirse mediante análisis retrospectivo, pero se pueden establecer valores típicos.

La categorización de susceptibilidad al transporte de avenidas torrenciales se deriva de la categorización propuesta por (Bregoli, Medina, & Bateman, 2018) basada en los trabajos de Buwal (1997) y Rickenmann (2005b). Esta identifica tres categorías altas, media y baja de acuerdo con la velocidad y altura de lámina de agua en relación con la probabilidad de ocurrencia.

Los parámetros de esfuerzo cortante y viscosidad adoptados corresponden a los reportados en la literatura por Kang y Zhang (1980) tal como se presentan en la **Tabla 27**.

**Tabla 27.** Esfuerzo cortante y viscosidad como función de la concentración de sedimentos  
yield stress and viscosity as a function of sediment concentration

Source	$\tau_y = \alpha e^{\beta cv}$		$\eta = \alpha e^{\beta Cv}$	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
field data				
aspen pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
aspen pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
aspen natural soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
aspen mine fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
aspen waterhed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
aspen mine source area	0.291	14.3	0.000201	33.1
gienwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
gienwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.20
gienwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
gienwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
relationship available from the literature				
Lidia(1938)	.	.	0.000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
kang and zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al (1980)	0.00136	21.2	.	.
	0.050	15.48	.	.
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	.	.
fei (1981)	0.166	25.6	.	.
	0.00470	22.2	.	.

Fuente: O'Brien & FLO-2D Software, 2014)

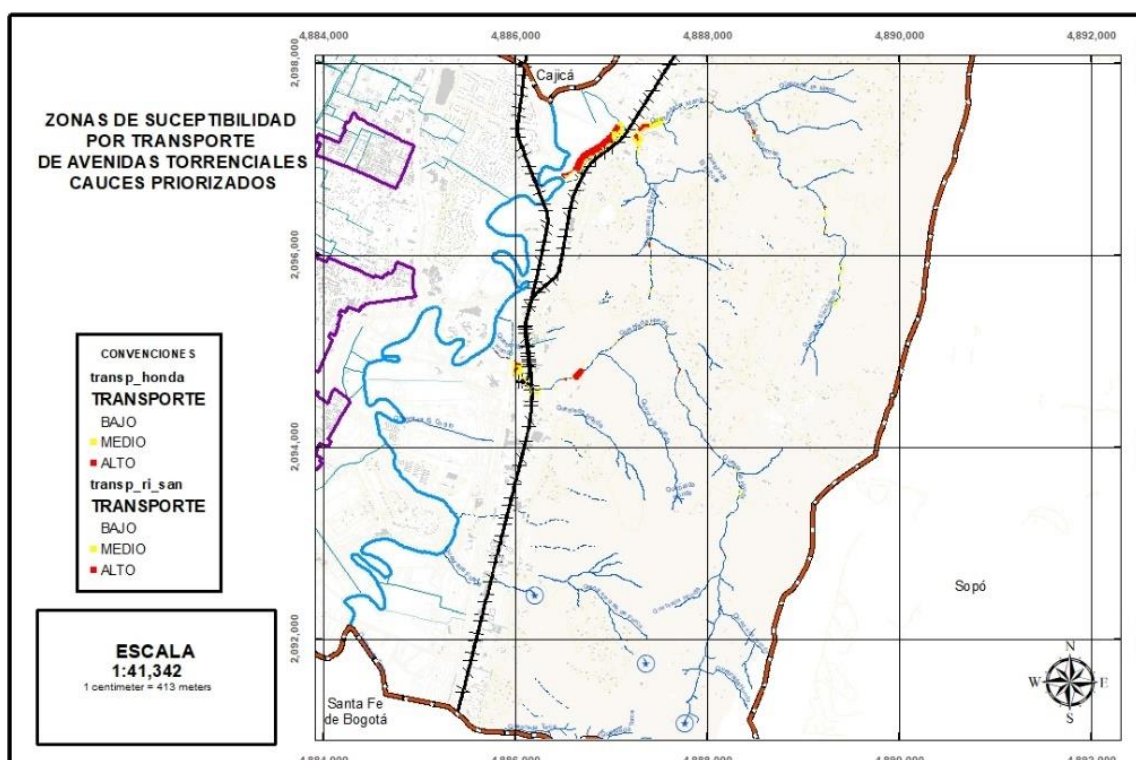
Para la elaboración del mapa de zonas de transporte, se parte del análisis hidrológico, una vez obtenidos los hidrogramas para las cuencas definidas, estos son incluidos en el modelo hidráulico, el cual es el resultado de la generación de las secciones transversales de cada uno de los cauces priorizados. Adicionalmente, a partir de la relación Kang & Zhang (1980) se generan los valores del esfuerzo cortante y viscosidad como función de la concentración de sedimentos los cuales son incluidos en el modelo hidráulico. Posteriormente se obtiene altura y velocidad del flujo.

**Figura 35.** Cálculo de la intensidad de eventos de flujo de detritos

				probability of occurrence, P		
				HIGH	MEDIUM	LOW
INTENSITY, I	BUWAL(1997)	RICKENMANN(2005b)				
	$h > 1.0 \text{ m}$ and $v > 1.0 \text{ m/s}$	$h > 1.0 \text{ m}$ or $v < 1.5 \text{ m/s}$	HIGH	High	High	Moderate
	$h < 1.0 \text{ m}$ and $v < 1.0 \text{ m/s}$	$h < 1.0 \text{ m}$ and $0.4 \text{ m/s} < v < 1.5 \text{ m/s}$	MEDIUM	Moderate	Moderate	Low
		$h < 0.4 \text{ m}$ and $v < 0.4 \text{ m/s}$	LOW	Low	Low	Very low
NOT AFFECTED AREAS				Very low	Very low	Very low

Fuente: Bregoli, Medina & Bateman, 2018

**Figura 36.** Zonificación de susceptibilidad por transporte de avenida torrencial cauces priorizados



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

### 5.2.3 Análisis de zonas de depósito

El Servicio Geológico Colombiano (2017) define algunas geformas indicativas de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujos, los cuales se tomaron como base para evaluar la susceptibilidad a depósitos de avenidas torrenciales del municipio.

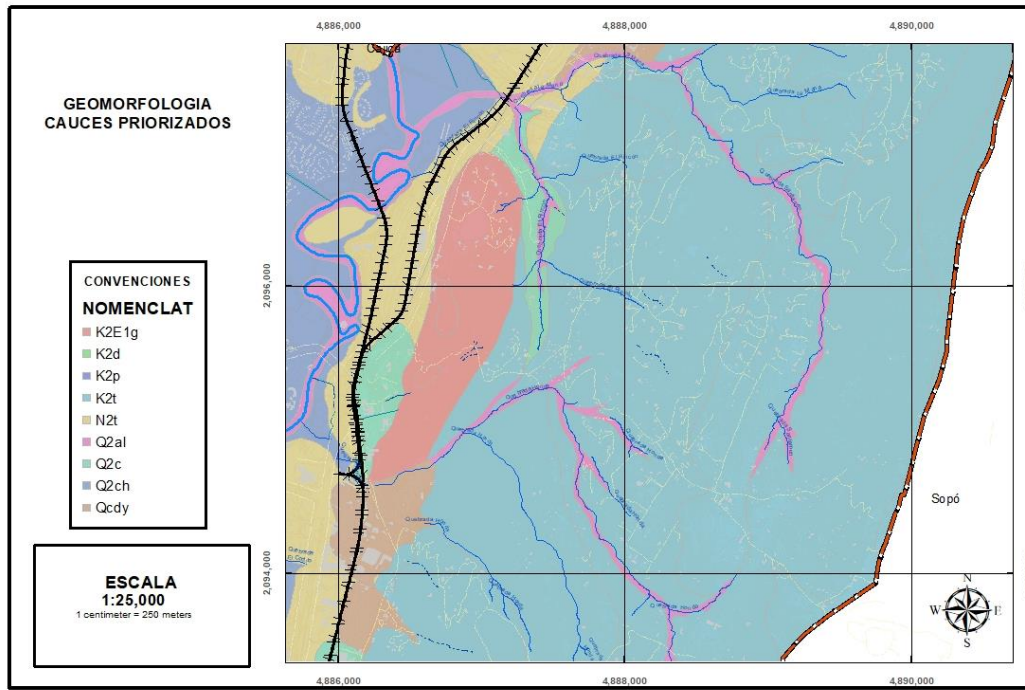
**Tabla 28.** Categorías de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo.

