

**ESTUDIO DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN LA MICROCUENCA DE LA  
QUEBRADA LA CUCALINA, PAMPLONITA NORTE DE SANTANDER**

**JULIET PAOLA BARROSO ANTELIZ**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
PAMPLONA**

**2017**

**ESTUDIO DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN LA MICROCUENCA DE LA  
QUEBRADA LA CUCALINA, PAMPLONITA NORTE DE SANTANDER**

**JULIET PAOLA BARROSO ANTELIZ**

**1094275315**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero  
Ambiental**

**Director**

**MARIA ESTHER RIVERA**

**PhD en Hidrología**

**Codirector**

**JESUS RAMON DELGADO**

**MSc en Geotecnia**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PAMPLONA**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis directores de trabajo de grado María Esther Rivera y Jesús Ramón Delgado R. por sus conocimientos, colaboración, apoyo, paciencia y dedicación de tiempo, para la realización y culminación de este proyecto.

A mis familiares, en especial a mis padres Hugo Alberto Barroso y María Rosalba Anteliz, por su apoyo en todo momento, su ánimo y aliento brindado, y por creer en mí durante toda mi formación.

A Javier Peñaloza, como un líder de la vereda San Antonio, Pamplonita, por su ayuda, por compartir información y por su acompañamiento a la microcuenca de la Quebrada La Cucalina. Y a mi amiga Karina Peñaloza, por darme a conocer la existencia de esta microcuenca, y por permitirme saber su potencial para el proyecto.

A Dios, por haberme dado la fortaleza para seguir adelante en momentos de debilidad, y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	15
INTRODUCCIÓN .....	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
3. OBJETIVOS .....	20
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
4. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	21
MARCO REFERENCIAL .....	22
5.1. MARCO CONTEXTUAL .....	22
5.2. ANTECEDENTES.....	24
5.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES .....	24
5.2.2. ANTECEDENTES NACIONALES .....	26
5.2.3. ANTECEDENTES REGIONALES .....	28
5.4. MARCO TEÓRICO .....	29
5.4.1. AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO.....	29
5.4.2. DESLIZAMIENTOS .....	29
5.4.3. ESCALAS DE ANÁLISIS.....	37
5.4.4. ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA.....	37
5.4.5. TALUD INFINITO .....	38
5.4.6. FACTORES CONDICIONANTES .....	40
5.4.7. FACTORES DETONANTES .....	70
5.5. MARCO NORMATIVO.....	85
6. METODOLOGÍA.....	88
6.1. RECONOCIMIENTO DE LA ZONA Y DELIMITACIÓN DE LA CUENCA .....	88
6.2. IDENTIFICACION DE LAS VARIABLES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE LOS DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	90
6.2.1. FACTORES CONDICIONANTES .....	90
6.2.2. FACTORES DETONANTES .....	103
6.3. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA RELACIONADA CON LOS FACTORES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS.....	109

6.4. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA.....	110
7. RESULTADOS Y DISCUSION.....	113
7.1. IDENTIFICAR LAS VARIABLES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE LOS DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	113
7.1.1. FACTORES CONDICIONANTES .....	113
7.1.2. FACTORES DETONANTES .....	154
7.2. EVALUAR Y ZONIFICAR LA AMENAZA RELACIONADA CON LOS FACTORES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	178
CONCLUSIONES.....	182
RECOMENDACIONES .....	186
BIBLIOGRAFÍA .....	187
ANEXOS .....	195

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Tipos de movimiento en masa.....	32
<b>Tabla 2.</b> Símbolos de grupo de suelos para SUCS.....	42
<b>Tabla 3.</b> Tipología de suelos para SUCS.....	42
<b>Tabla 4.</b> Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	48
<b>Tabla 5.</b> Características de los suelos según el SUCS.....	49
<b>Tabla 6.</b> Rangos de pendiente utilizados con propósitos de análisis de ingeniería y zonificación de amenazas por movimientos en masa.....	51
<b>Tabla 7.</b> Formas de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad.....	52
<b>Tabla 8.</b> Rangos de pendientes según %.....	57
<b>Tabla 9.</b> Escalas utilizadas para el relieve.....	57
<b>Tabla 10.</b> Unidades de coberturas de la tierra para la leyenda nacional, escala 1:100.000, de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia.....	63
<b>Tabla 11.</b> Caracterización climática mensual basada en la temperatura media y la precipitación, según la U.S. Air Force, Aeronautical Chart Service, 1947.....	67
<b>Tabla 12.</b> Clasificación del Índice de Concentración de las Precipitaciones (PCI), propuesta por Lobo (2005).....	68
<b>Tabla 13.</b> Clasificación del Índice Modificado de Fournier (MFI), propuesta por CEC (1992).....	69
<b>Tabla 14.</b> Valores de número de curva para diferentes grupos hidrológicos y usos de suelo.....	78
<b>Tabla 15.</b> Condiciones antecedentes de humedad básicas empleadas en el método SCS.....	79
<b>Tabla 16.</b> Magnitud de un sismo y sus efectos y frecuencias.....	83
<b>Tabla 17.</b> Coordenadas geográficas para los puntos de muestreo de suelo.....	91
<b>Tabla 18.</b> Información de la imagen satelital Landsat 8 identificada para la zona de estudio.....	97
<b>Tabla 19.</b> Determinación de los usos del suelo para NC según la cobertura vegetal de Corine Land Cover.....	101

<b>Tabla 20.</b> Características de las variables de precipitación total diaria y temperatura media diaria con el satélite TRMM y MERRA – 2 Model respectivamente.....	102
<b>Tabla 21.</b> Dimensiones de las Unidades de Cálculo de Terreno UCT.....	112
<b>Tabla 22.</b> Formaciones geológicas presentes en el área de estudio.....	113
<b>Tabla 23.</b> Resultados del análisis granulométrico y límites de Atterberg de suelos en la zona de estudio.....	116
<b>Tabla 24.</b> Descripción de la clasificación de suelos por S.U.C.S., y caracterización del color por Munsell en la zona de estudio.....	117
<b>Tabla 25.</b> Propiedades mecánicas para materiales de la zona de estudio.....	121
<b>Tabla 26.</b> Características morfométricas básicas de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	131
<b>Tabla 27.</b> Parámetros morfométricos relativos a la forma de la cuenca de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	132
<b>Tabla 28.</b> Parámetros morfométricos relativos al relieve de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	135
<b>Tabla 29.</b> Parámetros morfométricos relativos al drenaje de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	138
<b>Tabla 30.</b> Proporciones de la cobertura vegetal en la zona de estudio.....	142
<b>Tabla 31.</b> Proporciones de los usos del suelo en la zona de estudio.....	145
<b>Figura 32.</b> Clasificación de la zona de vida de Holdridge de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	151
<b>Tabla 33.</b> Nivel de amenaza sísmica según valores de $A_a$ .....	170
<b>Tabla 34.</b> Valores de amenaza sísmica para Pamplonita, Norte de Santander.....	173
<b>Tabla 35.</b> Registros de sismos desde junio-1993 para el municipio de Pamplonita, Norte de Santander.....	176
<b>Tabla 36.</b> Sismicidad Histórica cercana a la zona de estudio.....	176
<b>Tabla 37.</b> Constantes utilizadas en el cálculo de factor de seguridad para talud infinito.....	178

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Ubicación de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	23
<b>Figura 2.</b> Algunos tipos de movimientos en masa.....	32
<b>Figura 3.</b> Parámetros para análisis de amenaza según talud infinito.....	40
<b>Figura 4.</b> Carta de Casagrande.....	47
<b>Figura 5.</b> Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión.....	56
<b>Figura 6.</b> Número de ordenes de corriente según Strahler.....	59
<b>Figura 7.</b> Climograma con información de precipitación y temperatura.....	66
<b>Figura 8.</b> Clasificación de zonas de vida según Holdridge.....	70
<b>Figura 9.</b> Relación de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.....	74
<b>Figura 10.</b> Unidades para la aceleración horizontal máxima.....	85
<b>Figura 11.</b> Diagrama de flujo para la clasificación de suelos según SUCS.....	94
<b>Figura 12.</b> Obtención de los mapas de los parámetros de resistencia de materiales.	95
<b>Figura 13.</b> Obtención de parámetros morfométricos en el SIG.....	96
<b>Figura 14.</b> Ubicación de la imagen satelital Lansat 8 identificada para la zona de estudio.....	98
<b>Figura 15.</b> Procesamiento de la imagen Landsat 8 identificada para la zona de estudio.....	99
<b>Figura 16.</b> Obtención de la zonificación de la cobertura vegetal para la zona de estudio.....	100
<b>Figura 17.</b> Estimación de la profundidad del nivel freático para la zona de estudio...	104
<b>Figura 18.</b> Identificación del valor de número de curva para la zona de estudio.....	107
<b>Figura 19.</b> Representación de los términos utilizados para calcular la profundidad del nivel freático resultante variada por una precipitación determinada.....	108
<b>Figura 20.</b> Evaluación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000.....	110
<b>Figura 21.</b> Zonificación del factor de seguridad para talud infinito.....	111



<b>Figura 22.</b> Curva hipsométrica y Frecuencia de altitudes de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	134
<b>Figura 23.</b> Perfil topográfico de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	137
<b>Figura 24.</b> Perfil topográfico del cauce principal de la microcuenca.....	138
<b>Figura 25.</b> Proporciones de área de cobertura vegetal en la zona de estudio.....	142
<b>Figura 26.</b> Proporciones de área de usos del suelo en la zona de estudio.....	145
<b>Figura 27.</b> Coeficiente pluviométrico mensual de la zona.....	146
<b>Figura 28.</b> Comportamiento de la precipitación total mensual a lo largo de 18 años en la zona.....	147
<b>Figura 29.</b> Climograma de la zona de estudio.....	149
<b>Figura 30.</b> Índice de Concentración de Precipitación (ICP) para la zona de estudio...	150
<b>Figura 31.</b> Índice Modificado de Fournier (MFI) para la zona de estudio.....	151
<b>Figura 32.</b> Clasificación de la zona de vida de Holdridge de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	152
<b>Figura 33.</b> Curvas IDF de la zona de estudio.....	154
<b>Figura 34.</b> Curva de excedencia para Pamplonita, Norte de Santander.....	174
<b>Figura 35.</b> Porcentajes de área de tipo de amenaza por deslizamiento en la microcuenca Q. La Cucalina.....	181
<b>Figura 36.</b> Curvas granulométricas y ensayo de granulometría para las muestras de suelo.....	195
<b>Figura 37.</b> Cartas de Casagrande para las muestras de suelo.....	198

## LISTA DE IMÁGENES

	<b>Pág.</b>
<b>Imagen 1.</b> Movimiento en masa producido en la parte superior de la mina de carbón Santa Helena.....	18
<b>Imagen 2.</b> Transporte de sedimentos en la quebrada La Cucalina.....	18
<b>Imagen 3.</b> Deslizamiento rotacional activo.....	127
<b>Imagen 4.</b> Deslizamiento rotacional inactivo.....	127
<b>Imagen 5.</b> Reptación en la zona de estudio.....	128
<b>Imagen 6.</b> Deslizamiento traslacional activo.....	128
<b>Imagen 7.</b> <i>Didymopanax tremulus</i> (palo de viento) en la zona de estudio.....	153
<b>Imagen 8.</b> <i>Tillandsia usneoides</i> (musgo español ó heno) en la zona de estudio.....	153

## LISTA DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
<b>Ecuación 1.</b> Factor de seguridad para talud infinito.....	39
<b>Ecuación 2.</b> Coeficiente de uniformidad.....	46
<b>Ecuación 3.</b> Coeficiente de curvatura.....	46
<b>Ecuación 4.</b> Índice de Plasticidad.....	46
<b>Ecuación 5.</b> Ancho de la cuenca B.....	53
<b>Ecuación 6.</b> Factor de Forma Kf.....	53
<b>Ecuación 7.</b> Coeficiente de compacidad Kc.....	54
<b>Ecuación 8.</b> Índice de alargamiento la.....	54
<b>Ecuación 9.</b> Razón de Elongación Re.....	54
<b>Ecuación 10.</b> Elevación media de la cuenca.....	56
<b>Ecuación 11.</b> Pendiente media de la cuenca Pm.....	57
<b>Ecuación 12.</b> Pendiente del cauce principal.....	58
<b>Ecuación 13.</b> Coeficiente de masividad Km.....	58
<b>Ecuación 14.</b> Coeficiente orográfico Ko.....	58
<b>Ecuación 15.</b> Relación de bifurcación Rb.....	59
<b>Ecuación 16.</b> Relación de longitudes medias de los ríos rL.....	60
<b>Ecuación 17.</b> Densidad de drenaje Dd.....	60
<b>Ecuación 18.</b> Tiempo de concentración de Kirpich.....	61
<b>Ecuación 19.</b> Tiempo de concentración de Témez.....	61
<b>Ecuación 20.</b> Tiempo de concentración de Passini.....	61
<b>Ecuación 21.</b> Tiempo de concentración de Giandotti.....	61
<b>Ecuación 22.</b> Coeficiente pluviométrico.....	61
<b>Ecuación 23.</b> Índice de Concentración de la Precipitación PCI.....	67
<b>Ecuación 24.</b> Índice de Agresividad de las Lluvias o de Fournier FI.....	68
<b>Ecuación 25.</b> Índice modificad de Fournier MFI.....	68

<b>Ecuación 26.</b> Evapotranspiración potencial ETP.....	69
<b>Ecuación 27.</b> Relación Evapotranspiración Potencial RETP.....	69
<b>Ecuación 28.</b> Ecuación general para las curvas IDF por Aparicio (1997).....	74
<b>Ecuación 29.</b> Intensidad de precipitación.....	75
<b>Ecuación 30.</b> Distribución de probabilidad de Gumbel.....	76
<b>Ecuación 31.</b> Modelo de regresión lineal múltiple para curvas IDF.....	76
<b>Ecuación 32.</b> Modelo de regresión lineal múltiple para curvas IDF (expresado de otra manera).....	76
<b>Ecuación 33.</b> Precipitación infiltrada $P_i$ .....	77
<b>Ecuación 34.</b> Retención potencial máxima $S$ .....	79
<b>Ecuación 35.</b> Condición antecedente de humedad I (seco).....	80
<b>Ecuación 36.</b> Condición antecedente de humedad III (húmedo).....	80
<b>Ecuación 37.</b> Precipitación efectiva o escorrentía directa $P_e$ .....	80
<b>Ecuación 38.</b> Nivel freático resultante para una precipitación determinada.....	80
<b>Ecuación 39.</b> Aceleración horizontal del terreno por Donovan.....	84
<b>Ecuación 40.</b> Aceleración horizontal del terreno por Milen y Davenport.....	84
<b>Ecuación 41.</b> Distancia al hipocentro del terremoto.....	84
<b>Ecuación 42.</b> Contenido de humedad.....	93
<b>Ecuación 43.</b> Ecuación particular para las curvas IDF.....	154

## LISTA DE MAPAS

	<b>Pág.</b>
<b>Mapa 1.</b> Modelo Digital de Elevación para la microcuenca Q. La Cucalina.....	89
<b>Mapa 2.</b> Puntos de muestreo de suelos en la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	91
<b>Mapa 3.</b> Perfiles transversales para estimación de niveles freáticos en la microcuenca Q. La Cucalina.....	105
<b>Mapa 4.</b> Geología para la microcuenca Q. La Cucalina.....	115
<b>Mapa 5.</b> Tipo de suelos en la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	120
<b>Mapa 6.</b> Valores de cohesión en $\text{kN/m}^2$ para los materiales de la microcuenca Q. La Cucalina.....	122
<b>Mapa 7.</b> Valores de ángulo de fricción en grados para los materiales de la microcuenca Q. La Cucalina.....	123
<b>Mapa 8.</b> Valores para peso unitario en $\text{kN/m}^3$ para la microcuenca Q. La Cucalina.....	124
<b>Mapa 9.</b> Morfodinámica en la microcuenca Q. La Cucalina.....	125
<b>Mapa 10.</b> Valores de pendientes en grados para la microcuenca Q. La Cucalina.....	129
<b>Mapa 11.</b> Tipo de corriente de la Q. La Cucalina.....	130
<b>Mapa 12.</b> Cauce principal de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	132
<b>Mapa 13.</b> Pendientes en porcentaje de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	136
<b>Mapa 14.</b> Orden de corriente de la microcuenca de la Q. La Cucalina.....	139
<b>Mapa 15.</b> Mapa de cobertura vegetal según CORINE LAND COVER en la zona de estudio.....	141
<b>Mapa 16.</b> Uso del suelo de acuerdo al método de Número de Curva para la microcuenca Q. La Cucalina.....	144
<b>Mapa 17.</b> Profundidad del nivel freático en la microcuenca Q. La Cucalina.....	156
<b>Mapa 18.</b> Grupo hidrológico del suelo según el Número de Curva para la microcuenca Q. La Cucalina.....	157
<b>Mapa 19.</b> Número de Curva NC para la microcuenca Q. La Cucalina.....	158
<b>Mapa 20.</b> Retención Potencial Máxima para la microcuenca Q. La Cucalina.....	160

<b>Mapa 21.</b> Precipitación efectiva para una precipitación de 120 mm de 20 años de período de retorno y una duración de 24 horas, de la zona de estudio.....	162
<b>Mapa 22.</b> Precipitación efectiva para una precipitación de 2141,9 mm como la precipitación media anual para 18 años de registro, de la zona de estudio.....	163
<b>Mapa 23.</b> Precipitación infiltrada para una precipitación de 120 mm de 20 años de período de retorno y una duración de 24 horas, de la zona de estudio.....	165
<b>Mapa 24.</b> Precipitación infiltrada para una precipitación de 2141,9 mm como la precipitación media anual para 18 años de registro, de la zona de estudio.....	166
<b>Mapa 25.</b> Nivel freático variado con una precipitación de 120 mm.....	168
<b>Mapa 26.</b> Nivel freático variado con una precipitación de 2141 mm.....	169
<b>Mapa 27.</b> Mapa de Zonas de Amenaza Sísmica en función de $A_a$ y $A_v$ .....	171
<b>Mapa 28.</b> Mapa de valores de $A_a$ .....	172
<b>Mapa 29.</b> Reporte de sismos desde 1993 con epicentro en el municipio de Pamplonita por la Red Sismológica Nacional de Colombia.....	175
<b>Mapa 30.</b> Ubicación de los sismos históricos cercanos y distancia respecto a la zona de estudio.....	177
<b>Mapa 31.</b> Mapa de valores de factor de seguridad por talud infinito para la zonificación de la amenaza con una precipitación de 120 mm.....	179
<b>Mapa 32.</b> Mapa de valores de factor de seguridad por talud infinito para la zonificación de amenaza con una precipitación de 2141 mm.....	180

## RESUMEN

Los deslizamientos han sido fenómenos muy recurrentes en el país, debido a la ola invernal, y al uso inadecuado de suelos, entre las causas más importantes; además de que la región Andina se caracteriza por presentar un relieve montañoso al ubicarse dentro de la Cordillera de Los Andes y que por sus características los favorecen. Estos acontecimientos han producido muchas pérdidas humanas, económicas y de infraestructura. En la actualidad se cuentan con pocos estudios de zonificación de áreas de amenaza -y a escalas muy regionales-, y Planes de Ordenamiento Territorial a nivel municipal que incluyen componentes respecto al uso actual y potencial del suelo rural, para sobrellevar o disminuir los efectos. Respecto a este estudio, la quebrada La Cucalina desemboca en el río Pamplonita, y en los últimos años se han presentado crecidas y deslizamientos, en especial uno de gran tamaño ubicado justo arriba de la mina de carbón Santa Helena ubicada en la vertiente derecha del cauce. El objetivo de esta investigación es evaluar y analizar la amenaza respecto a este fenómeno de acuerdo a las características propias de la microcuenca de la quebrada y la zona, su comportamiento hidrológico y factores externos que pueden acelerar su ocurrencia, como intensas precipitaciones, sismos, uso inadecuado de suelo, y actividades antrópicas en la ladera como la minería en este caso. Mediante la interacción de estos factores se obtiene una amenaza de ocurrir una inestabilidad. Con los insumos de cartografía básica a escala, modelo digital del terreno (MDT), perfiles topográficos y registros de precipitaciones, más la información de los factores condicionantes como la cobertura y uso del suelo (Corine Land Cover – adaptada IDEAM), unidades geológicas y características del suelo, y además del factor detonante de sismo; se calcula la amenaza por medio del análisis de estabilidad para diferentes escenarios por equilibrio límite, y se zonifica la amenaza por deslizamientos de acuerdo a los factores de seguridad por talud infinito calculados en diferentes celdas para hallar así su distribución espacial. Con la ayuda de los sistemas de información geográfica se plasmarán los resultados obtenidos. Como resultados se obtuvieron, que la mayor parte de la microcuenca presenta una amenaza Alta por movimientos en masa con un 76,8%, seguidos por la amenaza Baja con un 13,9%, y por último con la menor proporción, la Amenaza Media con un 9,3%. Concluyendo que, la mayoría de la zona presenta una cobertura densa, alta capacidad de infiltración y pendiente abrupta, lo cual genera una amenaza alta de 76,8% respecto al área total de la cuenca y alta posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa.

**Palabras clave:** Amenaza, Cucalina, deslizamiento, factores condicionantes, factores detonantes, geología, Pamplonita, precipitación, zonificación.

## INTRODUCCIÓN

En el territorio de Colombia se presentan de forma continua y a gran escala procesos de remoción en masa, esto se debe a efectos detonantes como altas precipitaciones y condiciones de sismicidad extrema (Rivera Carmona, 2017). En Colombia, los deslizamientos de masas de tierra, al igual que las inundaciones, constituyen los riesgos naturales más severos en el país, lo cual se debe principalmente a las diversas y variadas características geográficas y fisiográficas del país, siendo detonados por factores tanto naturales como antrópicos (Coronado 2006, citado por Vega Gutierrez, 2010).

Sin embargo, la inestabilidad del terreno no solo se presenta por las condiciones detonantes, sino también a la estructura del suelo y su calidad. Teniendo en cuenta todas las variables que permiten que se presenten los fenómenos de remoción en masa, es necesario conocer una zonificación a escala regional de este tipo de eventos.

El análisis de la amenaza por movimientos en masa es el primer insumo en el proceso de gestión integral del riesgo. Para ello, el análisis y zonificación de la amenaza es necesario partir del conocimiento de las características geoambientales que determinan o pueden determinar la ocurrencia de un movimiento en masa en una región o área de estudio (SGC, 2017).

La metodología aplicada es la de Talud Infinito, teniendo en cuenta factores condicionantes y detonantes, con el fin de zonificar la zona de estudio mediante categorías de amenaza de factor de seguridad para equilibrio límite.



## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es un país montañoso y de pendientes muy fuertes, debido a que lo atraviesan tres cordilleras, la Occidental, la Central y la Oriental, las cuales son ramificaciones de la Cordillera de los Andes, y estas se ubican mayoritariamente sobre la región Andina. De acuerdo con el DANE (2010), donde se asienta el 75% de la población colombiana. En estas zonas, es donde se presenta mayor amenaza por deslizamientos. Lo anterior, sumado a las fuertes precipitaciones de los últimos años principalmente, ha facilitado que el país esté en constante amenaza a este tipo de desastres.

En una noticia de Caracol Radio (2011), Martha Calvache, subdirectora de Ingeominas en ese momento, dijo ante las emergencias de la ola invernal de 2011: “los departamentos del país donde se presentan más riesgos tanto de deslizamientos como inundaciones son los montañosos”, y menciona entre ellos a Norte de Santander.

De acuerdo con la opinión de los habitantes de la zona, en la cuenca de la Quebrada La Cucalina, ocurrió una creciente en el 2013, formando una planicie en la parte central de la quebrada, donde aún se encuentran escombros y ha crecido vegetación sobre ellos, además un deslizamiento en la parte superior de la mina de carbón Santa Helena durante la ola invernal en el año 2011, que se observa en la imagen 1. Así mismo, la quebrada presenta transporte de sedimentos producido por estos fenómenos, como se muestra en la imagen 2, y en la parte alta de la microcuenca se presenta la actividad de tala de árboles. Recientemente, en el mes de marzo de este año han acontecido varias crecidas por las intensas precipitaciones dejando grandes escombros en la parte alta de la quebrada La Cucalina; y en junio, alrededor de la desembocadura de la quebrada en el río Pamplonita, se han presentado altos niveles, crecidas y arrastre de gran cantidad de material.

**Imagen 1.** Movimiento en masa producido en la parte superior de la mina de carbón Santa Helena.



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Imagen 2.** Transporte de sedimentos en la quebrada La Cucalina.



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

De acuerdo al mapa interactivo de amenaza por remoción en masa a escala municipal en Colombia publicado por García (2014) con información de INGEOMINAS (2006), “el municipio de Pamplonita en general presenta una amenaza Muy Alta por deslizamientos, desprendimientos y caídas de rocas y la mayor parte de la zona de estudio presenta Amenaza Media por Erosión y Remoción en masa, finalmente, en la desembocadura de la microcuenca, una Amenaza Alta por Dinámica Fluvial”. Más recientemente, el Mapa Nacional de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa a escala 1:100.000, publicado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC , 2015), en la plancha 110IIA con escala 1:25.000 se observa que en la zona de estudio la mayor parte presenta una amenaza Muy Alta y el área restante amenaza de carácter Alta.

De acuerdo con lo anterior, se puede sugerir la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las áreas susceptibles a presentar amenaza por deslizamientos en la microcuenca de la Q La Cucalina?

Para González Valencia (2006), un hecho de interés se da sobre el estudio de la identificación de zonas de amenaza, cuando se presentan las temporadas de lluvias, los deslizamientos e inundaciones se disparan considerablemente ocasionando pérdidas humanas y económicas; otro hecho es que, se zonifica con el fin de evitar que se establezcan usos del suelo que puedan poner en peligro la vida de comunidades, o algún tipo de infraestructura vital para el desarrollo de la comunidad. Acorde con SGC (2015), al evaluar la amenaza, se tendrá un mapa de zonificación de amenaza que permitirá la toma de decisiones en un primer nivel de conocimiento, para la aplicación de las posteriores fases y etapas para la elaboración de estudios de riesgo.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la amenaza por deslizamientos en la cuenca de la Quebrada La Cucalina, en el municipio de Pamplonita, Norte de Santander.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar información sobre movimientos en masa ocurridos en la zona de estudio
- Identificar las variables que inciden en la ocurrencia de los deslizamientos en la zona de estudio
- Caracterizar la microcuenca de acuerdo a su morfometría, clima, formaciones geológicas, suelos y cobertura de la tierra
- Analizar la incidencia de las precipitaciones y sismos sobre la generación de deslizamientos
- Evaluar la amenaza relacionada con los factores que inciden en la ocurrencia de deslizamientos
- Zonificar la amenaza por deslizamientos en la zona de estudio

## 4. ALCANCES Y LIMITACIONES

### **ALCANCES:**

La presente investigación tiene como alcance evaluar la amenaza por movimientos en masa en la microcuenca La Cucalina, usando el método de talud infinito para estabilidad de laderas, mediante el cálculo del factor de seguridad para la zona, dividida por celdas; junto con el levantamiento de información para el cálculo, como procesamiento de información meteorológica, conformación de mapas temáticos: red de drenaje, suelo, cobertura vegetal, uso del suelo, pendientes, morfodinámica; además de información perteneciente a precipitación infiltrada y sismos.

### **LIMITACIONES:**

En el área de la microcuenca La Cucalina no se encuentran estaciones meteorológicas para el estudio del factor lluvia, como detonante de deslizamientos; y tampoco estaciones cercanas. Las estaciones meteorológicas próximas pertenecientes al municipio y municipios fronterizos, presentan información incompleta, un registro diario de menos de quince años y/o se encuentran a una diferencia de elevación mayor de la zona de estudio a 500 m, los cuales se encuentran en los requerimientos del SGC (2015), para el estudio. Por lo tanto, se usó información meteorológica de satélite para su desarrollo.

El muestreo de suelos y el reconocimiento de la zona por salidas de campo se limitaron debido al terreno abrupto y la densificación de bosques y vegetación, que impidió una mejor caracterización principalmente para las zonas más altas de la microcuenca, por ello se trabajó con la información que más se pudiese extraer de imágenes satelitales.

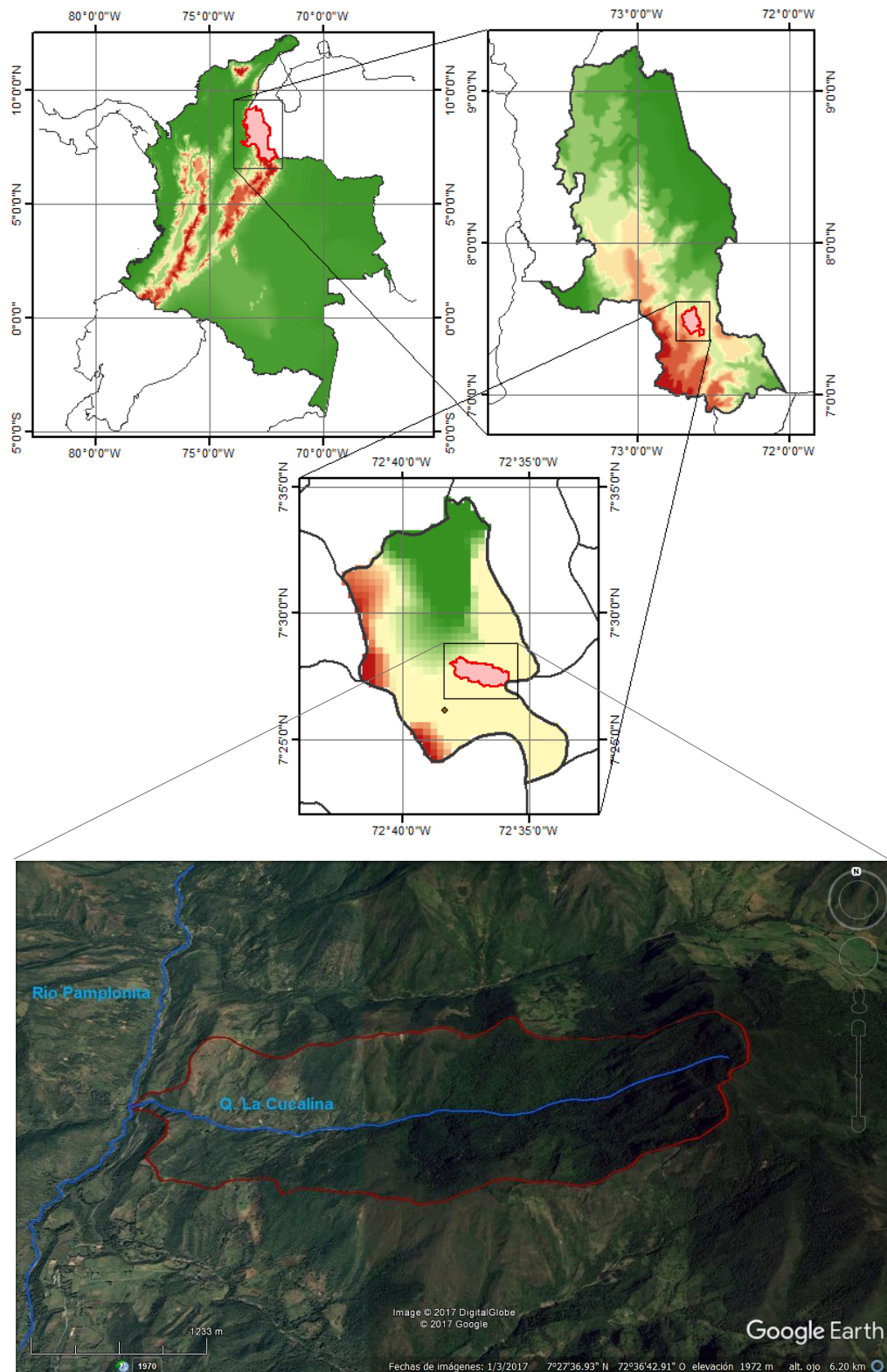
Los ensayos de laboratorio para la obtención de los parámetros de resistencia propios de los materiales de la zona, más las perforaciones del subsuelo para información de espesor y medición de la profundidad del nivel freático; se vieron limitados por el tiempo de ejecución del proyecto y recursos económicos. Debido a esto, se requirió de fuentes de literatura para la determinación de los valores de las propiedades y de una estimación del nivel freático por su comportamiento teórico.

## MARCO REFERENCIAL

### 5.1. MARCO CONTEXTUAL

La microcuenca de la Q. La Cucalina, desemboca en el río Pamplonita en el municipio de Pamplonita, en el punto con las coordenadas  $7^{\circ}28'0.26''N$  y  $72^{\circ}38'6.70''O$ . Se ubica a 4,52 km desde el cambio en la carretera para la cabecera municipal de Pamplonita, sobre la ruta 55 hacia Cúcuta (figura 1). Tiene ramificaciones aunque, la mayoría son de tipo de corriente intermitente; en la figura 1, sólo se observa el cauce principal. Según el Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T., 2002) del municipio de Pamplonita, la Q. La Cucalina se ubica principalmente por su desembocadura en la vereda San Antonio, que tiene 191 habitantes. Además, la Q. La Cucalina es una fuente abastecedora para uno de los Acueductos Rurales Comunitarios.

**Figura 1.** Ubicación de la microcuenca de la Q. La Cucalina.



Editado por: Barroso Anteliz (2017)

## 5.2. ANTECEDENTES

### 5.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Quesada Román, y otros (2017), a través de su trabajo en el volcán Poás en Costa Rica, mostraron un modelo morfodinámico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera a partir del caso de estudio de la región más afectada durante el terremoto de Cinchona en 2009; usando métodos basados en planteamientos de Simonov (1985), Lugo (1988) y Zamorano (1990). Se seleccionaron cuatro parámetros, derivados del modelo de elevación del terreno y de la red fluvial: densidad de la disección, profundidad de la disección, la energía del relieve y la erosión total. La densidad de la disección calcula la concentración de cauces fluviales en un área específica y, por ende, mayor erosión fluvial. Además de variables como la competencia del sustrato, las estructuras disyuntivas (fracturas o fallas), la inclinación del terreno, la cobertura, y la intensidad y el tipo de precipitación. Se compararon los resultados finales con los eventos ocurridos en 2009, lo que dio que un 98% de estos fenómenos coincidieran con las áreas de amenaza.

En el trabajo de grado de Cardozo (2013), el mapa de susceptibilidad de remoción en masa para la cuenca del río Tartagal, en Salta – Argentina, se obtuvo mediante el método heurístico a través de la combinación de mapas temáticos de los factores condicionantes de tales procesos en un SIG; que consistió en la suma algebraica de cada factor ponderado con pesos numéricos y referidos a una grilla común de 12.5 m de pixel; se jerarquizaron de la manera: (1) Geomorfología, incluyendo a movimientos en masa ocurridos; (2) Topografía, pendiente y curvatura; y (3) Geología, incluyendo a litología; y dentro de ellos se asignó un valor a cada variable que lo compone. Se calculó el Índice de susceptibilidad, que luego se categorizó en susceptibilidad alta, moderada y baja.

Jaimes, y otros (2013) presentaron para México, un mapa de peligro de deslizamiento asociado a la aceleración máxima del suelo que se presenta con un período de retorno de 150 años, y un ejemplo de aplicación de un mapa empleando como detonador el sismo de Tecmán en Colima de magnitud  $M = 7.6$  ocurrido el 21 de enero de 2003; mediante la propuesta de una expresión para estimar el desplazamiento de Newmark relacionando la aceleración crítica entre la aceleración máxima del suelo, para obtener el desplazamiento traslacional de laderas por sismo. Con los resultados de la ecuación de deslizamiento propuesta se define un mapa de peligro sísmico por deslizamiento traslacional, asumiendo valores promedio de propiedades mecánicas del suelo como cohesión, peso volumétrico y ángulo de fricción a partir de mapas geológicos y litológicos a escala 1:1.000.000, así como la pendiente a partir de MDT.

En Honduras, Bohórquez Ríos (2013) elaboró un documento con criterios para evaluación de amenazas generales y locales, por inundaciones y deslizamientos. Muestra información sobre escalas de análisis, cartografía base, geología y geología para ingeniería, geomorfología, análisis hidrológico, análisis hidrogeológico, cobertura y uso



del suelo, análisis sismológico, inventario de movimientos en masa, investigación del subsuelo, análisis de estabilidad y evaluación de la amenaza, tanto para deslizamientos como inundaciones, usando métodos que sean aplicables a los mecanismos identificados en la zona de estudio.

Marcano Montilla, y otros (2012) analizaron la distribución espacial de la susceptibilidad a movimientos en masa, en la cuenca del río San Julián, en el estado Vargas de Venezuela, basado en el método heurístico, aplicando herramienta SIG MapInfo, análisis geoestadístico univariado y multivariado, y el método de las Jerarquías Analíticas (MJA) de la Evaluación Multi-criterios (EMC) para obtener mapas de susceptibilidad específica ponderada y susceptibilidad final, asignando puntajes ponderados a las variables y unidades. Para ello se elaboraron una serie de mapas temáticos (geomorfología, geología de superficie, pendiente media y conflictos de uso y ubicación de los movimientos de remoción en masa), los cuales se evalúan separadamente y después se integran para alcanzar una evaluación general del área.

En el trabajo de Cárdenas, y otros (2006), de usaron dos metodologías en la provincia de Loja – Ecuador, el método de Brabb (MB) para la zonificación de susceptibilidad de fenómenos de remoción en masa, es de tipo explícito empírico y utiliza tres factores: un inventario de eventos, un mapa de unidades litológicas y un mapa de pendientes, que se sobreponen. El método de Mora – Vahrson (MMV), para la zonificación de amenaza, es de tipo explícito semianalítico, y considera factores como: relieve relativo, litología, humedad del suelo, sismicidad e intensidad de lluvias; y el nivel de amenaza es el producto de la susceptibilidad y la acción de los elementos de disparo. Estas dos metodologías no se pueden comparar, debido a que la primera representa el estado actual de las condiciones del terreno, mientras que la segunda tiene un carácter predictivo.

Cartaya, y otros (2006) en su trabajo aplicaron para la microcuenca de la quebrada Curucutí en el estado Vargas, Venezuela, un modelo para la zonificación y análisis de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa empleando estadística multivariada y un SIG; adaptando el modelo propuesto por INGEOMINAS (2001) de Colombia. Luego de la estructuración de información temática base, definición de las variables (geología de superficie, geomorfología, pendiente media y conflictos de uso) y generación de mapas temáticos, realizaron un análisis geoestadístico y superposición de mapas, resulta el mapa de susceptibilidad final. Para el procesamiento se utilizaron sistemas automatizados de análisis de data espacial como el Módulo Vertical Mapper de MapInfo para el manejo de la información altimétrica, ArcShell para facilitar el ajuste y arreglo de las capas temáticas, y ArcView para realizar los cruces de capas temáticas índices.

INETER & COSUDE (2005), en Nicaragua, publicaron las Recomendaciones Técnicas para la elaboración de Mapas de Amenazas en Inestabilidad de Laderas. La metodología utilizada es el método geomorfológico, en el que se recopiló material existente como: fotos aéreas, satelitales, mapa topográfico, datos históricos de deslizamientos, datos

geológicos, litológicos, de meteorización, de zonas de fracturación, datos meteorológicos, climatológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, de suelos y uso de suelo, entre otros; luego, se elaboró un mapa de inventario de eventos de inestabilidad de laderas ya ocurridos, para la delimitación de terrenos inestables. Y después, se evaluó y mapeó la susceptibilidad por un análisis comparativo entre las zonas afectadas y los factores que caracterizan el terreno, y su cálculo. Además, en el informe se plasman criterios para estimar la intensidad para diferentes tipos de ladera, identificar zonas potenciales de derrumbes o caída de bloques, estimar su probabilidad de ocurrencia o frecuencia, para definir niveles de amenaza, la zonificación de amenazas, y leyendas y formatos recomendados para la elaboración de mapas de amenaza.

En el trabajo “Desarrollo de una Metodología para la Identificación de Amenazas y Riesgos a Inundaciones y Deslizamientos en la Cuenca del río San Juan”, de UNESCO, ITC, Universidad de Utrecht, CEPREDENAC (2000), en República Dominicana, respecto a deslizamientos se utilizaron dos métodos. El método directo o determinístico, se trabajó con un Modelo combinado Hidrológico-Estabilidad de Taludes de Van Asch (2000), a través de diferentes escenarios que realiza un análisis físico-estadístico, calculando el Factor de Seguridad, a través del programa PCRaster. Para el desarrollo de los diferentes escenarios se tomaron diferentes valores de precipitación diaria bajo condiciones climáticas normales, para intervalos de 2, 5, 10, 20 y 50 años, y se calculó la estabilidad de la pendiente con tres tipos de cobertura: la actual, boscosa y de pastos; obteniéndose mapas de probabilidad de fallas y de áreas de inestabilidad. El método indirecto analiza la interrelación de características y condiciones del terreno y la potencialidad de ocurrencia, mediante la asignación de pesos a los mapas temáticos, y luego la combinación por adición generó el mapa de amenazas por deslizamientos.

### **5.2.2. ANTECEDENTES NACIONALES**

Rivera Carmona (2017), en su proyecto realizó un estudio de fenómenos de remoción en masa regional del municipio de Girardota Antioquia, empleando la metodología de Talud Infinito y simulaciones de Montecarlo, para determinar el factor de seguridad (estabilidad del terreno), utilizando herramientas de SIG y de geoestadística. El cálculo del talud infinito se realizará por unidad de pixel, utilizando insumos de uso público generados por entidades encargadas, como lo son modelo digital del terreno y geología. Los resultados obtenidos permiten estudiar los factores de seguridad, categorizados según la Guía Metodología para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa del SGC (2015).

La metodología de SGC (2015), para estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa, en el capítulo respectivo para la evaluación de la amenaza, especifica que los estudios básicos se realizan con base en análisis determinísticos, y para los estudios de detalle aplicando análisis probabilísticos. La amenaza comprende tres fases principales: definir un modelo geológico-geotécnico, plantear escenarios de amenaza y zonificar la amenaza. Se requiere de cartografía temática de geología, y de

cobertura y uso del suelo; información del inventario de movimientos que permiten identificar las características de los eventos, su distribución espacial y temporal y su relación con los factores detonantes; para establecer un modelo geológico-geotécnico para realizar un análisis determinístico de estabilidad, que en suelos se hace por medio del modelo de talud infinito y para roca por modelos de estabilidad de macizos rocosos. Además con la distribución espacial de los espesores del suelo, la posición del nivel freático y aceleración sísmica, se calcula por métodos de equilibrio límite, los factores de seguridad, en diferentes celdas de suelo para su distribución espacial; y para taludes en roca, se basa en el método SMR.