Categoría de susceptibilidad	Unidad / Subunidad geomorfológica
Alta	Dl cad (Lóbulo y cono de avalancha de detritos), Dl car (Lóbulo y cono de avalancha de rocas), Faaac (Abanico aluvial actual), Fcdy (Cono de deyección)
Media	Faas (Abanico aluvial subreciente)
Baja	Faaa (Abanico aluvial antiguo), Faai (Abanico aluvial incisado)

Fuente: SGC 2017.

Se realizó un ajuste a nivel de escala de las unidades geológicas presentes a partir de la observación en campo, del criterio de experto y de los sondeos realizados es decir la geotecnia.

**Figura 37.** Mapa de las unidades geomorfológicas superficiales para cauces priorizados y ajustado en campo



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

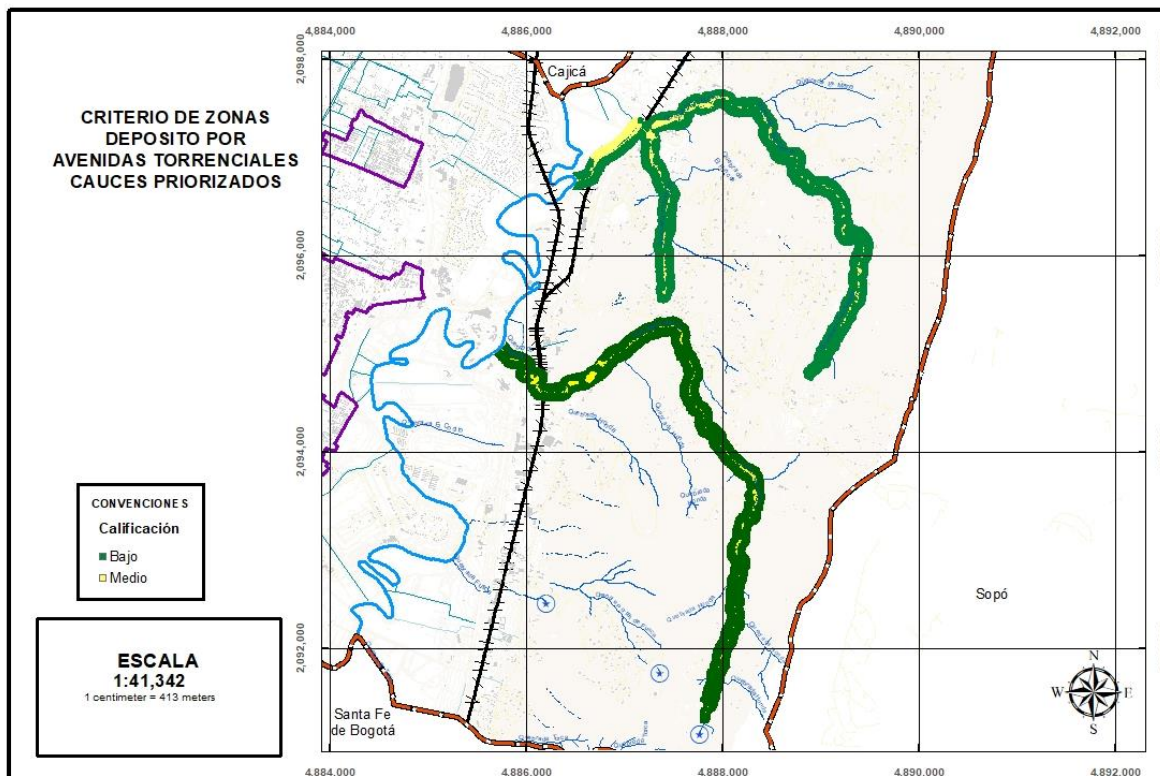
### 5.2.3.1 Planicie o llanuras de inundación (Fpi)

“Franja de terreno plana baja de morfología ondulada de 0.05 – 5 km de extensión, eventualmente inundable. Se presenta bordeando los cauces fluviales y se limita localmente por escarpes de terraza. Se constituye de 3 - 5 m de arcillas y limos producto de la sedimentación durante eventos de inundación fluvial. Se incluyen los planos fluviales menores en formas de “U” o “V” y conos coluviales menores, localizados en los flancos de los valles intramontanos.”(Glosario, s.f.)

Las planicies o llanuras de inundación presentan un amplio desarrollo en la sabana de Bogotá y están asociadas evolutivamente a los últimos eventos de secado y los procesos de disección de las planicies lagunares por los principales ríos que la drenaron. Se destacan por su amplitud las llanuras de inundación de los ríos Bogotá y Frío.

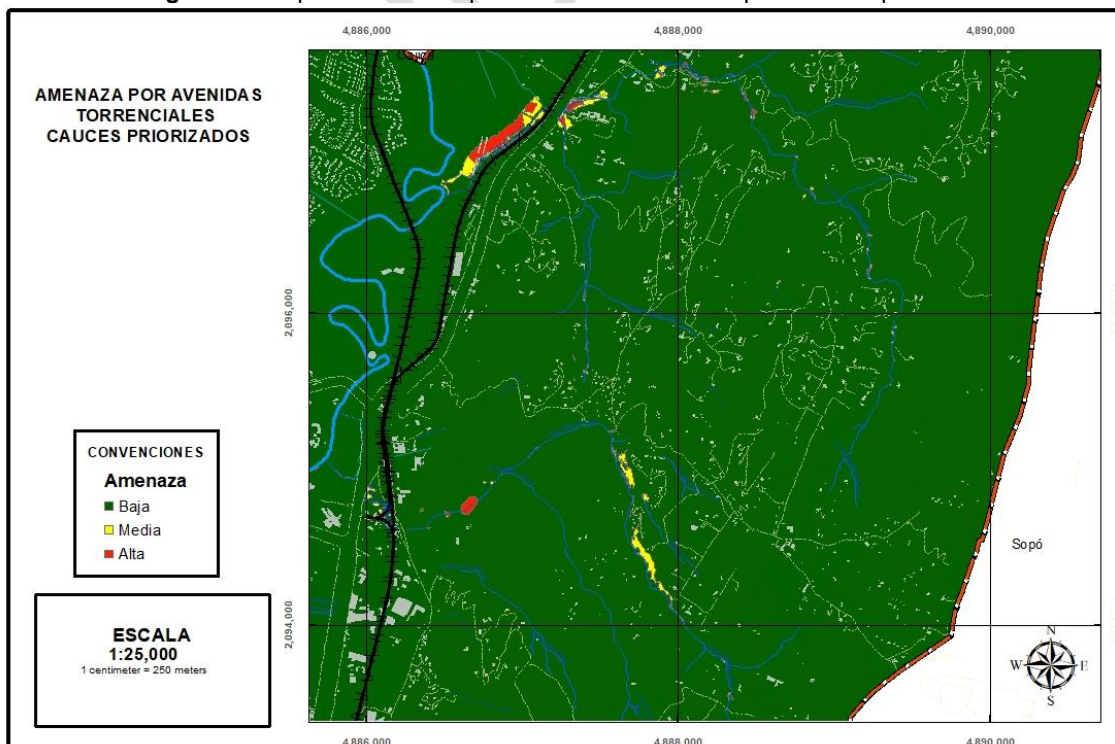
Se constituyen de arcillas grises de inundación, localmente con intercalaciones de arenas muy finas a limosas de colores claros, dispuestos en capas delgadas horizontales de la llamada formación Chía.

**Figura 38.** Calificación de la susceptibilidad a los procesos de torrencialidad de acuerdo a criterios morfogénicos.



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

**Figura 39.** Mapa de amenaza por avenidas torrenciales para cauces priorizados.



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

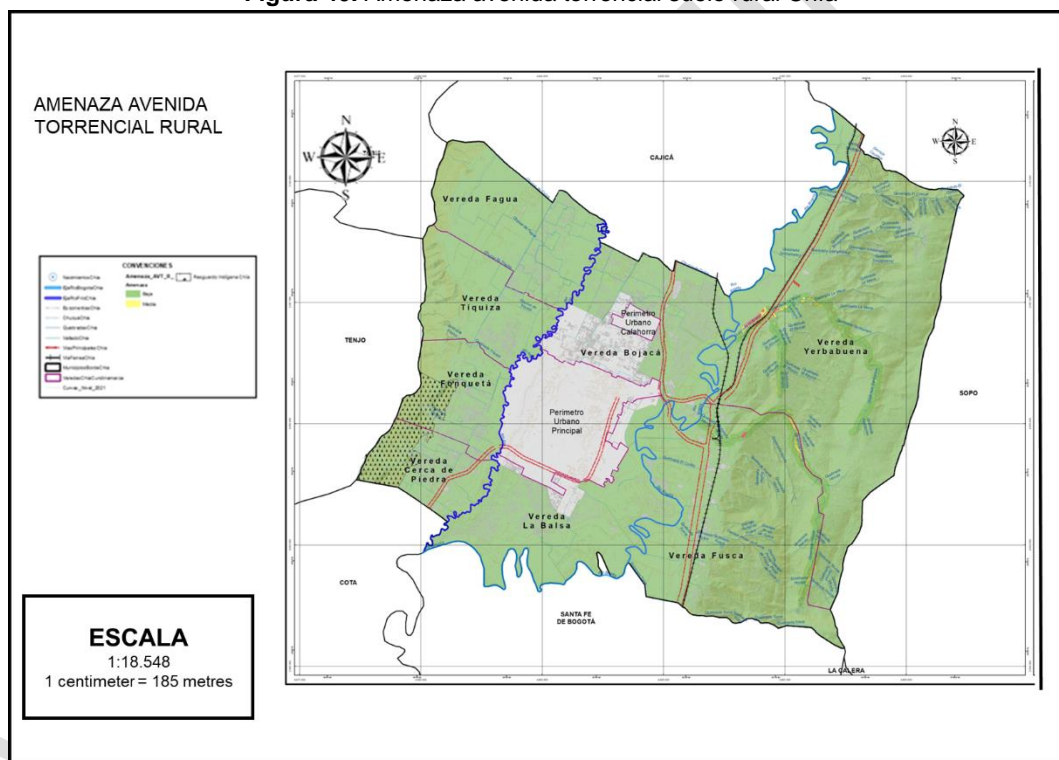
Para construir el mapa de avenidas torrenciales de los cauces priorizados, se hace el análisis de los mapas de zonas de inicio, transporte y depósito descritos anteriormente.

La probabilidad para eventos de avenidas torrenciales se da a partir de que la amenaza por movimientos en masa es el detonante de los flujos torrenciales y son los desencadenantes del proceso. Así las cosas, el periodo de retorno utilizado en el modelo de amenaza por movimientos en masa es de 20 años y por consiguiente es el mismo para los eventos por avenidas torrenciales

## 6. ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR AVENIDA TORRENCIAL EN SUELO RURAL

La zonificación de amenaza en suelo rural a escala 1:25.000 y los cauces priorizados (quebradas Honda, Rincón y Santiamén) a escala 1:2.000, se superpusieron en el plano de amenaza total por avenida torrencial rural para escala 1:25.000.

**Figura 40. Amenaza avenida torrencial suelo rural Chía**



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

## 7. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN EL CASCO URBANO

La recopilación de información disponible se realizó, de acuerdo con lo establecido en artículo 6 del Decreto 1807 de 2014 (compilado por el Decreto 1077 de 2015), correspondiente a las condiciones técnicas para la elaboración de estudios básicos, en donde se especifica los parámetros a seguir para el análisis de la información disponible. Para el presente estudio se ha procedido a consultar información técnica relacionada con estudios de amenaza y riesgo,

cartografía básica y temática y demás información pertinente que haya sido aprobada y elaborada por autoridades y sectores competentes.

Para el caso particular del casco urbano y la posible zona de expansión no existen antecedentes de eventos relacionados con avenida torrencial por lo cual se procedió a hacer un análisis teniendo en cuenta variables que al integrarlas establecieran la zonificación final; es así que todos los cauces presentes o con influencia en el área urbana y de expansión urbana del municipio, que por sus condiciones topográficas puedan tener un comportamiento torrencial han sido incluidos dentro del área de estudio, lo cual demuestra que las pendientes son planas, por lo cual no hay transporte de sedimentos, no existen zonas de inicio debido a que la amenaza por procesos de remoción en masa es baja y finalmente no hay zonas de depósito puesto que de las unidades geomorfológicas presentes ninguna está relacionada con torrencialidad.

La metodología de análisis utilizada para la zonificación de amenaza para avenidas torrenciales tiene en cuenta tres aspectos fundamentales para el casco urbano y zonas de expansión; estos se refieren a la identificación, diagnóstico, evaluación y análisis de zonas de inicio a partir del movimiento en masa y de la geotecnia, zonas de transporte con velocidades de flujo de detritos y zonas de depósito teniendo en cuenta la morfogénesis.

### 7.1.1 Análisis de zonas de inicio

El análisis de zonas de inicio para procesos de avenidas torrenciales se realizó tomando como base el mapa de movimientos en masa resultado del modelamiento del proceso siguiendo la metodología sugerida por el SGC, en el cual se desarrolló el método determinístico así:

$$FS = \frac{c' + (\gamma h \cos^2 \beta - \alpha \gamma \sin \beta \cos \beta - m \gamma_w h \cos^2 \beta) \tan \phi'}{\gamma h \sin \beta \cos \beta + \alpha \gamma h \cos^2 \beta}$$

Dónde:

C' = Cohesión efectiva

Φ = Ángulo efectivo de fricción

β = Pendiente del terreno

γ = Peso unitario del suelo

γ<sub>w</sub> = Peso unitario del agua

h = Espesor de estrato deslizante

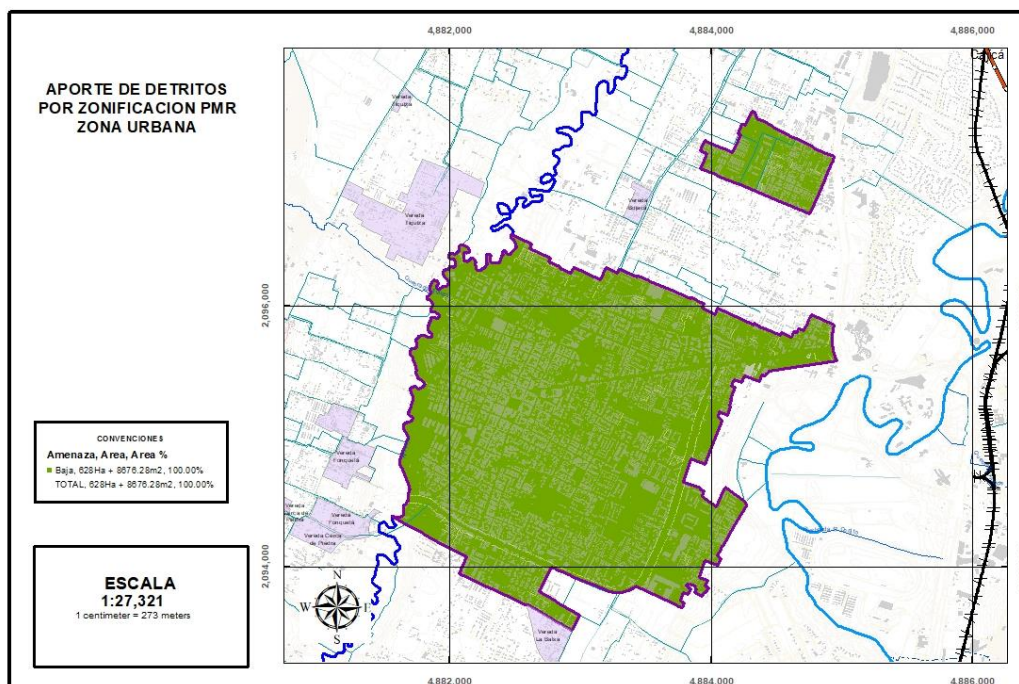
m = Proporción del estrato deslizante que se encuentra saturado

α = Coeficiente de aceleración horizontal

Los análisis pueden ser vistos en el documento de zonificación de amenaza para movimientos en masa de la zona urbana.

El resultado obtenido se puede ver en la **Figura 41**, lo cual muestra que la amenaza por PRM es baja que para este caso significa que no hay aporte de detritos o erosión en las laderas en estos sectores.

**Figura 41.** Aporte de detritos por zonificación de PRM para los cauces priorizados.



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

### 7.1.2 Caracterización de zonas de transporte

Para el análisis de zonas de transporte se utilizó el modelo de DebrisDice desarrollado por el grupo GITS-UPC, el cual se basa en la morfología del terreno y considera un flujo incorporado a una ruta aleatoria para generar trayectorias de flujo de escombros; para lo anterior se requiere incluir la velocidad del flujo local y mecanismos de estacionamiento.

Con los puntos de iniciación encontrados con los modelos de susceptibilidad y datos de los sondeos, es posible obtener una trayectoria de propagación de flujo para cada punto y la probabilidad de invadir una celda  $X$ , se calcula para todo el DEM usando la siguiente ecuación (Bregoli, Medina, & Bateman, 2018).

$$X = Na/Ni$$

Donde:

$X$  = Probabilidad de invadir una celda

$Na$  = Número de trayectorias que pasan a través de una celda

$Ni$  = Número de iteraciones

Para los mecanismos de estacionamiento se tiene en cuenta la detención por enrutamiento mediante el volumen total del flujo de escombros y el ángulo de alcance; para esto se hace el cálculo de el área total susceptible a inicio multiplicado por el espesor de suelo promedio identificado en el análisis de zonas de inicio.

**Tabla 29.** Cálculo de volúmenes para el casco urbano y zonas de expansión.

Polígono casco urbano y zona de expansión			
Probabilidad Alta			
Celdas	Tamaño celda	Espesor	Volumen
#	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )
0	2	1,5	0
Probabilidad Media			
0	2	1,5	0
Probabilidad Baja			
7918041	2	1,5	47508246

Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

El volumen que puede ser movilizado para la categoría alta, la cual es la de mayor probabilidad puede ser de **0 m<sup>3</sup>** de sedimento en el casco urbano.

El otro mecanismo es de detención del flujo por velocidad mediante la aplicación reológica de Flujo Fluido de Voellmy para Flujo de Escombros Granulares (Voellmy 1955):

$$\frac{1}{2} \frac{dv^2}{dl} = g(\sin \alpha - \mu_m \cos \alpha) - \frac{v^2}{k}$$

Donde:

V=velocidad de la mezcla

L= línea de la trayectoria del flujo

$\mu_m$  = coeficiente de fricción por deslizamiento,

K= coeficiente de turbulencia

$\mu_m$  y k= deben definirse mediante análisis retrospectivo, pero se pueden establecer valores típicos.

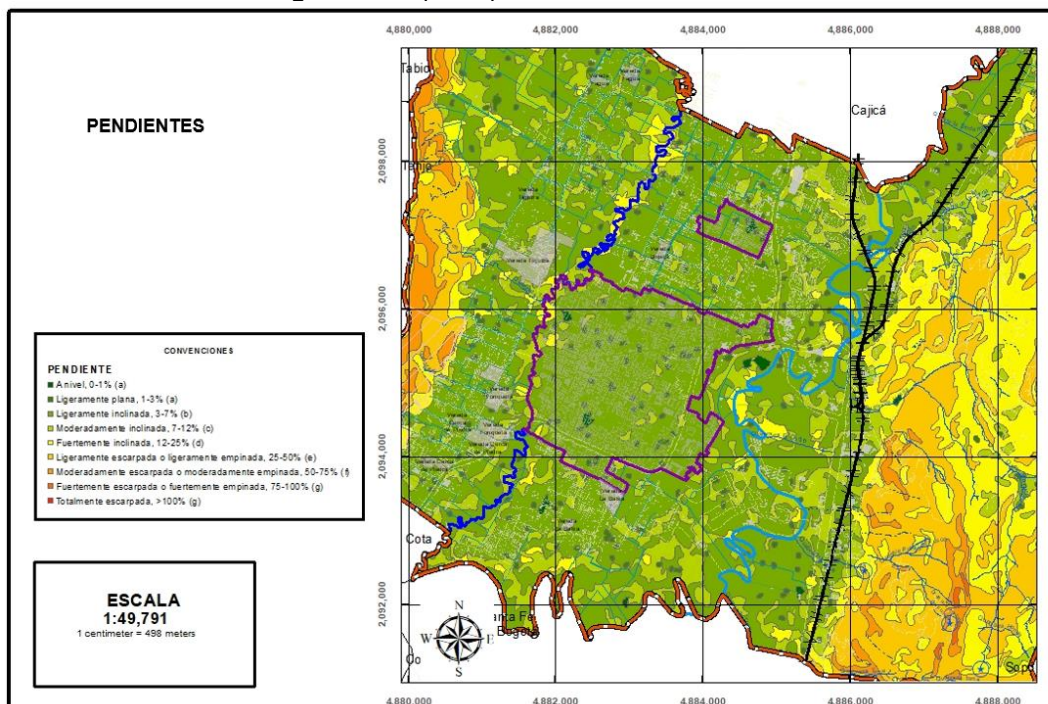
La categorización de susceptibilidad al transporte de avenidas torrenciales se deriva de la categorización propuesta por (Bregoli, Medina, & Bateman, 2018) basada en los trabajos de Buwal (1997) y Rickenmann (2005b). Esta identifica tres categorías altas, media y baja de acuerdo con la velocidad y altura de lámina de agua en relación con la probabilidad de ocurrencia.