El artículo de Hidalgo Montoya, y otros (2014), presenta una estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvias en el Valle de Aburrá – Colombia, usando un SIG y mediante un modelo que considera las características topográficas, geológicas, geotécnicas e hidrológicas de la zona; que se basa en el modelo pseudoestático de Newmark y utiliza un enfoque probabilista basado en la técnica del primer orden y segundo momento FOSM. El proceso de cálculo de estabilidad de taludes considerando el modelo de talud infinito, calcula la probabilidad de que ocurra una falla de taludes dado que se presente un sismo que produzca una aceleración, considerando la incertidumbre de los parámetros geotécnicos y las condiciones de saturación del suelo

IDEAM (2012), tiene una Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del Terreno a los movimientos en masa, usando como mínimo información de Geomorfología, Geología, Suelos y Cobertura de la tierra. Estas variables se parametrizan en términos de susceptibilidad de 1 a 5, desde Muy Baja hasta Muy Alta respectivamente, calculándose mediante la suma ponderada de cada una de las variables (esta ponderación se realiza por calificación heurística por panel de expertos). Cada variable a la vez tiene capas que también tienen una ponderación. Como resultado se tiene una zonificación de áreas susceptibles a movimientos en masa usando la nomenclatura del semáforo.

Asocars & Universidad de Magdalena (2011), para la Ordenación y Manejo de humedales en el río Magdalena en el Atlántico, se identificaron amenazas y vulnerabilidades. En el caso de amenazas por Remoción en Masa, se usó el método heurístico de procesos jerárquicos de análisis (AHP) con ajustes estadísticos por peso de variables a través de componentes principales; la zonificación se generó a partir de la susceptibilidad aplicando los factores detonantes de lluvia y sismo con base en la propuesta por INGEOMINAS (2001). Para la generación del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, se usaron variables cualitativas (geología, geomorfología, suelos y cobertura vegetal) y cuantitativas (pendiente, longitud de la pendiente, rugosidad; derivado del DEM).

En el estudio de Cobos Miranda, y otros (2010), la zonificación de la amenaza para el municipio de Suratá se realiza teniendo en cuenta factores de seguridad por el método de equilibrio límite, como talud infinito, para simular procesos de saturación del suelo y métodos de dovelas, planteados por Bishop, Janbu y Morgenstern & Price, con los cuales

se crean escenarios que sirven de base para generar la zonificación final del estudio. Como primera fase se tuvo una recopilación de información que consiste en obtener información básica (levantamiento topográfico, geología y geotecnia); la segunda fase de análisis se caracterizó por la interpretación de los datos, calibración de modelos planteados y la elaboración del mapa de zonificación de amenazas; y como fase final el planteamiento de las medidas de prevención, corrección y mitigación necesarias para el manejo de estos fenómenos.

En el trabajo de González Valencia (2006) para la identificación de zonas de amenaza por deslizamientos e inundaciones, basado en un análisis multicriterio, para el Valle de Aburrá, Antioquia, junto con el río Medellín; se aplicó una primera metodología basada en un Análisis de Regresión Múltiple, con la cual se pretendió predecir la ocurrencia de eventos a partir de la precipitación (P), correlacionándola con el número de eventos de inundaciones y deslizamientos producidos en el mismo día del evento. Además, se hicieron correlaciones con las variables: número de días consecutivos de lluvia antes de ocurrir el evento, el valor de P (mm) de los tres días antes del evento y la distancia (km) del evento a la estación de precipitación. Aunque, los resultados no indicaron que la precipitación tuviera una relación directa con los eventos, a pesar de una positiva correlación, significa que en la ocurrencia de eventos intervienen también: la pendiente, el uso del suelo, la geología, entre otros. La segunda metodología basada en el modelo Análisis Multicriterio para el cálculo de riesgo, mediante el software IDRISI KILIMANJARO, permitió hacer análisis de varias variables a la vez, usándose 5 factores de mapas temáticos: precipitación, pendiente, geología, distancia a cauces y la red de drenaje acumulada; para realizar el álgebra de mapas. La escala de valores está entre 0 y 1: 0 para la mínima amenaza y 1 la máxima amenaza.

### **5.2.3. ANTECEDENTES REGIONALES**

El trabajo de grado de Gáfar Duarte (2013), sobre zonas de amenazas por deslizamientos, a partir de modelamiento de datos espaciales para Cúcuta, realizó un modelo en el que usan cinco factores intrínsecos o de susceptibilidad (pendiente, suelo, cobertura, geomorfología y geología) y dos externos o de disparo (isoyetas y zonas de conflicto de uso del suelo); en donde el nivel de amenaza es igual al producto de los factores de susceptibilidad y los de disparo, y las variables se obtienen al clasificar los valores iniciales de las mismas. Después, el cálculo obtenido se reclasificó en rangos de importancia desde baja hasta muy alta amenaza. En cuanto a la clasificación del suelo se escogió la textura, tomando como base el triángulo de texturas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos 1954, 1957; y para cobertura vegetal, de acuerdo a la clasificación de la FAO 1985; con el análisis litológico y la génesis en el proceso evolutivo de las geo-formas actuales, permitieron identificar las unidades geomorfológicas; las isoyetas se delimitaron en zonas con precipitación entre 500 – 1000 y 1000 – 2000 mm. Más adelante, se definieron las ponderaciones de tal modo que la suma de cada factor sea de 100% y usando herramientas de SIG se delimitaron las zonas de amenaza clasificándolas según su grado.

El trabajo presentado por Rodríguez Solano, y otros (2013), usó la metodología de Mora y Varhson (1991) utilizando indicadores morfodinámicos del terreno para la zonificación del fenómeno de remoción en masa de la zona urbana del municipio de Pamplona, adaptando documentos fotográficos, estadísticos, textuales y climatológicos para la construcción de los mapas índice utilizados en el geoprocésamiento por álgebra de matrices mediante ArcGIS 10. La información se basa en la interacción de los factores de susceptibilidad (relieve relativo, litología, humedad del suelo) y factores de disparo (actividad sísmica, precipitación); de tal forma que la combinación de estos factores da como resultado una ecuación como el producto de los factores intrínsecos con cada uno de los parámetros de disparo.

## 5.4. MARCO TEÓRICO

### 5.4.1. AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO

De acuerdo con Westen (2010), González Valencia (2006) y la Ley 1523 de 2012, la **Amenaza** es la probabilidad o peligro latente de la ocurrencia de un evento natural o antrópico que se presenta con una cierta magnitud y dentro de un período de tiempo, suficiente para afectar directa o indirectamente la vida y causar pérdidas físicas y daño a recursos ambientales. Según Westen (2010) y González Valencia (2006), el grado de destrucción o exposición de una zona ante un evento, en función de su magnitud y los tipos de elementos bajo riesgo, se refiere a **Vulnerabilidad**. Y de acuerdo a la Ley 1523 de 2012, es la fragilidad y disposición física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una zona o comunidad de ser afectada en caso de que un evento físico peligroso se presente. Para González Valencia (2006) y concorde con la Ley 1523 de 2012, el valor esperado de las pérdidas o daños cuando se considera la ocurrencia de un evento amenazante ante una zona, y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos es el **Riesgo**. No se puede hablar de riesgo si la amenaza no tiene posibilidad de afectar a una comunidad o alguna infraestructura física o económica; por lo tanto, el riesgo se deriva de la combinación de la amenaza y vulnerabilidad.

Existen riesgos respecto a sismos, remoción en masa, inundaciones, avenidas de masas de agua, incendios forestales, contaminación del aire, entre otros. Esta investigación se enfoca en Amenaza y la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

### 5.4.2. DESLIZAMIENTOS

Según García (2014), una remoción en masa es el desplazamiento de material de suelo, rocas o de cobertura vegetal por influencia de la gravedad, la pendiente del terreno y la cohesión y las características del suelo.

De acuerdo con García (2014) e INETER & COSUDE (2005), entre las causas más comunes están:

- Procesos litológicos y tipo de cobertura: Donde se presenta materiales con baja cohesión o poca consolidación.
- Procesos topográficos: Zonas con pendientes muy pronunciadas donde se supera el ángulo de reposo de un material.
- Procesos climáticos: Cuando existen precipitaciones frecuentes, un régimen de lluvias elevado o de alta intensidad.
- Procesos tectónicos: cuando intervienen los movimientos sísmicos en el movimiento del terreno.
- Procesos antrópicos: acción del hombre sobre el medio, por ejemplo, deforestación en zona de ladera, incendios forestales, agricultura en zonas no aptas, minería, entre otros.

González Valencia (2006), define a un deslizamiento como el desplazamiento a lo largo de una o varias superficies y puede provenir de una sola masa que se mueve o de varias unidades o masas semi-independientes. Los deslizamientos pueden obedecer a procesos naturales o a desestabilizaciones de masa de tierra por el efecto de cortes, rellenos, deforestación, entre otros. Así mismo, INETER & COSUDE (2005) considera que los deslizamientos pueden acelerarse a causa de terremotos, erupciones volcánicas, precipitaciones, aumento del nivel de aguas subterráneas, por erosión, socavamiento de los ríos y por actividad humana. Los factores son múltiples y se dividen en condicionantes y desencadenantes.

- **FACTORES INFLUYENTES EN LOS DESLIZAMIENTOS**

**Los Factores condicionantes (intrínsecos)** son los que inciden en la inestabilidad de laderas y son característicos de las propias laderas o de la zona (INETER & COSUDE, 2005):

- **Geológicos:** Factor permanente, entre ellos están: litología, estratigrafía de la roca (orientación y ángulo de inclinación), discontinuidades estratigráficas y estructurales, y alteración de las rocas (meteorización).
- **Hidrológicos e hidrogeológicos:** Como cambios en las presiones de poros (hidrostático) y comportamiento geomecánico (resistencia a deformabilidad, compresibilidad, cohesión).
- **Geomorfológico:** Altas pendientes, geometría de los taludes, topografía irregular.
- **Climáticos:** Temperatura, evapotranspiración, brillo solar, etc.

**Los Factores desencadenantes** son los detonantes provocando la inestabilidad, y de acuerdo con INETER & COSUDE (2005) se encuentran:

- **Naturales:** Precipitaciones normales y extraordinarias, infiltración de las aguas lluvias en el terreno, variaciones de temperatura, sismos, entre otros.
- **Antrópicos:** Deforestación, incendios forestales o quemas, corte de taludes para construcción de carreteras o infraestructura, asentamiento humano en las laderas, actividad minera, uso indebido del suelo, entre otros.
- **CLASIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA**

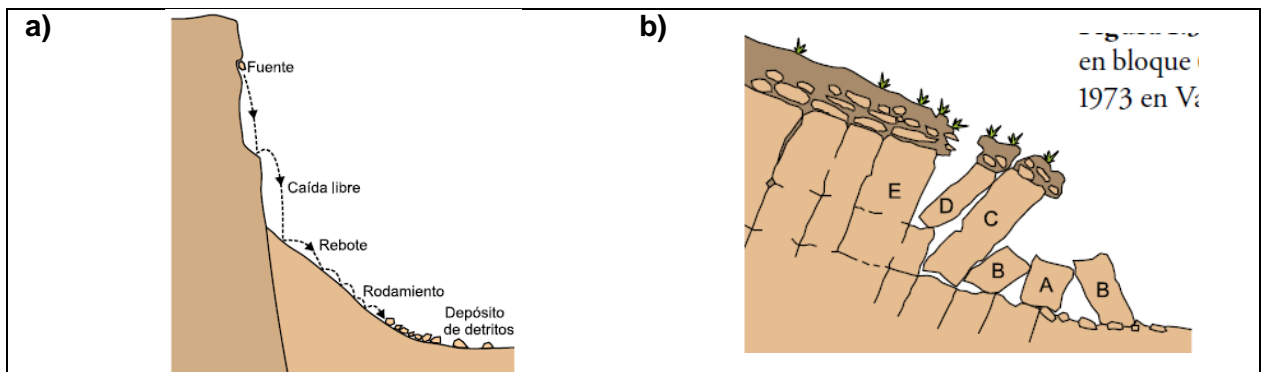
El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera debajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Crozier, 1999a, en Glade y Crozier, 2005). Varnes (1958 y 1978), emplea como criterio principal en la clasificación, el tipo de movimiento y en segundo lugar, el tipo de material; dividiéndolos en: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos. Además, divide los materiales en dos clases: rocas y suelos, éstos últimos subdivididos en detritos y tierra (PMA: GCA, 2007). En la tabla 1, se muestran los tipos de movimientos en masa, y en la figura 2, algunas ilustraciones de los mismos.

**Tabla 1.** Tipos de movimiento en masa

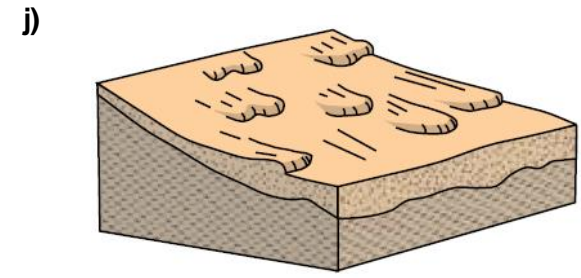
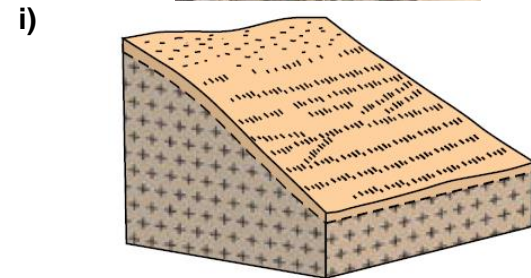
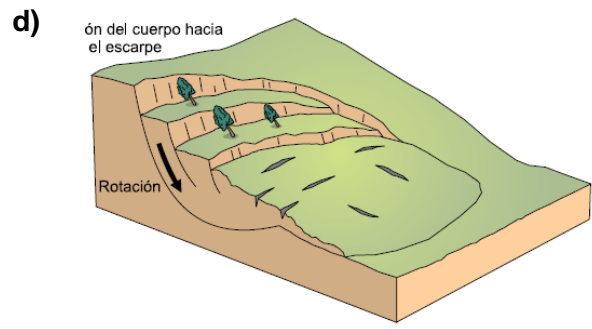
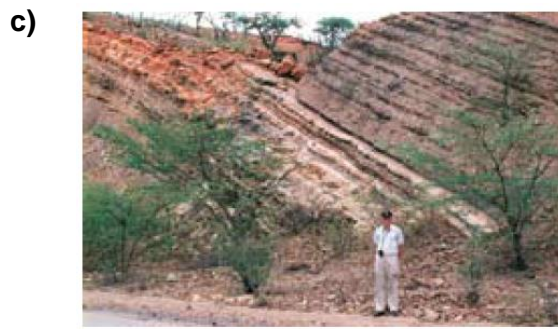
Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelos Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

Fuente: PMA: GCA (2007)

**Figura 2.** Algunos tipos de movimientos en masa







a) Caída. b) Volcamiento. c) Deslizamiento traslacional, según los planos de estratificación de capas de areniscas y lutitas, Venezuela. d) Deslizamiento rotacional. e) Coladas o flujos. f) Avalancha de detritos en el estado Vargas, Venezuela, 1999. g) Flujo de detritos, Lima, Perú. h) Flujos de detritos y flujos de tierra generados durante el sismo M = 6,4 de Páez, junio 6 de 1994, Huila, Colombia. i) Reptación. j) Soliflujión.

Fuente: PMA: GCA (2007) y INETER & COSUDE (2005), editado por Barroso Anteliz (2017).

De acuerdo con PMA: GCA (2007), **la caída** es un tipo de movimiento en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable; y una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978). El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Cruden y Varnes, 1996). Según INETER & COSUDE (2005), la zona de origen corresponde prioritariamente a acantilados rocosos o laderas de fuerte pendiente, donde la roca está fracturada y alterada.

El tipo de movimiento de **volcamiento**, se denomina así por haber un rotación generalmente hacia delante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior; y ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978, citado por PMA: GCA, 2007). El material afectado son formaciones sedimentarias y metamórficas, por lo general de fuerte buzamiento y en vertientes contrarias siendo los esquistos los más sensibles a este doblamiento (INETER & COSUDE, 2005).

**El deslizamiento** es un movimiento ladera debajo de una masa de suelo o roca cuyo deslizamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona donde ocurre una gran deformación cortante. Estos últimos se clasifican según la forma de la superficie de la falla por la cual se desliza el material (PMA: GCA, 2007).

**Los Deslizamientos peliculares o superficiales** se caracterizan por la forma de cáscara de naranja, por tener ondulaciones pequeñas que corresponden a deslizamientos pequeños rotacionales con profundidad de hasta uno o dos metros; y de forma de escalones en trama enrejada, que progresivamente se van deslizando. Implican volúmenes pequeños de material y velocidades de 1 a 2 cm/año en promedio. El material afectado son horizontes terrosos, cubierta de suelo, depósitos eluviales y coluviales finos, preferentemente sobre pendientes iguales o mayores a los 20° (INETER & COSUDE, 2005). Según INETER & COSUDE (2005) y PMA: GCA (2007), un movimiento lento de una masa a lo largo de una superficie de ruptura en forma circular o cóncava; y que se caracteriza por presentar un escarpe principal pronunciado, se conocen como **Deslizamientos rotacionales o circulares**. Se da en terrenos muebles, homogéneos, isotrópicos, cohesivos. Implica volúmenes de material pequeños y también grandes, y velocidades muy variables (INETER & COSUDE, 2005). Los **Deslizamientos traslacionales**, de acuerdo con INETER & COSUDE (2005) y Gáfar Duarte (2013), son movimientos de un bloque de suelo o roca a lo largo de una superficie de deslizamiento planar o ligeramente ondulada, y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo; el material afectado es rocoso, estratificado, formando placas cuyas bases no tienen soporte, por erosión natural o cortes artificiales en un talud. Estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales (PMA: GCA, 2007), e implica también volúmenes de material pequeños y grandes, y velocidades muy variables (INETER & COSUDE, 2005).

Y como una combinación de los anteriores, los **Deslizamientos complejos** son deslizamientos grandes donde se encuentran mecanismos combinados por su evolución y con episodios periódicos de aceleración; pueden convertirse en deslizamientos permanentes por la acción de suelos residuales después de la ruptura. Pueden tener grandes superficies, bastante profundidad y grandes volúmenes de material en movimiento (INETER & COSUDE, 2005).

Según PMA: GCA (2007), el tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material, se conoce como **Propagación Lateral**. Esta se puede considerar como la etapa final en una serie de movimientos donde la deformación interna predomina decididamente sobre otros mecanismos de desplazamiento.

Varnes (1978), citado por PMA: GCA (2007), distingue dos tipos de propagación, uno en que el movimiento afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla, típico de masas rocosas que sobreyacen a materiales blandos, como **Propagación lateral lenta**; y otro que ocurre en suelos cohesivos que sobreyacen a materiales que han sufrido licuefacción o a materiales en flujo plástico tales como arenas saturadas de densidad relativa baja a media o limos y arcillas sensitivas, como **Propagación lateral por licuación**.

**Los flujos** son un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978, citado por PMA: GCA, 2007). Son masas de material sin cohesión que fluye como un fluido viscoso al sobrepasar su límite líquido, y son fenómenos básicamente estacionales, frecuentes en temporada de lluvias, aunque también pueden producirse por otras causas (INETER & COSUDE, 2005). Hungr et al. (2001) citado por PMA: GCA, 2007, clasifican los flujos de acuerdo con el tipo y propiedades del material involucrado, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral y otras características.

Los tipos de flujos son, según PMA: GCA (2007): Los **Flujos secos** son de material granular seco, y se han registrado este tipo de flujos como grandes y catastróficos. Los **Flujo de detritos** son un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos ( $IP < 5\%$ ), material grueso de diferente diámetro, que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. La **Crecida de detritos** corresponde a un flujo muy rápido de una crecida de agua que transporta una gran carga de detritos a lo largo de un canal, de acuerdo con Hungr et al., 2001, citado por PMA: GCA, 2007. Y es difícil distinguir entre un flujo de detritos y una crecida de detritos, por lo que deben diferenciarse según el caudal pico; las crecidas de detritos se caracterizan por caudales mayores.

Los **Flujo de lodo** es un flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material

fuelle (IP > 5%) (Hungre et al., 2001, citado por PMA: GCA, 2007), suele involucrar volúmenes de material fino con alto contenido de limos y arcillas (INETER & COSUDE, 2005). Es un movimiento intermitente, rápido o lento, de suelo arcilloso plástico (Hungre et al., 2001, citado por PMA: GCA, 2007). Los **Flujos de tierra** son un movimiento intermitente, rápido o lento, de suelo arcilloso o limoso plástico (Hungre et al., 2001); desarrollan velocidades moderadas de cm/año, sin embargo, pueden alcanzar valores hasta de metros por minuto (Hutchinson, 1998). Para designar deslizamientos que en fases posteriores a su iniciación se comportan como un flujo, como resultado de licuación, se usa el término de **Deslizamiento por flujo**, y ocurren en cierto tipo de materiales como arenas o lmos saturados no compactados o arcillas “extra-sensitivas (Varnes, 1978, citado por PMA: GCA, 2007). Hungre et al. (2001), citado por PMA: GCA (2007), lo define como un flujo muy rápido o extremadamente rápido de una masa de suelo con estructura granular ordenada o desordenada, ocurre en taludes de pendiente moderada.

La **Avalancha de detritos** es un flujo no canalizado de detritos saturados o parcialmente saturados, poco profundos, muy rápidos a extremadamente rápidos, que comienzan como un deslizamiento superficial de una masa de detritos que al desplazarse sufre una considerable distorsión interna y toma la condición de flujo; relacionado con la ausencia de canalización de estos movimientos, está el hecho de que presentan un menor grado de saturación que los flujos de detritos (Hungre et al., 2001, citado por PMA: GCA, 2007). Por último, la **Avalancha de rocas** son flujos de gran longitud extremadamente rápidos, de roca fracturada; pueden ser muy móviles y su movilidad parece que crece con el volumen; además pueden ser muy peligrosas, pero afortunadamente no son muy frecuentes incluso en zonas de alta montaña (PMA: GCA, 2007).

Hay una gran variedad de procesos que podrían describirse como **Deformaciones gravitacionales profundas**, estos tipos presentan rasgos de deformación, pero sin el desarrollo de una superficie de ruptura definida y usualmente con muy baja magnitud de velocidad y desplazamiento; aunque algunas deformaciones de laderas deben ser consideradas como precursoras de deslizamientos en gran escala.

Como último, aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla, prácticamente imperceptibles, que afecta a los materiales poco o menos cohesivos de la cubierta de suelo y sobre pendientes igual o superiores a 20°, se refieren a **Reptación** (PMA: GCA, 2007), (INETER & COSUDE, 2005). Esta puede ser de tipo estacional, cuando se asocia a cambios climáticos o de humedad del terreno, y verdadera cuando hay un desplazamiento relativamente continuo en el tiempo. Dentro de este movimiento se incluyen la **Soliflucción** y la **Geliflucción**, este último término reservado para ambiente periglaciales. Ambos son causados por cambios de volumen de carácter estacional en capas superficiales del orden de 1 a 2 m de profundidad, combinados con el movimiento lento del material ladera abajo.

## SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO

Según Asocars y Universidad de Magdalena (2011), e INETER & COSUDE (2005) la vulnerabilidad del deslizamiento es la evaluación cuantitativa o cualitativa de la propensión de un terreno a presentarse o generar deslizamientos o movimientos de ladera, y la intensidad de la ocurrencia del fenómeno, está en función de los factores condicionantes y los factores desencadenantes; y la Amenaza a su vez está en función de la Probabilidad de ocurrencia del fenómeno y de su Intensidad.

### 5.4.3. ESCALAS DE ANÁLISIS

Para poder plantear y plasmar la investigación espacialmente se necesita de una Escala de trabajo que según Westen (2010), permite definir el método de análisis, el tipo y detalle de datos necesarios. Entre mayor el área, más cantidad de datos son requeridos. Entre las escalas análisis están (Westen, 2010):

- **Escala nacional:** Menos de 1:1.000.000. Cubre la totalidad del país. Generalmente, mapas a esta escala se diseñan para ser incluidos en atlas nacionales.
- **Escala regional:** Entre 1:100.000 y 1:1.000.000. cubre una cuenca grande o entidad político-administrativa del país. Mapas diseñados a esta escala son usados para la planificación de infraestructura de gran dimensión.
- **Escala media:** Entre 1:25.0000 y 1:100.00, cubre una municipalidad o una cuenca pequeña. Para planificación de proyectos de infraestructura, estudios de impacto ambiental, planificación municipal.
- **Escala detallada:** Entre 1:2.000 y 1:25.000, cubre una municipalidad o parte de una ciudad. Usados en generación de mapas de riesgo detallados.
- **Investigación de sitio:** Entre 1:200 y 1:2.000, cubre áreas donde los trabajos ingenieriles van a ser ejecutados, o un sector problema. Usados en diseños de trabajos de ingeniería y trabajos de mitigación.

### 5.4.4. ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA

Según Asocars & Universidad de Magdalena (2011), para la selección del método de zonificación más adecuada depende de varios factores como: disponibilidad, calidad y exactitud de los datos, resolución de zonificación, resultados requeridos, escala de zonificación, entre otros.

#### - **Inventario de movimientos en masa o Análisis Histórico**

Según Westen (2010) y Asocars & Universidad de Magdalena (2011), es el método más directo, con actividades de fotointerpretación, datos de investigación del subsuelo y registro histórico de movimientos ocurridos en la zona, por medio de mapeo de eventos históricos y determinación de período de retorno y magnitud. Se obtiene la distribución

espacial de los movimientos en masa. La primera etapa es la de Términos de Referencia, se establece la definición del alcance y propósito del estudio; la segunda etapa, el Estudio Preliminar, tiene lugar la revisión de Información Existente y la Obtención de Información a través de productos de sensores remotos; la tercera, Cartografía Temática, obtención de mapas temáticos preliminares; quinta, Análisis de Variables Temáticas y aplicación de metodologías de análisis; y por última, el Reporte de Resultados y Mapa de Amenaza.

- **Método heurístico:**

De acuerdo con Asocars & Universidad de Magdalena (2011), es un método indirecto y se basa en categorizar y ponderar los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de movimientos en masa. Se encuentran dos tipos de análisis heurísticos; el primer método, mediante el análisis de la geomorfología y mapa de combinación cualitativo; y el segundo método, basado en combinación de mapas de factores. Ambos son métodos que permiten la regionalización o estudio a escala regional. Según Westen (2010), la susceptibilidad es determinada por un experto con base en su experiencia para decidir y asignar pesos.

- **Análisis Geomorfológico**

Según Asocars & Universidad de Magdalena (2011), es un método para producir un mapa combinado de amenaza determinado directamente en el campo por expertos. Es un método directo y se basa en la experiencia individual y uso de razonamiento por analogía; por lo tanto, los pasos son difíciles de formular.

- **Método de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)**

Según Asocars & Universidad de Magdalena (2011), es un método semicualitativo que compara por pares a partir de una matriz de atributos o variables que contribuyen a los movimientos de remoción en masa. Se estructura su jerarquía desde un nivel superior hacia un nivel más bajo, se construye matrices de comparación por pares, y cada elemento de un nivel superior se usa para comparar los elementos con el nivel seguidamente inferior con respecto a él. Luego para cada elemento en el nivel inferior se agregan sus valores pesados y se obtiene su prioridad global. Para poder hacer estas comparaciones se necesita una escala que indique cuántas veces un elemento domina sobre otro.

- **Análisis determinístico:**

Según Westen (2010), simula eventos utilizando modelos asistidos por computador basados en el conocimiento de los fenómenos físicos involucrados en la generación de eventos.

#### **5.4.5. TALUD INFINITO**

Es el método de equilibrio límite que más se ajusta para calcular factores de seguridad considerando saturación del suelo suponiendo una falla plana paralela a la pendiente del

talud. A su vez este método permite el análisis en condiciones estáticas, con presencia de niveles freáticos y con sismo (Cobos Miranda, y otros, 2010).

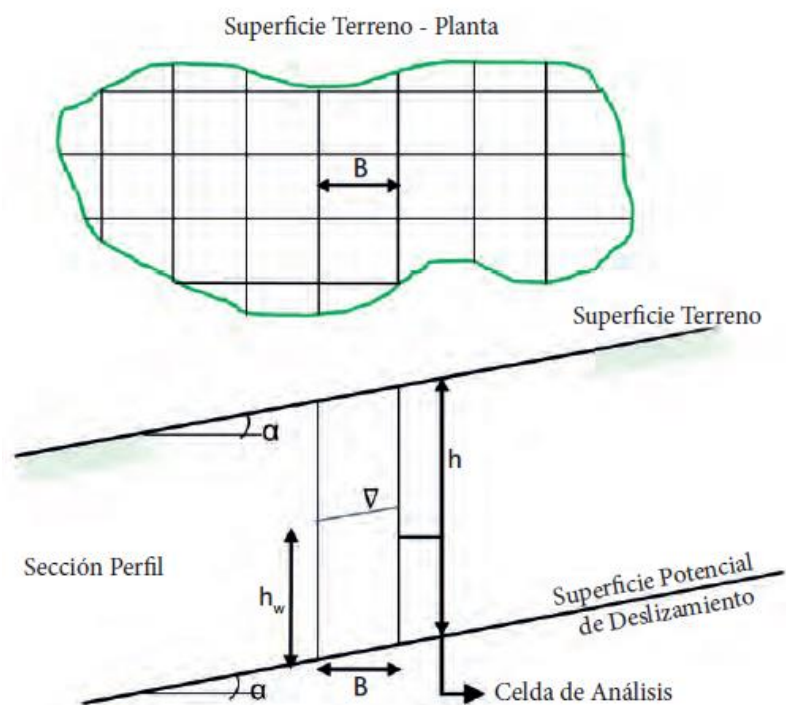
El cálculo del factor de seguridad se basa en el método de equilibrio límite. En este caso, se debe aplicar la ecuación de factor de seguridad para talud infinito en cada una de las celdas de trabajo. La ecuación del factor de seguridad (Ecuación 1) en este caso se expresa de la siguiente manera (SGC, 2015):

$$FS = \frac{(c' b \sec \alpha + (ybh \cos \alpha - kybh \sin \alpha - y_w h_w (\cos \alpha)^2) \tan \varphi')}{ybh \sin \alpha + kybh \cos \alpha} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde,  $c'$  y  $\varphi'$  – parámetros de resistencia del suelo en la base de la columna de suelo, en término de esfuerzos efectivos;  $c'$  – cohesión, en  $\text{kN/m}^2$ ;  $\varphi'$  – ángulo de fricción interna, en grados;  $y$  – peso unitario del suelo, en  $\text{kN/m}^3$ ;  $b$  – ancho de la tajada (ancho de la celda), en m;  $h$  – altura de suelo por encima de la superficie potencial de deslizamiento, en m;  $y_w$  – peso unitario del agua, en  $\text{kN/m}^3$ ;  $h_w$  – altura de la lámina de agua, determinada a partir del nivel freático correspondiente a una lluvia determinada, en m;  $\alpha$  – ángulo de inclinación de la superficie de falla, en grados;  $k$  – coeficiente de aceleración horizontal para un periodo de retorno de 100 años.

Los parámetros  $c'$  y  $\tan(\varphi')$  deben ser los valores medios obtenidos de ensayos de laboratorio para la unidad geotécnica definida. La profundidad de la superficie de falla se toma como la profundidad del suelo o la profundidad hasta el contacto entre dos unidades de diferente comportamiento mecánico. El ángulo  $\alpha$  se puede asumir como el ángulo de la superficie del terreno en la celda (SGC, 2015). Seguidamente se ilustran los parámetros antes indicados, en la figura 3.

**Figura 3.** Parámetros para análisis de amenaza según talud infinito



Fuente: SGC (2015)

A continuación se describen de una manera más amplia y detallada, los factores que influyen y desencadenan en el movimiento en masa, y que se trabajarán en el presente trabajo.

#### **5.4.6. FACTORES CONDICIONANTES**

De acuerdo con SGC (2017), los factores condicionantes están representados en las temáticas de geología, geomorfología y cobertura de la tierra y uso del suelo, y configuran la predisposición del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa, considerándose intrínsecos o inherentes al área de estudio dado que prácticamente no varían en el tiempo. Debido a la complejidad en el análisis y poca disponibilidad de información relacionada con la actividad antrópica y su variación temporal, se ha incluido la temática de cobertura de la tierra y uso del suelo como un factor condicionante de inestabilidad y no como un detonante. Factores tales como origen de los materiales, litología, pendiente, meteorización, morfología, vegetación, uso del suelo, entre otros, y su relación con la ocurrencia de movimientos en masa, son obtenidos a partir de la cartografía de unidades geológicas superficiales (UGS), subunidades geomorfológicas y de cobertura de la tierra y usos del suelo.



- **FACTOR CONDICIONANTE GEOLOGÍA Y SUELOS**

La Geología para ingeniería, muestra información sobre la distribución y propiedades físicas y mecánicas de las rocas y suelos, el agua subterránea, las características del relieve y procesos geodinámicos actuales” (SGC, 2015), este se puede elaborar a partir de las Unidades de Geología para Ingeniería UGI, que permiten diferenciar los materiales aflorantes entre suelo y rocas, definir los espesores de suelo y caracterizar los materiales de acuerdo con sus propiedades mecánicas. Por otra parte, la hidrogeología para SGC (2015), se centra en la obtención de los niveles freáticos como detonantes de movimientos en masa.

A partir de la geología, la litología, según INGEOMINAS (2009), citado por IDEAM (2012), representa las características de los diferentes tipos de rocas y depósitos que se agrupan según el tipo de roca ígnea, metamórfica y sedimentaria, sus características texturales y propiedades geomecánicas. Cada uno de los materiales ofrece diferentes respuestas ante agentes para su alteración y para determinar la susceptibilidad de cada uno. Los depósitos son los que presentan menos resistencia y mayor susceptibilidad a movimientos en masa.

La variable de suelo según IDEAM (2012), es la capa más superficial de la corteza terrestre, que resulta de la interacción de los factores y los procesos formadores de suelos. Esta variable incluye características físicas que se obtienen de los mapas de suelos, publicados por el Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” -IGAC-. El suelo es la entrada y el regulador inicial de la precipitación pluvial, y a lo largo del perfil de suelos, cada uno presenta diferentes características respecto a la estabilidad.

### **SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)**

Al clasificar los suelos de una manera más precisa se transmite una mejor descripción de su comportamiento, y al hacerse en un sistema de referencia conocido y especificado por la técnica, se transmite la información de una mejor manera (Cruz Velasco, 2009).

Este método es uno de los sistemas de clasificación de suelos más utilizados, además de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (Cruz Velasco, 2009), y parte en base a criterios como granulometría y límites de Atterberg (Grupo de Geotecnia, 2013).

Según Bañón Blázquez (1999), fue A. Casagrande quien en 1942 ideó el sistema genérico de clasificación de suelos, como la Clasificación general de Casagrande modificada, que fue empleado por el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los EE.UU. para la construcción de pistas de aterrizaje durante la II Guerra Mundial. Diez años más tarde, y vista la gran utilidad de este sistema en Ingeniería Civil, fue ligeramente modificado por el *Bureau of Reclamation*, naciendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); este sistema fue adoptado por la ASTM (American Society of Testing Materials) como parte de sus métodos normalizados.

Según Das (2001), citado por Quesada (2016), para clasificar apropiadamente un suelo utilizando este sistema, deben conocerse el porcentaje de grava, el porcentaje de arena, el porcentaje de limo y arcilla, los coeficientes de uniformidad y curvatura y el límite líquido e índice de plasticidad. Los primero cinco datos se obtienen a partir de un análisis granulométrico.

Dicha clasificación se vale de unos símbolos de grupo (tabla 2), consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades. Y en función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo (tabla 3).

**Tabla 2.** Símbolos de grupo para SUCS

Tipo de Suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrementemente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	H

Fuente: Bañón Blázquez (1999)

**Tabla 3.** Tipología de suelos para SUCS

Símbolo	Características generales		
GW	GRAVAS (>50% en tamiz #4)	Limpias (Finos <5%)	Bien graduadas
GP			Pobrementemente graduadas
GM		Con finos (Finos >12%)	Componente limoso
GC			Componente arcilloso
SW	ARENAS (<50% en tamiz #4)	Limpias (Finos <5%)	Bien graduadas
SP			Pobrementemente graduadas
SM		Con finos (Finos >12%)	Componente limoso
SC			Componente arcilloso
ML	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

Fuente: Bañón Blázquez (1999)

Como se deduce en la tabla 2, existe una clara distinción entre tres grandes grupos de suelos (Bañón Blázquez , 1999):

- a) Suelos de grano grueso (G y S): Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido en finos, empleando el tamiz #200.
- b) Suelos de grano fino (M y C): Formados por suelos con al menos un 50% de contenido en limos y arcillas.
- c) Suelos orgánicos (O, Pt): Constituidos fundamentalmente por materia orgánica. Son inservibles como terreno de cimentación.

De acuerdo con Cuchillo Cayturo (2015), el sistema SUCS cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla No 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas.

Se describen a continuación los diferentes grupos referentes a suelos gruesos y suelos finos (Cuchillo Cayturo, 2015):

## **SUELOS GRUESOS**

El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo: G (gravel) para gravas, y S (sand) para arenas y suelos arenosos. Las gravas y las arenas se separan con la malla No 4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla No 200) no pasa la malla No 4, y es del grupo genérico S, en caso contrario. Las gravas y las arenas se subdividen en cuatro tipos.

### **Grupos GW y SW**

Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo W (well graded). Para cumplir con los requisitos de estos grupos se garantiza en la práctica especificando que el contenido de partículas finas no sea mayor de un 5% en peso.

La graduación se juzga por medio de los coeficientes de uniformidad y curvatura ( $C_u$  y  $C_c$ , respectivamente). Para considerar una grava bien graduada se exige que su coeficiente de uniformidad sea mayor que 4; mientras que el de curvatura debe estar comprendido entre 1 y 3. En el caso de las arenas bien graduadas, el coeficiente de uniformidad será mayor que 6, en tanto el de curvatura debe estar entre los mismos límites anteriores.

### **Grupos GP y SP**

Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo P (poorly graded). Son de apariencia uniforme o presentan predominio de un tamaño o de un margen de tamaños, faltando algunos intermedios; deben satisfacer los requisitos señalados, en lo referente

al contenido de partículas finas (máximo 5%), pero no cumplen los requisitos de graduación indicados para su consideración como bien graduados.

### **Grupos GM y SM**

Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Símbolo M (del sueco mo y mjala). En estos grupos el contenido de finos afecta las características de resistencia y esfuerzo – deformación y la capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa; esto ocurre para porcentajes de finos superiores a 12%, en peso, por lo que esa cantidad se toma como frontera inferior de dicho contenido de partículas finas. La plasticidad de los finos en estos grupos varía entre nula y media; es decir, es requisito que los límites de plasticidad localicen a la fracción que pase la malla No 40 abajo de la línea A o bien que su índice de plasticidad sea menor que 4.

### **Grupos GC y SC**

Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo C (clay). Como en el grupo anterior, el contenido de finos debe ser mayor que 12%, en peso, y por las mismas razones expuestas para los grupos GM y SM. Sin embargo, en estos casos, los finos son de media a alta plasticidad; es ahora requisito que los límites de plasticidad sitúen a la fracción que pasa la malla No 40 sobre la línea A, teniéndose además, la condición que el índice plástico sea mayor que 7.

A los suelos gruesos con contenido de finos comprendido entre 5% y 12%, en peso, el sistema unificado los considera casos de frontera, adjudicándoles un símbolo doble. Por ejemplo, un símbolo GP-GC indica una grava mal graduada, con un contenido entre 5% y 12% de finos plásticos (arcillosos).

Cuando un material no cae claramente dentro de un grupo, deberán usarse también símbolos dobles, correspondientes a casos de frontera. Por ejemplo, el símbolo GW-SW se usará para un material bien graduado, con menos de 5% de finos y formada su fracción gruesa por iguales proporciones de grava y arena.

## **SUELOS FINOS**

También en este caso el sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, escogidas por un criterio similar al usado para los suelos gruesos y dando lugar a las siguientes divisiones: Limos inorgánicos, de símbolo genérico M (del sueco mo y mjala); Arcillas inorgánicas, de símbolo genérico C (clay); Limos y arcillas orgánicas, de símbolo genérico O (organic)

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido en dos grupos. Si éste es menor de 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (low compressibility). Los suelos finos con límite líquido mayor de 50%, o sea los de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico la letra H (high compressibility).

Los suelos altamente orgánicos, usualmente fibrosos, tales como turbas y suelos pantanosos, extremadamente compresibles, forman un grupo independiente de símbolo Pt (del inglés peat: turba).

### **Grupos CL y CH**

El grupo CL comprende a la zona sobre la línea A de la carta de plasticidad, definida por  $LL < 50\%$  e  $IP > 7\%$ , donde, LL: límite líquido; IP: índice de plasticidad. El grupo CH corresponde a la zona arriba de la línea A, definida por  $LL > 50\%$ .

### **Grupos ML y MH**

El grupo ML comprende la zona abajo de la línea A, definida por  $LL < 50\%$  y la porción sobre la línea A con  $IP < 4$ . El grupo MH corresponde a la zona abajo de la línea A, definida por  $LL > 50\%$ .

En estos grupos quedan comprendidos los limos típicos inorgánicos y limos arcillosos, los tipos comunes de limos inorgánicos y limos arcillosos. Los tipos comunes de limos inorgánicos y polvo de roca, con  $LL < 30\%$ , se localizan en el grupo ML. Los depósitos eólicos, del tipo loess, con  $25\% < LL < 35\%$  usualmente, caen también en este grupo.

Los suelos finos que caen sobre la línea A y con  $4\% < IP < 7\%$  se consideran como casos de frontera, asignándoles el símbolo doble CL-ML.

### **Grupos OL y OH**

Las zonas correspondientes a estos dos grupos son los mismos que la de los grupos ML y MH, respectivamente, si bien los orgánicos están siempre en lugares próximos a la línea A.

### **Grupos Pt**

Las pruebas de límites pueden ejecutarse en la mayoría de suelos turbosos. El límite líquido de estos suelos puede estar entre 300% y 500%, quedando su posición en la carta de plasticidad netamente abajo de la línea A; el índice plástico normalmente varía entre 100% y 200%. Para Constructor Civil (2011), estos suelos con elevada proporción de materia orgánica, usualmente fibrosos, como laturba y los fangos de muy alta compresibilidad, no se subdividen y se colocan en un grupo Pt, basándose en la clasificación a simple vista.

## **ANÁLISIS GRANUOMÉTRICO**

Para Das (2001), citado por Quesada (2016), el análisis granulométrico es la determinación del rango de tamaños de partículas presentes en un suelo, como un porcentaje del peso seco total. Los resultados del análisis granulométrico se presentan generalmente en gráficas semi-logarítmicas como curvas de distribución granulométrica, en las cuales se grafica el porcentaje de partículas inferiores a un tamaño en particular

en función de ese tamaño en escala logarítmica. Con la forma de dichas curvas se puede describir la gradación, que depende de la amplitud o estrechez del gráfico.

Berry & Reid (1993), citado por Quesada (2016), indican la posibilidad de expresar la gradación numéricamente mediante el Coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) (Ecuación 2) y el Coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) (Ecuación 3), que se definen de la siguiente manera:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde,  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  – tamaños de partícula para los cuales el 10, 30 y 60% del material, respectivamente, es más fino que esos tamaños.

### LÍMITES DE ATTERBERG

Para poder identificar un suelo fino entonces, es preciso realizar los ensayos de Límites de Plasticidad o Límites de Atterberg. Dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica en cuatro estados básicos, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido (Das, 2008, citado por (Quesada, 2016)).