Los parámetros de esfuerzo cortante y viscosidad adoptados corresponden a los reportados en la literatura por Kang y Zhang (1980) tal como se presentan en la **Tabla 27**.

Para la elaboración del mapa de zonas de transporte, se parte del análisis hidrológico, una vez obtenidos los hidrogramas para las cuencas definidas, estos son incluidos en el modelo hidráulico, el cual es el resultado de la generación de las secciones transversales de cada uno de los cauces priorizados. Adicionalmente, a partir de la relación Kang & Zhang (1980) se generan los valores del esfuerzo cortante y viscosidad como función de la concentración de sedimentos los cuales son incluidos en el modelo hidráulico. Posteriormente se obtiene altura y velocidad del flujo.

Los rangos de pendientes son establecidos de acuerdo con las curvas de nivel a escala 1:2000 y teniendo en cuenta la **Tabla 10**.

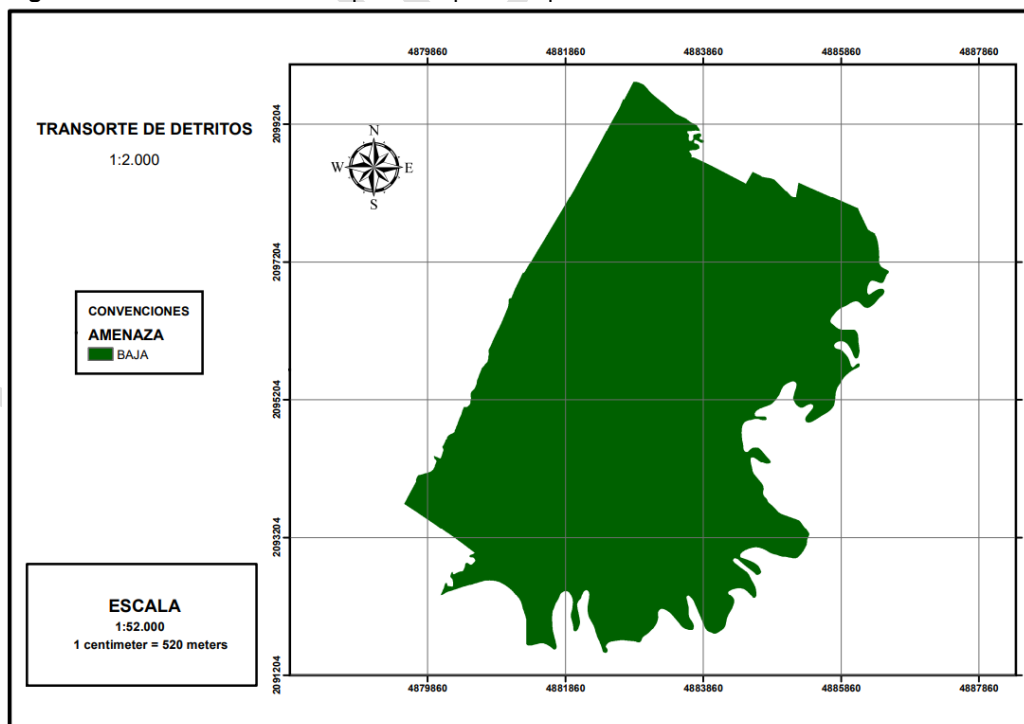
**Figura 42.** Mapa de pendiente zona escala 1:2000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

Teniendo en cuenta que las pendientes son planas y no hay aporte de volumen de sedimentos, no existe tránsito o transporte de estos con fines de generar avenidas torrenciales por lo cual las zonas de transporte son bajas.

**Figura 43.** Zonificación de susceptibilidad por transporte de avenida torrencial zona escala 1:2000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

### 7.1.3 Análisis de zonas de depósito

El Servicio Geológico Colombiano (2017) define las geoformas presentadas en la **Tabla 28**.

Para la zona de jurisdicción del municipio se tienen las siguientes unidades geomorfológicas a nivel urbano, de las cuales se hará una descripción de acuerdo con su subambiente y se describirán la génesis y algunos atributos relacionados con la morfometría y la dinámica teniendo en cuenta la pendiente, depósitos superficiales, litología, drenaje disección y los procesos actuales en su orden.

- Geoformas de Origen Denudativo

Se incluyen las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que han remodelado y dejado remanentes de las geoformas morfoestructurales preexistentes y además crean nuevas geoformas por acumulación de sedimentos.

Su origen obedece a los procesos de plegamiento y deformación intensa, durante la formación de las sierras homoclinales y la afectación posterior por procesos de meteorización y de denudación diferenciales intensos que generaron la formación local de suelos residuales y conos coluviales con los que generalmente se asocian.

Morfológicamente presentan las siguientes características generales:

- Glacis de acumulación (Dga)

Superficie de acumulación de longitudes moderadamente largas de formas cóncavas y suavemente inclinadas. Su génesis se asocia a la acumulación del material fino en zonas bajas por procesos de erosión laminar. Se incluyen igualmente los planos adyacentes, formados por rellenos de material coluvial fino con bloques, producto de la erosión laminar de las laderas circundantes y presentan espesores de 3 - 10 m.

Presentan su máxima expresión en la región de Chía. Se constituyen de material arenoso y arcilloso y no se descarta la interdigitación con sedimentos de origen lagunar en los bordes de la sabana.

- Planchas estructurales denudadas – Espolones estructurales (Dlpd)

Laderas y crestas simétricas de cimas agudas de morfología alomada y dispuestas transversales a las estructuras geológicas. Están constituidas por estratos delgados duros y blandos disectados profundamente en dirección perpendicular al rumbo de las capas, y que localmente definen salientes o crestas a manera de puentes entre espinaldos estructurales.

Geoformas de estas características tiene una amplia distribución en la Sabana de Bogotá (cuencas media-alta) y se encuentran principalmente en los flancos de las grandes estructuras tales como sierras homoclinales y anticlinales que se disponen por lo general en

dirección NNE a lo largo de la sabana. Las planchas estructurales denudadas se presentan tanto como espolones estructurales y como crestas perpendiculares entre espinazos estructurales.

Los espolones estructurales se presentan como salientes de morfología alomada, dispuestas perpendiculares a las laderas estructurales de sierra homoclinal o anticlinal.

Las crestas son irregulares de formas agudas a redondeadas, y asociadas a un drenaje subparalelo denso definido por la estratificación de capas areníticas y arcillolíticas, delgadas a gruesas principalmente de las formaciones Labor y Tierna del Grupo Guadalupe.

Su conformación está definida por la disección acentuada de los drenajes naturales y están asociados con conos de deyección, coluviones y localmente conos de deslizamiento. Las planchas estructurales cuando se encuentran confinadas entre espinazos se presentan como crestas de morfología alomada con fuerte disección y dispuestos a manera de puentes entre los espinazos estructurales.

Litológicamente están constituidas por intercalaciones de arcillolitas y areniscas de las formaciones Guaduas y Bogotá. En zonas donde las condiciones climáticas fueron diferentes a las actuales se encuentran en la sabana de Bogotá geoformas con las siguientes características:

- Conos y lóbulos coluviales y de solifluxión (Dco)

Geoforma en forma de cono o lóbulos de longitudes cortas a largas, de formas convexas e inclinaciones suaves a abruptas. Se originan respectivamente por acumulación de materiales sobre las laderas tanto por procesos de escorrentía superficial como por flujo lento y viscoso de suelo saturado y no saturado. Se constituyen de bloques angulares a subangulares de diferentes tamaños embebidos en material arcilloso en espesores del orden de 5 – 35 m.