Según Cuchillo Cayturo (2015), Atterberg llamó **Límite Líquido** a la frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico de un suelo, definiéndolo en una técnica de laboratorio que consiste en colocar el suelo remoldeado en una cápsula, formando en él una ranura y en hacer cerrar la ranura golpeando secamente la cápsula contra una superficie dura; el suelo tenía el contenido de agua correspondiente al límite líquido, según Atterberg, cuando los bordes inferiores de la ranura se tocaban, sin mezclarse, al cabo de un cierto número de golpes. Y la frontera convencional entre los estados plástico y semisólido fue llamada por Atterberg como **Límite Plástico**, y en términos de laboratorio, se rolaba un fragmento de suelo hasta convertirlo en un cilindro de un espesor; el agrietamiento y desmoronamiento del rollito, en un cierto momento, indicaba que se había alcanzado el límite plástico, y el contenido de agua en tal momento era la frontera deseada.

Con el uso de las fronteras anteriores se determina el Índice de Plasticidad (Ecuación 4) para definir la plasticidad (Cuchillo Cayturo, 2015). El índice de plasticidad se expresa con el peso en seco de la muestra de suelo, e indica el tamaño del intervalo de variación del contenido de humedad con el cual el suelo se mantiene plástico. El índice de plasticidad también da una buena indicación de la compresibilidad. Mientras mayor sea el  $I_p$ , mayor será la compresibilidad del suelo (Obando García, y otros, 2015).

$$I_p = LL - LP \quad \text{Ec. (4)}$$

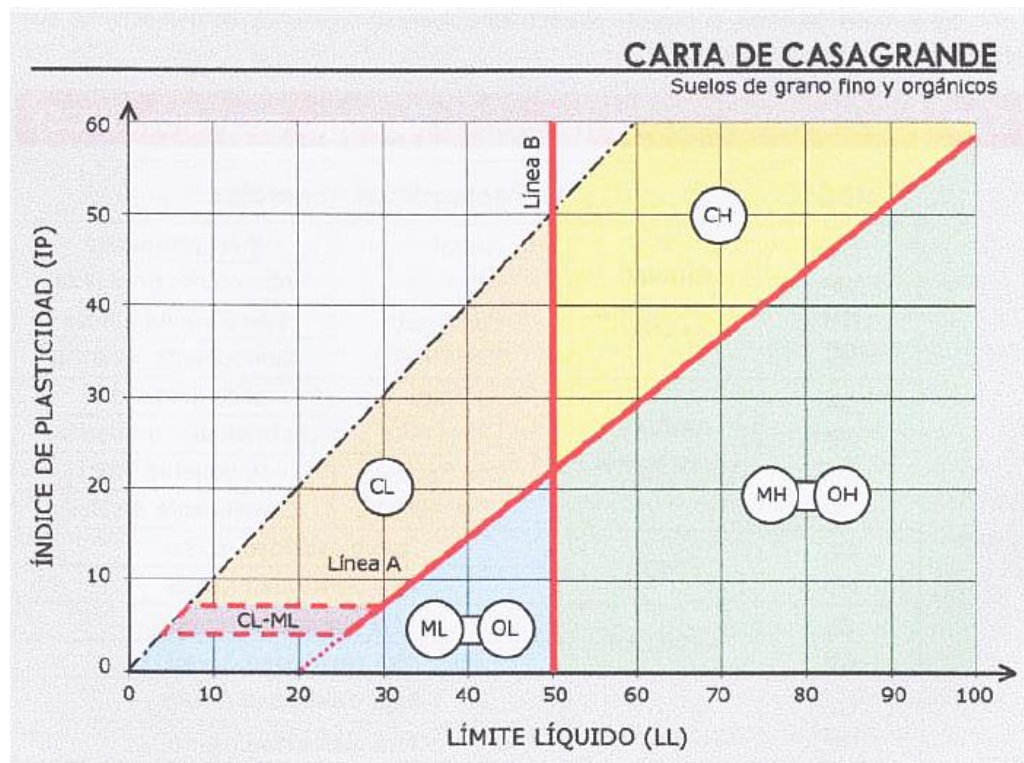
Donde,  $I_p$  – índice de plasticidad;  $LL$  – límite líquido; y  $LP$  – límite plástico.

Los límites líquido y plástico se ejecutan sobre material correspondiente a la fracción menor del Tamiz # 40 de todos los suelos, incluyendo gravas, arenas y suelos finos. Estos límites se utilizan con la Carta de Plasticidad de Casagrande (figura 4) para determinar el prefijo M, O ó C, dependiendo de la localización de las coordenadas de plasticidad del suelo dentro de la carta (Cuchillo Cayturo, 2015). De acuerdo con Bañón Blázquez (1999), tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la carta de Casagrande de los suelos cohesivos, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites:

Línea A:  $IP = 0.73 (LL - 20)$

Línea B:  $LL = 50$

**Figura 4.** Carta de Casagrande



Fuente: Bañón Blázquez (1999)

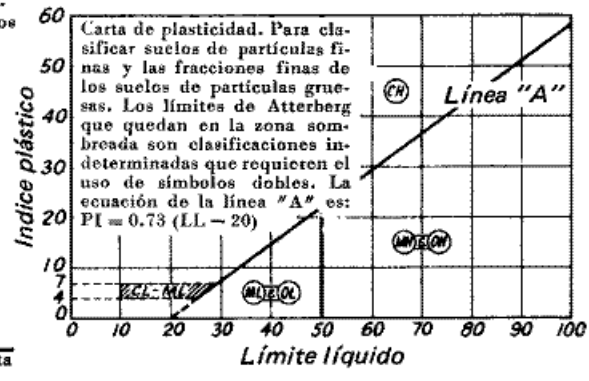
En la tabla 4, se muestra el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos S.U.C.S. de forma resumida, incluyendo identificación y descripción del tipo de suelo.

Tabla 4. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Divisiones principales	Símbolos del grupo	Nombres típicos	Criterios para la clasificación	
Suelos de partículas Gruesas Más del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas 50% o más de la fracción gruesa se retiene en la malla No. 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos	$C_u = D_{60}/D_{10}$ Mayor que 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3 No satisfacen ambos criterios para GW
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos	
		GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.	
	Gravas con finos	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla	Los límites de Atterberg quedan abajo de la línea "A", o el índice plástico es menor que 4. Los límites de Atterberg quedan arriba de la línea "A" y el índice plástico es mayor que 7
		SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos	
		SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos	
	Arenas limpias	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	$C_u = D_{60}/D_{10}$ Mayor que 6 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3 No se satisfacen ambos criterios para SW
		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	
		ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, limos arenosos o arcillos ligeramente plásticos	
	Suelos de Grano Fino 50% o más pasa la malla No. 200	Limos y arcillas con Límite Líquido de 50% o menor	CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas dobles
OL			Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
MH		Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos		
CH		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas		
OH		Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad		
Limos y arcillas con Límite Líquido mayor de 50%		Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos. Identificación visual o manual	

Clasificación según el porcentaje de finos  
 GW, GP, SW, SP  
 GM, GC, SM, SC  
 Clasificación indeterminada que requiere el uso de símbolos dobles

Pasa menos del 5% por la malla No. 200  
 Pasa más del 12% por la malla No. 200  
 Pasa del 5 al 12% por la malla No. 200



Fuente: Título D-2487 de la ASTM, citado por Constructor Civil (2011)

A partir de la clasificación de suelos, se pueden obtener algunas características de las tipologías de suelos según el SUCS, como se muestra en la tabla 5.



**Tabla 5.** Características de los suelos según el SUCS

DIVISIONES PRINCIPALES		SÍMBOLO	COMPORTAMIENTO MECÁNICO	CAPACIDAD DE DRENAJE	Densidad óptima P.M.	CBR In situ
SUELOS DE GRANO GRUESO	Gravas	GW	Excelente	Excelente	2.00 - 2.24	60 - 80
		GP	Bueno a excelente	Excelente	1.76 - 2.08	25 - 60
		GM $\left\{ \begin{array}{l} d \\ u \end{array} \right.$	Bueno a excelente	Aceptable a mala	2.08 - 2.32	40 - 80
			Bueno	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
		GC	Bueno	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
	Arenas	SW	Bueno	Excelente	1.76 - 2.08	20 - 40
		SP	Aceptable a bueno	Excelente	1.60 - 1.92	10 - 25
		SM $\left\{ \begin{array}{l} d \\ u \end{array} \right.$	Aceptable a bueno	Aceptable a mala	1.92 - 2.16	20 - 40
			Aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	10 - 20
		SC	Malo a aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	10 - 20
SUELOS DE GRANO FINO	Limos y arcillas (LL < 50)	ML	Malo a aceptable	Aceptable a mala	1.60 - 2.00	5 - 15
		CL	Malo a aceptable	Casi impermeable	1.60 - 2.00	5 - 15
		OL	Malo	Mala	1.44 - 1.70	4 - 8
	Limos y arcillas (LL > 50)	MH	Malo	Aceptable a mala	1.28 - 1.60	4 - 8
		CH	Malo a aceptable	Casi impermeable	1.44 - 1.76	3 - 5
		OH	Malo a muy malo	Casi impermeable	1.28 - 1.68	3 - 5
SUELOS ORGÁNICOS		Pt	Inaceptable	Aceptable a mala	-	-

Fuente: Bañón Blázquez (1999)

- **FACTOR CONDICIONANTE MORFOLOGÍA**

Está relacionada con los aspectos de la geometría del relieve e incluye fundamentalmente los gradientes topográficos y las formas relativas del mismo, descritos mediante adjetivos descriptivos y representativos (SGC, 2012). La morfología del relieve se debe a los procesos geomorfológicos endógenos o exógenos mayores, tales como: plegamiento, vulcanismo, denudación, sedimentación fluvial torrencial, sedimentación-erosión simultánea y sedimentación fluvial tranquila por desbordamiento lateral o sedimentación fluvial por diseminación, entre otros (Villota, 1997). El análisis morfológico del relieve incluye la comparación según la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales de una forma determinada del terreno. De acuerdo con SGC (2012), dicha comparación se puede expresar en términos de: contraste del relieve (diferencia de altitud de la geoforma entre la parte más alta y más baja de la misma), inclinación y longitud de la ladera, forma de la ladera (recta, cóncava, convexa, irregular, compleja), patrón de drenaje y forma de crestas y valles (SGC, 2017).

### MORFODINÁMICA

El relieve terrestre va evolucionando por unos procesos constructivos y destructivos afectados por la gravedad, que equilibra el relieve haciendo que las zonas elevadas

tiendan a caer y colmatar las zonas bajas. Esta variable se deriva del mapa de sistemas morfogénicos, a mayor frecuencia de morfodinámica, aumenta la susceptibilidad a deslizamientos (IDEAM, 2012).

De acuerdo con SGC (2017), estudia los procesos superficiales que afectan a una geoforma y que han ocurrido tanto en el pasado, como los que se encuentran activos en el presente o aquellos que se puedan activar en el futuro (INGEOMINAS, 2004a). Se refiere a la dinámica exógena relacionada con la actividad de agentes como el viento, agua, hielo y la acción de la gravedad terrestre, que modifica las geoformas preexistentes. Estos agentes, específicos para cada ambiente morfogenético, afectan y modelan la superficie terrestre con diferentes grados de intensidad, imprimiéndole al terreno características propias de cada ambiente (SGC, 2012).

La morfodinámica permite identificar y definir la evolución de los procesos denudacionales (procesos erosivos y movimientos en masa) que han ocurrido en un área determinada, particularmente en términos de estabilidad del terreno. Así mismo, el tipo de proceso y su intensidad, que contribuyen de manera importante en la evolución del paisaje. La morfodinámica permite explicar y clasificar los diferentes movimientos en masa que ocurren, han ocurrido o pueden ocurrir en el territorio, bajo unas condiciones naturales específicas.

**Catálogo e inventario de movimientos en masa.** Establece los movimientos en masa que afectaron o afectan a la zona de estudio, y contiene la fecha del evento, localización geográfica, clasificación del movimiento; y específicamente en el inventario, se debe caracterizar el movimiento. En el mapa de elementos geomorfológicos se incluyen los movimientos en masa inventariados, en el que se presenta en forma de polígonos (SGC, 2015).

## **PENDIENTES**

De acuerdo con SGC (2017), la pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, cuyo valor se expresa en grados de 0 a 90. La pendiente se puede considerar como un factor importante en la ocurrencia de movimientos en masa en la medida en que se relaciona directamente con las tensiones de corte tangenciales y normales en los materiales superficiales, e influye también en la distribución de agua en la ladera (Santacana, 2001). La pendiente es el principal factor geométrico a tener en cuenta en análisis de estabilidad y puede obtenerse como una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM.

Los rangos de pendiente presentados en la Tabla 6 pueden ser aplicados a la capa de información que será utilizada en el proceso de zonificación.

**Tabla 6.** Rangos de pendiente utilizados con propósitos de análisis de ingeniería y zonificación de amenazas por movimientos en masa

INCLINACIÓN (°)	PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO
0-2	Plano a casi plano. No hay denudación apreciable.
2-4	Suavemente inclinado. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (solifluxión) y fluviales (erosión laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos.
4-8	Inclinado. Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos.
8-16	Moderadamente abrupto. Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente solifluxión periglacial, reptación y ocasionalmente deslizamientos, también erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos.
16-35	Abrupto. Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos.
35-55	Muy abrupto. Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.
> 55	Extremadamente abrupto. Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente "denudación de escarpe"; susceptible a rodamiento de rocas.

Fuente: tomado de van Zuidam (1986).

Fuente: SGC (2017)

## CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA

Una cuenca hidrográfica o cuenca de drenaje de un río es el área limitada por un contorno al interior del cual las aguas de la lluvia que caen se dirigen hacia un mismo punto, denominado salida de cuenca o desembocadura. Es el área de captación de aguas de un río delimitado por el parteaguas. La cuenca hidrográfica actúa como un colector natural, encargada de evacuar parte de las aguas de lluvia en forma de escurrimiento; en esta transformación de lluvias en escurrimiento se producen pérdidas, debido a la evaporación y la percolación. Para su estudio, es necesario además del volumen total a la salida de la cuenca, su distribución espacial y temporal, para lo cual se necesita un buen conocimiento de sus características (Fuentes Junco, 2004).

El funcionamiento hidrológico de una cuenca se asemeja al de un colector que recibe la precipitación y la convierte en escurrimiento, esta transformación depende de las condiciones climáticas y de las características físicas, estableciendo una condición hídrica particular en cada unidad hidrológica; y la influencia de estos factores sobre la transformación de la precipitación en escurrimiento se formulan mediante parámetros morfométricos (Delgado, y otros, 2010). El análisis morfométrico de una cuenca de drenaje es de gran importancia para comprender e interpretar su comportamiento morfodinámico y su respuesta hidrológica (Méndez y Marcucci, 2006), citado por (Delgado, y otros, 2010). Por otra parte, Lux Cardona (2016) indica que la morfometría

de cuencas es el primer paso para determinar el comportamiento hidrológico de la misma ante eventos climatológicos.

Los métodos de análisis morfométricos del área de captación de una cuenca permiten medir las diferentes dimensiones de una cuenca, ya que ella no es un ente plano y posee tamaños a lo largo, ancho y profundidad. Según Gaspari (2012), citado por Lux Cardona (2016), el análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, de relieve y drenaje; que permite conocer las características físicas de una cuenca, lo cual permite realizar comparaciones entre varias cuencas, así como ayuda a la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo. Por su parte, López Cadenas del Llano (1998), citado por Delgado, y otros (2010), expresa que estos índices morfométricos expresen una caracterización básica de una cuenca, por medio de estudios de semejanza y comparación ante su respuesta hidrológica.

**Parámetros asociados a la forma de la cuenca.** De acuerdo con Lux Cardona (2016), la forma de la cuenca interviene de manera importante en las características de descarga de una corriente; la forma de la cuenca condiciona el escurrimiento superficial. Las cuencas de igual área y formas diferentes tienen un comportamiento hidrológico también diferente. La medición de factores de forma, permite comparar los resultados con los obtenidos en otras cuencas en las que se puede tener mayor información histórica de su comportamiento hidrológico.

### **Área (A)**

Se define según Lux Cardona (2016), como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido a un mismo cauce natural; corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona. Este parámetro se expresa normalmente en  $\text{km}^2$ . Para Fuentes Junco (2004), el área de una cuenca se encuentra relacionada con los procesos que en ella ocurren; es proporcional con la longitud de la misma, e inversamente proporcional con la densidad de drenaje y relieve relativo. Es la variable más utilizada para el cálculo de otras que, consecuentemente, serán dependientes de ella (Jardí, 1985).

### **Perímetro (P)**

Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de aguas, o el contorno de la cuenca; se expresa normalmente en metros o kilómetros (Lux Cardona, 2016); (Delgado, y otros, 2010)). De acuerdo con Jardí (1985), el perímetro y su forma están íntimamente relacionados con la litología y edad de la cuenca de drenaje; materiales blandos darán formas redondeadas, mientras que materiales más duros darán formas más quebradas o lobuladas.

### **Longitud de la cuenca (L) o Longitud axial**

Se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca (Lux Cardona, 2016), conocido como el punto más lejano de la cuenca (Delgado, y otros, 2010).

### **Ancho de la cuenca (B)**

Es la relación entre el área y la longitud de la cuenca (Ecuación 5). Las cuencas más ensanchadas poseen mayor susceptibilidad a generar crecidas, ya que el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más corto que en cuencas alargadas, en otras palabras, las cuencas ensanchadas tendrían menor tiempo de concentración y por ende, mayor rapidez para la concentración de los flujos de aguas superficiales, generando mayor violencia en sus crecidas (Lux Cardona, 2016).

$$B = \frac{A}{L} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde, B – ancho promedio, en km, A – área de la cuenca, en km<sup>2</sup> y L – longitud de la cuenca o longitud axial, en km.

### **Longitud del cauce principal**

De acuerdo con Fuentes Junco (2004), es la medida del escurrimiento principal de la cuenca, medido desde su parte más alta hasta la desembocadura. Este parámetro influye en el tiempo de concentración y en la mayoría de los índices morfométricos.

### **Forma de la cuenca**

De acuerdo con Horton R. E. (1932), citado por Lux Cardona (2016), principalmente, los factores geológicos son los encargados de moldear la fisiografía de una región y la forma que tienen las cuencas hidrográficas.

#### **- Factor de Forma (Kf)**

Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud axial de la cuenca (Ecuación 6). Este factor intenta medir cuán cuadrada (alargada) puede ser la cuenca (Lux Cardona, 2016), y el grado de achatamiento de la misma (Fuentes Junco, 2004). Fue introducida por Magette en 1976 (Jardí, 1985).

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad \text{Ec. (6)}$$

#### **- Coeficiente de compacidad (Kc)**

Propuesto por Gravelius, compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. Se define como la razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud de la divisoria que la encierra y

el perímetro de la circunferencia con igual área que la de la cuenca (Ecuación 7). Este coeficiente adimensional tiene por definición un valor de 1 para cuencas imaginarias de forma exactamente circular; y nunca los valores del coeficiente serán inferiores a 1 (Fuentes Junco, 2004); (Lux Cardona, 2016).

$$Kc = \frac{P}{Pc} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde, P – perímetro de la cuenca (longitud de la divisoria), Pc – perímetro de la circunferencia, y A – área de la cuenca.

De acuerdo a su resultado, se establecen tres categorías para la clasificación de la cuenca (Tabla 7) (Lux Cardona, 2016); (Fuentes Junco, 2004)):

**Tabla 7.** Formas de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad

Clase de forma	Índice de Compacidad	Forma de la cuenca
Kc 1	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval – redonda
Kc 2	1.26 a 1.50	Oval – Redonda a oval oblonga
Kc 3	1.51 o más de 2	Oval – oblonga a rectangular – oblonga

Fuente: Campos (1992), citado por Lux Cardona (2016).

#### - Índice de alargamiento (Ia)

Para Fuentes Junco (2004), este índice propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima encontrada en la cuenca, medida en el sentido del río principal, y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente a la dimensión anterior. Se calcula de acuerdo a la ecuación 8:

$$Ia = \frac{Lm}{l} \quad \text{Ec (8)}$$

Donde, Lm – longitud máxima de la cuenca, l – ancho máximo de la cuenca.

#### - Razón de Elongación (Re)

Lux Cardona (2016) explica que, es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma. La fórmula (Ecuación 9) es la propuesta por Shumm (1956):

$$Re = \frac{D}{Lc} = \frac{1.1284\sqrt{Ac}}{Lc} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde, D – diámetro de un círculo de la misma área de la cuenca, Lc – longitud de la cuenca y Ac – área de la cuenca.

#### Orientación de la cuenca

Determina la cantidad de sol que recibe durante el día y el ángulo de los rayos solares sobre la misma. Las cuencas con orientación N-S, aquellas cuyo cauce principal corre

hacia el norte o hacia el sur, no reciben insolación uniforme durante todo el día; en cambio, las cuencas con orientación E-W, aquellas en las cuales el cauce principal corre hacia el este o el oeste, reciben insolación en las dos vertientes durante todo el día; lo influye en la evaporación, la transpiración, en forma diferente.

**Parámetros asociados al relieve.** A mayor pendiente, corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes del cauce principal ((Navarrete, 2004), citado por (Lux Cardona, 2016). Las cuencas evolucionaron después de un levantamiento tectónico dando resultado a la erosión y degradación al paso del tiempo.

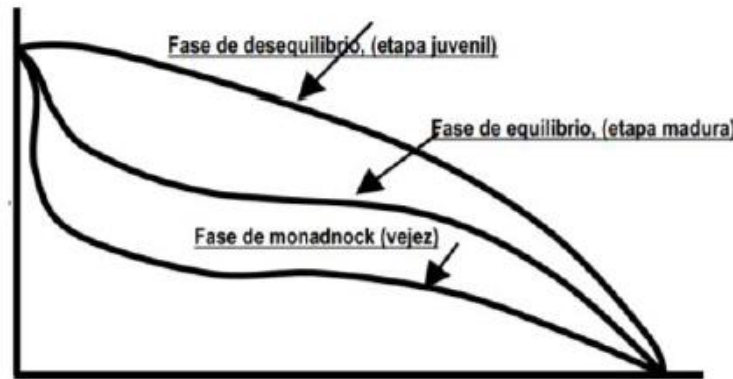
Según Tucker et al. (2001), citado por Delgado, y otros (2010), el grado en que el relieve del paisaje se divide en los distintos cursos de los arroyos, se ha reconocido como una propiedad morfométrica natural del terreno, que explica el funcionamiento hidrológico particular de una cuenca. Entre los parámetros se destacan:

### **Curva Hipsométrica**

La curva hipsométrica, según Strahler (1952), citado por Racca (2007), permite conocer la distribución de masa en la cuenca desde arriba hacia abajo. Para Delgado, y otros (2010), expone la distribución del área de acuerdo a su elevación por medio de una curva de doble eje de coordenadas, la cota altitudinal (msnm) en la ordenada, y el área por encima de una cota dada (en % ó km<sup>2</sup>) en las abscisas. Según Langbein et al. (1947), citado por Delgado, y otros (2010), una curva hipsométrica proporciona información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, representando gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. Permite caracterizar el relieve, obteniéndose a partir de las cotas de altitud y complementando con la estimación de la superficie acumulada por cada cota (Lux Cardona, 2016), considerándose entonces, la relación entre las alturas parciales y la altura total, así como las áreas parciales y la altura total.

Dentro de este parámetro, también se encuentra el **Análisis hipsométrico**, con el propósito de determinar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en que se encuentra la cuenca, como se muestra en la figura 5. Del estudio hipsométrico existen tres estados de las cuencas: Fase de desequilibrio o fase juvenil, en donde puede apreciarse altos índices de erosión y movimientos de tierras; fase de equilibrio o etapa de madurez, donde la cuenca entra en una etapa de estabilización respecto a los procesos erosivos; y Fase de Monandok o vejez, donde la mayor parte de su área es de pendientes consideradas como llanas o suaves.

**Figura 5.** Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión



Fuente: Caracterización morfométrica de la cuenca Alta del río Sauce Grande, Buenos Aires Argentina, según Strahler (1952), citado por Lux Cardona (2016).

### Histograma de frecuencia de altitudes

Es la representación de la superficie, en km<sup>2</sup> o en %, comprendida entre dos niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas; de esta forma, con diferentes niveles se puede formar el histograma. Este diagrama de barras puede ser obtenido de los mismos datos de la curva hipsométrica. Realmente contiene la misma información de ésta pero con una representación diferente, dándonos una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca (Oguerre, 2015). El análisis de frecuencia altimétrica se utiliza para describir, en altitudes sucesivas, las frecuencias de ciertos niveles de áreas parciales respecto al área total de la cuenca. Este se incluye junto con la curva hipsométrica.

### Elevación media de la cuenca

De acuerdo con Fuentes Junco (2004), la variación altitudinal de una cuenca hidrográfica incide directamente sobre su distribución térmica y por lo tanto en la existencia de microclimas y hábitats muy característicos de acuerdo a las condiciones reinantes; y da una base para caracterizar zonas climatológicas y ecológicas de ella. Existen diferentes métodos para su determinación, uno de ellos es la técnica Área – Elevación (Ecuación 10); para ello se necesita disponer de un mapa con curvas de nivel cuya separación altitudinal sea igual de nivel a nivel.

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot e_i}{A_t} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde,  $E_m$  – elevación media de la cuenca, en m;  $A_i$  – área de cada franja delimitada por las curvas de nivel consecutivas y la divisoria de aguas, en km<sup>2</sup>;  $e_i$  – promedio de las curvas de nivel que delimita cada franja, en m; y  $A_t$  – área total de la cuenca, en km<sup>2</sup>.



### Altitud mediana de la cuenca

A partir de la curva hipsométrica, se determina la elevación mediana equivalente al 50% del área de la cuenca, donde en el eje X del gráfico se aplicará el porcentaje (Lux Cardona, 2016), y que al cortar la curva, a partir de ese punto se traza una línea paralela al eje de las abscisas hasta cortar con el eje ordenado. El valor que se lee en el eje Y, es la mediana de altitud de la cuenca.

La elevación media es más alta que la mediana altitud, pero la diferencia es poca.

### Pendiente media de la cuenca (Pm)

Define la relación altitud-distancia según el eje central de la cuenca, y se indica en % (Delgado, y otros, 2010). Para Lux Cardona (2016), la pendiente caracteriza el relieve de la misma y permite hacer comparaciones entre cuencas para observar fenómenos erosivos que se manifiestan en la superficie. Una de las fórmulas para su cálculo (Ecuación 11) es:

$$J = 100 * \frac{(\sum L_i)(E)}{A} \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde, J – pendiente media de la cuenca, en %;  $\sum L_i$  – suma de las longitudes de las curvas de nivel dentro de los límites de la cuenca, en km; E – equidistancia entre curvas de desnivel, en km; y A – superficie de la cuenca, en km<sup>2</sup>.

Si crece la pendiente, aumenta la velocidad del agua, son directamente proporcionales; y con el aumento de la velocidad de agua, crece la capacidad de la erosión y la cantidad y el tamaño de los materiales arrastrados. De acuerdo con el resultado, se clasifica el relieve según la tabla 8. Además, en la tabla 9, se muestra el grado de erosión por relieve de acuerdo a la clasificación de relieve de la cuenca, según IGAC (1999), citado por (CORPOAIRE, 2002).

**Tabla 8.** Rangos de pendientes según %

Símbolo	Gradiente %	Descripción
a	0-3	Plano
b	3-7	Ligeramente inclinado
c	7-12	Moderadamente inclinado
d	12-25	Fuertemente inclinado
e	25-50	Ligeramente escarpado
f	50-75	Moderadamente escarpado
g	>75	Fuertemente escarpado

Fuente: IGAC (2013), citado por (MinAmbiente, 2014).

**Tabla 9.** Escalas utilizadas para el relieve

Pendiente (%)	Clasificación del relieve	Grado de erosión por relieve
0 – 3	Plano a ligeramente plano	Ligera

3 – 7	Ligeramente inclinado	Moderada
7 – 12	Moderadamente inclinado	
12 – 25	Muy inclinado	
25 – 50	Moderadamente escarpado	Severa
50 – 75	Escarpado	

Fuente: IGAC (1999), citado por CORPOAIRE (2002)

### **Pendiente del cauce principal**

Un método para estimarse, es el de los valores extremos, que consiste en determinar el desnivel altitudinal entre los puntos más elevado y más bajo del río principal y luego dividirlo entre la longitud del mismo (Ecuación 12).

$$S = \frac{H}{L} * 100 \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde, S – pendiente media del cauce, en %; H – desnivel, en m.s.n.m.; y L – longitud del cauce, en m.

### **Desnivel altitudinal**

Para Fuentes Junco (2004), es el valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja. Este se relaciona con la variabilidad climática y ecológica, debido a que con mayor cantidad de pisos altitudinales que presente, puede albergar más ecosistemas al presentarse variaciones importantes en su precipitación y temperatura.

### **Coefficiente de masividad (Km)**

Fuentes Junco (2004) lo explica como el que representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie (Ecuación 13). Km crece mientras que la altura media del relieve aumenta y las superficies de la cuenca disminuyen; por consiguiente, toma valores bastante grandes para cuencas muy pequeñas y montañosas, y disminuye para las cuencas extensas con poco relieve acentuado. Este índice sirve para estudiar el fenómeno de erosión influenciado por parte del relieve.

$$Km = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m)}}{\text{Área de la cuenca (km}^2\text{)}} \quad \text{Ec. (13)}$$

### **Coefficiente orográfico (Ko)**

Este resulta de la combinación entre la altura media de las cuencas y su coeficiente de masividad (Ecuación 14), y relaciona las dos variables esenciales del relieve: la altura, que influye sobre la energía potencial del agua; y la pendiente, la cual ejerce acción sobre la escorrentía.

$$Ko = H * Km \quad \text{Ec. (14)}$$

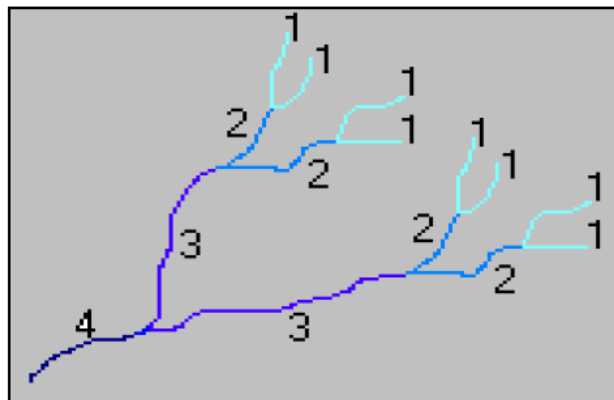
Donde, H – altura media de la cuenca; y Km – coeficiente de masividad.

**Parámetros relativos al drenaje.** Generalmente una densidad de drenaje alta se asocia con materiales impermeables a nivel superficial, vegetación dispersa y relieve montañoso, además de ello, indica que la cuenca posee suficiente drenaje para cuando se presentan las tormentas, según Lux Cardona (2016).

### Orden de corriente

El orden es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca (Lux Cardona, 2016). El método de Strahler para la clasificación es el más común, que explicado por Fuentes Junco (2004), considera una corriente de primer orden, aquella portadora de aguas de nacimientos y que no tiene afluentes; cuando dos corrientes de primer orden se unen, resulta una corriente de orden dos; una corriente de tercer orden donde confluyen dos de segundo orden; y así sucesivamente (figura 6). De manera general, cuando dos corrientes de orden  $i$  se unen, la corriente resultante es de orden  $i+1$ . Cuando una corriente se une con otra de orden mayor, resulta una corriente que conserva el mayor orden (Lux Cardona, 2016).

**Figura 6.** Número de ordenes de corriente según Strahler



Fuente: Ordenes de corriente según Strahler (Gregory, Op. Cit.), citado por (Fuentes Junco, 2004).

Según Fuentes Junco (2004), este índice indica el grado de estructura de la red de drenaje; mientras mayor sea el grado de corriente, mayor será la red y su estructura definida, y también mayor posibilidad de erosión.

### Relación de bifurcación (Rb)

Según Lux Cardona (2016), Horton también introdujo este concepto para definir el cociente entre el número de cauces de cualquier orden ( $N_u$ ) y el número de cauce de orden ( $u$ ) del siguiente orden superior, es decir (Ecuación 15):

$$Rb = \frac{N_u}{N_{u-1}} \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde,  $N_u$  – número total de cauces con orden  $U$ ,  $U$  – número de orden de cauce.

Las relaciones de bifurcación varían de 3.0 a 5.0 para cuencas en las cuales las estructuras geológicas no distorsionan el modelo de drenaje. En condiciones naturales y en general, el valor promedio es 3.5 (Lux Cardona, 2016). D. R. Coates, citado por Lux Cardona (2016), encontró que la Rb de corrientes de primero a segundo orden varía de 4.0 a 5.1 y de las de segundo a tercer orden varía de 2.8 a 4.9. Para Oguerre (2015), el valor mínimo de Rb es 2 y generalmente nunca se encuentran valores cercanos a éste bajo condiciones naturales.

Los materiales geológicos duros y resistentes tales como el granito, gneiss, arenisca y cuarcitas, tienden a originar bajas densidades de drenaje; esto es debido a que la erosión fluvial es difícil; en materiales blandos, tales como margas y arcillas, las cuencas por pequeñas que sean, pueden suministrar la escorrentía suficiente como para erosionar el cauce. Los materiales muy permeables, como las arenas o las gravas tienden a originar bajas densidades de drenaje, dado que la infiltración es grande (Strahler Arthur, op.cit).

### **Relación de longitudes medias de los ríos (rL)**

Es la razón existente entre la longitud media de los ríos de un orden dado y la de los ríos del orden inferior a ese (Ecuación 16). Oguerre (2015), la define como el promedio de la longitud de las corrientes de cualquier orden sobre la longitud promedio de las corrientes de orden inmediatamente inferior.

$$rL = \frac{L_x}{L_{x-1}} \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde,  $L_x$  – longitud media de los ríos de orden X, X – número de orden.

### **Densidad de drenaje (Dd)**

La red de drenaje toma sus características, influenciada por las lluvias y la topografía. Para Fuentes Junco (2004), éste índice permite conocer la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca, y en general, una mayor densidad indica mayor estructuración de la red fluvial o que existe mayor potencial de erosión. Indica la relación entre la sumatoria de la longitud de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma (Ecuación 17) (López Cardenas del Llano, 1998; citado por Delgado, y otros, 2010). De acuerdo con Delgado, y otros (2010), Dd fue establecida por una de las leyes de Horton; y se considera que caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca, además explica el grado de relación entre el tipo de red de drenaje y la clase de material predominante (Henaos, 1988; López Cardenas de Llano, 1998; citados por (Delgado, y otros, 2010). La densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca (Fuentes Junco, 2004).

$$Dd = \frac{L_n}{A} \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde, Dd – densidad de drenaje, en km/km<sup>2</sup>;  $L_n$  – sumatoria de la longitud de todos los ríos, en km; y A – superficie de la cuenca, en km<sup>2</sup>.

## Tiempo de concentración (Tc)

Tiempo que tarda en llegar una gota de agua de lluvia desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca hasta la sección de salida (Lux Cardona, 2016), y corresponde al lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial (Fuentes Junco, 2004).

Existen una serie de fórmulas que permiten el cálculo de este tiempo desarrolladas por diversos autores (Fuentes Junco, 2004). Algunas de las fórmulas (Ecuación 18 – 21) que se emplean son (Vélez Upegui, y otros, 2011):

$$\text{Kirpich: } tc = 0.0078 * Lp^{0,77} * S^{-0,385} \quad \text{Ec. (18)}$$

$$\text{Témez: } Tc = 0,3 * \left( \frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76} \quad \text{Ec. (19)}$$

$$\text{Passini: } Tc = 0.023 * \left( A * \frac{L}{S} \right)^{0,5} \quad \text{Ec. (20)}$$

$$\text{Giandotti: } Tc = \frac{4*\sqrt{A}+1,5*L}{25,3*\sqrt{S*L}} \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde, Tc – tiempo de concentración, en horas; tc – tiempo de concentración, en min; L – longitud del cauce principal, en km; Lp – longitud del cauce principal, en pies; S – pendiente del cauce principal, en m/m; y A – área de la cuenca, en km<sup>2</sup>.

- **FACTOR CONDICIONANTE COBERTURA Y USO DEL SUELO**

De acuerdo con SGC (2015), está relacionado con la estimación del número de curva CN, del método lluvia-esorrentía, para estimar el aporte de la lluvia para el nivel freático. En esta variable se valoran los aspectos antrópicos relevantes. El valor de CN depende de la cobertura y uso del terreno, al igual que de la clasificación hidrológica del suelo superficial, la cual tiene en cuenta la textura, espesor y origen de los suelos. Los mapas de cobertura y uso del suelo se elaboran con la metodología de Corine Land Cover adaptada por IDEAM (2010).

La Cobertura de la tierra incluye la vegetación y las actividades humanas que cubren la superficie, es el resultado de la interacción de la dinámica natural geológica, geomorfológica, suelos, clima y comunidades bióticas, interrumpida por el hombre para su supervivencia y desarrollo, generando cambios en la forma del relieve, en gran número produciendo deslizamientos, flujos, avalanchas y erosión. La incidencia de todo lo que implica la cobertura, su tipo, la densidad, la capacidad de interceptación de agua lluvia y el área de protección de cobertura vegetal, constituye un factor de resistencia o favorecimiento de procesos morfodinámicos como la erosión y los movimientos en masa (IDEAM, 2012).

## **COBERTURA DE LA TIERRA**

La Cobertura de la tierra, es la cobertura (bio) física que se observa sobre la superficie de la tierra (Di Gregorio, 2005), en un término amplio no solamente describe la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra, sino que también describen otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua (IDEAM, 2014).

Según IDEAM (2014), en términos puntuales para la delimitación de las coberturas de la Tierra, el IDEAM (1997) describe la cobertura como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima.

Para SGC (2015), la cobertura vegetal influye en la estabilidad de los depósitos de suelos y macizos rocosos mediante efectos que se pueden clasificar como hidrológicos y mecánicos. Los hidrológicos comprenden efectos sobre la capacidad de infiltración, la humedad y la evapotranspiración. Entre los mecánicos están el incremento de la resistencia que le proporcionan las raíces al suelo, la protección frente a la erosión o la sobrecarga que los árboles pueden generar sobre las laderas.

Los mapas de cobertura y uso del terreno se elaborarán de acuerdo con la metodología Corine Land Cover, adaptada para Colombia por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam) (2010) (SGC, 2015).

Dentro del programa CORINE (Coordination of Information on the Environment) promovido por la Comisión de la Comunidad Europea fue desarrollado el proyecto de cobertura de la tierra "CORINE Land Cover" 1990 (CLC90), el cual definió una metodología específica para realizar el inventario de la cobertura de la tierra. La base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas (IDEAM, 2010). El proceso de adopción de estandarización de la metodología y la leyenda de coberturas terrestres de Colombia, inició desde el año 2004 con la adaptación a nivel nacional de la metodología europea CORINE Land Cover - CLC; este proceso surge como respuesta a la necesidad que tenía el país de unificar y armonizar las diferentes metodologías y leyendas de cobertura terrestre empleadas hasta el momento, todo con el fin último de establecer un sistema de monitoreo que le permita generar información actualizada, confiable y trazable; dado que la amplia variabilidad de sistemas de clasificación no lo permitían (IDEAM, 2014).

La leyenda nacional de las coberturas de la tierra del país a escala 1:100.000, se entrega como un nuevo paso en el proceso de consolidación de una propuesta metodológica para realizar la caracterización de las coberturas naturales y antropizadas presentes en el territorio colombiano. Ésta permite unificar los criterios, conceptos y métodos para conocer cómo está cubierto el país, a partir de la adaptación realizada de la metodología europea CORINE Land Cover a nuestro entorno. La actual leyenda nacional tiene sus

bases en el proyecto para la elaboración del Mapa de Coberturas de la Tierra de la Cuenca Magdalena-Cauca, escala 1:100.000, desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (Cormagdalena), durante los años 2004 a 2007, en el cual se hace la adaptación de la metodología CORINE Land Cover a Colombia y se elabora la leyenda de coberturas de la tierra para la cuenca. Posteriormente, en el desarrollo del proceso de preparación de las coberturas de la tierra del resto del país, el IDEAM, junto con el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi), el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH) e IGAC, y la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN), y con la participación de técnicos de otras entidades, elabora la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra (IDEAM, 2010).

En la Tabla 10 se presenta la síntesis de la leyenda unificada que se debe utilizar para elaborar cartografía de coberturas de la tierra de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover para Colombia.

**Tabla 10.** Unidades de coberturas de la tierra para la leyenda nacional, escala 1:100.000, de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia.

<b>LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA - COLOMBIA</b>	
<b>1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS</b>	<b>3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES</b>
<b>1.1. Zonas urbanizadas</b>	<b>3.1. Bosques</b>
1.1.1. Tejido urbano continuo	3.1.1. Bosque denso
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme
<b>1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación</b>	3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
1.2.3. Zonas portuarias	3.1.2. Bosque abierto
1.2.4. Aeropuertos	3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme
1.2.5. Obras hidráulicas	3.1.2.1.2. Bosque abierto alto inundable
<b>1.3. Zonas de extracción minera y escombreras</b>	3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme
1.3.1. Zonas de extracción minera	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	3.1.3. Bosque fragmentado
<b>1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas</b>	3.1.4. Bosque de galería y ripario
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3.1.5. Plantación forestal
1.4.2. Instalaciones recreativas	<b>3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva</b>
	3.2.1.1. Herbazal denso
<b>2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS</b>	3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado

<b>2.1. Cultivos transitorios</b>	3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
2.1.1. Otros cultivos transitorios	3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos
2.1.2. Cereales	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
2.1.4. Hortalizas	3.2.1.1.2.3. Arracachal
2.1.5. Tubérculos	3.2.1.1.2.4. Helechal
<b>2.2. Cultivos permanentes</b>	3.2.1.2. Herbazal abierto
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
2.2.1.2. Caña	3.2.2.1. Arbustal denso
2.2.1.3. Plátano y banano	3.2.2.2. Arbustal abierto
2.2.1.4. Tabaco	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
2.2.1.5. Papaya	<b>3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación</b>
2.2.1.6. Amapola	3.3.1. Zonas arenosas naturales
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	3.3.2. Afloramientos rocosos
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2.2.2.2. Café	3.3.4. Zonas quemadas
2.2.2.3. Cacao	3.3.5. Zonas glaciares y nivales
2.2.2.4. Viñedos	<b>4. AREAS HÚMEDAS</b>
2.2.2.5. Coca	<b>4.1. Áreas húmedas continentales</b>
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	4.1.1. Zonas Pantanosas
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos	4.1.2. Turberas
2.2.3.2. Palma de aceite	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
2.2.3.3. Cítricos	<b>4.2. Áreas húmedas costeras</b>
2.2.3.4. Mango	4.2.1. Pantanos costeros
2.2.4. Cultivos agroforestales	4.2.2. Salitral
2.2.5. Cultivos confinados	4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar
<b>2.3. Pastos</b>	<b>5. SUPERFICIES DE AGUA</b>
2.3.1. Pastos limpios	<b>5.1. Aguas continentales</b>
2.3.2. Pastos arbolados	5.1.1. Ríos (50 m)
2.3.3. Pastos enmalezados	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
<b>2.4. Áreas agrícolas heterogéneas</b>	5.1.3. Canales
2.4.1. Mosaico de cultivos	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	5.2. Aguas marítimas
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	5.2.1. Lagunas costeras
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5.2.2. Mares y océanos



Fuente: IDEAM (2010)

## USOS DEL SUELO

Según el (SGC, 2015), el alcance de la información de cobertura y uso del suelo está relacionado con la estimación del denominado número de curva (CN, por su sigla en inglés), del método lluvia – escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, el cual se incorpora para estimar el aporte de la lluvia en términos de nivel freático, lámina o altura de agua, al considerar la lluvia como un detonante de movimientos en masa. En materia de cobertura y uso del suelo se deberán valorar los aspectos antrópicos relevantes en la zonificación de amenaza por movimientos en masa, como cambios en el uso, cortes de laderas y explanaciones.