Este tipo de geoforma son de amplia distribución en la base de las laderas de las sierras homoclinales que atraviesan de sur a norte la sabana de Bogotá. Presentan forma de cono en general de 3 – 5 ha y 5° – 15° de inclinación, que se interdigitan conformando franjas de 100 - 500 m en la base de las laderas. Hacia las zonas más elevadas, en los bordes de la sabana donde la humedad es muy alta desarrollan tamaños kilométricos y se asocian con procesos de solifluxión de suelos. Los conos coluviales se constituyen de bloques de variado tamaño (areniscas, arcillolitas) embebidos en una matriz arcillosa o arcilloarenosa que cubre parcialmente la base de las laderas.

Es importante notar la existencia de acumulaciones de estas mismas características, localmente sobre las laderas de cerros residuales y remanentes, sin embargo, su morfología ha sido modificada por levantamientos del terreno y procesos denudativos posteriores. Este rejuvenecimiento del paisaje indica los cambios sucedidos durante el levantamiento de la cordillera oriental, lo cual se ha comprobado igualmente con la presencia de suelos rojos típicos de climas tropicales diferentes a los actuales.

– Geoformas de Origen Antrópico

Son formas del terreno cuyo origen está ligado a las actividades humanas de explotación de recursos del subsuelo y al acondicionamiento del terreno tanto para la construcción de obras civiles como para la disposición de desechos tanto orgánicos como inorgánicos. En general se evidencian en la Sabana de Bogotá geoformas como Azupi y Azupla.

– Geoformas de Origen Fluvial y Lagunar

Las geoformas de origen fluvial y lagunar están originadas por el efecto erosivo y acumulativo de las corrientes de los ríos y la sedimentación de materiales en cuencas restringidas respectivamente. Estas geoformas están definidas principalmente en la parte central de la sabana de Bogotá, y particularmente asociadas a la acumulación de sedimentos de los cursos de los ríos.

– Cauce Activo (Fca)

Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Los cauces rectos se restringen a valles estrechos en forma de V, generalmente relacionados al control estructural de fallas o diaclasas. Estos cauces cuando recorren grandes distancias pueden formar lagunas y rápidos. Cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), los cauces son de tipo meándrico o divagante, como producto del cambio súbito de la dirección del flujo. Dependiendo la cantidad de carga de sedimentos, la pendiente y caudal pueden llegar a formar sistemas anastomosados, trenzados, divergentes y otras unidades asociadas.

– Planicies y Deltas Lacustrinos (Fpla)

Planicies extensas de aspecto aterrazado y morfología ondulada suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por escarpes de 2 – 20 m de altura.

Se constituyen de arcillas grises con locales intercalaciones de arenas finas y delgados niveles de gravas y turbas en capas paralelas producto de la acumulación de materiales transportados por las corrientes locales hacia la cuenca ocupada por el antiguo lago de la Sabana de Bogotá. Espesores de 20 – 300 m.

Estas geoformas son las de mayor expresión en la sabana de Bogotá con una cobertura de aproximadamente 2700 km<sup>2</sup>. Son de morfología plana y de aspecto aterrazado, suavemente ondulada de 3° – 5° de inclinación y con forma lobulada o de abanico principalmente en la desembocadura de los grandes cursos de agua que entregaron sus aguas en la antigua laguna de la sabana de Bogotá.

Estas geoformas están limitadas por escarpes de 0.5 – 20 m de altura y 15° – 35° de inclinación, encontrándose las máximas alturas en los bordes de la cuenca y particularmente en la zona de la salida del río Bogotá en el sector suroeste de Soacha.

Las planicies lacustrinas de la Sabana de Bogotá localizadas en la parte central de la cuenca están constituidas predominantemente de arcillas grises con delgadas intercalaciones de arcillas turbosas. Las arcillas son de características plásticas y localmente expansivas lo cual se evidencia en la deformación de las vías particularmente en la vía que conduce hacia Tenjo. Hacia los bordes de la cuenca como se indicó previamente la con figuración es localmente en forma de abanico, definiendo los lóbulos de deltas lacustrinos constituidos de arcillas con intercalaciones frecuentes de arenas finas, arenas arcillosas y es igualmente evidente el incremento de arcillas turbosas y ligníticas (VANDER HAMMEN Y HELMENS, 1990).

Las planicies lagunares e igualmente planicies fluviales más antiguas han sido disectadas, dejando amplias planicies de inundación y terrazas fluviales.

– Planicie o llanuras de inundación (Fpi)

Franja de terreno plana baja de morfología ondulada de 0.05 – 5 km de extensión, eventualmente inundable. Se presenta bordeando los cauces fluviales y se limita localmente por escarpes de terraza. Se constituye de 3 - 5 m de arcillas y limos producto de la sedimentación durante eventos de inundación fluvial. Se incluyen los planos fluviales menores en formas de “U” o “V” y conos coluviales menores, localizados en los flancos de los valles intramontanos.

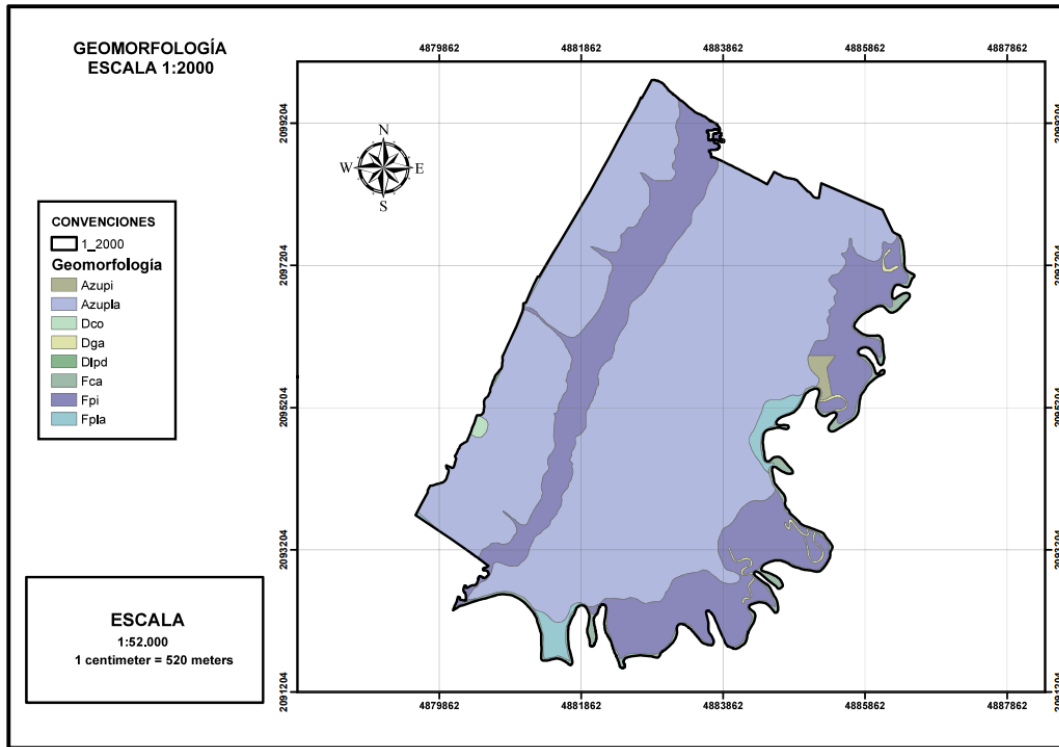
Las planicies o llanuras de inundación presentan un amplio desarrollo en la sabana de Bogotá y están asociadas evolutivamente a los últimos eventos de secado y los procesos de disección de las planicies lagunares por los principales ríos que la drenaron. Se destacan por su amplitud las llanuras de inundación de los ríos Bogotá y Frío.