El método del número de curva (CN) fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU. (Natural Resources Conservation Service – NRCS), originalmente llamado Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service – SCS) para calcular la precipitación efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad (Lavao Pastrana, 2014).

Una vez identificada la cobertura vegetal con la metodología Corine Land Cover se permite clasificar el uso del suelo de la zona de análisis, mediante la aplicación de la teoría del Número de Curva (SGC, 2015), a partir de la tabla 14.

- **FACTOR CONDICIONANTE CLIMA Y ZONAS DE VIDA**

### Coeficiente Pluviométrico

Se aplica el cálculo del coeficiente pluviométrico para ayudar a determinar los regímenes pluviométricos de las regiones, poniendo de manifiesto un enfoque sobre la forma en que se distribuyen las distribuciones a través del año (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1981). Esta relación se conoce como Coeficiente relativo de Angot (1897) y resulta de dividir el número que expresa la lluvia media observada en un mes dado por la que se observaría si la suma anual estuviese igualmente repartida a lo largo del año. Para tener en cuenta la desigualdad de los meses, la suma anual se divide por 365 y se multiplica por el número de días del mes considerado; el resultado sirve de divisor a la media mensual observada (Ecuación 22). Los coeficientes pluviométricos pueden emplearse para establecer curvas que muestren el régimen con mayor claridad (Albentosa Sánchez, 1990).

$$\text{Coef pluviométrico} = \frac{p*365}{P*d} \quad \text{Ec. (22)}$$

Donde, p – precipitación media mensual, en mm; P – precipitación media anual, en mm; y d – días del mes considerado.

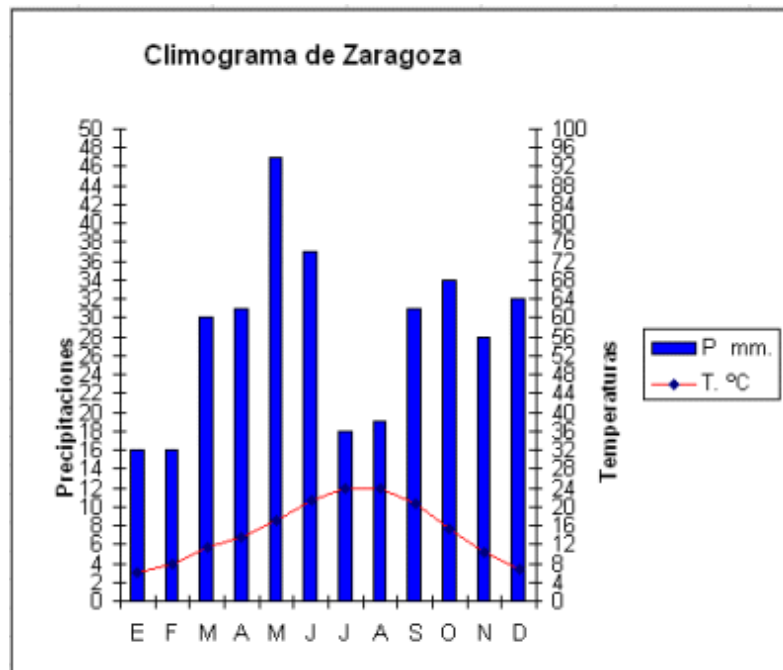
Para (Albentosa Sánchez, 1990), se trata de un índice que expresa el carácter más o menos lluvioso del mes considerado en el conjunto del año, y matiza considerablemente la distribución de las precipitaciones.

## Climograma

A diferencia del tiempo, que es el estado de la atmósfera en un momento dado y en un lugar específico, el clima hace referencia al promedio de las condiciones meteorológicas en ese lugar. Para estudiar el clima, entonces, es necesario registrar durante muchos años (más de 10) los diversos elementos climáticos (temperatura, precipitación, presión, humedad, viento, nubosidad y otros fenómenos meteorológicos, tales como nieve y granizo), calcular el promedio de dichos registros y determinar sus variaciones a lo largo del tiempo (EDUC.AR, 2013).

También llamado diagrama climático, ombrograma o diagrama ombrotérmico (EcuRed, 2017), un climograma es un gráfico de doble entrada que sintetiza y representa conjuntamente las características principales del clima de un lugar determinado. Para tener una idea acerca del clima de una zona, se grafican conjuntamente los comportamientos anuales de la precipitación y la temperatura como los elementos climáticos más importantes (figura 7); con el fin de averiguar si en el lugar existe un período invernal y otro estival, si la precipitación es abundante durante todo el año o si hay períodos de sequía, conociendo la variación de los valores de estos elementos mes a mes a lo largo del año (EDUC.AR, 2013).

**Figura 7.** Climograma con información de precipitación y temperatura



Fuente: Climograma, EDUC.AR (2013)

De acuerdo con Strahler, A (1975), citado por (Luengo Ugidos, 2015), existe una caracterización climática mensual (tabla 11) basada en la temperatura media y la precipitación, variables utilizadas anteriormente en el diagrama ombrotérmico, según la U.S. Air Force (1947).

**Tabla 11.** Caracterización climática mensual basada en la temperatura media y la precipitación, según la U.S. Air Force, Aeronautical Chart Service, 1947.

<b>Caracterización climática mensual basada en la temp. media y la precipitación</b>				
Según la U.S. Air Force, Aeronautical Chart Service, 1947.				
	Temp. media mensual (°C)	Precipitación media mensual (mm)		
		Seco	Húmedo	Muy húmedo
<i>MUY CÁLIDO</i>	> de 30	< 100	>=100 <305	>= 305
<i>CÁLIDO</i>	>20 <=30	< 75	>=75 <305	>= 305
<i>TEMPLADO</i>	>10 <=20	< 50	>=50 <200	>= 200
<i>FRESCO</i>	>0 <=10	< 25	>=25 <127	>= 127
<i>FRÍO</i>	>-10 a <=0	< 25	>=25 <75	>= 75
<i>MUY FRÍO</i>	>-20 <=-10			
<i>Extremadamente FRÍO</i>	>-40 <=-20			
<i>ULTRA-FRÍO</i>	<=-40			

Fuente: Strahler, A (1975): Geografía física, citado por Luengo Ugidos (2015).

### Índice de Concentración de la Precipitación

El Índice de Concentración de la Precipitación (PCI), refleja la estacionalidad de las lluvias. Para Schulze (1997), citado por (Pizarro T., y otros, 2008), el término concentración se refiere al comportamiento de las mismas, ya sea en su cantidad anual, en su variación estacional y en la duración de la estación lluviosa de un año cualquiera, es decir, si las precipitaciones de la época lluviosa se concentran sobre un período corto o más largo del año. Según (Pizarro T., y otros, 2008), con el fin de estimar la agresividad de las lluvias, a partir de la variabilidad temporal de las precipitaciones mensuales, Oliver (1980) propuso el Índice de Concentración de las Precipitaciones (PCI) (Ecuación 23). De acuerdo con (IDEAM, 2014), los mayores valores del PCI indican alta estacionalidad, es decir grandes diferencias entre temporadas secas y lluviosas; y valores pequeños indican poca diferencia entre los meses lluviosos y los meses secos.

$$PCI_j = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} p_{ij}^2}{P_j^2} \quad \text{Ec. (23)}$$

Donde, PCI<sub>j</sub> – índice de concentración de la precipitación para el año j, en %; p<sub>ij</sub> – precipitación mensual del mes i, en mm; y P<sub>j</sub> – precipitación anual del año j, en mm.

De acuerdo con el resultado de PCI, el comportamiento estacional se clasifica según Lobo et al (2005), citado por (Pizarro T., y otros, 2008) y (Velasco, y otros), con la tabla 12.

**Tabla 12.** Clasificación del Índice de Concentración de las Precipitaciones (PCI), propuesta por Lobo (2005).

PCI	Descripción de la concentración
8,3 – 10	Uniforme
10 – 15	Moderadamente estacional
15 – 20	Estacional
20 – 50	Altamente estacional
50 – 100	Irregular

Fuente: Lobo et al (2005), citado por (Pizarro T., y otros, 2008); (Velasco, y otros).

### Agresividad de las Lluvias

Fournier (1960), citado por (Pizarro T., y otros, 2008), crea el índice de Agresividad Climática o Índice de Fournier (FI), el cual se obtiene con los volúmenes de precipitación registrados representativos de la zona de estudio, utilizando la siguiente expresión (Ecuación 24):

$$FI_j = \frac{p_{\max j}^2}{P_m} \quad \text{Ec. (24)}$$

Donde, FI<sub>j</sub> – índice de Fournier para el año j; p<sub>max j</sub> – precipitación correspondiente al mes más lluvioso del año j, en mm; y P<sub>m</sub> – precipitación media anual, mm.

El FI solo considera el mes de mayor precipitación, despreciando los valores del resto de los meses. Sin embargo, es necesario considerar que existen zonas cuyo régimen de precipitaciones presenta más de una máxima mensual, así como también zonas donde los valores pluviométricos son en general elevados (Jordán y Bellinfante, 2000), citado por (Pizarro T., y otros, 2008). Para corregir posibles desviaciones, Arnoldus (1978), citado por (Pizarro T., y otros, 2008), propone una modificación del FI que considera las precipitaciones de cada mes, dando origen al Índice Modificado de Fournier (MFI) definido de la siguiente forma (Ecuación 25):

$$MFI_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (p_{ij})^2}{P_m} \quad \text{Ec. (25)}$$

Donde, MFI<sub>j</sub> – índice modificado de Fournier para el año j; p<sub>ij</sub> – precipitación mensual del mes i del año j, en mm; y P<sub>m</sub> – precipitación media anual, en mm.

De acuerdo con el resultado de MFI, se clasifica el índice según CEC (1992), citado por (Pizarro T., y otros, 2008), con la tabla 13.

**Tabla 13.** Clasificación del Índice Modificado de Fournier (MFI), propuesta por CEC (1992)

Clase	MFI	Descripción de la agresividad
1	<60	Muy baja
2	60 – 90	Baja
3	90 – 120	Moderada
4	120 – 160	Alta
5	>160	Muy alta

Fuente: CEC (1992), citado por (Pizarro T., y otros, 2008)

### Zonas de Vida según Holdridge

Una zona de vida es un grupo de asociaciones vegetales dentro de una división natural del clima, las cuales tomando en cuenta las condiciones edáficas y las etapas de sucesión, tienen una fisonomía similar en cualquier parte del mundo (UNAD, 2013).

El concepto de zonas de vida fue desarrollado por el naturalista estadounidense Clinton Hart Merriam en 1889 como una forma de describir áreas con similares comunidades de plantas y animales; él observó que los cambios en estas comunidades con el aumento de la latitud, para una elevación constante, eran similares a los cambios observados con un aumento en la elevación para una latitud constante (Rodríguez, 2013).

De acuerdo con UNAD (2013), el sistema de Holdridge de Zonas de Vida permite clasificar las diferentes áreas del mundo, desde el ecuador hasta los polos (regiones latitudinales) y desde el nivel del mar hasta las nieves perpetuas (pisos altitudinales). En dicha metodología (figura 8), cada zona está representada por un hexágono en un modelo matemático, donde la respectiva unidad está definida por valores promedio anuales de biotemperatura y precipitación, lo cual indica que dentro de cada hexágono, se ubican series de Zonas de Vida con idénticas condiciones de biotemperatura, precipitación y humedad (Holdridge, 1966, 1967, 1972, 1982, citado por el IGAC, 1988).

Esta clasificación se basa en los siguientes factores (UNAD, 2013); (Rodríguez, 2013):

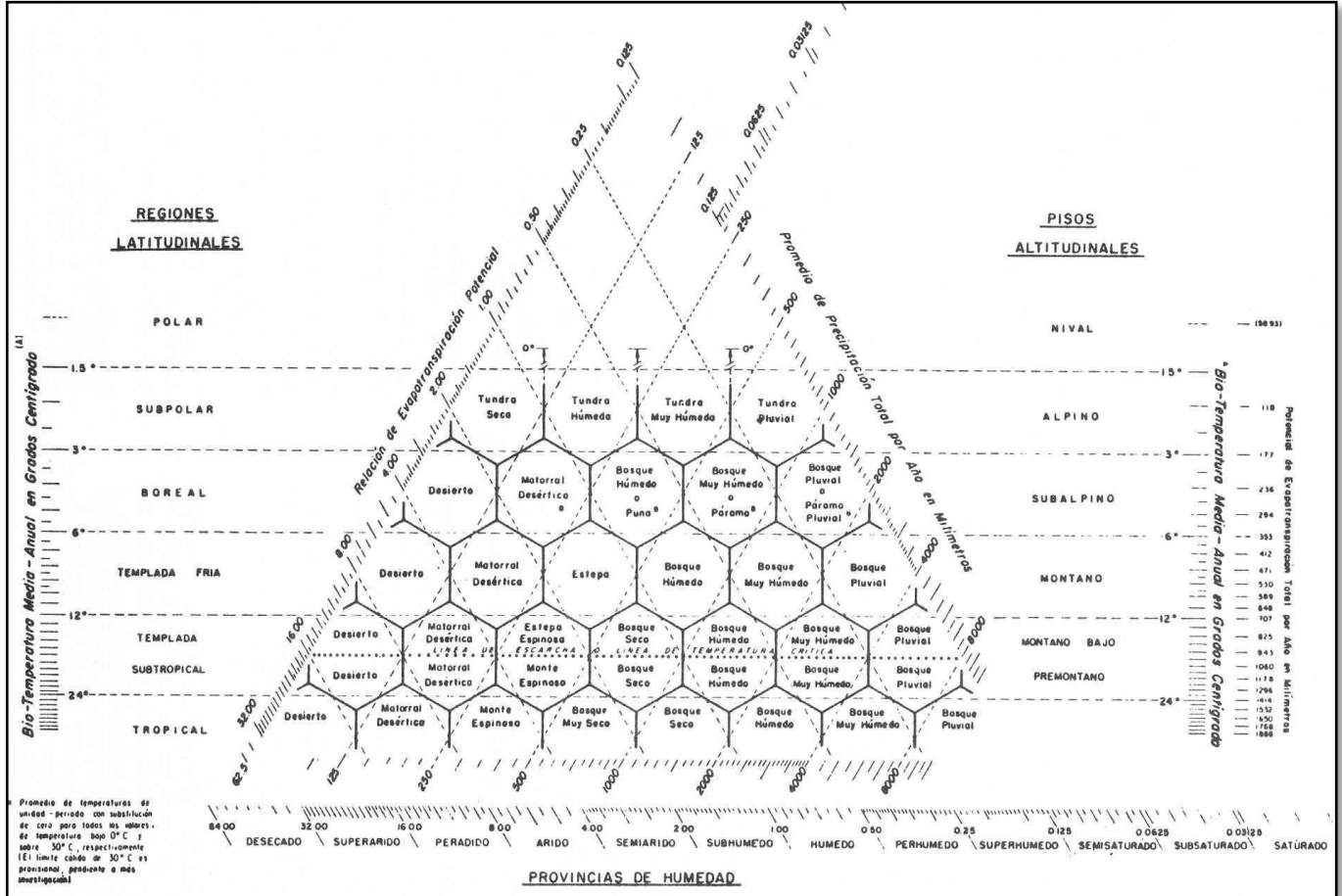
- Evapotranspiración potencial (ETP) (Ecuación 26)
- Temperatura media anual (°C)
- Precipitación total media anual (mm)
- Relación Evapotranspiración Potencial (RETP) (Ecuación 27)
- Altitud
- Latitud
- Vegetación

$$ETP = T * 58.93 \quad \text{Ec. (26)}$$

$$RETP = \frac{ETP}{P} \quad \text{Ec. (27)}$$

Donde, ETP – evapotranspiración potencial, en mm anuales; T – biotemperatura, en °C; RETP – relación evapotranspiración potencial; y P – precipitación media anual, en mm.

**Figura 8.** Clasificación de zonas de vida según Holdridge



Fuente: Organization of American States OAS en <http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea65s/p238.JPG> , citado por (UNAD, 2013).

### 5.4.7. FACTORES DETONANTES

De acuerdo con SGC (2017), los factores naturales que modifican las condiciones de estabilidad y se consideran los detonantes más comunes son la lluvia y el sismo (Turner & Schuster, 1996). Estos tienen regularmente una frecuencia de ocurrencia que permite incluir el componente temporal en el análisis de amenaza, junto con la definición de escenarios de análisis. En este caso se proponen, de acuerdo con la disponibilidad de información, el cálculo de frecuencias de ocurrencia, probabilidades asociadas o cálculo de probabilidades de excedencia de los umbrales, definidos a partir de la relación histórica entre la ocurrencia de eventos posiblemente detonados por alguno de estos factores.

Los **factores detonantes** comprenden, para SGC (2015), la lluvia y el sismo.

- **FACTOR DETONANTE LLUVIA**

Los deslizamientos profundos ocurren debido a un incremento en la presión de poros del suelo generado por el ascenso del nivel freático. Estos procesos están asociados a largos periodos de lluvia y se requiere relacionar de alguna manera la variación del nivel freático con la variabilidad de la lluvia acumulada para largos periodos. Y dado que una proporción de la lluvia que cae al suelo se infiltra, se utiliza esa fracción para calcular la variabilidad de la profundidad del nivel freático, tomando en cuenta las características de la vegetación y de los suelos superficiales, determinándose antes el número de curva CN. Para estimar dicha fracción de agua infiltrada se propone utilizar el método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, el cual se emplea para calcular la cantidad de agua proveniente de una tormenta que se convierte en escorrentía directa, pero que en este caso se utiliza para estimar el complemento, esto es, el resto de la lluvia que no se convierte en escorrentía directa (SGC, 2015).

Para analizar el factor detonante Lluvia en función del régimen de precipitación de la zona, mediante las curvas IDF es posible estimar la intensidad de tormentas intensas de distintas duraciones y para diferentes períodos de retorno (Acevedo Aristizábal, 2009), que pueden incidir en la ocurrencia de deslizamientos, mediante la inestabilidad resultante de la acción hídrica relacionada con el descenso del frente húmedo y la profundidad del nivel freático del suelo (SGC, 2015).

Para este análisis, la información de precipitación es el principal insumo. Para ello se requiere contar, con información pluviográfica o, en su defecto, pluviométrica registrada en una estación cercana que cuente con un registro de precipitación diaria de por lo menos quince años. Según SGC (2015), en los casos en que no se cuente con información de ningún tipo, se recomienda acudir a información diaria generada a partir de satélite, algunas de cuyas fuentes son:

- International Precipitation Group (IPG)
- Tropical Research Measurement Mission (TRMM)
- Climate Research Unit (CRU)
- Global Precipitation Climatology Center (GPCC)
- Megha Tropiques

### **SATÉLITE TRMM**

El satélite TRMM es uno de los satélites más antiguos que registra precipitación teniendo registros que datan hasta el año 1998 (Gidahatari, 2017) completando 19 años de registros de precipitación hasta el presente. De acuerdo con (Goddard Space Flight Center, 2017), el Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM (Misión de Medición de Lluvias Tropicales) es una misión conjunta entre la NASA (Administración Nacional de la

Aeronáutica y el Espacio) y JAXA (Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial) para estudiar las precipitaciones para la investigación climática y del tiempo; su conjunto de datos se convirtió en el estándar espacial para medir la precipitación y condujo a una investigación que mejoró la comprensión de la estructura y la evolución del ciclón tropical, las relaciones tormentosas, el clima y el tiempo y los impactos humanos en las precipitaciones, también del monitoreo de inundaciones y sequías y el pronóstico del tiempo. El observatorio del TRMM se lanzó en 1997 en una órbita casi circular de aproximadamente 350 km de altitud con una inclinación de 35° y un período de 91.5 minutos (15.7 órbitas por día), aunque durante el 2001, la altitud del TRMM se elevó a aproximadamente 402.5 km con un período de 92.5 minutos (15.6 órbitas por día) (GES DISC, 2017)

Como informa Goddard Space Flight Center (2011), el TRMM posee 3 instrumentos importantes: El Radar de precipitación (PR), el primer instrumento espacial diseñado para proporcionar mapas tridimensionales de la estructura de la tormenta, dando información sobre la intensidad, distribución, tipo de la lluvia, profundidad de la tormenta, además tiene la capacidad de proporcionar perfiles verticales de lluvia y nieve desde la superficie hasta una altura aproximadamente de 20 km, y de detectar tasas de lluvia bastante livianas hasta de 0.727 mm/h; el generador de Imágenes de microondas TRMM (TMI), es un sensor de microondas pasivo diseñado para proporcionar información de precipitación cuantitativa en una amplia franja bajo el satélite, midiendo las pequeñas cantidades de energía de microondas emitidas por la Tierra y su atmósfera, y puede cuantificar el vapor de agua, el agua de la nube y la intensidad de la lluvia; y el Escáner visible e infrarrojo (VIRS), detecta la radiación que sale de la Tierra en cinco regiones espectrales, que van desde lo visible a lo infrarrojo, y tiene la capacidad de delimitar las precipitaciones y servir como un estándar de transferencia a otras mediciones que se realizan de manera rutinaria por otros satélites.

## **SATÉLITE MERRA – 2 Model**

De acuerdo con DISC GES (2016), el satélite Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications versión 2 MERRA – 2 (Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para Investigación y Aplicaciones versión 2), es un reanálisis atmosférico de la NASA para la era de los satélites utilizando el Modelo del Sistema de Observación de la Tierra Goddard, versión 5 (GEOS-5) con su Sistema de Asimilación de Datos Atmosféricos (ADAS), versión 5.12.4; que se enfoca en análisis climáticos históricos para una amplia gama de escalas de clima y tiempo y ubica el conjunto de observadores EOS de la NASA en un contexto climático. Además de asimilaciones de observaciones espaciales de aerosoles y representar sus interacciones con otros procesos físicos en el sistema climático.

Como informa Goddard Space Flight Center (2017), el proyecto MERRA-2 proporciona datos que comienzan en 1980, y se introdujo para reemplazar el conjunto de datos MERRA original debido a los avances realizados en el sistema de asimilación del



resplandor hiperespectral moderno y observaciones de microondas, junto con los conjuntos de datos de ocultación GPS-Radio; el satélite también utiliza observaciones de ozono de la NASA después de 2005 junto con mejores representaciones de la estratósfera y de los procesos criosféricos. Estos avances adicionales tanto en el modelo GEOS-5 como en el sistema de asimilación GSI se incluyen en MERRA-2, y la resolución espacial sigue siendo aproximadamente la misma (unos 50 km en la dirección latitudinal) que en MERRA. Este es el último reanálisis atmosférico de la era moderna del satélite producido por la Oficina de Modelización y Asimilación Global de la NASA (GMAO). Los productos de MERRA-2 son accesibles en línea a través del Centro de Servicios de Información de Datos Goddard Earth Sciences de la NASA (GES DISC).

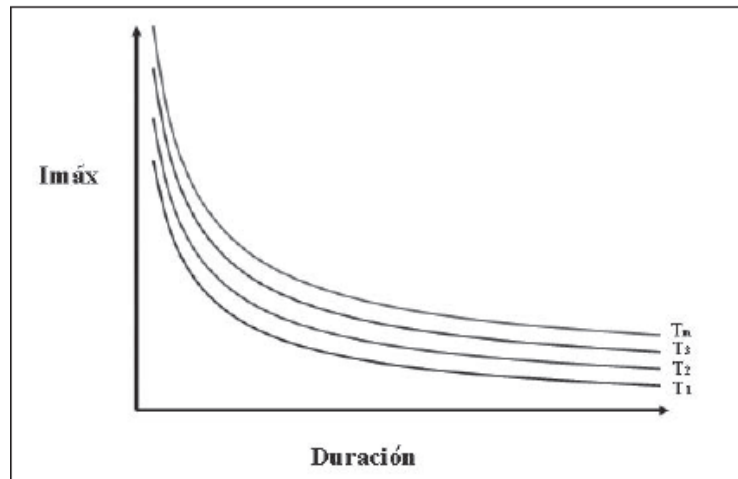
### **CURVAS IDF**

De acuerdo con SGC (2015), para determinar la frecuencia de ocurrencia de posibles deslizamientos actuales o potenciales detonados por precipitación, se recurre al análisis de intensidad-duración-frecuencia (curvas IDF) para las lluvias más intensas del registro. Según UNESCO, y otros (2007), para evaluar adecuadamente el comportamiento de las precipitaciones, es necesario conocer las relaciones entre cuatro características fundamentales de éstas: la intensidad, la duración, la frecuencia y su distribución.

Las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), según Témez (1978), citado por Acevedo Aristizábal (2009) y por Pizarro Tapia., y otros (2005), se construyen por medio de puntos representativos de la intensidad media de precipitación para diferentes duraciones, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno. Para IDEAM (2014), la curva IDF representa la intensidad (I) o magnitud de una lluvia fuerte expresada en milímetros por hora, para una duración (D) determinada que usualmente puede ser 30, 60, 90, 120 o 360 minutos y que se estima tiene una probabilidad de ocurrencia o frecuencia (F) expresada en años, lo que también se conoce como período de retorno.

La definición entregada por Mintegui y López (1990), citado por UNESCO, y otros (2007), es que las curvas IDF representan a las duraciones en las abscisas y a la altura o intensidad de precipitación en las ordenadas, donde cada curva representada corresponde a una frecuencia (o período de retorno), de tal forma que las gráficas de estas curvas representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los puntos de una misma curva a un idéntico período de retorno. La figura 9 muestra la relación teórica entre la intensidad, la duración y la frecuencia; en ella se observa que la intensidad decrece a mayor duración y a su vez, para una tormenta de cualquier duración, se tendrá mayor intensidad a mayor período de retorno (UNESCO, y otros, 2007).

**Figura 9.** Relación de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia



Fuente: UNESCO, y otros (2007)

Usualmente las curvas IDF se determinan mediante análisis del mayor número posible de registros pluviográficos en la zona de estudio, en los cuales se consignan los perfiles de cada tormenta, es decir la profundidad de precipitación acumulada en función del tiempo. El problema que se presenta es la escasez de información de este tipo, probablemente a causa de sus costos de instalación y mantenimiento (Vargas M., y otros, 1998). Cuando se dispone de información pluviométrica, sólo se podrá conocer la intensidad media en 24 horas, y por consiguiente esta información puede inducir a grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son, en general, las más intensas (Pizarro Tapia., y otros, 2005); ya que como se miden las alturas totales para intervalos grandes, de 24 horas, se asume que el comportamiento de la intensidad en ese intervalo de tiempo es constante (UNESCO, y otros, 2007). De acuerdo con Vargas M., y otros (1998), la información generada de datos pluviométricos es discreta y no continua, por lo cual no se sabe la forma en que se distribuye la precipitación a lo largo de cada tormenta, sino únicamente con un nivel de agregación de 24 horas, por ello la estimación de curvas IDF a partir de información pluviométrica se presenta como una alternativa muy importante para resolver este problema; se han propuesto diversas ecuaciones empíricas que permiten generar curvas IDF sintéticas a partir de información pluviométrica.

En 1932, Bernard propuso una ecuación general (Ecuación 28) para las curvas IDF (Vargas M., y otros, 1998), más tarde validada por Aparicio en 1997 (Pizarro Tapia., y otros, 2005):

$$I = \frac{kT^m}{t^n} \quad \text{Ec. (28)}$$

Donde,  $I$  - intensidad de precipitación en mm/h,  $T$  - tiempo de retorno en años,  $t$  - duración en minutos u horas;  $k$ ,  $m$  y  $n$  - constantes de regresión lineal múltiple que dependen del sitio.

Según Chow et al (1994), citado por Pizarro Tapia, y otros (2005), la **intensidad** (Ecuación 29) se define como la tasa temporal de precipitación, o sea, la profundidad por unidad de tiempo (mm/hr), y ésta se expresa en la ecuación 2, como:

$$i = \frac{P}{Td} \quad \text{Ec. (29)}$$

Donde  $P$  - profundidad de lluvia en mm ó pulg;  $Td$  - duración, dada usualmente en hr.

En cuanto a la **duración** de un evento de precipitación, Pereyra et al. (2004), citado por UNESCO, y otros (2007), lo define como el tiempo que transcurre desde que se inicia la precipitación, hasta que ésta cesa.

Otra variable es la **frecuencia**, que corresponde a la repetición de eventos de características similares en intensidad y duración, según Coras et al. (2001), citado por UNESCO, y otros (2007). Esta definición se relaciona directamente con el período de retorno, que Linsley et al. (1977), citado por UNESCO, y otros (2007), lo define como el número de años promedio que transcurre para que un evento sea igualado o excedido; y Pizarro et al. (1986), citado por UNESCO, y otros (2007), lo plantea como el inverso de la probabilidad de ocurrencia de un evento  $x$ .

La metodología tradicional usada para el cálculo de las curvas IDF consiste básicamente en realizar un análisis de frecuencia a cada una de las series de valores máximos de precipitación obtenidas para cada duración. Entre las series a las cuales se le realiza el análisis de frecuencias, está la serie de máximas anuales, aquella que está conformada por cada uno de los valores máximos de precipitación observadas en cada uno de los años de registro. Esta serie es utilizada en muchos casos por no ser necesaria la separación de la serie de registros continua en eventos o tormentas estadísticas independientes. El siguiente paso consiste en establecer el rango de duraciones para el cual se estimarán las curvas IDF, luego, a cada una de las series obtenidas para cada duración se le ajusta una función de distribución para construir familias de curvas para diferentes probabilidades. Existen varias funciones de distribución utilizadas en hidrología, aunque frecuentemente se emplea la distribución de Gumbel para la evaluación de las precipitaciones (Acevedo Aristizábal, 2009).

De acuerdo con Acevedo Aristizábal (2009), el objeto del análisis de frecuencia de parámetros hidrológicos mediante el uso de distribuciones de probabilidad se realiza para relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia.

**La distribución de probabilidad de Gumbel**, es una función de probabilidad utilizada usualmente para valores máximos aleatorios sacados de poblaciones suficientemente

grandes (Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2009), citado por Corzo Oviedo, y otros (2015)). Esta función se define (Ecuación 30) como Pizarro T., y otros (2003):

$$P(x \leq x_i) = e^{-e^{-\sigma(X-\mu)}} \quad (\text{Ec. 30})$$

$$P(x \leq x_i) = e^{-e^Y}$$

Dónde, X – valor a asumir por la variable aleatoria, Y - Variable reducida, y  $\sigma$ ,  $\mu$  - parámetros a estimar en función de los valores de muestra

El método propuesto por Aparicio (1997), plantea la forma de obtener una ecuación que genere las curvas IDF a través de un modelo de regresión lineal, relacionando simultáneamente las tres variables en una familia de curvas, para lo cual se utiliza la Ecuación 28. Luego aplicando los logaritmos a la ecuación propuesta se pretende llegar a la forma de un modelo de regresión lineal múltiple (Ecuación 31) y cuyo modelo se expresa de otra manera en la ecuación 32 (Pizarro Tapia., y otros, 2005):

$$\log I = \log k + m * \log T - n * \log t \quad \text{Ec. (31)}$$

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 \quad \text{Ec. (32)}$$

Donde:

$$y = \log I \quad a_0 = \log k$$

$$X_1 = \log T \quad a_1 = m$$

$$X_2 = \log t \quad a_2 = -n$$

Luego, una vez calculados los coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$ , es posible obtener los parámetros  $k$ ,  $m$  y  $n$  para la ecuación 1.

## **NIVEL FREÁTICO**

Como lo explica SGC (2015), en razón de que en los deslizamientos la posición del nivel freático es generalmente un condicionante de la inestabilidad, resulta clave calcular la profundidad de la tabla de agua, asociada a un cierto periodo de retorno, para el cual se considera que ocurrirá la falla. La experiencia sugiere utilizar un periodo de retorno de 20 años. En virtud de que los deslizamientos profundos ocurren debido a un incremento en la presión de poros del suelo generado por el ascenso del nivel freático, y que estos procesos están asociados a largos periodos de lluvia, se requiere relacionar de alguna manera la variación del nivel freático con la variabilidad de la lluvia acumulada para largos periodos. Dicha estimación se ha de realizar en atención a que existe una relación directa entre el volumen acumulado de agua caída en un periodo de lluvia y el ascenso del nivel freático, por lo tanto, se sugiere asignarle una variabilidad a la profundidad del nivel freático en función de la variabilidad temporal de la precipitación.

Por otra parte, dado que una proporción de la lluvia que cae al suelo se infiltra, que otro porcentaje queda detenido en la vegetación y en depresiones del suelo mientras se evapora y que otro más fluye como escorrentía directa, es conveniente utilizar la fracción que se infiltra para calcular la variabilidad de la profundidad del nivel freático, tomando en cuenta las características de la vegetación y de los suelos superficiales. Para estimar dicha fracción de agua infiltrada se propone utilizar el método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, el cual se emplea para calcular la cantidad de agua proveniente de una tormenta (P) que se convierte en escorrentía directa (Pe), pero que en este caso se utiliza para estimar el complemento, esto es, el resto de la lluvia (Ecuación 33) que no se convierte en escorrentía directa (SGC, 2015).

$$P_i = P - P_e \quad \text{Ec. (33)}$$

Donde,  $P_i$  – precipitación infiltrada, en mm;  $P$  – precipitación derivada de una tormenta, en mm; y  $P_e$  – precipitación convertida en escorrentía directa, en mm.

### **Método del Número de Curva**

La metodología del número de la curva (CN), es la más empleada para transformar la precipitación total en precipitación efectiva, surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente. La representación gráfica de la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (Pe), permitió obtener una familia de curvas que fueron estandarizadas a partir de un número adimensional de curva CN, que varía de 1 a 100, según sea el grado del escurrimiento directo. Así un número de la curva CN = 100, indica que toda la lluvia escurre y un CN = 1, indica que toda la lluvia se infiltra (Lavao Pastrana, 2014).

La metodología del Número de Curva considera como variables en su determinación (Lavao Pastrana, 2014):

- La precipitación, representada en este caso por la precipitación para un período de tiempo previamente seleccionado.
- El complejo de suelo - hidrológico que considera la interrelación suelo - cobertura vegetal.
- La condición de humedad antecedente; de acuerdo con estas variables se fija un número de curva (CN) que representa tal interrelación.

Por lo tanto, el valor de CN depende de la cobertura y uso del terreno, al igual que de la clasificación hidrológica del suelo superficial (A, B, C y D), la cual tiene en cuenta la textura, espesor y origen de los suelos, de acuerdo con la siguiente clasificación hidrológica de los suelos (SGC, 2015):

- Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

- Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, suelos francoarenosos.
- Grupo C: Suelos francoarcillosos, francoarenosos poco profundos, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcillas.
- Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Esta interacción permite determinar el valor de CN para las condiciones hidrológicas promedio a nivel local (Lavao Pastrana, 2014). Estas variables se observan relacionadas en la tabla 14. Los números de curva han sido tabulados por el Servicio de Conservación de Suelos en base al tipo y uso de suelo.

**Tabla 14.** Valores de número de curva para diferentes grupos hidrológicos y usos de suelo

USO DE SUELO	GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO			
	A	B	C	D
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales				
Condiciones pobres	68	79	86	89
Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos	30	58	71	78
Bosques				
Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
Óptimas condiciones: cubierta en pasto (75% o más)	39	61	74	80
Condiciones aceptables: cubierta en pasto (50 al 75%)	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial				
Tamaño promedio lote porcentaje promedio impermeable				
1/8 de acre 65	77	85	90	92
1/4 de acre 38	61	75	83	87
1/3 de acre 30	57	72	81	86
1/2 de acre 25	54	70	80	85
1 de acre 20	51	68	79	84
Parqueadero pavimentado, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Fuente: Chow et al. (1994), citado por SGC (2015).

Según Lavao Pastrana (2014), para el cálculo de la precipitación efectiva, un procedimiento utilizado, es el que se basa en el método propuesto por el Soil Conservation Service – SCS; para la formulación del método de número de curva, la altura de precipitación efectiva o escorrentía directa  $P_e$  es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación  $P$ ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional de agua retenida en la cuenca es menor o igual a alguna retención potencial máxima  $S$ .

Los estudios empíricos realizados por el SCS (Soil Conservation Service) permitieron relacionar la máxima infiltración potencial con un parámetro de referencia, denominado número de curva,  $CN$ , cuyos valores están tabulados entre 0 y 100 (Montserrat, Joaquín & Teodoro, 1995; citado por Lavao Pastrana (2014)). Y por medio de este valor, se calcula la retención potencial máxima  $S$  (Ecuación 34) como (SGC, 2015):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ec. (34)}$$

Donde,  $S$  – retención potencial máxima, en mm;  $CN$  – número de curva previamente seleccionado como representativo de la zona para la condición de humedad antecedente II.

La retención potencial máxima es la diferencia entre  $P$  y  $Q$  a la hora que se inicia la tormenta y representa proporcionalmente la pérdida de escorrentía por infiltración, intercepción y almacenamiento (Lavao Pastrana, 2014).

De acuerdo con SGC (2015), el método del Soil Conservation Service considera números de curva para tres condiciones de humedad antecedente (I, II y III), las cuales se agrupan en tres condiciones básicas (tabla 15) (Lavao Pastrana, 2014).

**Tabla 15.** Condiciones antecedentes de humedad básicas empleadas en el método SCS

<b>AMC (I)</b>	Condiciones secas
<b>AMC (II)</b>	Condiciones normales
<b>AMC (III)</b>	Condiciones húmedas

Fuente: (Lavao Pastrana, 2014)

Los números de curva se aplican para condiciones antecedentes de humedad normales, y se establecen las siguientes relaciones para las otras dos condiciones I y II (Ecuación 35 y Ecuación 36, respectivamente) (Lavao Pastrana, 2014):

**Condición I:** Suelo seco; Caudales chicos. Los suelos en la cuenca están secos, pero no hasta el punto de marchitamiento, cuando se aran o se cultivan bien.

**Condición II:** Suelo medio; Asociado a crecidas anuales o promedios. Los suelos en la cuenca, se encuentran en estado de humedad normal.

**Condición III:** Suelo húmedo; Crecidas máximas; Caudales grandes. Los suelos en la cuenca se encuentran en estado muy húmedo, esto se presenta cuando ha llovido mucho o poco y han ocurrido bajas temperaturas durante los cinco días anteriores a la tormenta, y el suelo está casi saturado.

$$CN(I) = \frac{4.2*CN(II)}{10-0.058*CN(II)} \quad \text{Ec. (35)}$$

$$CN(III) = \frac{23*CN(II)}{0.13*CN(II)} \quad \text{Ec. (36)}$$

Según este procedimiento, la escorrentía directa o precipitación efectiva, se establece como la respuesta que se espera a una precipitación específica, y se obtiene de acuerdo a la precipitación considerada, y a la retención potencial máxima, como se expresa mediante la ecuación 37, (Lavao Pastrana, 2014).

$$Pe = \frac{(P-0.2*S)^2}{P+0.8*S} \quad \text{Ec. (37)}$$

Donde, Pe – escorrentía directa o precipitación efectiva, en mm; P – precipitación considerada, en mm; y S – retención potencial máxima, en mm.

### **Variación del Nivel Freático**

Con el cálculo de la precipitación infiltrable correspondiente, asumiendo una condición antecedente de humedad (II), se deduce esa altura de precipitación a la profundidad del nivel freático supuesta como media. Este análisis se hace suponiendo una variación a largo plazo del nivel freático que sigue una distribución normal, así que la profundidad del nivel freático para dicho periodo se puede estimar con una ecuación (ecuación 38) (SGC, 2015).

$$P_{ff} = \overline{P_f} - P_{inf} \quad \text{Ec. (38)}$$

Donde, P<sub>ff</sub> – nivel freático resultante para una precipitación determinada, en mm; P<sub>f</sub> – nivel freático medio para una zona, en mm, y P<sub>inf</sub> – precipitación infiltrada de una lluvia, en mm.

- **FACTOR DETONANTE SISMO**

El efecto de la carga sísmica se propone según SGC (2015), como una fuerza inercial horizontal, a partir del coeficiente de aceleración horizontal en análisis de equilibrio límite pseudoestáticos. Se requiere tener la curva de amenaza sísmica de la zona de estudio para determinar la aceleración horizontal con un periodo de retorno específico; para establecer la probabilidad de excedencia de una aceleración, se pueden utilizar curvas de amenaza sísmica disponibles en estudios regionales de amenaza sísmica o hacer un análisis simplificado de amenaza sísmica. Cuando no se pueden aplicar las curvas de amenaza sísmica disponibles, es posible obtener la probabilidad de excedencia de una



aceleración a partir de la función de recurrencia de las fuentes sismogénicas más cercanas, utilizando las ecuaciones de atenuación sugeridas en el Estudio de amenaza sísmica de Colombia.

Los sismos se definen como el proceso de liberación súbita de energía mecánica acumulada dentro de la corteza terrestre a lo largo de largos periodos de tiempo. Su efecto inmediato es la transmisión de la energía liberada en el punto de origen del sismo o foco al terreno circundante mediante vibración. La sismicidad es recurrente (episódica) en cada región donde se producen sismos. Los sismos de magnitudes bajas y medianas ( $M \leq 6$ ) tienen una probabilidad mayor de producirse ( $T_r = 50$  años o menos), mientras que el periodo de recurrencia  $T_r$  de los sismos de magnitudes superiores ( $M \geq 6$ ) pueden superar los 50 años en cada una de sus fuentes sismogénicas. La variabilidad de la recurrencia, según las magnitudes, implica la necesidad de modelar la sismicidad de manera probabilística (CSNF, 2010).

Según CSNF (2010), el análisis de amenaza sísmica está basado en la frecuencia histórica de eventos y en la severidad de cada uno de ellos. La severidad se mide mediante parámetros de intensidad válidos para una ubicación geográfica específica, y una vez definidos, es necesario generar un conjunto de eventos estocásticos que definen la frecuencia y severidad de miles de eventos, representando así la ocurrencia de la amenaza en la región.

### **Efectos de sitio**

Las condiciones locales del terreno afectan las características del movimiento sísmico. Los efectos de sitio son las alteraciones que sufren las ondas sísmicas debido a cambios en la geología local, es decir, en la geometría y composición de la superficie, incluyendo la presencia de depósitos superficiales compuestos por arcillas o arenas. Existen efectos de sitio que solamente modifican las características del movimiento sísmico como los ocasionados por la presencia de topografías distintas a una superficie plana (montañas, cañones, entre otros), o por la presencia de valles con arcillas con contenidos de agua. Pero existen otros efectos de sitio, donde existen depósitos de arena o pendientes inestables, que ocasionan la falla del suelo con asentamientos o desplazamientos súbitos y permanentes (CSNF, 2010):

- a) Topografía del terreno: La superficie irregular del terreno puede provocar amplificación o deamplificación del movimiento. Esto se presenta en cañones, montañas, pendientes, cimas (punto más alto de un monte) y simas (cavidad natural grande y profunda en la tierra). Los detalles de los efectos de sitio dependerán de la topografía, del tipo de onda sísmica y de su ángulo de incidencia.
- b) Presencia de depósitos de arcillas: En valles aluviales o lacustres, se presenta amplificación dinámica debido al contraste de la velocidad del suelo superficial con respecto a los depósitos más profundos. Entre mayor sea el contraste, mayor será la amplificación. Dependen también de la geometría tridimensional del valle aluvial.

- c) Presencia de estratos y depósitos de arenas: En estos depósitos se puede presentar el fenómeno de licuación en el cual el suelo pierde su capacidad de carga debido al aumento de la presión de poro. En algunos casos la licuación de estratos completos de arena han provocado enormes deslizamientos de tierra (sismo de Alaska, 1964). Es más factible su ocurrencia en arenas sueltas que en compactas, y en arenas con granulometría uniforme.
- d) Deslizamientos y deslaves: Provocados por las fuerzas sísmicas que encuentran perfiles inestables. Son los responsables de gran parte de los daños en vías de comunicación como carreteras.

El movimiento del terreno durante la ocurrencia de un sismo ha sido un detonante importante de movimientos en masa en diferentes ambientes geológicos. Caídas de roca, deslizamientos de suelos y deslizamientos en roca en laderas escarpadas, involucrando capas superficiales de suelo y roca descompuesta, han sido los tipos de movimientos en masa más comunes detonados por sismos históricos (Wieczorek, 1996, citado por SGC, 2017).

Para el análisis de sismos que detonan deslizamientos generalmente se usan datos de aceleración pico del terreno (PGA, por su sigla en inglés, "acceleration peak of the ground") que luego son considerados en modelaciones dinámicas o pseudoestáticas con análisis de equilibrio límite, que permiten obtener resultados cuantitativos en términos de la probabilidad de falla de un talud (SGC, 2017).

Sin embargo, según SGC (2017), el análisis de los sismos que detonan deslizamientos aún no está lo suficientemente desarrollado y constituye un campo de investigación aún en construcción debido a la dificultad implícita en definir los posibles escenarios de sismos (Corominas et al., 2013), por lo que se requiere ampliar el conocimiento sobre la relación entre sismos y deslizamientos a partir de la elaboración de inventarios de procesos co-sísmicos en diferentes ambientes. La literatura relacionada con los factores que condicionan la ocurrencia de un movimiento en masa detonado por un sismo es aún muy escasa, en parte porque se requiere del conocimiento y consideración de un amplio rango de condiciones tectónicas, geomorfológicas y climáticas para establecer patrones de distribución de movimientos en masa (Tanyas et al., 2017).

La sismología mundial usa la escala sismológica de Richter, también conocida como escala de magnitud local (ML), para determinar la magnitud de sismos entre 2,0 y 6,9; es una escala logarítmica arbitraria que asigna un número para cuantificar la energía liberada en un terremoto, denominada así en honor del sismólogo estadounidense Charles Richter (1900-1985). Para sismos superiores a 6,9 se utiliza la escala sismológica de magnitud de momento, e incluso todavía se suele usar la escala Mercalli. Es una escala de 12 grados desarrollada para evaluar la intensidad de los terremotos a través de los efectos y daños causados a distintas estructuras, y se debe su nombre al físico italiano Giuseppe Mercalli (Estructurando, 2015) y (Ciencia Geográfica, 2014).

Los efectos o daños de un sismo según su magnitud, se muestran en la tabla 16, donde se describen los efectos típicos de los sismos de diversas magnitudes cerca del epicentro (Estructurando, 2015).

**Tabla 16.** Magnitud de un sismo y sus efectos y frecuencias

Magnitud Escala Richter/Momento	Descripción	Efectos de un sismo	Frecuencia de ocurrencia
Menos de 2.0	Micro	Los microsismos no son perceptibles	Alrededor de 8000 por día
2.0 – 2.9	Menor	Generalmente no son perceptibles	Alrededor de 1000 por día
3.0 – 3.9		Perceptibles a menudo, pero rara vez provocan daños	49000 por año
4.0 – 4.9	Ligero	Movimiento de objetos en las habitaciones que genera ruido. Sismo significativo pero con daño poco probable.	6 200 por año
5.0 – 5.9	Moderado	Puede causar daños mayores en edificaciones débiles o mal construidas. En edificaciones bien diseñadas los daños son leves.	800 por año
6.0 – 6.9	Fuerte	Pueden llegar a destruir áreas pobladas, en hasta unos 160 kilómetros a la redonda.	120 por año
7.0 – 7.9	Mayor	Puede causar serios daños en extensas zonas.	18 por año.
8.0 – 8.9	Gran	Puede causar graves daños en zonas de varios cientos de kilómetros.	1-3 por año.
9.0 – 9.9		Devastadores en zonas de varios miles de kilómetros.	1-2 en 20 años.
10.0+	Épico	Nunca registrado.	En la historia de la humanidad (y desde que se tienen registros históricos de los sismos) nunca ha sucedido un terremoto de esta magnitud.

Fuente: Estructurando (2015)

## Tasa de excedencia

Las tasas de excedencia de intensidades miden qué tan frecuentemente se generan temblores con intensidad superior a una dada. También se les llama “curva de amenaza”, la cual indica la probabilidad de que una intensidad específica sea igualada o excedida en un período de tiempo determinado (CSNF, 2010).

De acuerdo con SGC (2015), para el análisis de amenaza basado en el factor de seguridad, se propone incluir el efecto de la carga sísmica como una fuerza inercial horizontal, a partir del coeficiente de aceleración horizontal. Para ello, se requiere tener la curva de amenaza sísmica de la zona de estudio para determinar la aceleración horizontal con un periodo de retorno específico; para establecer la probabilidad de excedencia de una aceleración.

**Aceleración sísmica.** Es una medida utilizada en terremotos que consiste en una medición directa de las aceleraciones que sufre la superficie del suelo. Normalmente la unidad de aceleración utilizada es la intensidad del campo gravitatorio ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ). No es una medida de la energía total liberada sino de intensidad; y se usa para establecer normativas sísmicas y zonas de riesgo sísmico, ya que durante un terremoto, el daño en los edificios e infraestructuras está relacionado con la velocidad y aceleración sísmica, y no con la magnitud del temblor (NC Arquitectura, 2012).

Una formulación empírica que relaciona la magnitud de un sismo con la máxima aceleración horizontal del terreno  $a_c$  [ $\text{m/s}^2$ ], es la desarrollada por Donovan (Ecuación 39) y otra ecuación empírica es la de Milen y Davenport (Ecuación 40). La utilización de cualquiera de estas expresiones está sujeta a grandes limitaciones debidas a su carácter empírico, obtenidas en Estados Unidos y referidas a terreno firme para emplazamientos a más de 20 Km de la falla sismogénica (Estructurando, 2015).

$$a_c = \frac{10.8 * e^{0.5 * M}}{(R + 25)^{1.35}} \quad \text{Ec. (39)}$$

$$a_c = \frac{0.0677 * e^{1.64 * M}}{1.1 * e^{1.1 * M} + R^2} \quad \text{Ec. (40)}$$

$$R = \sqrt{(D^2 + h^2)} \quad \text{Ec. (41)}$$

Donde,  $a_c$  – aceleración horizontal, en  $\text{m/s}^2$ ;  $M$  – magnitud del sismo en la escala Richter;  $R$  – distancia al hipocentro del terremoto;  $D$  – distancia al epicentro, en km; y  $h$  – profundidad focal, en km.

La aceleración pico efectiva ( $A_a$ ) corresponde a las aceleraciones horizontales del sismo de diseño contempladas en NSR-10 (2010), como porcentaje de la aceleración de la gravedad terrestre ( $980 \text{ cm/s}^2$ ). Estas aceleraciones tienen una probabilidad de ser excedidas del 10% en un lapso de 50 años, correspondiente a la vida útil de una edificación. El valor del parámetro  $A_a$  se utiliza para definir las cargas sísmicas de diseño

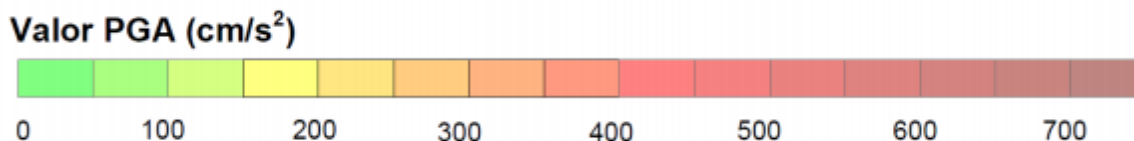
que exige el reglamento de Construcciones Sismo Resistentes (Sismoclub, 2011). Otros coeficientes contenidos en NSR-10 (2010) son:

- $A_v$  = coeficiente de aceleración que representa la velocidad horizontal pico efectiva para diseño.
- $A_e$  = coeficiente que representa la aceleración pico efectiva reducida para diseño con seguridad limitada

### Mapa Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia

De acuerdo con SGC (2010), las extensas fallas que delimitan las cadenas montañosas, y las zonas de convergencia de placas litosféricas que se hallan en el territorio colombiano, muestran también evidencias de actividad sísmica en el pasado geológico reciente, sugiriendo posibles zonas de generación de sismos. Esta historia de la actividad pasada permite construir un modelo de la probable actividad futura, que se representa en los mapas de amenaza sísmica de Colombia. El mapa de amenaza sísmica representa un modelo probabilístico para el movimiento del terreno que podría esperarse por la ocurrencia de sismos en Colombia. El movimiento del terreno se calcula en términos de aceleración horizontal máxima (PGA) (figura 10), y se estima para probabilidades del 2%, 10% o 50% de ser sobrepasado en un tiempo de 50 años, tiempo estimado de vida útil de una construcción corriente. Estas probabilidades se asocian con la frecuencia de ocurrencia o período de retorno de los sismos potencialmente destructores: de ocurrencia excepcional ( $Tr = 2475$  años), frecuentes ( $Tr = 475$  años) o muy frecuentes ( $Tr = 75$  años).

**Figura 10.** Unidades para la aceleración horizontal máxima



Fuente: SGC (2010)

## 5.5. MARCO NORMATIVO

**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”.

**Art.2:** El principio de gradualidad trata de que se deben realizar primero los estudios básicos para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los POT o la expedición de nuevos, y en su ejecución se deben realizar los estudios detallados.

**Art.3:** Estudios básicos. Se deben elaborar estudios en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa, que contienen la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza, en las que se requieren los estudios detallados; la delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo; y la determinación de las medidas de intervención.

**Art.4:** Estudios detallados. Se orientan a determinar la categorización del riesgo y establecer las medidas de mitigación correspondientes.

**Art.5:** Escala de trabajo. De acuerdo con las clases de suelo, los estudios se elaboran como mínimo, para estudios básicos, para clase de suelo urbano y de expansión urbana, a escala 1:5.000, y para clase de suelo rural, a escala 1:25.000; para estudios detallados, para clase de suelo urbano y de expansión urbana, a escala 1:2.000, y para suelo rural suburbano, a escala 1:5.000.

**Art.8:** Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa.

**Área de estudio.** Deben ser todas las zonas de relieve escarpado, montañoso y ondulado, con pendientes iguales o superiores a 5 grados más los taludes marginales de cauces, así como las zonas planas que puedan recibir los efectos de los movimientos en masa; y áreas urbanas y de expansión urbana que tengan una pendiente menor a 5 grados y hayan presentado problemas de inestabilidad y subsidencia debido a problemas geotécnicos o al desarrollo de actividades antrópicas.

**Insumos.** Como mínimo se deben utilizar: Cartografía base que contenga coordenadas, curvas de nivel, drenajes, red vial, infraestructura y equipamientos, asentamientos humanos; e Inventario de procesos morfodinámicos.

En la elaboración de los estudios para suelos urbanos y de expansión urbana, adicionalmente se elabora: la geología para ingeniería y la geomorfología aplicada a movimientos en masa a nivel de elementos geomorfológicos.

En la elaboración de los estudios para suelos rurales, adicionalmente se realiza: la geología, unidades geológicas superficiales, la geomorfología aplicada a movimientos en masa a nivel de subunidades geomorfológicas y cobertura y uso del suelo.

**Alcance:** La determinación de las condiciones de amenaza por movimientos en masa deberá integrar las diferentes variables que inciden en la ocurrencia tanto actual como futura de estos fenómenos. Se deben considerar dentro de los agentes detonantes los siguientes factores: agua, sismo y procesos antrópicos (cortes, excavaciones, rellenos y construcciones en general).

Para el suelo urbano y de expansión urbana se utilizará, como mínimo, alguno de los siguientes análisis: estadísticos, determinísticos o probabilísticos.

Para los suelos rurales se utilizará, como mínimo, alguno de los siguientes análisis: de inventarios, heurísticos o estadísticos.

En todo caso, los análisis se realizarán en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y la disponibilidad de información.

**Zonificación.** La amenaza se categorizará en alta, media y baja, que se establece según el método empleado. En todo caso las áreas con procesos activos se consideran en la categoría alta.

**Productos:** Como resultado de los estudios, se elaboran los mapas de zonificación de amenaza por movimientos en masa. La leyenda deberá incluir la descripción de las características físicas de las unidades según la categoría establecida, los tipos de procesos predominantes y los posibles daños que se pueden generar. Se deberá elaborar un documento técnico que contenga la metodología empleada y los resultados obtenidos.

**Art.14:** Los estudios detallados deben contener para cada uno de los eventos analizados: análisis detallado de amenaza, evaluación de vulnerabilidad, evaluación del riesgo, y determinación de medidas de mitigación.

**Art.15:** Análisis detallado de amenaza por movimientos en masa.

**Área de estudio.** Se refiere a las áreas con condiciones de riesgo y amenaza, por movimientos en masa delimitadas a partir de los estudios básicos.

**Insumos.** Se consideran como insumos mínimos que se elaboran y evalúan a la escala de trabajo, los siguientes: Geología para ingeniería, Geomorfología a nivel de elementos, Hidrogeología con énfasis en comportamiento de los niveles freáticos, Evaluación del drenaje superficial, Sismología, Uso del Suelo, Exploración del subsuelo, Levantamiento topográfico incluyendo la información predial o catastral.

**Alcance.** Se realiza empleando por lo menos métodos determinísticos y modelos matemáticos, en función de la dinámica del movimiento en masa objeto de análisis.

Como parte del análisis de amenaza se debe tener en cuenta las causas de la inestabilidad del terreno, considerando dentro de los agentes detonantes los siguientes factores: agua, sismo y procesos antrópicos (cortes, excavaciones, rellenos y construcciones en general), mediante el análisis mínimo de tres escenarios.

**Productos.** Mapas de zonificación de amenaza por movimientos en masa, además de un documento técnico que contenga la metodología empleada y los resultados obtenidos.

## **6. METODOLOGÍA**

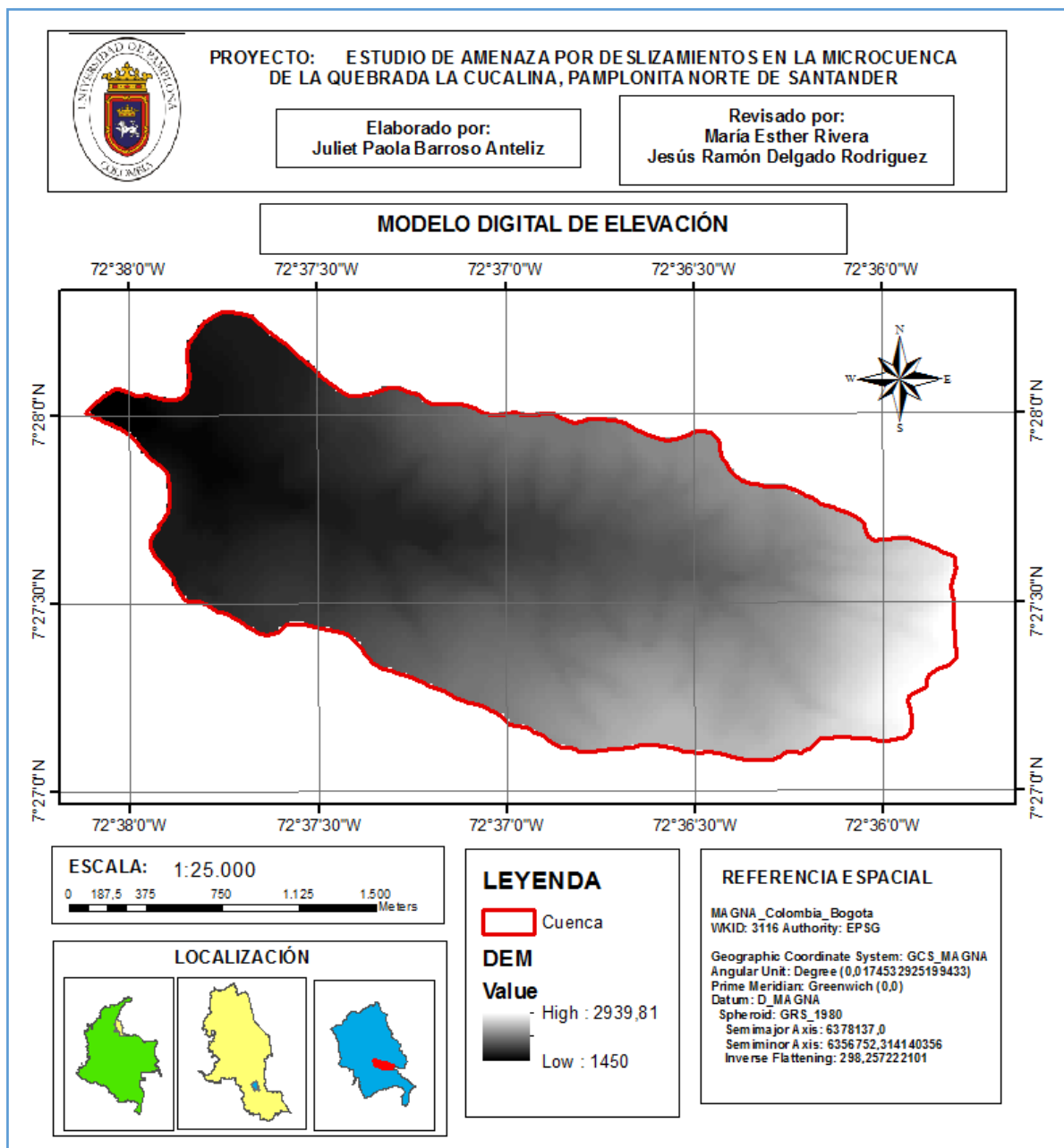
A continuación se dan a conocer las actividades desarrolladas en el proyecto

### **6.1. RECONOCIMIENTO DE LA ZONA Y DELIMITACIÓN DE LA CUENCA**

Sobre la base del mapa topográfico, generado de la digitalización de la plancha 110IIA del IGAC que cubre la zona de estudio, con curvas de nivel con equidistancia de 50 m se generó una base de datos vectorial altimétrica, y junto con la red de drenaje y localización de la zona en Google Earth, se obtuvieron los límites topográficos de la cuenca y la red hidrológica, a través de la interpretación de la divisoria de agua a partir de las curvas de nivel, que permitió delimitar manualmente en pantalla la microcuenca. Posteriormente, la interpolación lineal de las curvas de nivel generó el Modelo de Elevación Digital DEM (Mapa 1). La interpretación fue digitalizada y rasterizada en el programa ArcGis 10.3.



**Mapa 1. Modelo Digital de Elevación para la microcuenca Q. La Cucalina**



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se debe realizar una delimitación del área de estudio comprendiendo la microcuenca de la Q. La Cucalina. Con la revisión de bibliografía identificando las variables que inciden en estos fenómenos y que se deben estudiar, se compara con la información disponible de la zona de estudio; información que es levantada directamente de la zona mediante

visitas de campo o de instituciones relacionadas con el contexto de la investigación, y que también debe ser suficiente para realizar la evaluación.

## **6.2. IDENTIFICACION DE LAS VARIABLES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE LOS DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA DE ESTUDIO**

### **6.2.1. FACTORES CONDICIONANTES**

#### **a) GEOLOGÍA Y SUELOS**

##### **IDENTIFICACIÓN DE UNIDADES GEOLÓGICAS**

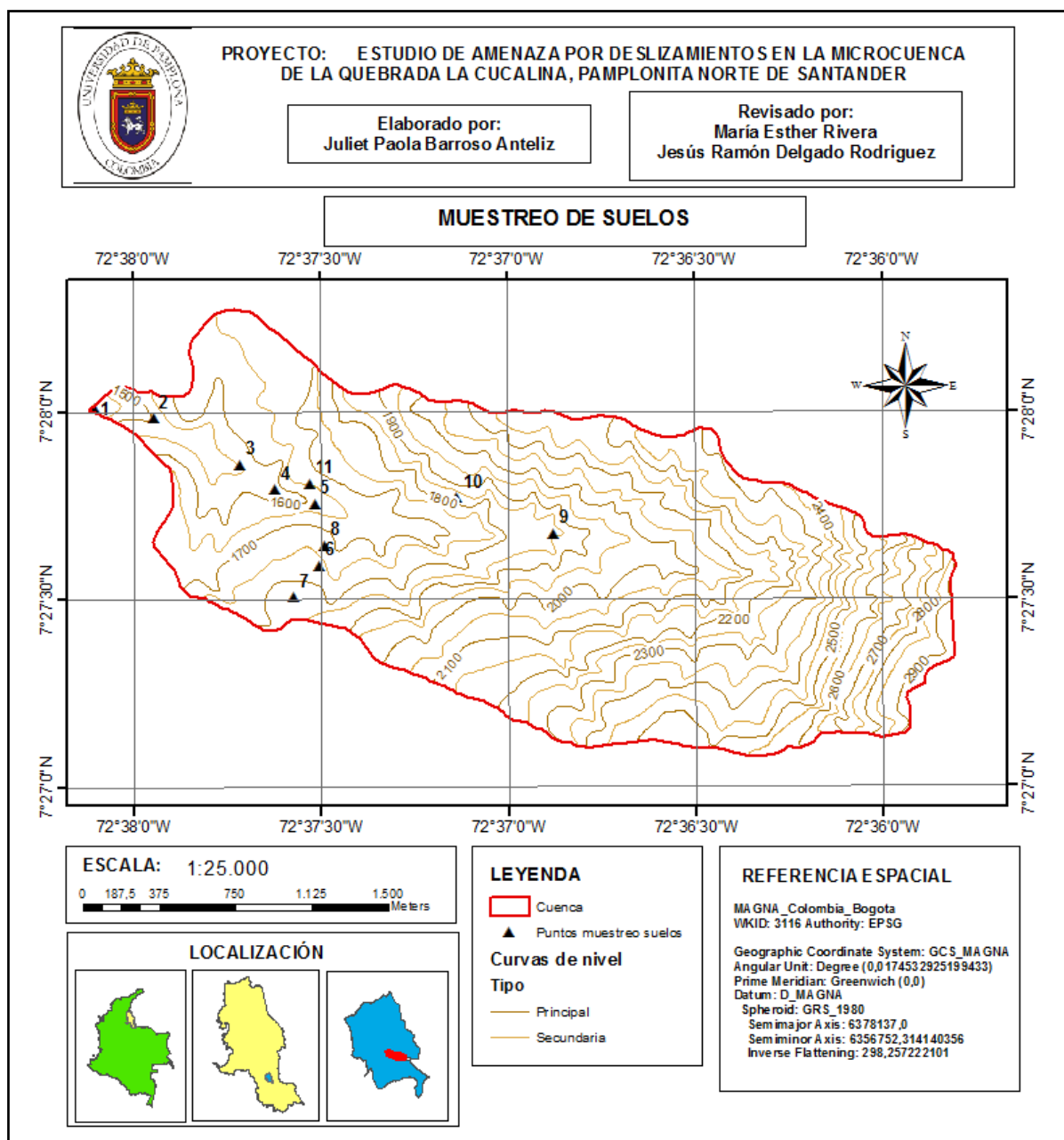
Se identificaron las formaciones geológicas presentes en la microcuenca, de acuerdo a la plancha 110 de Geología, escala 1:100.000 para el área de Pamplona, de INGEOMINAS (2013); y se corroboraron las mismas e identificaron nuevas, en salida de campo, por medio de afloraciones superficiales de macizos rocosos y depósitos.

Además, por medio de una Imagen satelital de ESRI para ArcGIS de la zona de estudio, se identificaron los diferentes tipos de depósitos, producidos tanto por deslizamientos antiguos y actuales, como por el flujo de la quebrada. Por último, en el software ArcGIS 10.3 se delimitan los polígonos resultantes del análisis de las unidades geológicas.

##### **MUESTREO DE SUELOS**

Para esta caracterización se hicieron toma de muestras de suelo de la zona al presenciarse cambio de color y textura (Mapa 2 y Tabla 17), y a una profundidad de 10 cm, teniendo en cuenta la accesibilidad, para posteriormente realizarse ensayos de laboratorio de granulometría, límite líquido y límite plástico para su posterior clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

**Mapa 2.** Puntos de muestreo de suelos en la microcuenca de la Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Tabla 17.** Coordenadas geográficas para los puntos de muestreo de suelo

Punto de muestra	Latitud	Longitud
1	7° 28' 0,534" N	72° 38' 6,033" W
2	7° 27' 59,043" N	72° 37' 56,663" W
3	7° 27' 51,562" N	72° 37' 42,788" W
4	7° 27' 47,536" N	72° 37' 37,180" W

5	7° 27' 45,232" N	72° 37' 30,835" W
6	7° 27' 34,226" N	72° 37' 29,592" W
7	7° 27' 30,318" N	72° 37' 34,311" W
8	7° 27' 38,626" N	72° 37' 29,267" W
9	7° 27' 40,412" N	72° 36' 52,536" W
10	7° 27' 46,140" N	72° 37' 8,100" W
11	7° 27' 48,487" N	72° 37' 31,664" W

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

La cantidad de muestra tomada de cada punto fue alrededor de 2 kg, estas se dejaron secar y se les identificó el color de acuerdo a las Cartas de Color de Munsell, según su matiz, intensidad y croma, mediante la comparación de los colores de las placas con una porción del suelo.

### **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Se le realizó la prueba de granulometría por tamizado a las muestras con la serie de tamices: 3/8, 4, 10, 40, 60, 100, 200 y fondo. Se preparó la muestra verificando que estuviese totalmente seca, pulverizada y homogénea, se colocó en la serie de tamices ya acomodados y se acomodó en un agitador electrónico durante 7 minutos. Luego, se pesó cada uno de los tamices con la muestra retenida en cada uno, conociendo anteriormente el peso del tamiz vacío para determinar los porcentajes que pasan en cada uno de los tamaños de abertura de los tamices. Con estos datos se grafica el % que pasa como el porcentaje de partículas inferiores a un tamaño en particular en función de ese tamaño, en escala logarítmica, teniendo la curva granulométrica. En base con esta curva, se describe la gradación dentro de cada muestra de suelo.

Posteriormente, se almacenó la parte pasante del tamiz 40 de las muestras, para realizar los ensayos de límites líquido y plástico.

### **ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG**

#### **Límite Líquido (LL)**

Con una porción de la muestra seca pasante del tamiz 40, se mezcla con agua hasta ser capaz de moldearse, hasta conseguir una mezcla homogénea, y se deposita una cantidad en la parte central de la Cazuela de Casagrande y se nivela la superficie. Luego se pasa el ranurador por el centro de la copa para cortar en dos la pasta de suelo. La ranura debe apreciarse claramente y que separe la masa en dos partes, para ello, la mayor profundidad del suelo en la copa debe ser igual a la altura de la cabeza del ranurador. Se golpea consecutivamente contra la base de la cazuela, haciendo girar la manivela, hasta que la zanja previamente recortada, se cierre en una longitud aproximada de 1 cm. Se registra la cantidad de golpes realizados y se toma una muestra de la parte central para la determinación del contenido de humedad. Si el número de golpes para que se cierre la zanja es 25, la humedad del suelo corresponde al límite líquido. Se realiza la operación dos veces para cada rango de golpes: 10 – 20, 20 – 30, 30 – 40, dado que

no siempre es posible que la zanja se cierre en la longitud exactamente con 25 golpes. Por ello, se traza una gráfica con el número de golpes en coordenadas logarítmicas, contra el contenido de humedad correspondiente en coordenadas normales, y se interpola para la humedad correspondiente a 25 golpes. La humedad obtenida es el Límite Líquido.

### **Límite Plástico (LP)**

Se trabaja con el material preparado para el límite líquido y se toma una pequeña cantidad. Luego se amasa la mezcla y se deja que pierda humedad hasta una consistencia a la cual pueda enrollarse sin que se pegue. Se enrolla la mezcla adelgazándose contra una superficie inerte hasta que el diámetro del cilindro sea de 3 mm, verificándose usando el pie de rey. La prueba continúa hasta que el rollito empiece a rajarse y tienda a desmoronarse. Y una vez que se ha producido el límite plástico se mide el contenido de humedad del rollito el cual corresponde al Límite Plástico, para el cual no es posible moldear un cilindro con un diámetro de 3 mm. Seguidamente se vuelve a repetir la operación tomando otra porción de la mezcla de suelo, para disminuir los errores de interpretación o medición. El límite plástico es el promedio de ambas determinaciones. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo o se vuelve pulverulento, por pérdida de humedad.

### **Determinación del contenido de humedad**

Para cada una de las determinaciones de contenido de humedad (Ecuación 42) para los procedimientos de límite líquido y límite plástico, se usan los pesos de los recipientes para las muestras, el peso húmedo de la muestra más el recipiente, medidos en una balanza; y el peso seco de la muestra más el recipiente, medido después de permanecer en el horno por 24 horas.

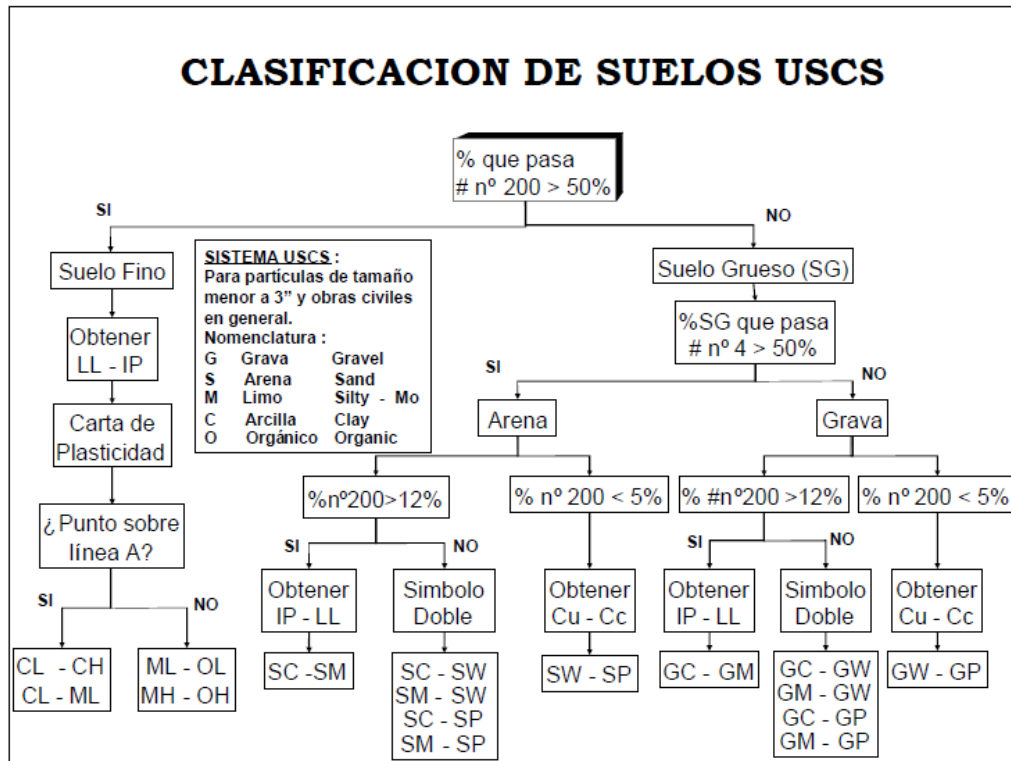
$$\%H = \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_3} * 100 \quad \text{Ec. (42)}$$

Donde,  $w_1$  – peso recipiente + muestra húmeda, en g;  $w_2$  – peso recipiente + muestra seca, en g; y  $w_3$  – peso recipiente, en g.  $w_1 - w_2$  hace referencia al peso del agua existente en la muestra, y  $w_2 - w_3$  al peso seco del suelo de la muestra.

### **CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO**

Se realizó la verificación de qué tipo de suelo se encontraba en las zonas delimitadas según los establecido en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), siguiendo los pasos mostrados en la figura 11. Con la determinación de los porcentajes de la cantidad de suelo que pasa por los tamices, se realiza una primera clasificación entre grava, arena y suelos finos. Luego, de acuerdo a los límites líquido y plástico calculados, y posteriormente, el índice de plasticidad, con la carta de Casagrande se clasifica el suelo según SUCS entre los diferentes grupos.

**Figura 11.** Diagrama de flujo para la clasificación de suelos según SUCS

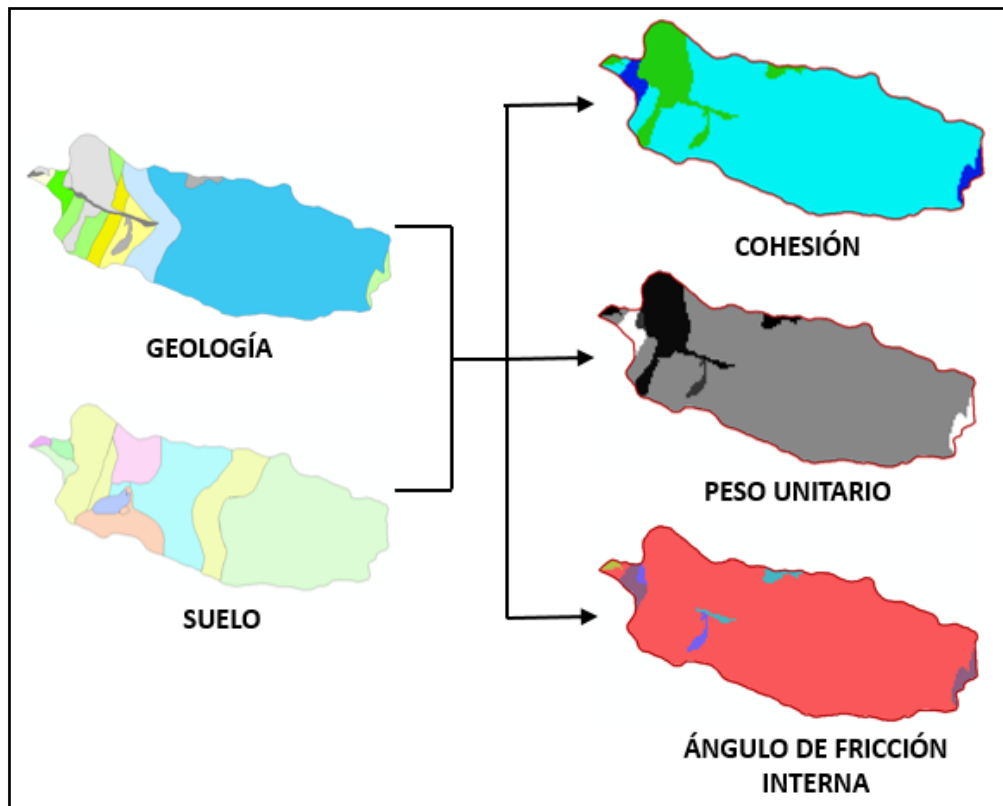


Fuente: Grupo de Geotecnia (2013)

## IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES

La exploración a partir del mapa de geología y el de suelos, permite definir los parámetros de resistencia del modelo geológico-geotécnico, como se muestra en la figura 12. Para su espacialización se basó en usar el mapa de geología resultante, identificando las propiedades mecánicas para las rocas presentes en las formaciones; y en las áreas de depósitos, se usaron los tipos de suelos que intersectaban sobre las mismas, utilizando el mapa de suelos sobre el de geología. Las propiedades mecánicas de acuerdo al material, se identifican con ayuda de varios autores por medio de literatura.

**Figura 12.** Obtención de los mapas de los parámetros de resistencia de materiales



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## **b) GEOMORFOLOGÍA**

### **IDENTIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA PRESENTES EN LA ZONA**

A partir de interpretación de imágenes satelitales Landsat 8, y del banco de imágenes de ESRI para ArcGIS, junto con la identificación de movimientos en masa antiguos y activos, por trabajo de campo, se creó el mapa de Morfodinámica.

La representación de movimientos en masa en lo posible debe ser mediante polígonos, y los deslizamientos que tengan áreas más pequeñas que las mínimas cartografiables deberán representarse, por lo menos por un punto (Calvello et al., 2013, citado por SGC, 2015). El mapeo de cada uno de ellos se hace de manera individual para su posterior clasificación por tipo, de acuerdo con la clasificación presentada en PMA: GCA (2007). Además para su representación en el mapa se tuvo en cuenta la actividad para activo e inactivo, y las partes del movimiento en masa, diferenciándose por la representación cartográfica también propuesta por PMA: GCA (2007).

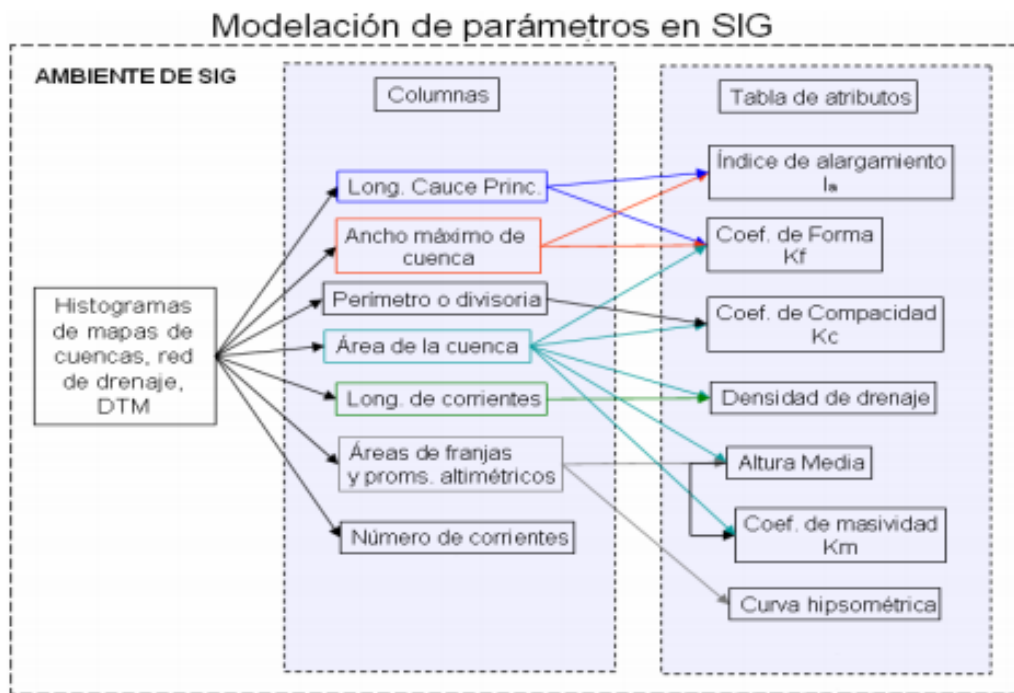
### **CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA**

A partir de los modelos digitales de terreno y de las unidades hidrológicas definidas, se realizó el análisis morfométrico de parámetros de forma, de relieve y relativos a la red

hidrográfica, por medio de la generación manual y automática con SIG. Los mapas base de trabajo son: el mapa de delimitación del área de la cuenca de estudio, el mapa topográfico de curvas de nivel para el área de estudio y, el mapa de drenajes de la cuenca.

En la figura 13, se muestra el proceso de obtención de parámetros en SIG, mediante mapas rasterizados y digitalizados de topografía, de cuenca y de ríos.

**Figura 13.** Obtención de parámetros morfométricos en el SIG



Fuente: Fuentes Junco (2004).

El área de la cuenca (A), el perímetro del contorno (P), la longitud axial (L), se obtiene a partir de la digitalización y poligonización de la cuenca en SIG. Por otra parte, la longitud del cauce principal (Lc), el número y la longitud de corrientes, y el orden de corriente, se obtienen y se calculan a partir de la digitalización de la red de drenaje. Sobre el DEM, se calculan las cotas máximas y mínimas de la cuenca y el cauce. Las áreas de las franjas entre curvas de nivel consecutivas, se calculan a partir de la unión del polígono de la cuenca y las curvas de nivel. Para la obtención de los parámetros morfométricos se usan las anteriores características básicas.

### Mapa de pendientes de la cuenca

Las zonas con valores de pendiente se determinaron a partir del DEM obtenido de las curvas de nivel del área, y de éstas a través de una red de triángulos irregulares contiguos (TIN) y un proceso de conversión, con las herramientas del SIG del programa ArcGis 10.3. Respecto al mapa de pendientes, en su elaboración se utilizaron los rangos de



pendientes propuestos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC que se describen en la tabla 8.

### **Curva hipsométrica**

La curva hipsométrica se grafica con el área acumulada entre isohipsas adyacentes desde el punto más alto de la cuenca hasta la desembocadura, y la frecuencia de altitudes con el porcentaje parcial del área total de la cuenca para cada par de curvas de nivel consecutivas; teniendo una ordenada para la altitud en m.s.n.m., y dos abscisas, una para el porcentaje de área acumulada y la segunda para el porcentaje de área parcial. Esta curva incluye a la vez la frecuencia altimétrica usando las mismas áreas existentes entre curvas de nivel de cotas sucesivas, que constituyen las frecuencias altitudinales expresadas en valores relativos, correspondientes a cada intervalo de elevación.