Se constituyen de arcillas grises de inundación, localmente con intercalaciones de arenas muy finas a limosas de colores claros, dispuestos en capas delgadas horizontales de la llamada formación Chía.

Para construir el mapa de avenidas torrenciales de los cauces priorizados, se hace el análisis de los mapas de zonas de inicio, transporte y deposito descritos anteriormente.

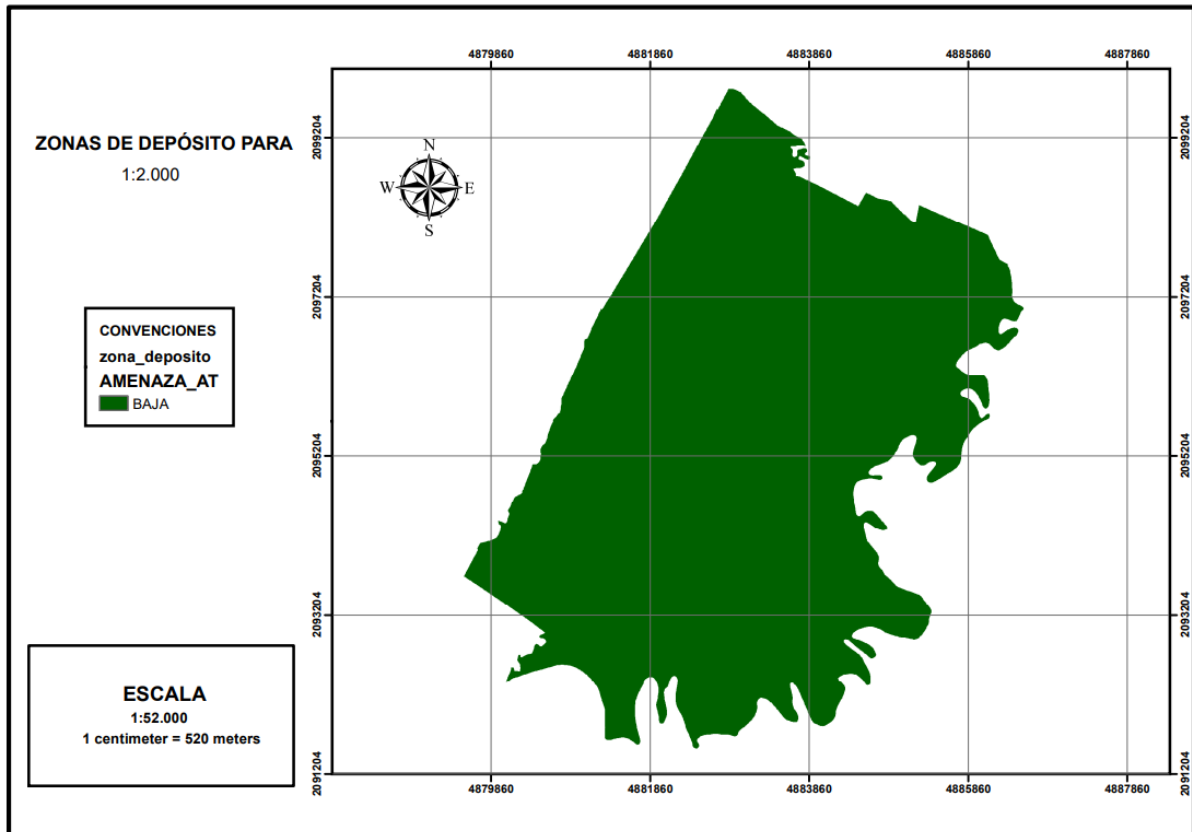
La probabilidad para eventos de avenidas torrenciales se da a partir de que la amenaza por movimientos en masa es el detonante de los flujos torrenciales y son los desencadenantes del proceso. Así las cosas, el periodo de retorno utilizado en el modelo de amenaza por movimientos en masa es de 20 años y por consiguiente es el mismo para los eventos por avenidas torrenciales.

**Figura 44.** Geomorfología zona escala 1:2000



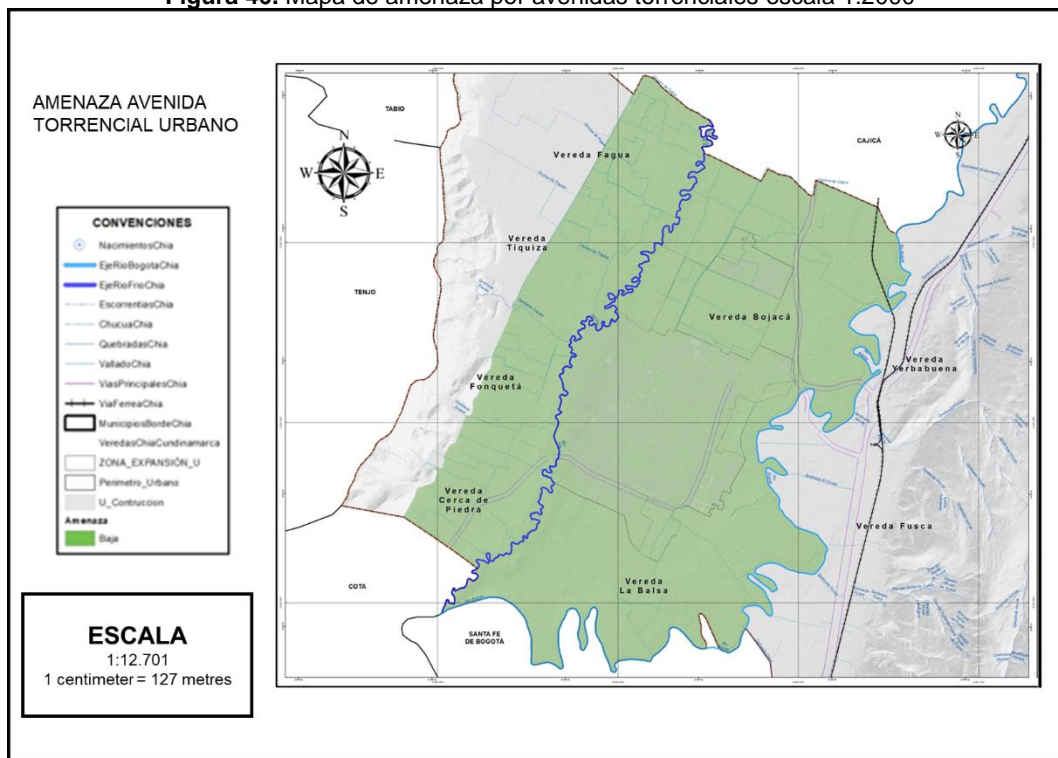
Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS

**Figura 45.** Calificación de la susceptibilidad a los procesos de torrencialidad de acuerdo con criterios morfogénicos escala 1:2000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