### **c) COBERTURA Y USO DEL SUELO**

#### **OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN SATELITAL LANDSAT 8**

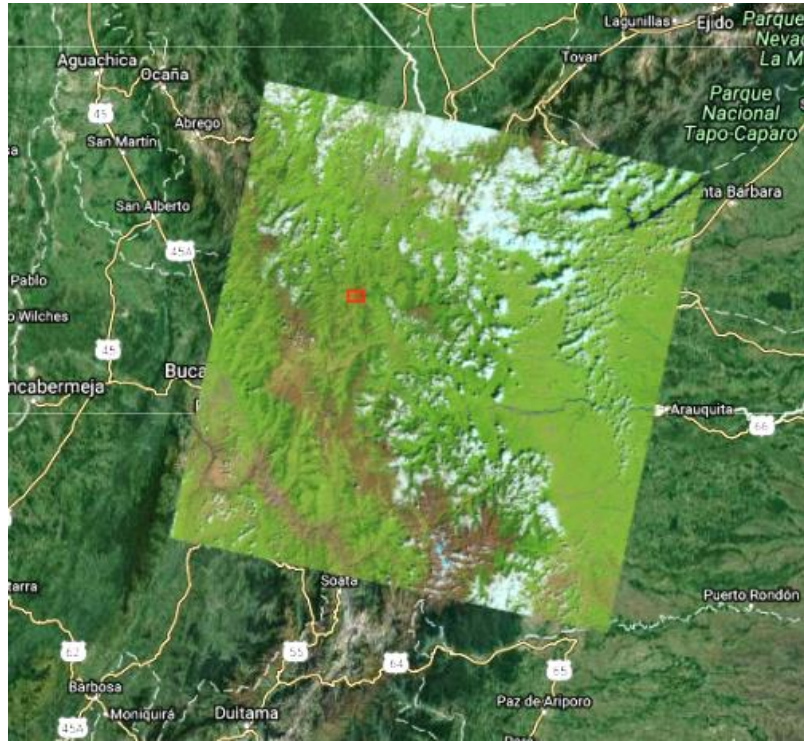
Se utilizaron imágenes satelitales para la identificación de coberturas terrestres. La imagen satelital Landsat 8 que encierra la zona de estudio se descargó de la página del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), Earth Explorer, tomada de la colección Landsat Collection 1 Level -1, como Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1. Al escogerse la imagen satelital, se tuvo en cuenta que en la zona de estudio tuviera un porcentaje de nubes y sombras mínimo, con el fin de identificar la totalidad de cobertura vegetal, y además de tener una fecha de adquisición lo más cercana posible al presente, para ser lo más representativo de la zona de estudio. En la tabla 18, se observan las características de la imagen seleccionada para el estudio; y en la figura 14, se muestra la imagen Landsat 8 utilizada, en el que se observa por medio de un rectángulo rojo, la zona de estudio.

**Tabla 18.** Información de la imagen satelital Landsat 8 identificada para la zona de estudio.

ID	LC08_L1TP_007055_20170102_20170312_01_T1
Date:	02-JAN-17
Number of Bands	11
Resolution	30 m
Pixel Depth	16 Bit

Fuente: USGS (2017), editado por Barroso Anteliz (2017)

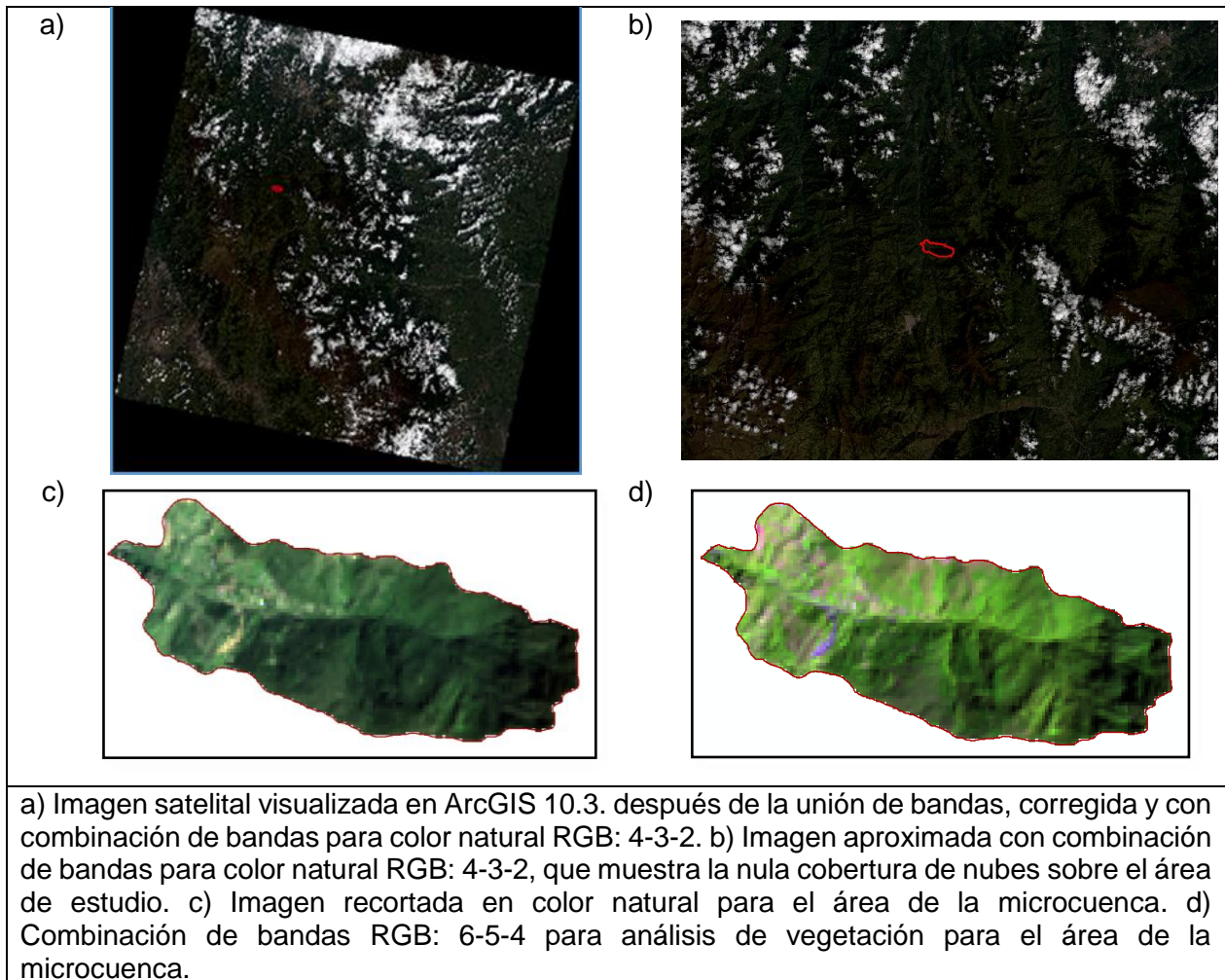
**Figura 14.** Ubicación de la imagen satelital Lansat 8 identificada para la zona de estudio.



Fuente: USGS (2017)

El procesamiento de la imagen Landsat 8 se realizó en el software ArcGis 10.3., en el que se unen las bandas espectrales. En la figura 15, se muestra la imagen visualizada en ArcGIS 10.3.; luego, en la misma se combinan las bandas para obtener el color natural de la imagen (Red: 4, Green: 3, Blue: 2), a la que posteriormente se le aplica una corrección radiométrica y una corrección atmosférica; después, se corta la imagen para el área de la microcuenca; y se combinan las bandas espectrales de la imagen resultante para el análisis de vegetación (Red: 6, Green: 5, Blue: 4).

**Figura 15.** Procesamiento de la imagen Landsat 8 identificada para la zona de estudio



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

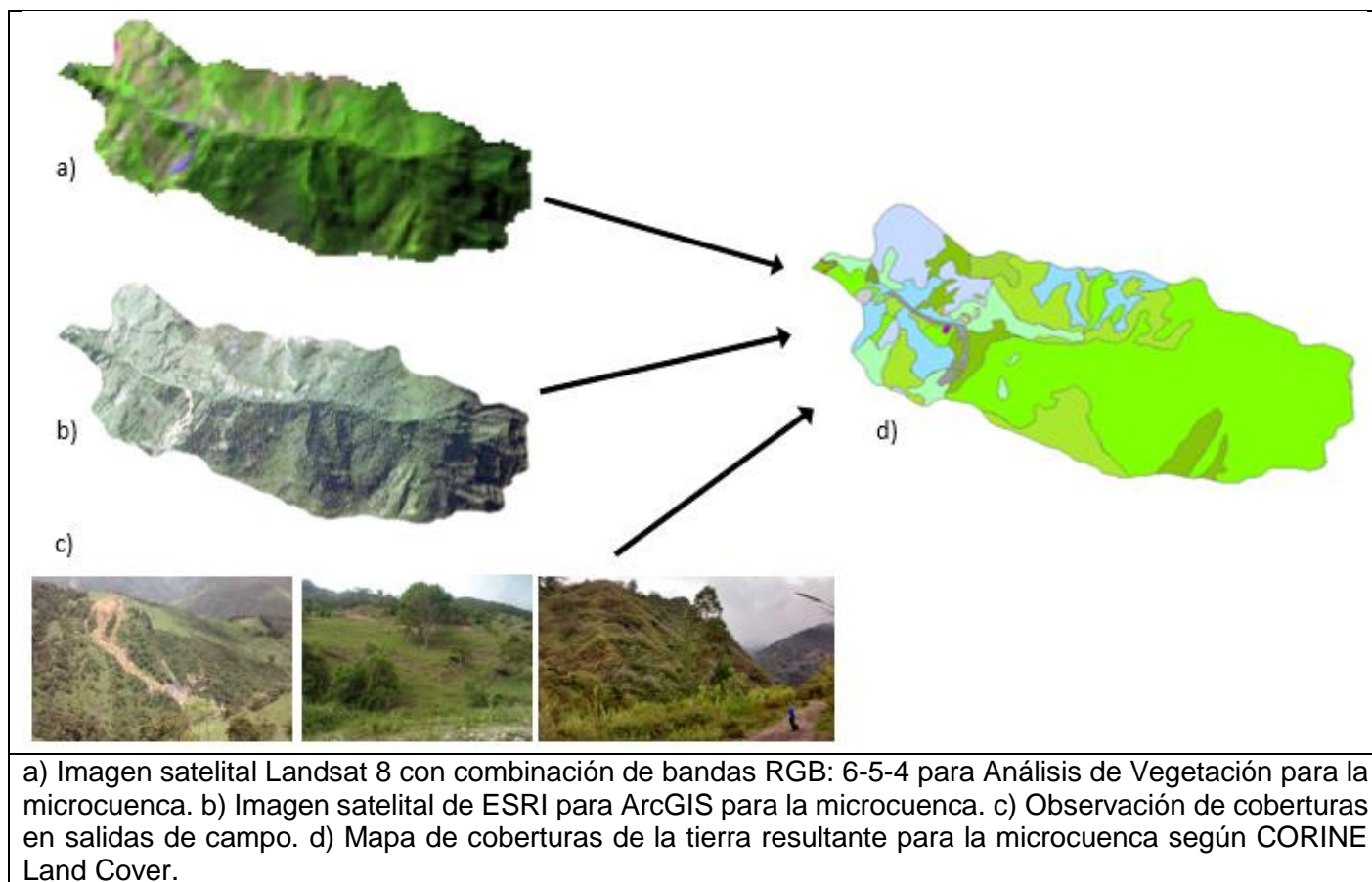
A partir de la imagen Landsat 8 para análisis de vegetación, se interpretan los colores resultantes para el tipo de cobertura vegetal, y se determinan los colores representativos para cada uno. El color morado determina las tierras desnudas y de caminos, los rosados los pastos, el verde más intenso los bosques, el verde grisáceo determina los pastos con cubierta densa, y el verde claro los arbustos.

### **POLIGONIZACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL**

Como una identificación previa de las posibles coberturas presentes en la zona de estudio, se tuvieron en cuenta mapas sobre Cobertura vegetal en territorio nacional a escala 1:100.000: el Mapa de Cobertura de la Tierra, según la metodología CORINE Land Cover adaptada para el país por IDEAM (2010) y el Mapa de Cobertura de la Tierra por IGAC (2008)

La clasificación de la cobertura vegetal se obtuvo a partir de, como se muestra en la figura 16, la imagen Landsat 8 con la combinación de bandas para análisis de vegetación, una imagen satelital perteneciente a ESRI para ArcGIS con una mejor resolución que la Landsat 8, y descargada del programa SAS Planet, y la identificación de coberturas durante las visitas a campo. Los diferentes tipos de cobertura vegetal junto con el color perteneciente de cada uno, se adaptaron a la establecida Leyenda Nacional de Cobertura de La Tierra según Corine Land Cover para Colombia, según IDEAM (2010). Teniendo en cuenta lo anterior, se empieza a digitalizar y poligonizar áreas de cobertura vegetal, identificándose la misma sobreponiéndose a las dos imágenes mencionadas.

**Figura 16.** Obtención de la zonificación de la cobertura vegetal para la zona de estudio.



Fuente: Barroso Anteliz (2017).

## POLIGONIZACIÓN DE USOS DEL SUELO

El uso del suelo actual sobre la zona de estudio se identifican a partir de la cobertura vegetal presente de acuerdo a CORINE Land Cover, adaptada por el IDEAM (2010), según los usos del suelo dispuestos por la metodología del Número de Curva (CN). Para su adaptación, se tuvo en cuenta lo dispuesto en la tabla 19.

**Tabla 19.** Determinación de los usos del suelo para NC según la cobertura vegetal de Corine Land Cover

<b>COBERTURA DE LA TIERRA</b>	<b>USOS DEL SUELO</b>
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Calles y carreteras – Pavimentados
Tierras desnudas y degradadas	Calles y carreteras – Tierra
Zonas de extracción minera	Distritos industriales
Cereales	Tierra cultivada – Con tratamiento de conservación
Oleaginosas y leguminosas	
Hortalizas	
Cultivos permanentes herbáceos	
Cultivos permanentes arbustivos	
Pastos limpios	Pastizales – Condiciones pobres
Vegetación secundaria o en transición	
Afloramiento rocoso	
Pastos arbolados	Pastizales – Condiciones óptimas
Pastos enmalezados	
Bosque denso	Bosques – Cubierta buena
Herbazal denso	
Arbustal denso	
Bosque abierto	Bosques – Cubierta pobre
Arbustal abierto	

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Se identifican la cobertura vegetal y el uso del suelo actual sobre la zona de estudio, de modo que la cobertura se presente de acuerdo a Corine Land Cover – adaptada IDEAM (2010), a partir de una imagen tipo Landsat 8 del USGS y observación en campo, para posteriormente digitalizar y poligonizar las áreas.

#### **d) CLIMATOLOGÍA**

##### **OBTENCIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA**

Para representar el clima de la zona de estudio, se usaron registros de datos de elementos climáticos principales como precipitación diaria y temperatura diaria. Esta información se descargó desde el servidor NASA Giovanni, con datos desde el 1 de enero de 1998 hasta el 31 de diciembre de 2016 mediante la opción Time Series: Area-Averaged con las coordenadas de un rectángulo que cubre el área de estudio, y seleccionando cada variable a descargar.

Los registros de precipitación se descargaron como datos de precipitación diaria, en mm, del satélite TRMM, seleccionando la variable Precipitacion Rate (TRMM\_3B42\_Daily v7) con resolución espacial de 0.25° y unidades en mm/day. Los datos de temperatura diaria se descargaron del satélite MERRA – 2 Model, con la variable Surface air temperature (M2TMNXFLX v5.12.4) con resolución espacial de 0.5 x 0.625° y unidades en °C. En la

tabla 20 se registran las características de la variable utilizada del satélite TRMM y del MERRA – 2 Model.

**Tabla 20.** Características de las variables de precipitación total diaria y temperatura media diaria con el satélite TRMM y MERRA – 2 Model respectivamente.

Variable	Precipitación diaria	Temperatura diaria
Source	TRMM	MERRA – 2 Model
Shortname	TRMM_3B42	M2TMNXFLX
Longname	TRMM (TMPA) Precipitation L3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree V7	MERRA-2 tavgM_2d_flx_Nx: 2d,Monthly mean,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation,Surface Flux Diagnostics V5.12.4
Version	7	5.12.4
Format	NetCDF4	NetCDF4
Spatial Coverage	-180.0, -50.0, 180.0, 50.0	-180.0, -90.0, 180.0, 90.
Temporal Coverage	1998-01-01 to present	1980-01-01 to present
File Size	1 MB per file	380 MB per file per file
Spatial Resolution	0.25 ° x 0.25 °	0.5° x 0.625°
Temporal Resolution	Daily	Monthly
Units	mm	°C

Fuente: GES DISC (2016). Editado por Barroso Anteliz (2017)

## CÁLCULO DEL COEFICIENTE PLUVIOMÉTRICO

Con el registro de precipitación diaria, en mm, se calcula la precipitación total mensual para cada mes de cada año de información. Posteriormente, se obtiene la precipitación media mensual para cada mes; y la precipitación media anual, como la sumatoria de las precipitaciones medias mensuales. En base a estos datos, se calcula el coeficiente pluviométrico de Angot, y se grafica ubicando en las ordenadas el coeficiente, y en las abscisas el tiempo en meses.

## REPRESENTACIÓN DEL COMPORTAMIENTO PLUVIOMÉTRICO

A partir de los datos de precipitación diaria, en mm, de los 19 años de información, se calcula la precipitación total mensual para cada año; posteriormente esta para cada año se grafica dentro de un mismo gráfico para observar su variación.

## GRAFICACIÓN DEL CLIMOGRAMA

En un climograma se presentan en cada mes del año, la precipitación total media anual y la temperatura media mensual de los años con información meteorológica, calculados a partir del registro de datos de precipitación diaria y temperatura diaria por 19 años. Los

datos se representan: en el eje de abscisas se indica el tiempo en meses del año, en un eje de ordenadas la escala de temperaturas, en °C, presentándose en una línea, y en el segundo eje de ordenadas la precipitación, en mm, presentándose en barras.

### **CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (ICP)**

En base con los registros de precipitación total mensual para cada mes de cada año, se halla la precipitación total anual para cada año considerado, y luego se aplica la ecuación 24 para su cálculo para cada año. Posteriormente, se halla la media del ICP para la zona.

### **CLASIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE VIDA SEGÚN HOLDRIDGE**

La zona de vida del área de estudio se clasificó según la metodología de Holdridge. De acuerdo con la temperatura media anual calculada anteriormente, se calcula la evapotranspiración potencial, en mm, con la ecuación 27; luego, con la precipitación media anual y la evapotranspiración anterior se halla la relación de evapotranspiración, con la ecuación 28. Posteriormente, con los valores de RETP, ETP, P, y T se ubica el hexágono con la zona de vida definida por ellos; y se define la zona de vida para la zona de estudio, además de la región latitudinal, el piso altitudinal y la provincia de humedad.

## **6.2.2. FACTORES DETONANTES**

### **e) LLUVIA**

#### **DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL NIVEL FREÁTICO**

De acuerdo con (SGC, 2015), dado que en el ámbito de la ingeniería el concepto de hidrogeología está relacionado con el flujo de agua subterránea en los estratos profundos del suelo, en la guía del mismo, el uso de este término está más relacionado con la estimación de la posición del nivel freático medio y su variabilidad en un año típico para la localidad, presumiendo que la precipitación que se infiltra en el suelo es la principal causa de la fluctuación del nivel freático, pues no se consideran procesos de recarga regional, flujo subterráneo ni interacciones con los cauces.

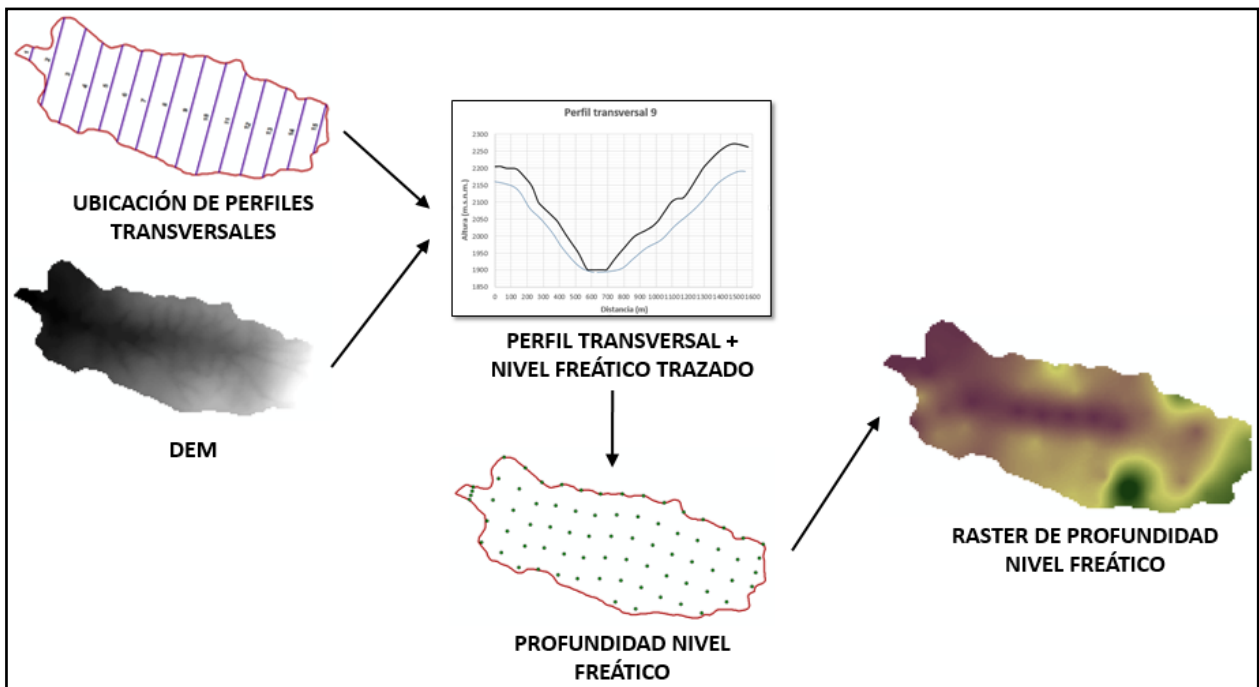
Para la estimación de la profundidad media del nivel freático presente en la zona, se usaron perfiles transversales con una equidistancia de 290 m aproximadamente, para asumir su posición de acuerdo a la forma de la topografía, localizados según lo muestra el mapa 3. Como se observa en la figura 17, estos perfiles transversales se realizaron mediante interpolación de líneas con el DEM, luego a partir de ellos se dibuja la línea del nivel freático, teniendo en cuenta que la profundidad de la línea de agua de la quebrada es muy pequeña y no es cartografiable respecto a la altura de las márgenes de la cuenca, siendo esta profundidad un indicador para el nivel freático. Después se ubican puntos para cada perfil cada 60 m para el primer perfil, cada 200 m para el último perfil, y el resto cada 300 m a lo largo de la distancia horizontal, de norte a sur. Con el shape de puntos de profundidad, se aplica el método de kriging en ArcGIS 10.3 para obtener el raster de nivel freático de la microcuenca.

Para el dibujo de los niveles, se tuvieron en cuenta las siguientes características de los mismos (Laurencena, y otros, 2002):

- A menor pendiente, predomina la infiltración, por lo tanto, se presenta una menor profundidad del nivel freático en las zonas próximas a la planicie de inundación.
- A mayor pendiente, se presenta mayor escurrimiento superficial, por lo tanto, los niveles se encuentran a mayor profundidad en las zonas cerca de la divisoria de aguas.
- Las planicies de inundación presentan una respuesta rápida a las variaciones de excesos de agua.
- A mayor espesor de la zona saturada, menor profundidad de niveles freáticos, en las zonas de menor pendiente.

Para la estimación de los valores del raster de Espesor, se realiza un similar procedimiento. Con la ayuda de los mismos perfiles transversales del terreno, se estima el espesor como la altura media del talud, siendo paralela a la superficie. Primero se ubican puntos para cada perfil, teniendo en cuenta que esta profundidad sea mayor o igual que la profundidad del nivel freático, punto propuesto por el SGC (2015). Luego, se crea un shape de puntos teniendo como atributo el espesor en metros, y por medio del método de kriging se obtiene el raster.

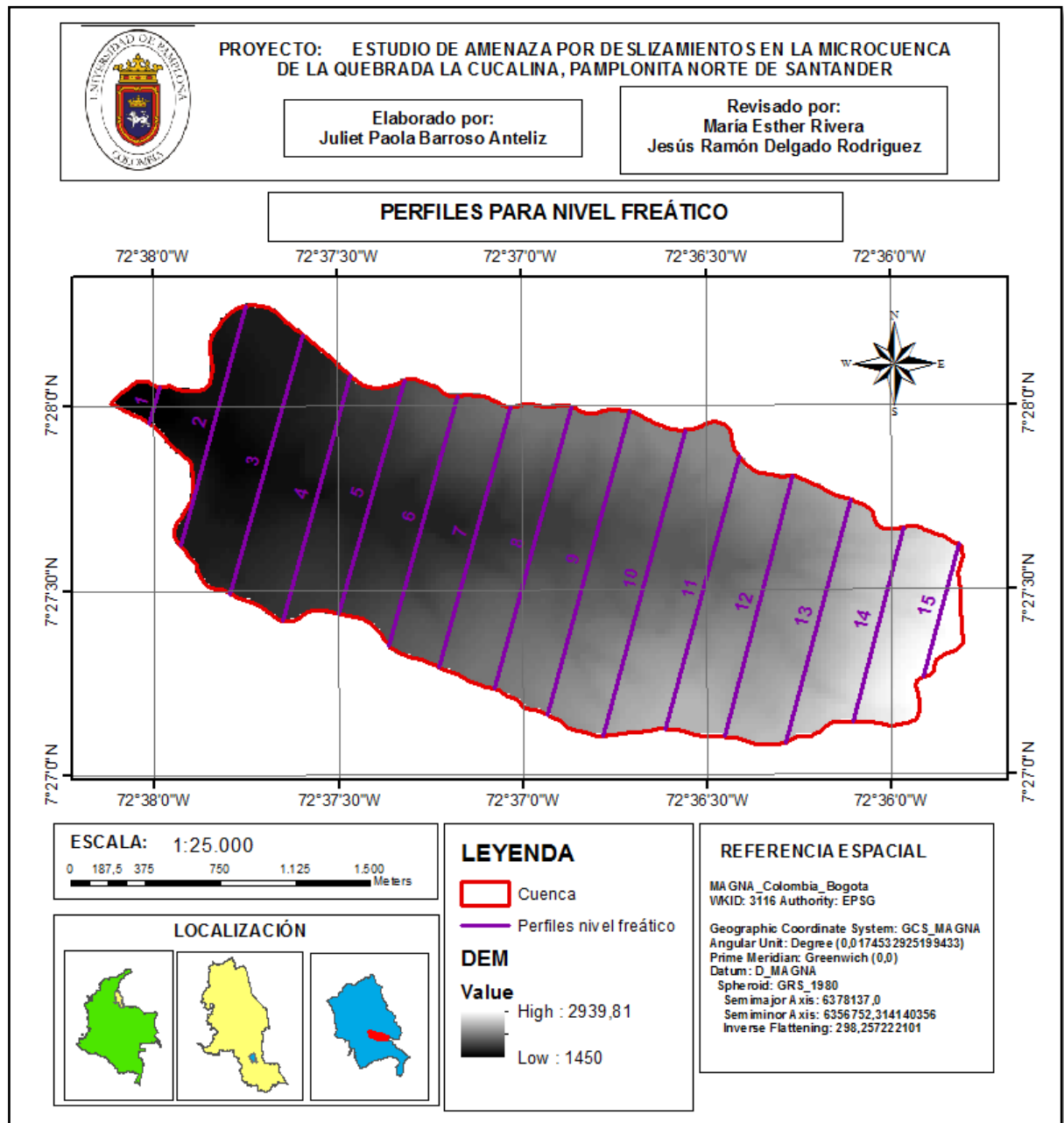
**Figura 17.** Estimación de la profundidad del nivel freático para la zona de estudio



Fuente: Barroso Anteliz (2017)



**Mapa 3. Perfiles transversales para estimación de niveles freáticos en la microcuenca Q. La Cucalina**



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

### OBTENCIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

Para seleccionar la fuente de los datos de precipitación, se tuvo como criterio la cantidad y periodicidad de los datos, y la cercanía a la zona de estudio.

Se obtiene información diaria de precipitación, procurando que se tenga un registro suficientemente largo (más de quince años). Los registros de precipitación se descargaron como datos de precipitación diaria en mm del satélite TRMM desde el servidor NASA Giovanni, desde el 1 de enero de 1998 hasta el 31 de diciembre de 2016.

## **ELABORACIÓN DE CURVAS IDF**

Contando con el registro de 18 años de precipitación diaria en mm, se debe procesar y ordenar la información, basada en la estimación de datos faltantes. Respecto a esto, en el conjunto de datos no se encuentra ningún dato faltante. Seguidamente, del registro se seleccionan los valores máximos del mes en cada año, determinándose la correspondiente serie anual de precipitación máxima mensual en 24 horas. A partir de estos datos, se seleccionan los valores máximos anuales de precipitación con su respectivo mes de ocurrencia; y de esta serie, se calcula el promedio, la desviación estándar.

Se determina el rango de períodos de retorno o frecuencias así: 2, 5, 10, 25, 50, 75, 100 y 500 años; y se calcula para la serie de valores máximos mensuales, las láminas de lluvia para distintas frecuencias, con la función de distribución de probabilidad ajustada a los datos observados, y así se construyen familias de curvas para diferentes probabilidades de ocurrencia.

El siguiente paso consiste en establecer el rango de duraciones para el cual se estiman las curvas IDF, de la forma: 60, 120, 180, 240, 300, 360, 480, 720, 1080 y 1440 minutos. Luego, se calcula la Precipitación Máxima Probable PMP en mm para diferentes duraciones, multiplicando la lámina de lluvia de cada frecuencia, calculada anteriormente, por el cociente asociado de cada duración.

Posteriormente, a cada una de las series obtenidas de cada período de retorno, se calcula la intensidad de lluvia en mm/h, dividiendo la PMP correspondiente sobre cada duración en horas, y después, se aplica el modelo de regresión lineal múltiple, teniendo en el eje de las abscisas la duración en minutos y en el eje de las ordenadas la intensidad en mm/h, obteniendo para cada frecuencia por separado, los parámetros. Seguidamente, a cada regresión lineal por frecuencia, se aplica el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ), para indicar la asimilación y la correlación de los datos a la ecuación.

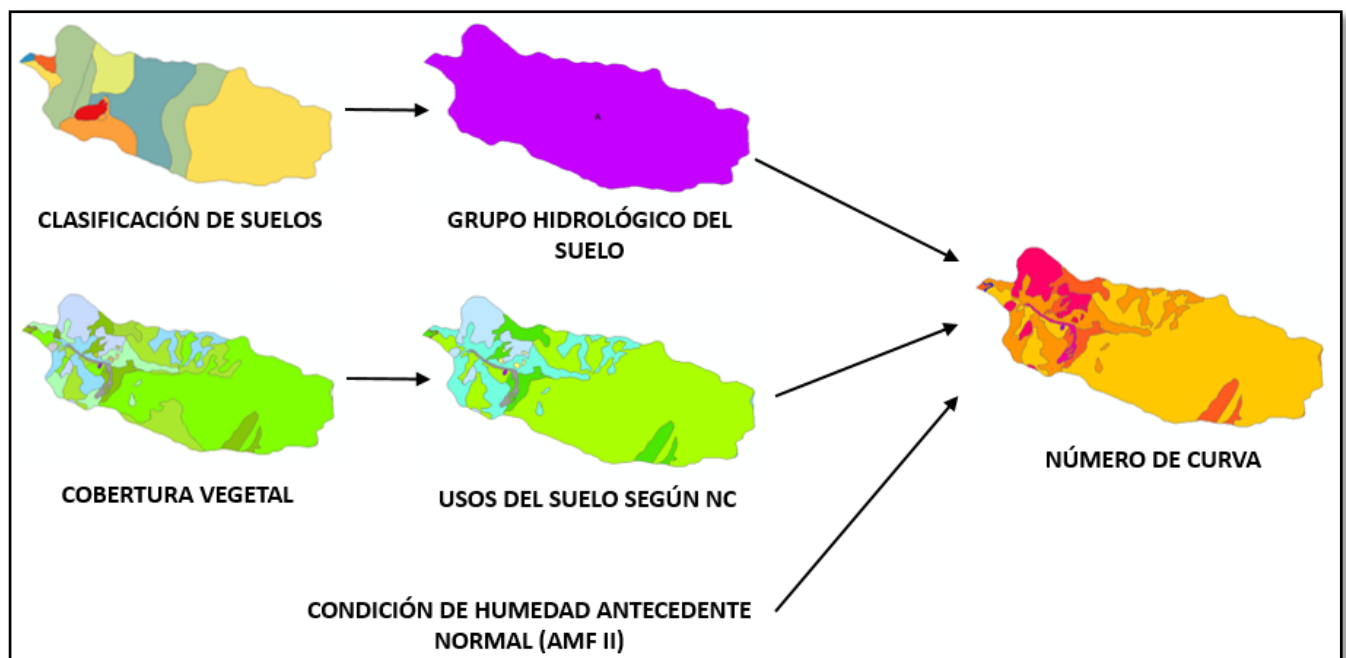
Por medio de regresión potencial, y reuniendo los parámetros de cada período de retorno, se hallan los parámetros A, a y C de la fórmula general (Ecuación 1) para las curvas IDF de Bernard.

Usando la fórmula particular para las curvas IDF de la zona, se halla la intensidad máxima en mm/h, para cada período de retorno en años y para cada duración de cada cinco minutos hasta una hora. Obteniéndose luego, gráficamente, las curvas IDF de la zona.

## CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA CON EL MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA

Para la determinación del Número de Curva se consideran como variables los diferentes grupos hidrológicos de suelo, las condiciones de humedad antecedente, y los usos del suelo de la zona. Se identifica el valor para NC según la interacción de las mismas en la tabla 14. Para el área de estudio, según como se muestra en la figura 18, el grupo hidrológico del suelo se identifica de acuerdo a la clasificación de suelos realizada; los usos del suelo se determinaron a partir de la cobertura de la tierra presente identificada según Corine Land Cover, y se tuvo en cuenta la condición de humedad antecedente normal (AMF II). Luego, se conforman los polígonos que representen las zonas con determinados valores de NC.

**Figura 18.** Identificación del valor de número de curva para la zona de estudio



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Basado en el método propuesto por el Soil Conservation Service SCS, por medio del valor del número de curva, se calcula la retención potencial máxima  $S$  local, en mm, según la ecuación 34, para la zona de estudio. Después, la escorrentía directa o precipitación efectiva  $P_e$ , se obtiene de acuerdo con la retención potencial máxima  $S$  y con la precipitación considerada  $P$ , mediante la ecuación (37). Las precipitaciones seleccionadas para el cálculo de precipitación efectiva son:

- Precipitación para un período de retorno de 20 años y una duración de 24 horas, tomada a partir de las curvas IDF.
- Precipitación media anual para el registro de 18 años de precipitación diaria.

## CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN INFILTRABLE

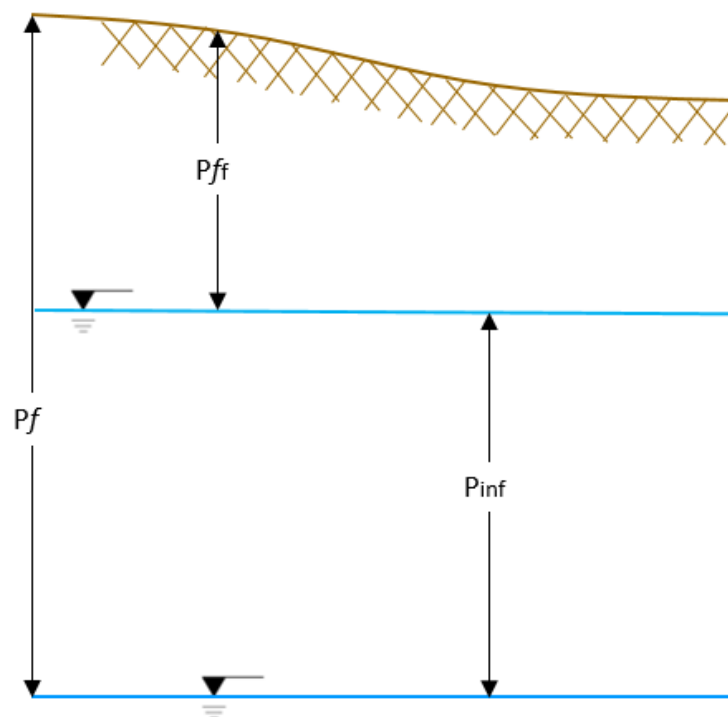
Debido que una proporción de la lluvia que cae al suelo se infiltra, que otro porcentaje queda detenido en la vegetación y en depresiones del suelo mientras se evapora y que otro más fluye como escorrentía directa, se estima esa fracción de agua infiltrada, calculándose el complemento del resto de la lluvia que no se convierte en escorrentía directa, según la ecuación (33), teniendo en cuenta las dos precipitaciones seleccionadas para la zona de estudio. Esto, luego de utilizar el método lluvia – escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, para la determinación de la precipitación infiltrada.

## CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DE LA POSICIÓN DEL NIVEL FREÁTICO DEBIDO A LA LLUVIA ACUMULADA

Debido a la relación entre el volumen acumulado de agua caída en un período de lluvia y el ascenso del nivel freático, se le asigna una variabilidad a la profundidad del nivel freático en función de la variabilidad de la precipitación.

Con el cálculo de la precipitación infiltrable correspondiente, se deduce esa altura de precipitación a la profundidad del nivel freático supuesta. Este análisis se hace en dos escenarios, de acuerdo con los dos valores de precipitación. La posición del nivel freático resultante se estima mediante la ecuación (38), y como se muestra en la figura 19.

**Figura 19.** Representación de los términos utilizados para calcular la profundidad del nivel freático resultante variada por una precipitación determinada



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Teniendo en cuenta los factores de nivel freático variado y espesor, se calcula la altura del nivel freático para una lluvia específica por encima de la superficie de deslizamiento; para su uso en el cálculo de factores de seguridad por talud infinito, de acuerdo con la figura 3.

#### **f) SISMO**

El método de talud infinito interviene el factor detonante sismo dentro del cálculo del factor de seguridad mediante el coeficiente de aceleración horizontal máxima de la zona de estudio. La metodología de SGC (2015), recomienda que se utilice el coeficiente de aceleración para 100 años de retorno; este se obtiene a partir de la curva de excedencia específica. El SGC (2010), en el Mapa Nacional de Amenaza Sísmica, se encuentran las tasas de excedencia para cada municipio y obtienen a medida de que se va acercando a la zona de interés. Esta curva de excedencia presenta en las ordenadas la tasa de excedencia en 1/año, y en las abscisas la intensidad en Gal, o en  $\text{cm/s}^2$ . Al calcular la inversa del período de retorno, se obtiene la tasa de excedencia; y por medio de interpolación se traza una línea hasta cortar la curva de PGA, y se obtiene la intensidad. La aceleración horizontal tiene unidades de  $\text{cm/s}^2$  que equivale a 1 Gal, y el coeficiente se obtiene como la fracción relativa respecto a la aceleración de la gravedad terrestre, de  $980 \text{ cm/s}^2$ .

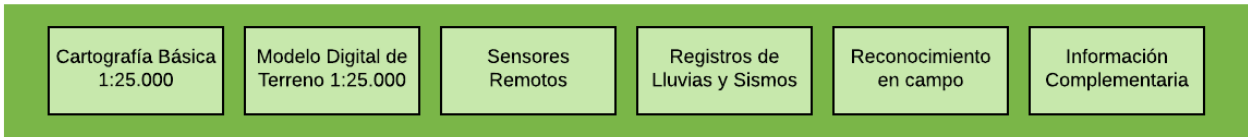
### **6.3. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA RELACIONADA CON LOS FACTORES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS**

La amenaza por deslizamientos se define basándose en un análisis determinístico de estabilidad, modelando talud infinito utilizando ArcGIS 10.3. Según la figura 20, para efectuar los estudios de amenaza se requiere la cartografía básica del área de análisis a escala 1:25.000 y a partir de ella se genera la cartografía temática, correspondiente a cartografía geológica en unidades de geología para ingeniería, la cartografía geomorfológica y la cartografía de cobertura y uso del suelo. Además, se debe hacer un inventario de movimientos en masa, que se incluye dentro de morfodinámica. También se consideran los agentes detonantes de precipitación y sismo, mientras que los factores antrópicos se incluyen de forma implícita en la cobertura y uso del suelo.

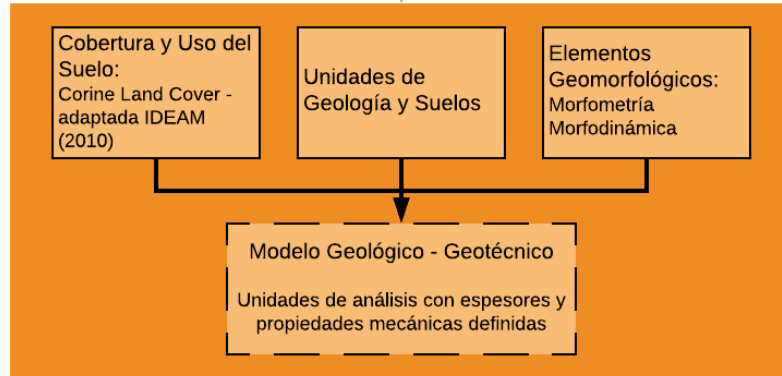
Con una distribución espacial de los espesores de suelo y de sus características mecánicas, además de una posición del nivel freático y de una aceleración sísmica, se procede a calcular por métodos de equilibrio límite, los factores de seguridad en diferentes celdas o “columnas” de suelo, para hallar así la distribución espacial de la amenaza. Con este procedimiento, el factor de seguridad es el dato discriminante para establecer las categorías de amenaza.

**Figura 20.** Evaluación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000

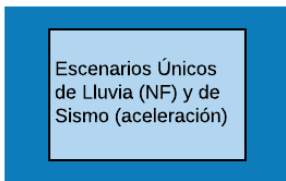
**INSUMOS**



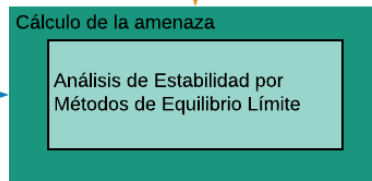
**FACTORES CONDICIONANTES**



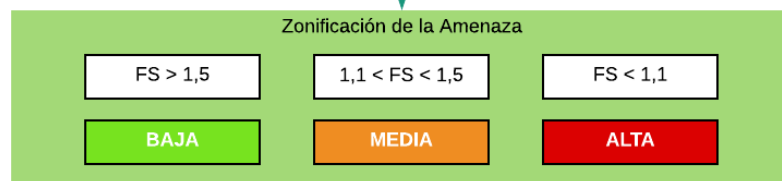
**FACTORES DETONANTES**



**MODELACIÓN**



**RESULTADOS**

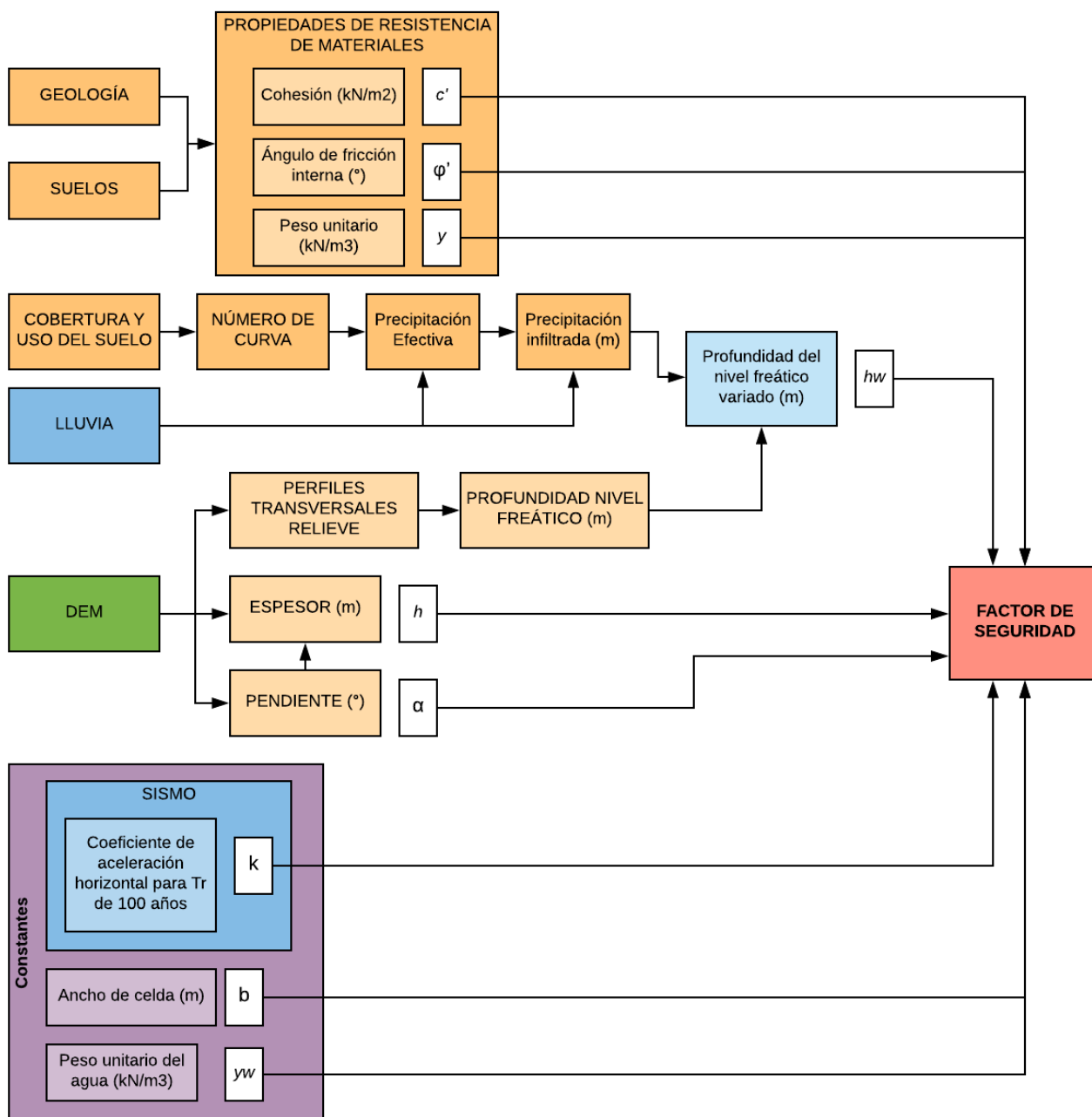


Fuente: SGC (2015), modificado por Barroso Anteliz (2017).

**6.4. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA**

Para la zonificación de la amenaza se debe determinar el factor de seguridad de cada unidad de trabajo, definido por la malla, y para cada capa de los factores condicionantes y detonantes, para aplicar la fórmula de talud infinito (Figura 21). Para el análisis y procesamiento de la información, se recomienda el formato raster, para emplear el tamaño de pixel como unidad mínima de mapeo. De acuerdo con los resultados de la evaluación de la amenaza de la zona, los factores de seguridad calculados por talud infinito en cada celda y con el criterio de clasificación, se puede representar el nivel de amenaza en la zona de estudio; y así se obtiene el mapa de amenaza (SGC, 2015).

**Figura 21.** Zonificación del factor de seguridad para talud infinito



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Las Unidades de Zonificación del Terreno (UZT) mínimas cartografiables aplican para las coberturas temáticas. A continuación (tabla 21), se relacionan las dimensiones de la Unidad de Cálculo de Trabajo adecuadas para escalas. De acuerdo con la misma, para una escala de trabajo 1:25000, la longitud del pixel es de 25 m, y la mínima área cartografiable es de 625 m<sup>2</sup>.

**Tabla 21.** Dimensiones de las Unidades de Cálculo de Terreno UCT

Escala de referencia	Dimensiones del pixel elemental – UTC	
	Longitud (m)	Área (m <sup>2</sup> )
1:X	X/1000	X <sup>2</sup> /10 <sup>6</sup>
1:2000	2	4
1:5000	5	25

Fuente: Calverllo et al. (2013), citado por SGC (2015)



## 7. RESULTADOS Y DISCUSION

### 7.1. IDENTIFICAR LAS VARIABLES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE LOS DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

#### 7.1.1. FACTORES CONDICIONANTES

##### a) GEOLOGÍA Y SUELO

#### UNIDADES GEOLÓGICAS

Las formaciones geológicas correspondientes a la zona de estudio son ocho más tres tipos de depósitos, estas se describen en la tabla 22 y se muestran en el mapa 4. Todas las formaciones geológicas son de tipo de roca sedimentaria. De acuerdo con el mapa 4, la localización de Cuervos coincide con la ubicación de la mina de carbón, debido a su composición de carbonáceas, y la mayor proporción para la zona pertenece a la formación Bocas

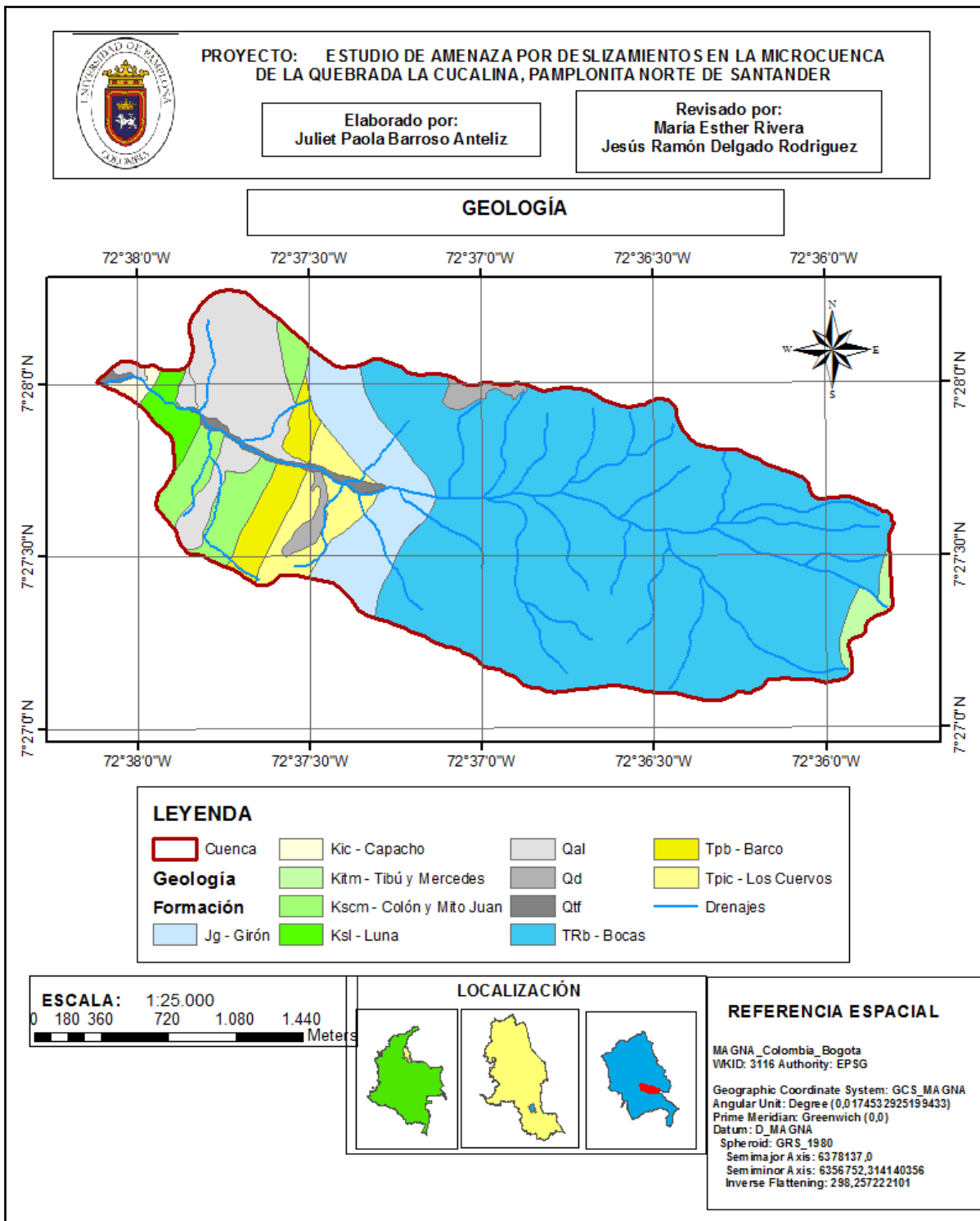
**Tabla 22.** Formaciones geológicas presentes en el área de estudio

FORMACIÓN GEOLÓGICA		EDAD	ROCA	DESCRIPCIÓN
<b>Jg</b>	Girón	Mesozoico, Jurásico	Sedimentaria	Arenisca conglomerática y conglomerado, de color gris amarillento a pardo rojizo, masivos y lenticulares; limolita parda rojiza.
<b>Qal</b>	Depósito aluvial	Cenozoico, Cuaternario Holoceno	Sedimentaria	Aluvión
<b>Qd</b>	Depósito coluvial	Cenozoico, Cuaternario Holoceno	Sedimentaria	Coluvión, talud, derrumbes
<b>Qft</b>	Depósito fluvio-torrencial	Cenozoico, Cuaternario Pleistoceno	Sedimentaria	Terraza y cono de deyección
<b>Tpic</b>	Los Cuervos	Cenozoico, Terciario, Paleoceno	Sedimentaria	Limolita y lutita, de color gris oscuro, carbonáceas, con capas de arenisca clara, de grano fino, arcillosa, mantos de carbón en la parte inferior.
<b>Tpb</b>	Barco	Cenozoico, Terciario Paleoceno	Sedimentaria	Areniscas, lutitas y limonitas intercaladas. Areniscas generalmente color gris,

				arcillosas, de grano muy fino a medio.
<b>Kscm</b>	Colón y Mito Juan	Mesozoico, Cretácico Superior	Sedimentaria	Mito Juan: Lutita gris verdosa; algunas capas limolíticas a arenosas; nódulos limoníticos; gris oscuro en la parte superior; mantos delgados de carbón. Colón: Lutita gris a gris oscura, poco calcárea, con foraminíferos, nódulos y lentes limoníticos.
<b>Ksl</b>	La luna	Mesozoico, Cretácico Superior	Sedimentaria	Parte superior: caliza, lutita silicosa y chert en capas delgadas de color gris oscuro a negro con foraminíferos, capas fosfáticas en la parte superior. Parte inferior: Lutita negra calcárea con concreciones, caliza gris en capas delgadas.
<b>Kic</b>	Capacho	Mesozoico, Cretáceo Inferior	Sedimentaria	Lutita, gris oscura a negra, con caliza gris, masiva y fosilífera en las partes inferior y superior.
<b>Kitm</b>	Tibú y Mercedes	Mesozoico, Cretácico Inferior	Sedimentaria	Mercedes: Caliza gris, fosilífera, arenosa; lutita y arenisca de color gris oscuro. Tibú: Caliza gris, fosilífera, con lutita gris oscura, en la base arenisca clara cuarcítica de grano grueso a conglomerático.
<b>TRb</b>	Bocas	Mesozoico, Triásico	Sedimentaria	Arenisca y lutita de color gris a gris parduzco.

Fuente: A partir de INGEOMINAS (2013)

**Mapa 4. Geología para la microcuenca Q. La Cucalina**



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## CLASIFICACIÓN DEL SUELO

De acuerdo al ensayo de granulometría por tamizado y como base las curvas granulométricas (Anexo 1), se calculó el % de grava, como la suma de % que se retiene hasta el tamiz 4; el % de arena, como la suma de % que pasa del tamiz 4 hasta lo que se retiene en el tamiz 200; y el % de finos, como el % que pasa del tamiz 200; y los coeficientes Cu y Cc; para cada una de las muestras, como se observa en la tabla 23. Por otra parte, según los resultados para los límites de Atterberg, el límite líquido (LL), el límite plástico (LP), y el índice de plasticidad (IP), también se muestran en la tabla 23. Como se muestra en la tabla 23, debido a que todas las muestras no poseen más del 50% de grava, es decir el % en peso que se retiene en el tamiz 4; ni más del 50% que pasa por el tamiz 200, se consideran arenas. También al tener menos del 5% de finos, es decir el % en peso que pasa del tamiz 200, se definen todas las muestras como arenas limpias. Sin embargo, al presentar una cantidad pasante significativa del tamiz 40, lo cual se denominan arenas finas, se usaron de igual manera los límites de Atterberg y el Índice de Plasticidad, y la Carta de Casagrande (Anexo 1), para la clasificación de las muestras de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).







**Tabla 23.** Resultados del análisis granulométrico y límites de Atterberg de suelos en la zona de estudio

Muestra	% Grava	% Arena	% Finos	Cu	Cc	LL	LP	IP
1	0,00	96,89	3,11	5,83	1,07	31,50	25,00	6,50
2	18,08	80,19	1,73	7,50	1,30	43,00	20,83	22,17
3	18,95	80,12	0,92	9,33	0,76	22,50	10,00	12,50
4	15,35	82,12	2,53	8,00	0,61			
5	21,92	77,72	0,37	6,60	1,36	38,80	15,48	23,32
6	6,70	92,55	0,74	3,13	1,45	50,00	16,67	33,33
7	4,90	91,83	3,27	8,00	0,98	41,00	22,50	18,50
8	1,25	97,51	1,25	5,71	0,80	45,50	16,67	28,83
9	34,01	65,99	0,00	6,42	0,85	42,00	16,67	25,33
10	29,78	70,22	0,00	6,64	1,79	47,00	45,00	2,00
11	7,33	91,76	0,92	4,29	0,80	30,30	22,50	7,80

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Tabla 24.** Descripción de la clasificación de suelos por S.U.C.S., y caracterización del color por Munsell en la zona de estudio.

Muestra	Clasificación	Color	Imagen
1	Arena limosa SM	Matiz: 10 YR Intensidad/Croma: 5/6 Marrón amarillento	
2	Arena arcillosa SC, con grava	Matiz: 10 YR Intensidad/Croma: 6/4 Marrón amarillento claro	
3	Arena mal graduada SP, con grava	Matiz: 7.5 YR Intensidad/Croma: 7/4 Rosado	
4	Arena mal graduada SP, con grava	Matiz: 10 YR Intensidad/Croma: 7/4 Marrón muy pálido	
5	Arena bien graduada SW, con grava	Matiz: 10 YR Intensidad/Croma: 7/8 Amarillo	

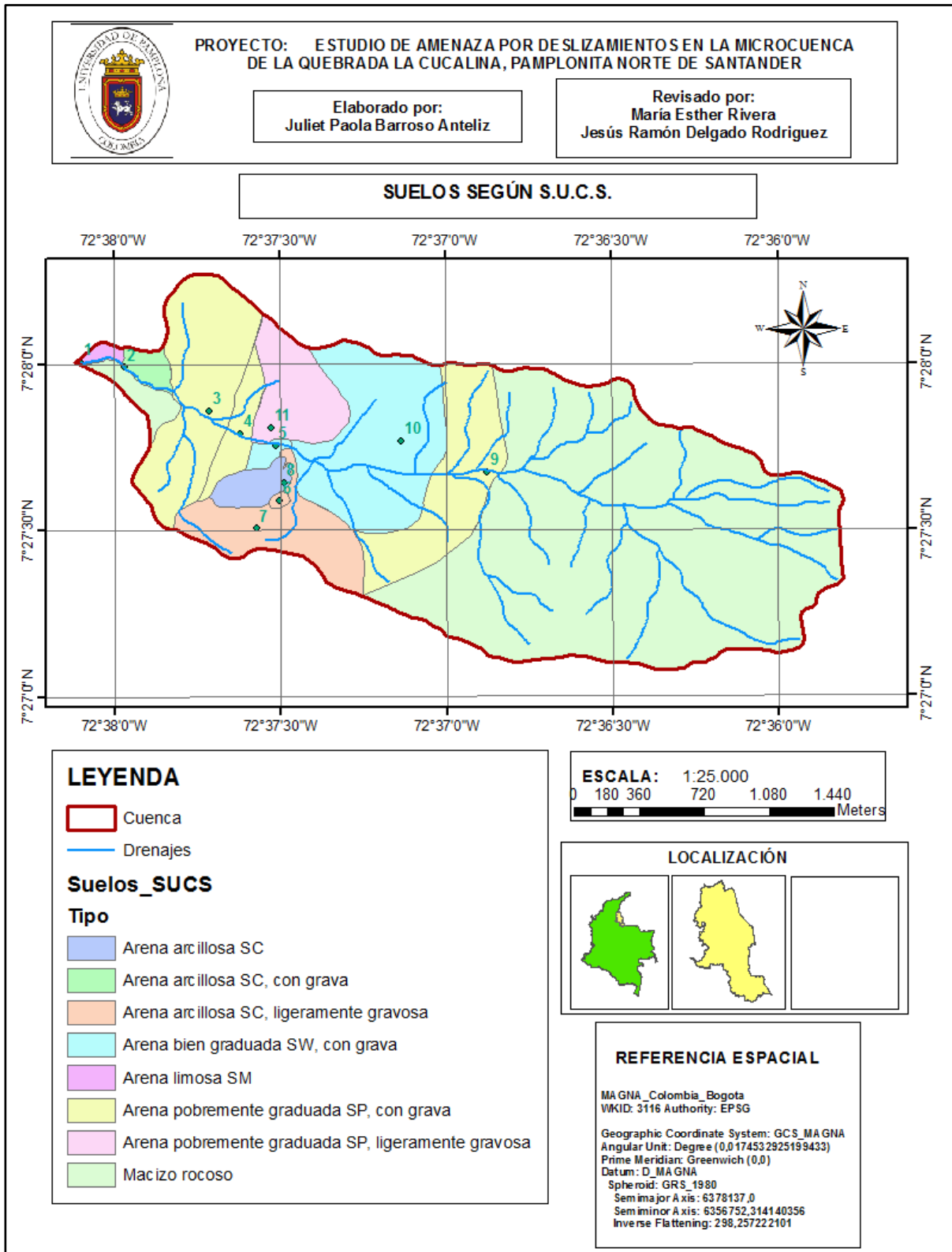
6	Arena arcillosa SC, ligeramente gravosa	Matiz: 10 YR Intensidad/Croma: 7/2 Gris claro	
7	Arena arcillosa SC, ligeramente gravosa	Matiz: 10 YR Intensidad/Croma: 7/6 Amarillo	
8	Arena arcillosa SC	Matiz: 10 YR Intensidad/Croma: 5/6 Marrón amarillento	
9	Arena mal graduada SP, con grava	Matiz: 10 YR Intensidad/Croma: 4/4 Marrón amarillento oscuro	
10	Arena bien graduada SW, con grava	Matiz: 5 YR Intensidad/Croma: 3/4 Marrón rojizo oscuro	
11	Arena mal graduada SP, ligeramente gravosa	Matiz: 7.5 YR Intensidad/Croma: 4/6 Marrón fuerte	

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Las muestras 3, 5, 6, 9, 10 y 11, como se muestra en la tabla 23 y 24, se clasificaron usando los criterios de los coeficientes de gradación, en arenas bien graduadas SW o mal graduadas SP, por tener muy poca cantidad de finos. Además de la muestra 4 que, no se pudieron realizar los ensayos de los límites de Atterberg. Las demás muestras para su clasificación, se usó el punto de coordenada del índice de plasticidad en función del límite líquido en la Carta de Casagrande (Anexo 1). En la zona de estudio, se presenta una muestra, la 1, como Arena limosa SM; 5 muestras como arenas arcillosas SC; 3 muestras como arenas mal graduadas SP; y 2 muestras de suelo como arenas bien graduadas SW; además, se presenta que la mayoría de las muestras presentan una cantidad significativa de gravas.

Observándose en el mapa de tipo de suelo, en el mapa 5, como resultado de la zonificación de la clasificación anterior, se observa que la arena limosa SM se localiza en la desembocadura de la quebrada, las arenas arcillosas SC se localizan alrededor del deslizamiento de la mina de carbón y en un depósito en la parte baja de la cuenca. Los suelos se presentan cada vez más gravosos al acercarse al macizo rocoso de la parte alta de la cuenca.

**Mapa 5. Tipo de suelos en la microcuenca de la Q. La Cucalina**



Fuente: Barroso Anteliz (2017)



## Propiedades mecánicas

En la tabla 25, se observan los valores de las propiedades mecánicas de las unidades indicadas, siendo la cohesión, ángulo de fricción y peso unitario, como medias de diferentes fuentes; de acuerdo a los materiales encontrados en el mapa 4 y 5, de geología y suelos, respectivamente.

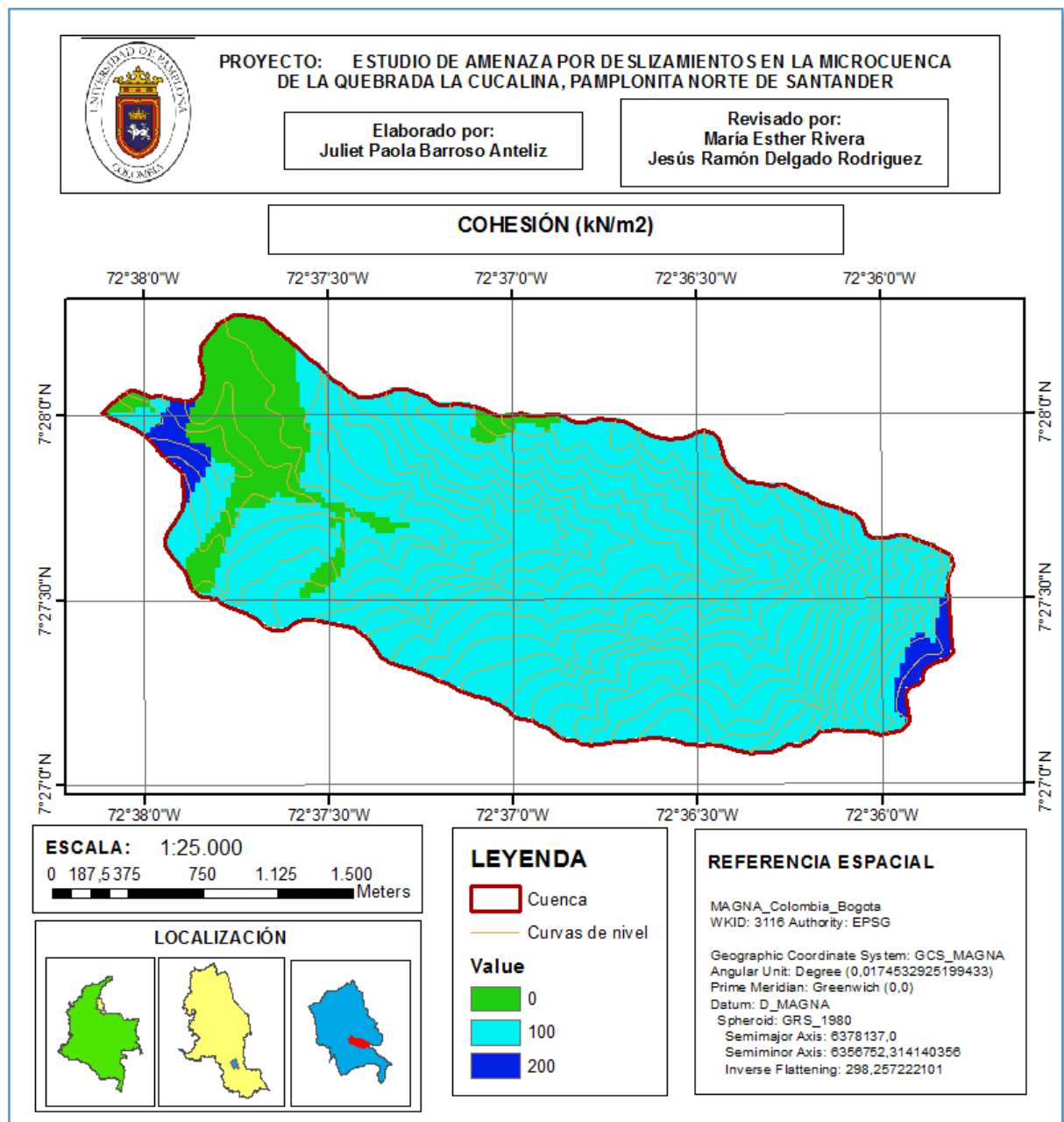
**Tabla 25.** Propiedades mecánicas para materiales de la zona de estudio

Tipo unidad		Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	Ángulo fricción (°)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )
Suelos	Arena limosa	0	25	13,34
	Arena arcillosa	0	27	17,65
	Arena bien graduada	0	33	15,69
	Arena mal graduada	0	30	16,38
Rocas Sedimentarias blandas	Limolita, lutita, arenisca	100	30	20
Rocas Sedimentarias duras	Caliza, dolomita, arenisca	200	40	25

Fuente: Martínez Vargas (1990), Civilgeeks (2011), IEEE Sección Panamá (2013), González de Vallejo, y otros (2002), modificado por Barroso Anteliz (2017)

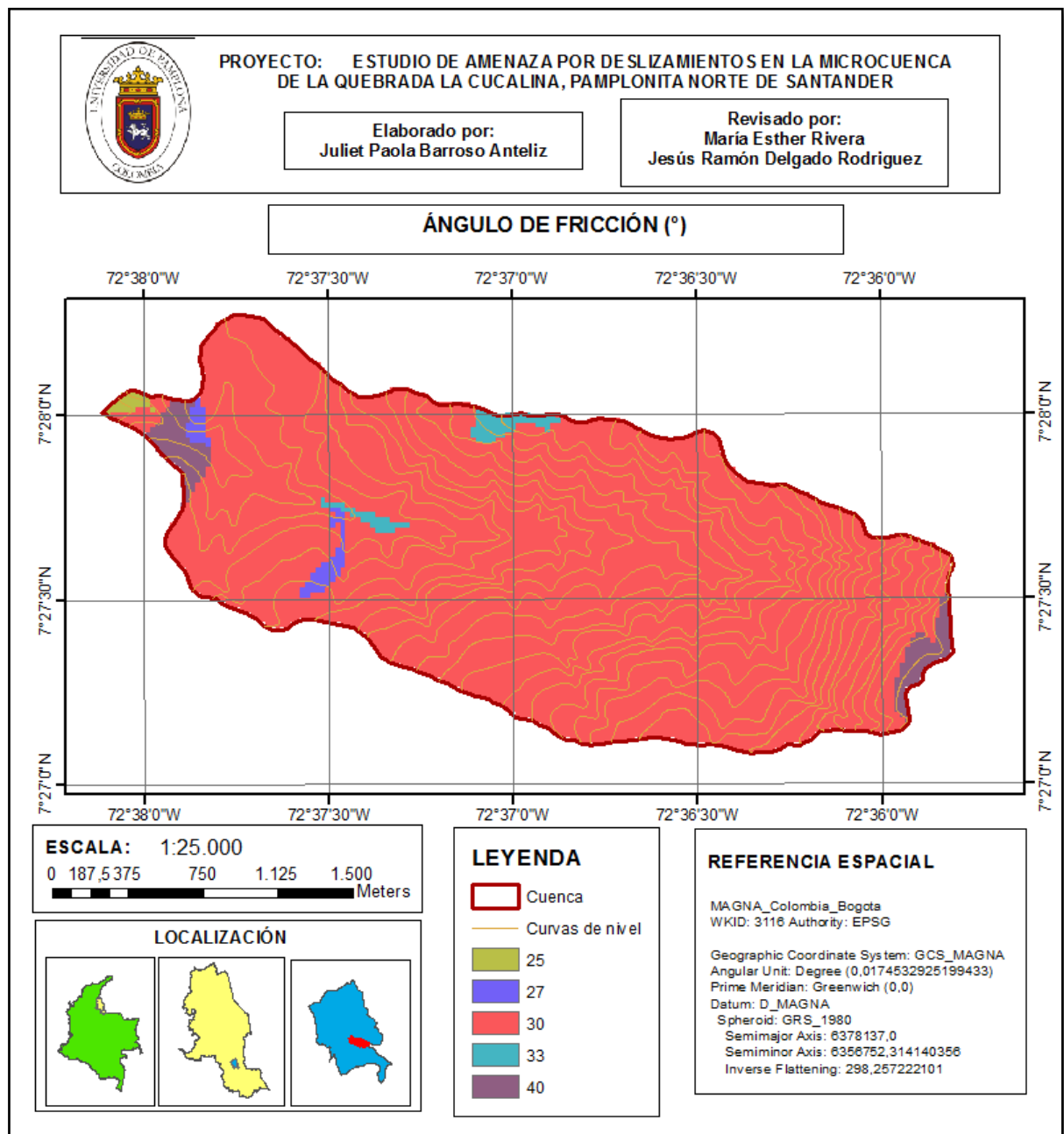
A continuación, en el mapa 6 se muestran los valores de cohesión para la zona de estudio, en el mapa 7, se presenta el ángulo de fricción o rozamiento interno, y en el mapa 8, los valores de peso unitario. Respecto a la cohesión de las unidades de suelo, las arenas no son cohesivas, por ello su cohesión es cero. Además, se observa que las rocas sedimentarias blandas presentan menor cohesión, menor ángulo de fricción y menor peso unitario, que las rocas sedimentarias duras.

**Mapa 6.** Valores de cohesión en  $\text{kN/m}^2$  para los materiales de la microcuenca Q. La Cucalina



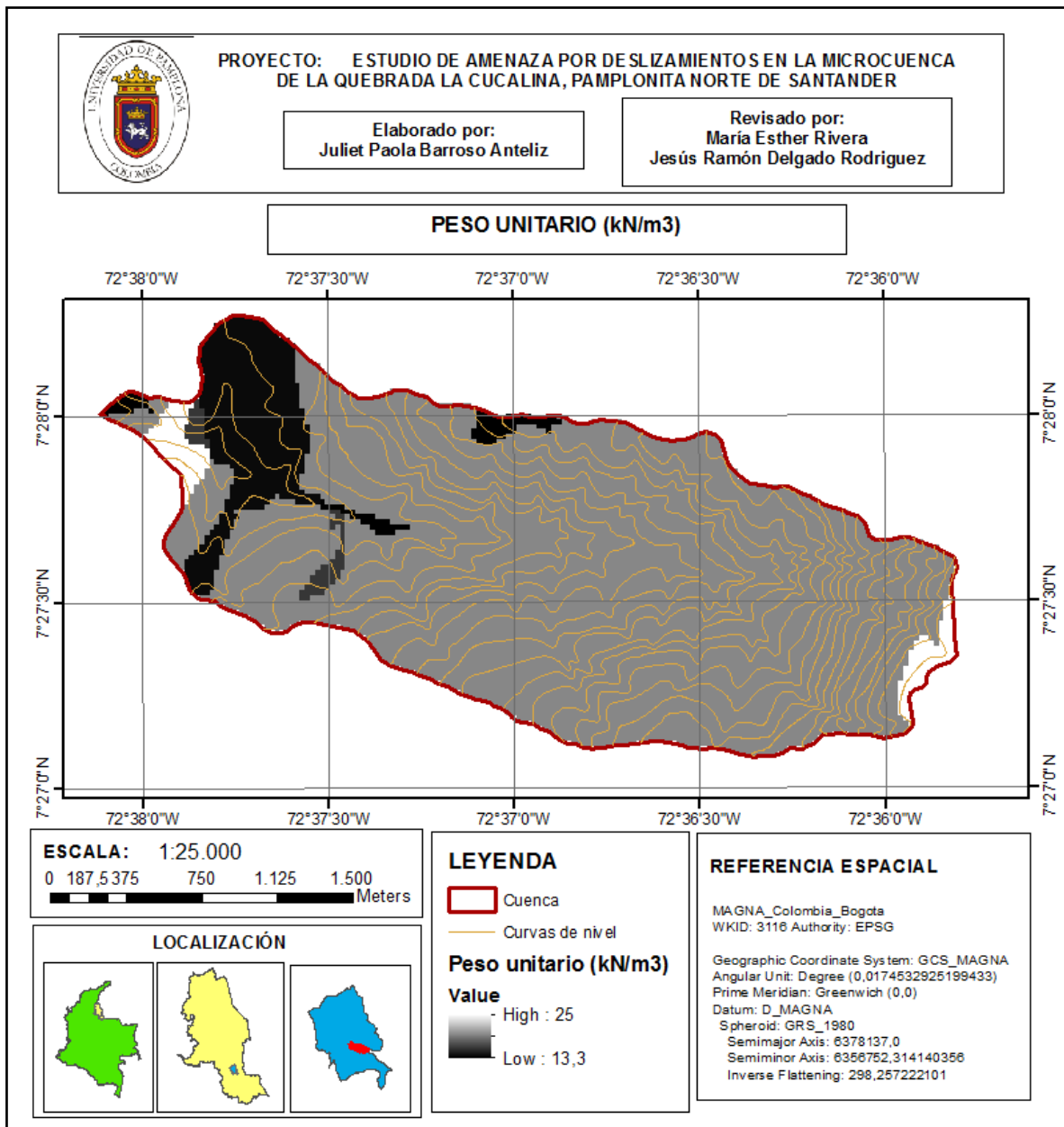
Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 7.** Valores de ángulo de fricción en grados para los materiales de la microcuenca Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 8.** Valores para peso unitario en  $\text{kN/m}^3$  para la microcuenca Q. La Cucalina



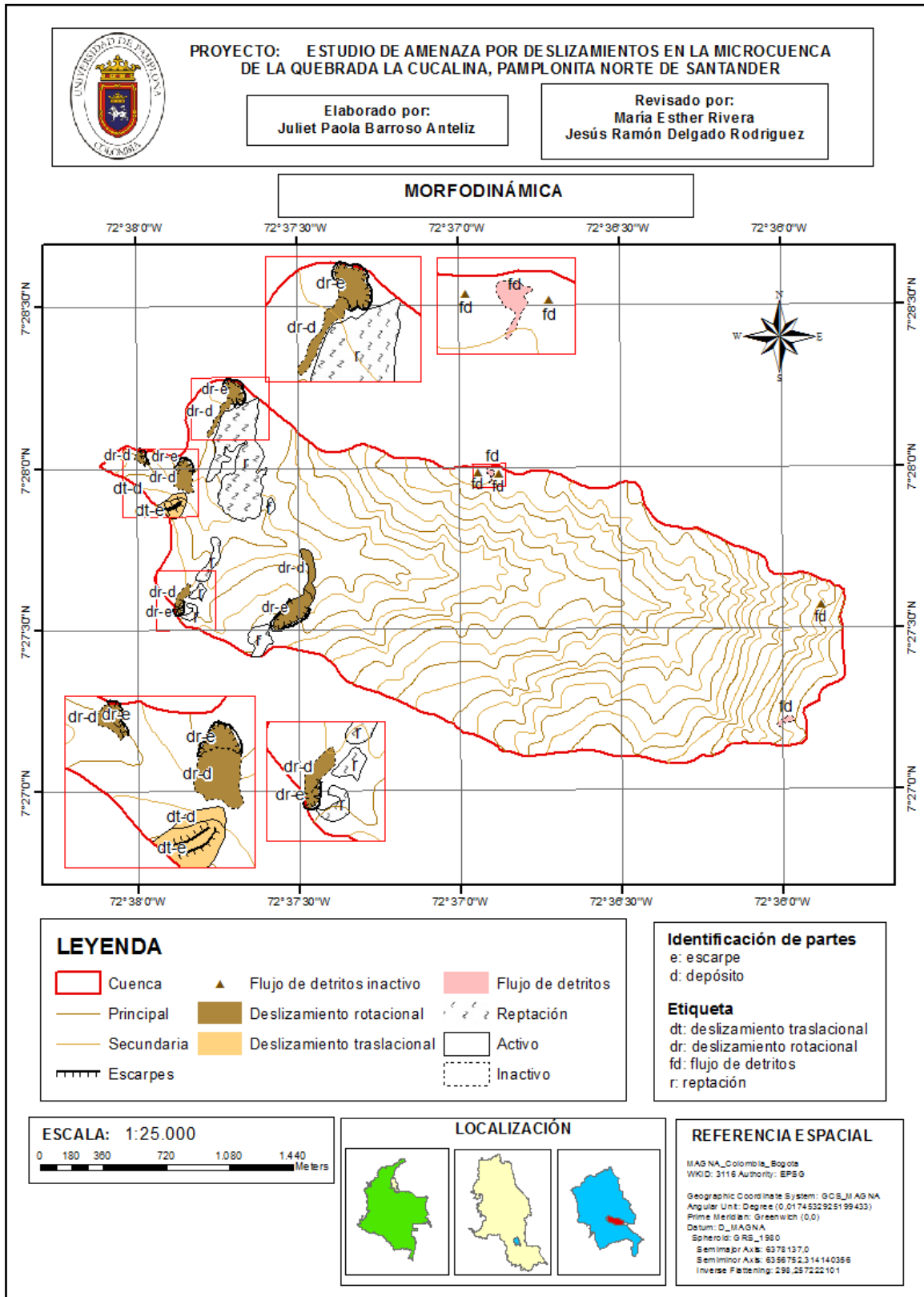
Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## b) MORFOMETRÍA

### MORFODINÁMICA

En el mapa 9, se muestran los movimientos en masa activos e inactivos presentes en la zona de estudio. Los movimientos en masa encontrados son reptación, deslizamientos rotacionales y traslacionales y flujo de detritos. La gran parte de ellos, se encuentran en la parte baja de la microcuenca, coincidiendo con las áreas de depósitos.

## Mapa 9. Morfodinámica en la microcuenca Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Los deslizamientos rotacionales se caracterizan por presentar un escarpe principal pronunciado, y una forma circular en la superficie de rotura, según INETER & COSUDE (2005) y PMA: GCA (2007). En la imagen 3, se presenta el deslizamiento rotacional activo, que se encuentra ubicado junto a la mina de carbón Santa Clara. Este tiene una dimensión de 35862 m<sup>2</sup>, y su fecha de ocurrencia fue durante la temporada de lluvia del año 2011. Debido a encontrarse activo, y por los impactos de la mina subterránea, esta zona representa un área de alta amenaza por un nuevo deslizamiento. Y en la imagen 4, se muestra uno de los deslizamientos rotacionales inactivo, que se encuentre en la margen derecha aguas abajo de la cuenca, en frente del deslizamiento traslacional.

Los movimientos de reptación en la zona de estudio (Imagen 5), no distinguen una superficie de falla, se encuentran en las áreas entre 16 a 35° de pendiente, y se presenta en Arenas mal graduadas SP, con grava, siendo un material no cohesivo; lo cual concuerda con la clasificación de PMA: GCA (2007). Este tipo de movimiento es que presenta mayor dimensión en la microcuenca, coincidiendo con las zonas de depósitos.

El deslizamiento traslacional, en la zona de estudio, se caracteriza por ser un movimiento de una superficie de rocas de la formación Luna con deslizamientos paralelos a la estratificación, a lo largo de una superficie planar, como se muestra en la imagen 6, concordando con la clasificación de INETER & COSUDE (2005) y Gáfaró Duarte (2013); y es un movimiento superficial, según PMA: GCA (2007).

En el caso de flujo de detritos, su clasificación se debe según PMA: GCA (2007), a que se encuentran en zonas con una pendiente pronunciada y con materiales no plásticos con suelos tipo Arenas bien graduadas SW. Estos se encuentran inactivos.

**Imagen 3. Deslizamiento rotacional activo**



**Imagen 4. Deslizamiento rotacional inactivo**



**Imagen 5. Reptación en la zona de estudio**



**Imagen 6. Deslizamiento traslacional activo**



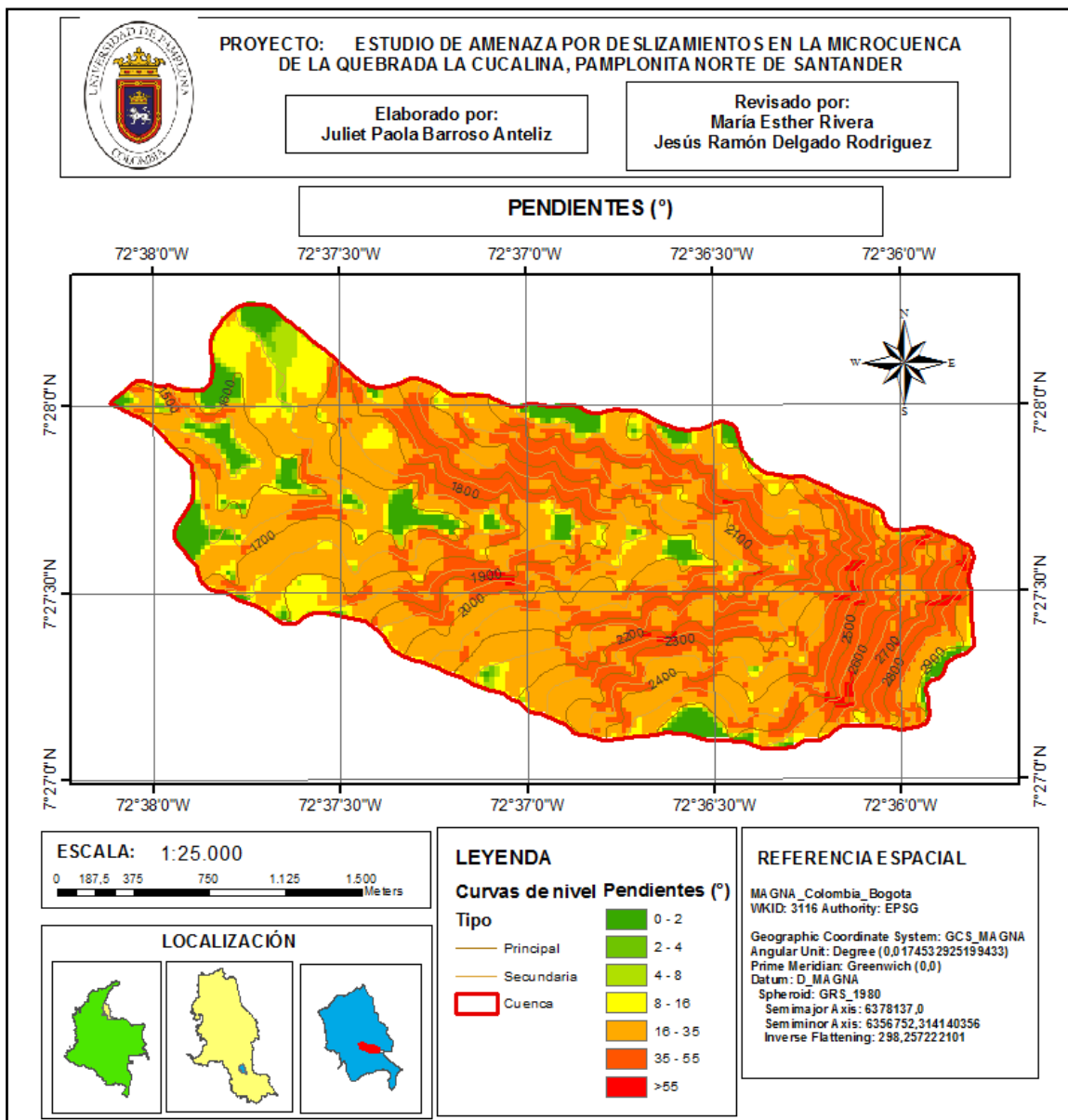
Fuente: Barroso Anteliz (2017)



## PENDIENTES

De acuerdo con el mapa 10, que presenta las pendientes en grados para la microcuenca, y según la tabla 6, el rango más frecuente es el de 16 – 35°, lo que se deduce en un terreno abrupto, con procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos) y alta propensión al desarrollo de procesos erosivos. El rango que le sigue es 35 – 45°, para un terreno muy abrupto, con afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.