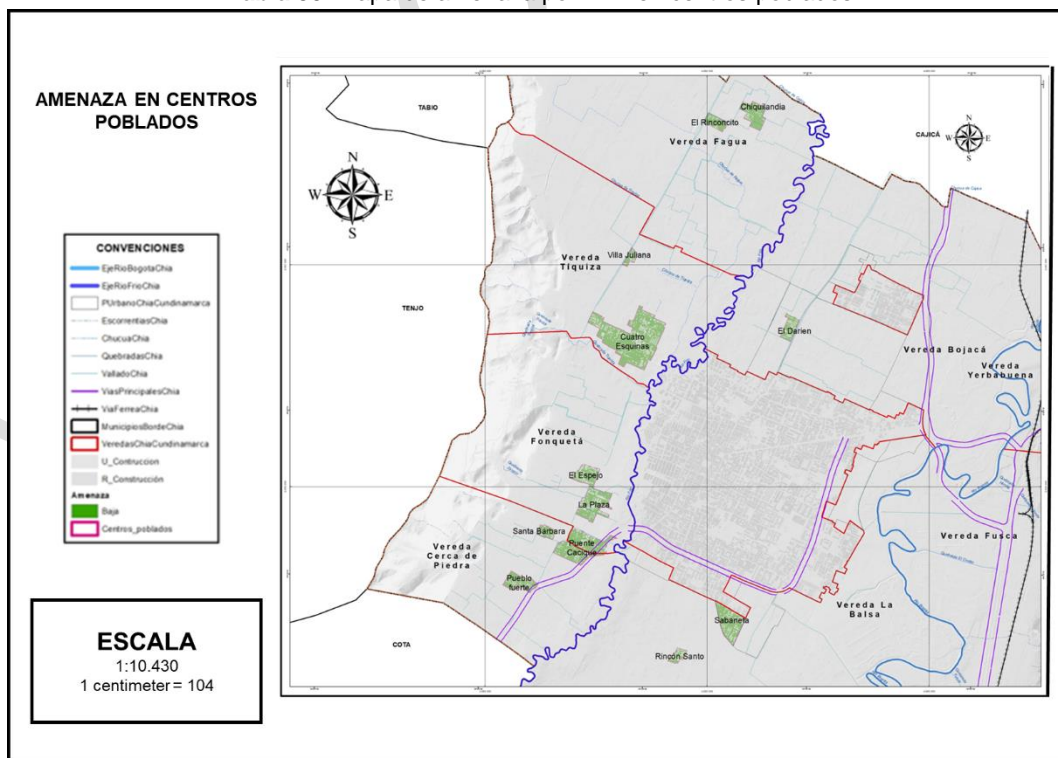
**Figura 46.** Mapa de amenaza por avenidas torrenciales escala 1:2000



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

## 7.2 Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales centros poblados

**Tabla 30.** Mapa de amenaza por AVT en centros poblados



Fuente: Hydraulic and Environmental Design SAS.

La zonificación de amenaza de los centros poblados del municipio de Chía se encuentra en el polígono a escala 1:2.000 por lo cual cumplen con los lineamientos para la zonificación del Decreto 1807 de 2014.

Los centros poblados no poseen condición de amenaza ni condición de riesgo por lo anteriormente analizado.

## 8. CONCLUSIONES

En el municipio de Chía se realizó el detalle de las quebradas Honda, Rincón y Santiamén, localizadas en el sector oriental del municipio con el fin de analizar la amenaza por avenidas torrenciales lo cual arrojó que en la quebrada Rincón al pasar la Autopista Norte presenta susceptibilidad a avenida torrencial por un almacenamiento de sedimentos. Las demás quebradas estudiadas transitan por el cauce presentando una amenaza baja por avenidas torrenciales.

Se recomienda que cuando se estudien a detalle las quebradas levantadas a escala 1:25000 se actualicen a su vez los modelos de avenidas torrenciales lo cual permita descartar susceptibilidad a este fenómeno.

En la parte plana del municipio en el modelamiento no se evidenció tendencia a avenida torrencial por su topografía (pendientes planas), por lo tanto, se determinó que las zonas urbanas y las posibles zonas de expansión urbana no son susceptibles a avenida torrencial.

Para el área zonificada en suelo rural para las quebradas Honda, Rincón y Santiamén se identificó que la amenaza por avenida torrencial es baja en un 99.81%, el 0.14% del área presenta amenaza media y el 0.07% presenta amenaza alta. Lo anterior indica que existe probabilidad baja de avenidas torrenciales en estas corrientes, lo cual obedece principalmente a que el aporte de sedimentos de las corrientes de cada una de sus cuencas es bajo por factores condicionantes como las coberturas, el lecho del río, su granulometría y composición, y la conformación de coberturas vegetales en las orillas de las mismas.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Alcántara. (2000).

Blanco, E. G. (2016). *Análisis de vulnerabilidad por el fenómeno de remoción en masa*. bogota: univversidad de la salle.

Brabb. (1984).

Bregoli, F., Medina, V., & Bateman, A. (2018). TXT-tool 3.034-2.1: A Debris Flow Regional Fast Hazard Assessment Toolbox. En *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools* (Sassa, Kyoji; Tiwari, Binod; Liu, Ko-Fei; McSaveney,

Mauri; Strom, Alexander; Setiawan, Hendy ed., págs. 225--234). Springer International Publishing.

Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2016). *Plan Municipal de Gestión del. chia.*

Hamblin. (1995).

Jakob, M. (2005). A size classification for debris flows. *Engineering geology*, 151-161.

Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water resources research*, 1153-1171.

Soeters y Van Westen. (1996).

Varnes. (1984).

VERSIÓN FINAL

## 10. NOTA LEGAL – MEMORIAL DE RESPONSABILIDAD

La responsabilidad total de la información presentada en el documento, así como la de sus insumos, anexos y cartografía asociada corresponde a los profesionales firmantes, quienes fueron responsables de su elaboración y en grado mayor para la empresa consultora Hydraulic and Enviromental Design S.A.S., quien aprueba y refrenda con su firma la calidad y pertinencia de los análisis realizados.

Lo anterior de conformidad con lo previsto en el artículo 27 del Decreto 1807 de 2014, compilado en el artículo 2.2.2.1.3.4.1 del Decreto nacional 1077 de 2015, que señala “*Los estudios técnicos señalados en la presente sección deben ser elaborados y firmados por profesionales idóneos en las materias, quienes son responsables de los mismos sin perjuicio de la responsabilidad por la correcta ejecución de los diseños y obras de mitigación*” y con las obligaciones derivadas del contrato de consultoría No 663 de 2020 cuyo objeto es “*la prestación de servicios de consultoría para la elaboración de los estudios básicos de riesgos por fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenida torrencial en el Municipio de Chía – Cundinamarca conforme a lo establecido en el Decreto 1807 de 2014 compilado en el Decreto 1077 de 2015*”, específicamente lo descrito en la cláusula primera”

Se deja constancia que la revisión realizada por el municipio de Chía, mediante los supervisores del contrato corresponde a una verificación del cumplimiento de los requisitos mínimos contractuales y a los establecidos en los decretos nacionales en materia de estudios básicos de gestión del riesgo, pero en ningún caso constituye una aprobación al estudio con ocasión de la aplicación metodológica, ni al empleo de las actividades científicas y profesionales a cargo de los profesionales de la consultoría, por cuanto, el contenido de los mismos es responsabilidad exclusiva del consultor, tal como se prevé en el artículo previamente referido y las obligaciones derivadas del contrato de consultoría No 663 de 2020.

JUAN SEBASTIÁN SALINAS UYABÁN

C.C. 1.014.271.752

TP No 25202-408162 CND

Formación académica: Ingeniero civil

Representante Legal Consultoría

LIBARDO ADOLFO LÓPEZ RAMÍREZ

C.C. 71.741.75

TP No 15202-091715

Formación académica: Ingeniero civil

Cargo: Ingeniero Experto Riesgos

JESÚS YESID HERNÁNDEZ EUGENIO

C.C. 88235784

TP No 15202-091715

Formación académica: Ingeniero civil

Cargo: Profesional en hidrología e hidráulica