**Mapa 10.** Valores de pendientes en grados para la microcuenca Q. La Cucalina

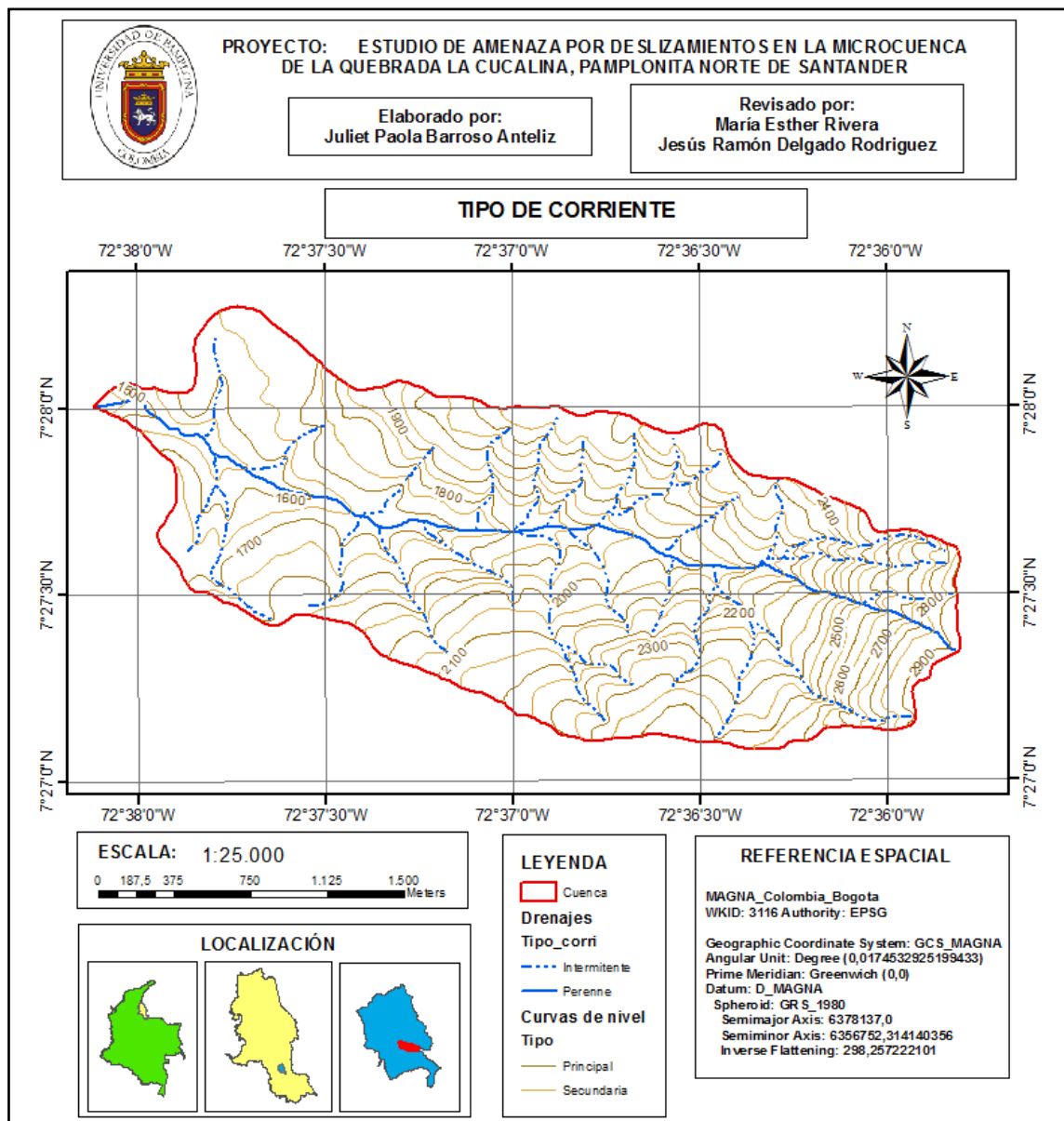


Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA

La microcuenca de la Q. La Cucalina, se caracteriza por ser una cuenca de tipo exorreica, al desembocar en el río Pamplonita; y este perteneciendo a la cuenca del río Zulia, más adelante desembocando en el Golfo del Lago de Maracaibo. La red hidrográfica de la quebrada (mapa 11) presenta sus ramificaciones de tipo de corriente intermitente, y también una parte del cauce principal (mapa 12), acarreado agua durante las temporadas de lluvia y hasta antes de comenzar con la siguiente, permaneciendo los drenajes secos durante la mayor parte de la temporada seca.

**Mapa 11.** Tipo de corriente de la Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## Características morfométricas básicas

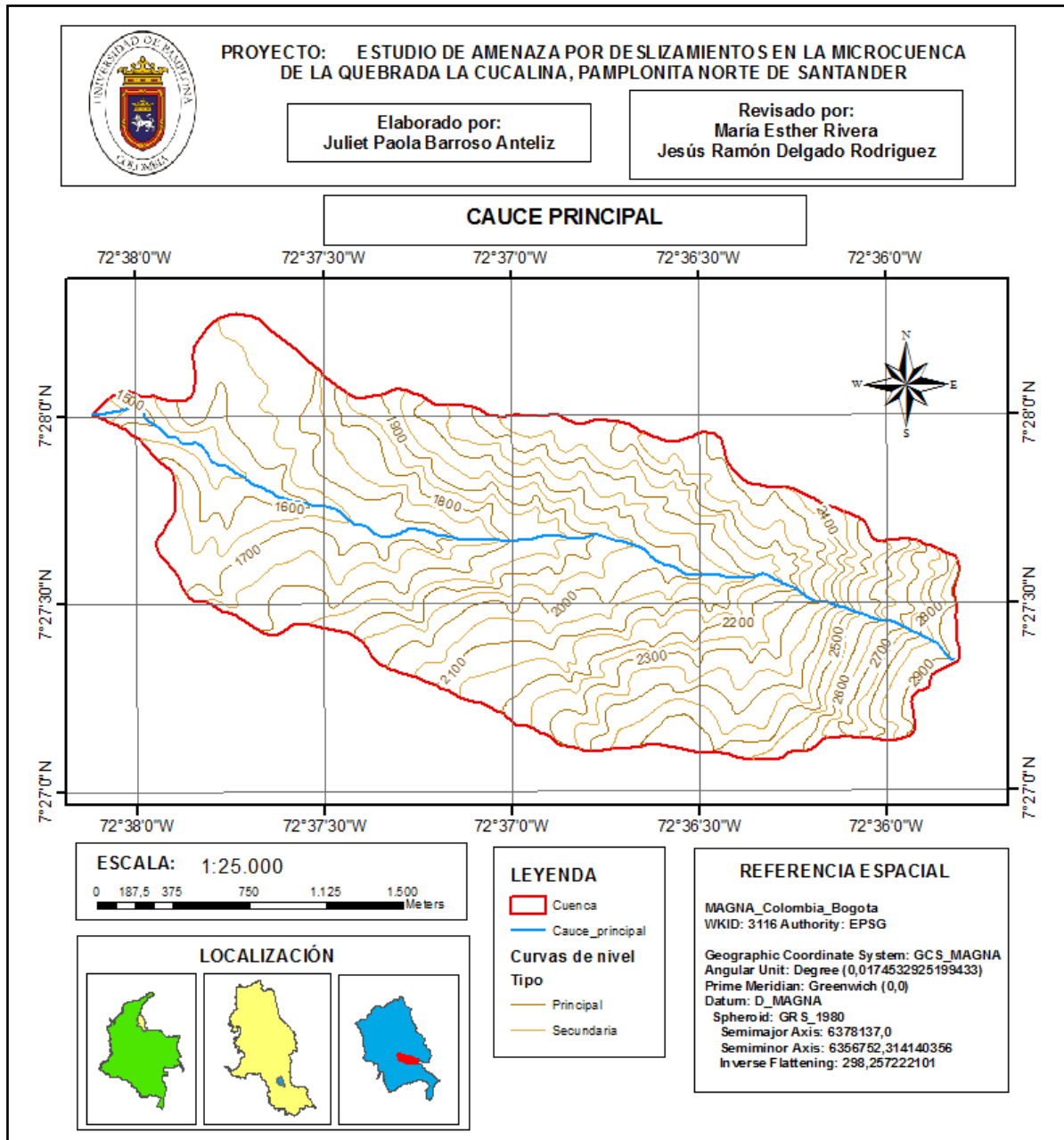
**Tabla 26.** Características morfométricas básicas de la microcuenca de la Q. La Cucalina

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Área	A	5,18	km <sup>2</sup>
Perímetro	P	11,13	km
Longitud axial	L	4,42	km
Ancho promedio	B	1,18	km
Ancho máximo	B máx.	1,60	km
Longitud del cauce principal	Lc	4,65	km
Longitud del valle del cauce principal		4,4	km
Cota máxima de la cuenca	CMC	2910,34	m.s.n.m.
Cota mínima de la cuenca	CmC	1450	m.s.n.m.
Cota máxima del cauce	CMc	2901,96	m.s.n.m.
Cota mínima del cauce	Cmc	1450	m.s.n.m.
Orientación de la cuenca		SE – NW	-

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

La zona de estudio, de acuerdo con la tabla 26, posee un área de 5,18 km<sup>2</sup>, un perímetro de 11,13 km, una longitud axial desde el punto más alto sobre la divisoria de aguas hasta su desembocadura de 4,42 km, y un ancho promedio de 1,18 km. Como se observa en el mapa 12 y la tabla 26, la microcuenca alcanza una cota máxima de la cuenca de 2910,34 msnm, y en su desembocadura una cota de 1450 msnm; por parte del cauce principal según la figura 12, presenta en su flujo una cota máxima alrededor de los 2901,96 msnm. La orientación de la cuenca es SE – NW, el cauce principal corre hacia el NW, y por lo tanto, recibe insolación en las dos vertientes durante todo el día, influyendo en la evapotranspiración.

**Mapa 12.** Cauce principal de la microcuenca de la Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Parámetros morfométricos relativos a la forma**

**Tabla 27.** Parámetros morfométricos relativos a la forma de la cuenca de la microcuenca de la Q. La Cucalina

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Factor Forma	Kf	0,266	-

Coeficiente de Compacidad	Kc	1,377	-
Índice de alargamiento	la	2,765	-
Razón de elongación	Re	0,585	-

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

En la tabla 27 se muestran los resultados para los parámetros relacionados con la forma de microcuenca.

Para el Factor Forma resultó un valor de 0,266, y de acuerdo con Horton R.E. (1932), citado por Lux Cardona (2016), un valor de Kf superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas; por lo tanto en este caso, por ser una cuenca con un factor de forma bajo, está menos sujeta a crecientes por tratarse de una cuenca alargada, que una de la misma área y mayor factor de forma.

La determinación del Coeficiente de Compacidad alcanzó un Kc con valor de 1,377, estableciendo que la microcuenca presenta forma oval-oblonga a rectangular-oblonga, según la tabla 7, que indica una baja susceptibilidad a las crecidas que una cuenca más redonda, porque su número se aleja de 1 que es cuando la cuenca es más peligrosa y tiende a ser de forma redonda. El grado de aproximación de este índice a la unidad indica la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano a 1 sea, es decir, que entre más bajo sea Kc mayor será la concentración de agua ((Fuentes Junco, 2004); (Lux Cardona, 2016)).

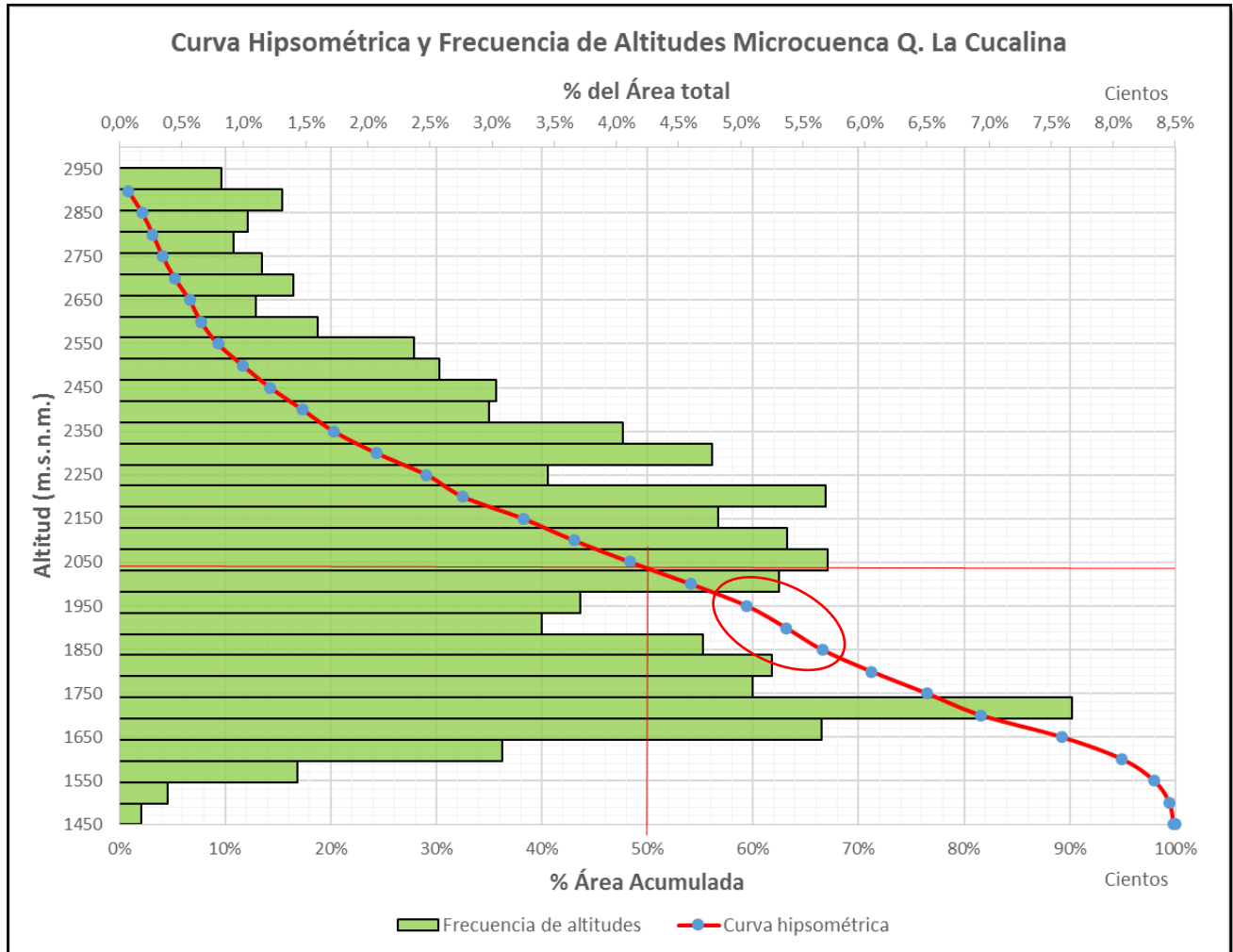
El parámetro de índice de alargamiento presentó un valor de 2,765. Cuando la toma valores mucho mayores a la unidad, se trata de cuencas alargadas, mientras que para valores cercanos a 1, se trata de una cuenca poco alargada, cuya red de drenaje presenta la forma de abanico y puede tener un río principal corto (Fuentes Junco, 2004). Por lo tanto, se deduce que la cuenca es alargada tendiendo a buscar una forma rectangular más que cuadrada.

Según Jardí (1985), para valores de Re inferiores a 1, implicará formas alargadas, y cuanto menor sea Re, más alargada será la forma de la cuenca. La razón de elongación en la zona de estudio indica un valor de 0,585, y se deduce que es de forma alargada.

Los anteriores parámetros relacionados con la forma, dan la misma clasificación a la cuenca como alargada. La cuenca al ser de forma alargada puede generar menor rapidez en la concentración de aguas superficiales y por ende crecidas más graduales (Delgadillo Santander, y otros, 2013), ya que como explica Lux Cardona (2016), el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más grande que en cuencas redondas, por lo tanto, menor rapidez para la concentración de los flujos, generando menor violencia.

## Parámetros morfométricos relativos al relieve

**Figura 22.** Curva hipsométrica y Frecuencia de altitudes de la microcuenca de la Q. La Cocalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

La curva hipsométrica de la zona de estudio se presenta en la figura 22, en ella se observa la distribución del área de acuerdo a su elevación por tramos sobre una equidistancia de 50 m. Los resultados definen que al 50% de la microcuenca presenta cotas superiores a 2036 msnm, llamándose así la altitud mediana; mientras que el 10% presenta altitud mayor a los 2550 msnm. De acuerdo con la forma de la curva, según la figura 22, se infiere que la microcuenca se encuentra en una fase de equilibrio y una etapa madura, y representa una cuenca joven de pie de montaña, donde la cuenca entra en una etapa de estabilización respecto a los procesos erosivos (Lux Cardona, 2016). Observando por otra parte que, la frecuencia de altitudes muestra que la microcuenca presenta mayor porcentaje de área desde la mitad a partes bajas de la cuenca, resultando la mayor

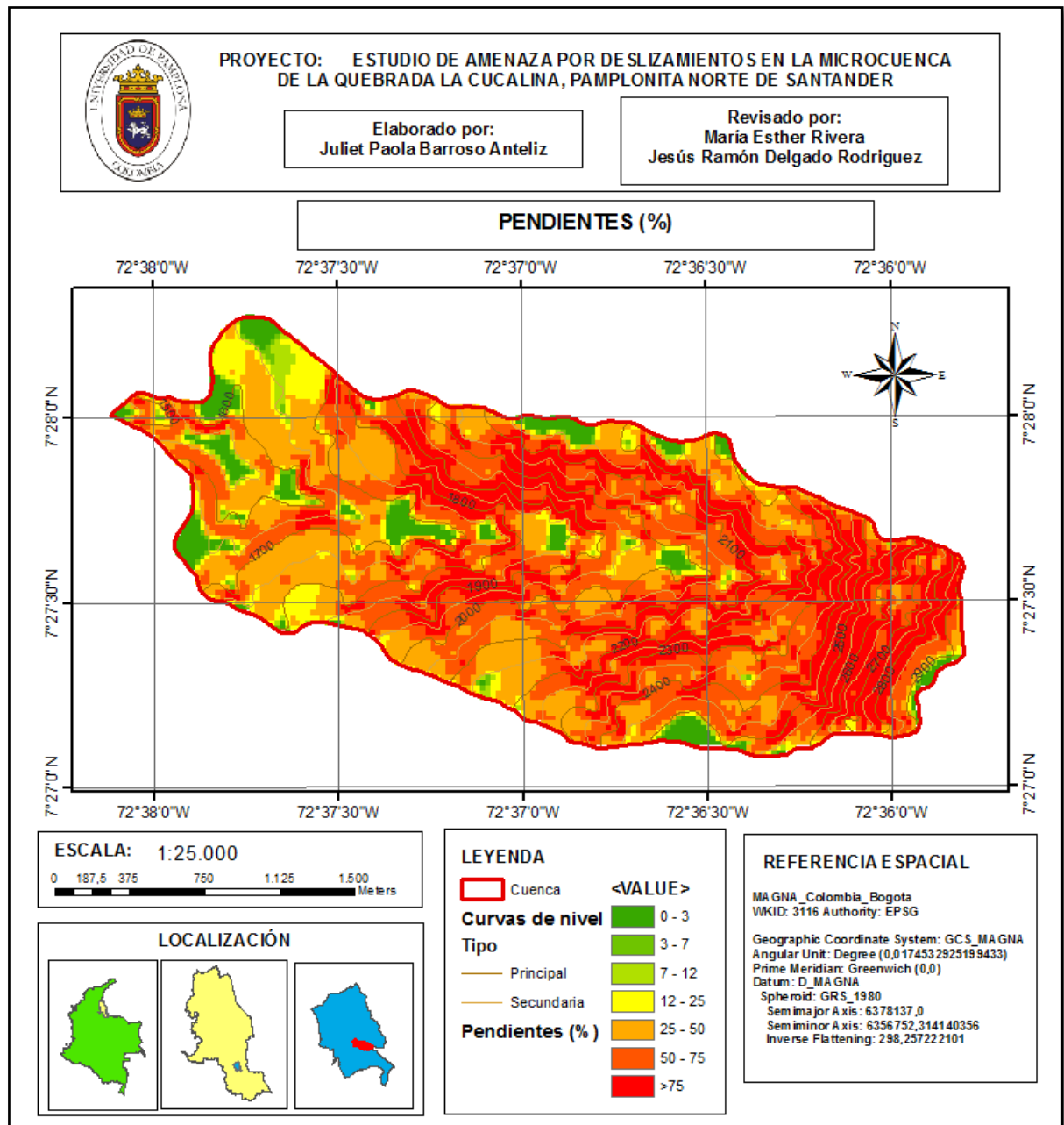
frecuencia para la cota 1675 msnm con un 7,67% del área total. En la parte resaltada sobre la curva por un óvalo rojo, se observa un cambio en el comportamiento de la misma, esto ocurre por un menor porcentaje de área del total entre las cotas 1850 – 1950 msnm, debido al aumento de pendiente entre las mismas

**Tabla 28.** Parámetros morfométricos relativos al relieve de la microcuenca de la Q. La Cucalina

<b>PARÁMETRO</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADES</b>
Elevación media	Em	2061,10	m.s.n.m.
Altitud mediana		2036,23	m.s.n.m.
Altitud más frecuente		1675	m.s.n.m.
Pendiente media de la cuenca		70,70	%
Pendiente del cauce principal		31,22	%
Desnivel altitudinal de la cuenca		1460,34	m
Desnivel altitudinal del cauce		1451,96	m
Coeficiente de masividad	Km	117,52	-
Coeficiente orográfico	Ko	71817,17	-

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 13.** Pendientes en porcentaje de la microcuenca de la Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Con el análisis de los demás parámetros morfométricos del relieve (tabla 28), se establece que se trata de un paisaje con pendientes escarpadas. La pendiente media de la cuenca con valor de 70,70%, caracteriza a la microcuenca (mapa 13 y figura 23) como de relieve moderadamente escarpado según el IGAC (tabla 8); y la pendiente del cauce principal (figura 24) de 31,22%, como ligeramente escarpado; teniendo mayor inclinación la microcuenca que el recorrido del cauce principal, y con la posibilidad de presentar

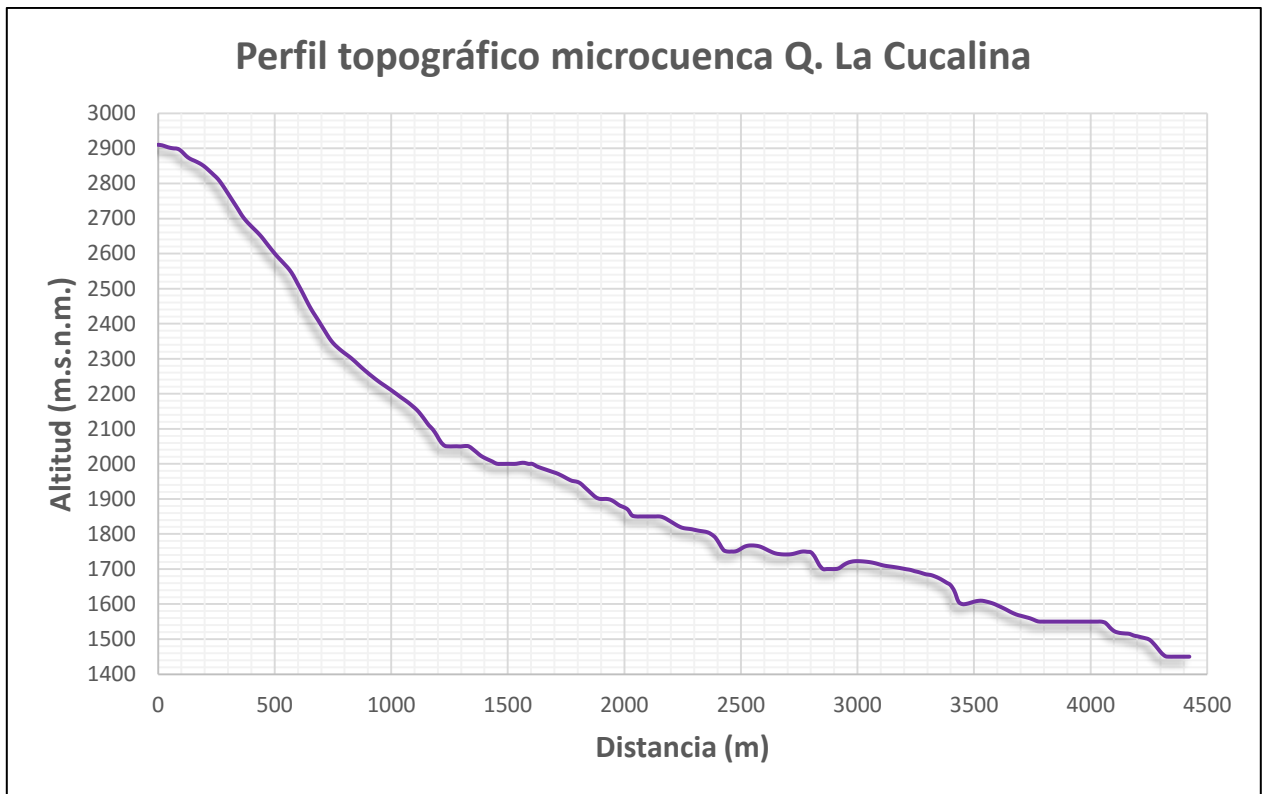


erosión severa por relieve. Además, estos valores favorecen la capacidad de arrastre de sedimentos e incrementan la velocidad de caudal en caso de tormentas, según Delgadillo Santander, y otros (2013).

De acuerdo con Oguerre (2015), y observando el perfil topográfico del cauce en la figura 20, generalmente las cuencas con pendientes altas en el cauce principal tienden a tener hidrógrafas más picudas y más cortas que cuencas con pendientes menores. Presenta un gran desnivel altitudinal, de 1460 m, debido a la alta amplitud altimétrica, pendiente moderadamente escarpada y área pequeña.

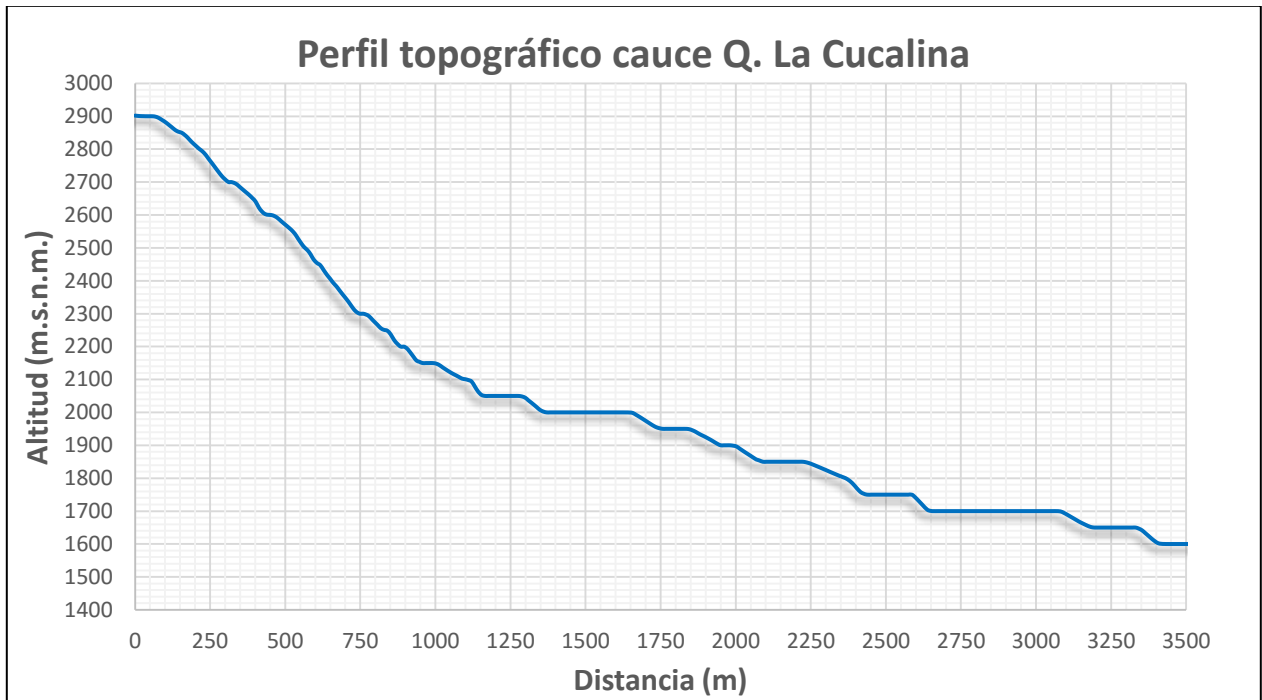
El coeficiente de masividad es alto, con un valor de 117,52, que ubica a la cuenca como montañosa.

**Figura 23.** Perfil topográfico de la microcuenca de la Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Figura 24.** Perfil topográfico del cauce principal



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

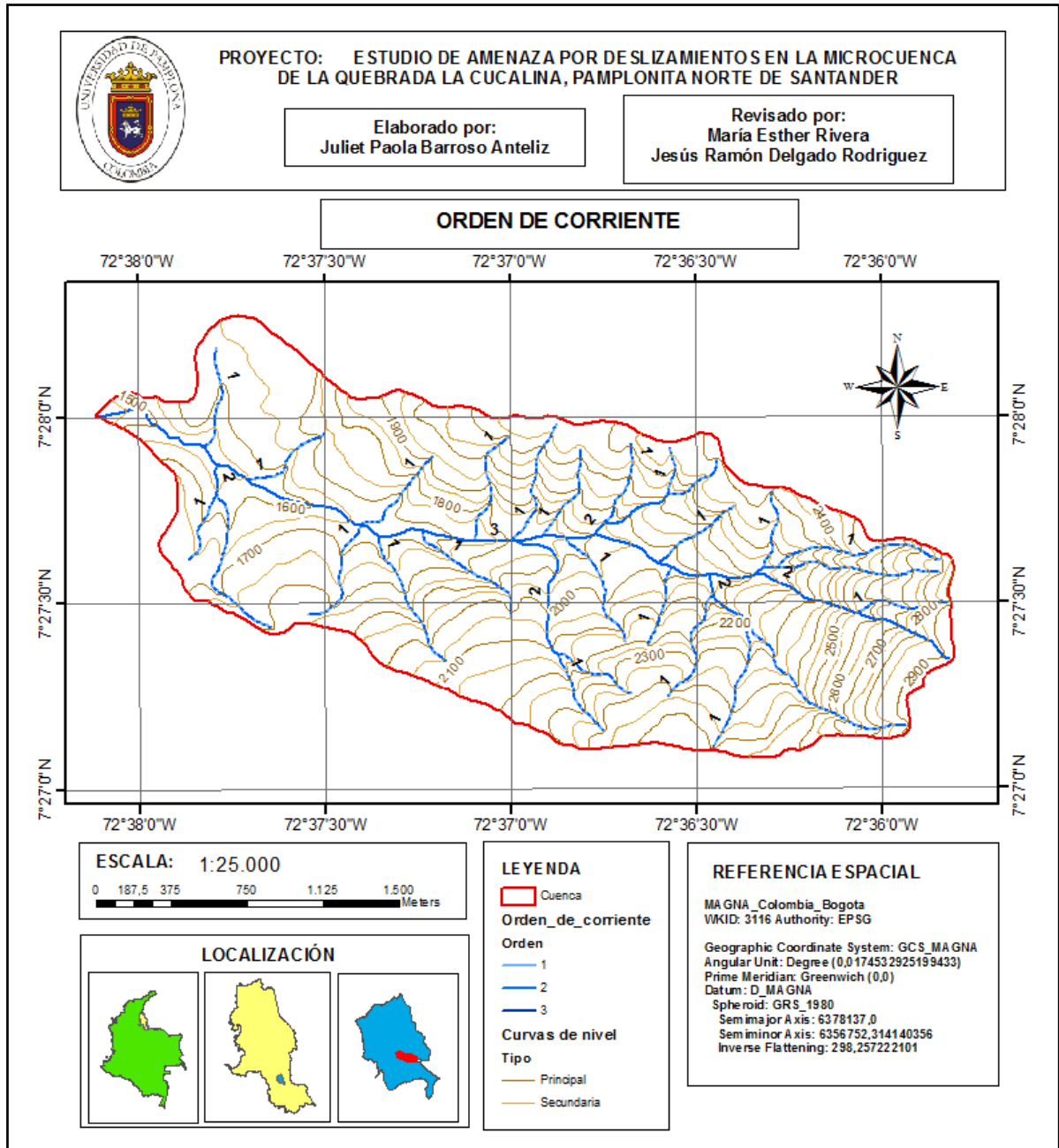
**Parámetros morfométricos relativos al drenaje**

**Tabla 29.** Parámetros morfométricos relativos al drenaje de la microcuenca de la Q. La Cucalina

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Orden		3	-
Sinuosidad		1,057	-
Relación de bifurcación	Rb	5,25	-
Relación de longitudes medias	rL	7,06	km
Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	Dd	4,10	km/km <sup>2</sup>
Tiempo de concentración de Témez	Tc	1,2	h
		72,21	min

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 14.** Orden de corriente de la microcuenca de la Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

En la tabla 29, se plasman los resultados de los parámetros relativos al drenaje. Como se observa en el mapa 14, el valor del orden de corriente de la cuenca alcanza un valor de 3 en el río principal; y una sinuosidad del mismo de: 1.057, lo que indica una baja sinuosidad definiendo a un río de lineamiento recto, al acercarse a la unidad.

La relación de bifurcación teniendo como resultado promedio: 5.25, indica una fuerte potencialidad erosiva y un rápido escurrimiento. Además, valores altos de Rb son esperados en regiones muy montañosas y rocosas, o en cuencas alargadas en la dirección del río principal o de mayor orden (Oguerre, 2015). La relación de longitudes medias de las corrientes es de: 7.06, lo que indica el promedio de longitud de los talwegs para cualquier orden.

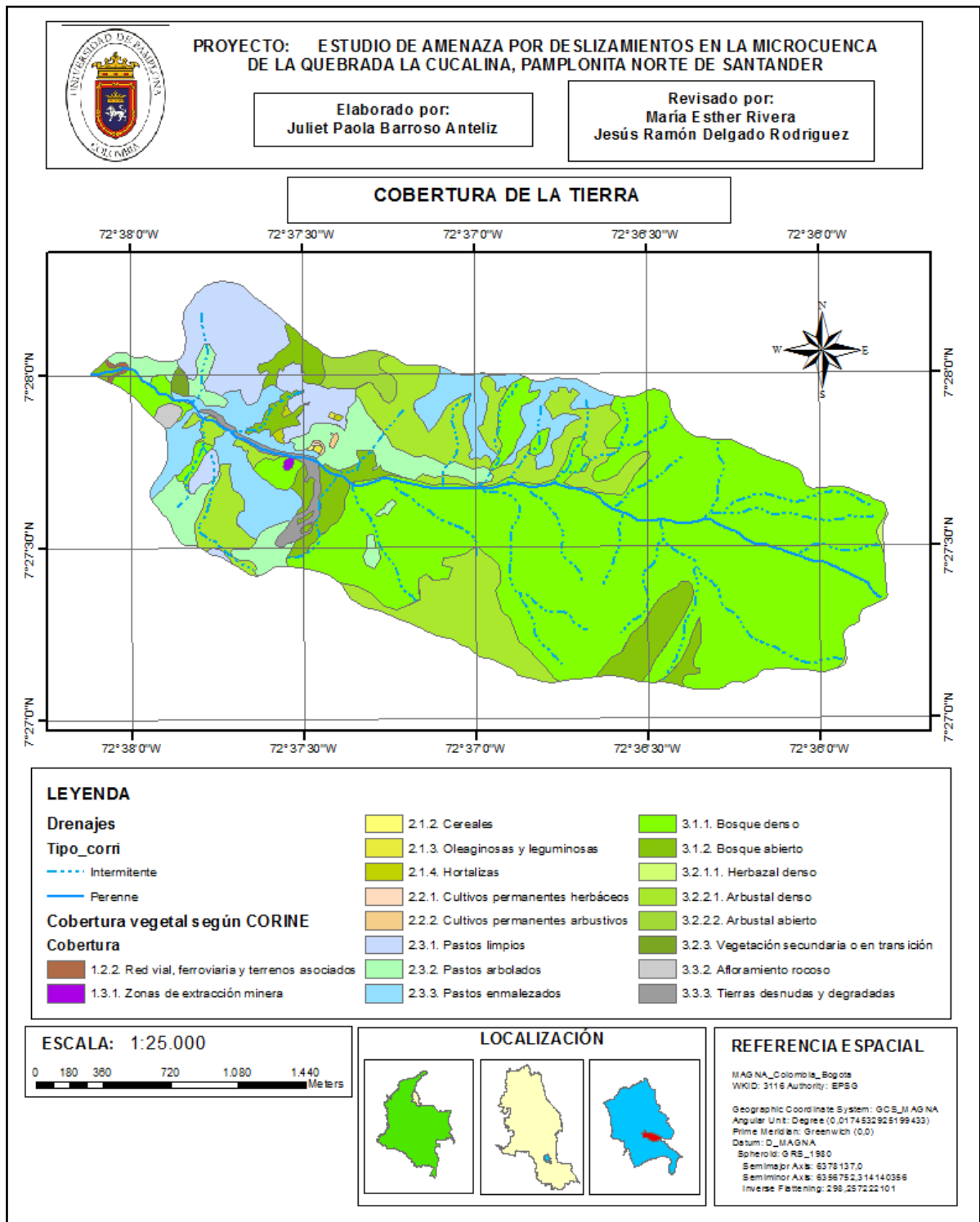
La densidad de drenaje tomó un valor de 4,10 km por km<sup>2</sup>, refleja una cuenca con suficiente drenaje como para producir buenos picos de crecida; y de acuerdo con Fuentes Junco (2004), con el fin de catalogar una cuenca bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje, se puede considerar que valores de Dd próximos a 0.5 km/km<sup>2</sup> o mayores, indica la eficiencia de la red de drenaje, por ello, para un valor alto de Dd corresponde grandes volúmenes de escurrimiento, al igual que mayores velocidades de desplazamiento de las aguas, y también mayor potencial de erosión. Además, en períodos de caudal mínimo se esperan valores más bajos del caudal en cuencas de alta densidad de drenaje y de fuertes pendientes. Según, Strahler A. (1964), citado por Delgadillo Santander, y otros (2013), y Oguerre (2015), una densidad de drenaje alta se asocia con materiales impermeables a nivel subsuperficial, vegetación dispersa y relieves montañosos; lo que significa que la escorrentía superficial no se infiltra ni percola a nivel subterráneo, de allí que los acuíferos de estas regiones son de bajo rendimiento, además de ello, Lux Cardona (2016), indica que la cuenca posee suficiente drenaje dando una buena respuesta hidrogeomorfológica para cuando se presentan las tormentas.

De acuerdo con la longitud de la cuenca y su pendiente, según la fórmula propuesta de Témez, el tiempo de concentración del área de estudio resultó con un valor de 1,2 horas; este valor si la cuenca fuese más ancha que larga, sería menor; y al ser una cuenca de pendiente menor, el tiempo de concentración sería mayor, por presentar menos velocidad de sus aguas.

### **c) COBERTURA Y USO DEL SUELO**

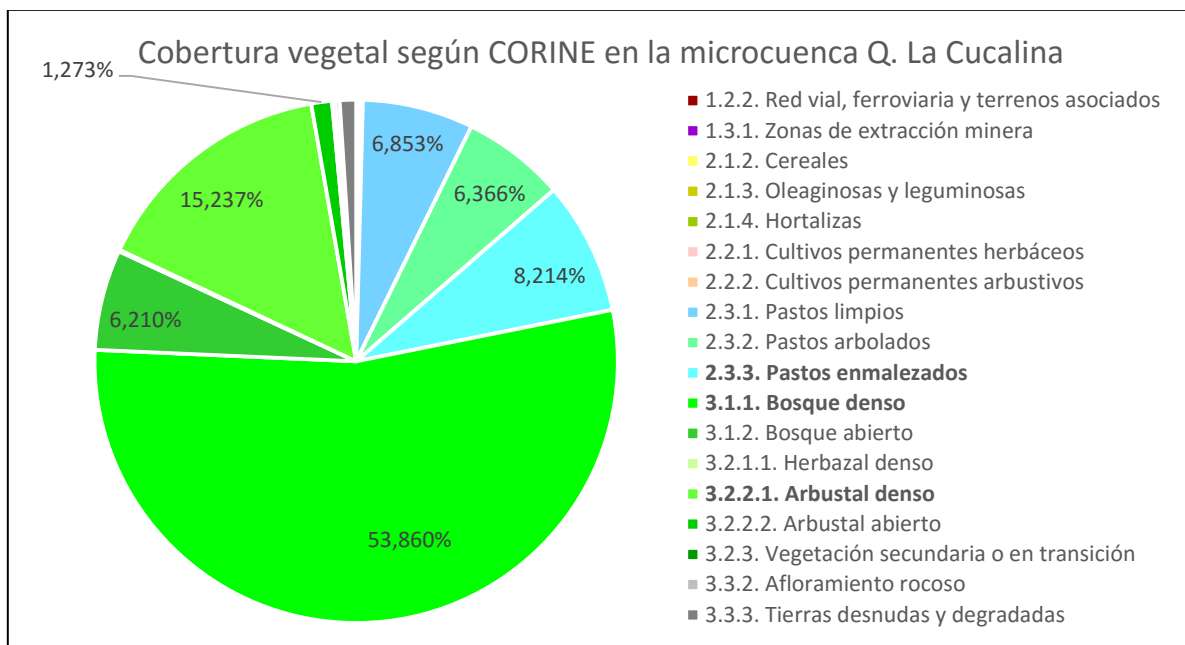
La cobertura vegetal presente en la zona de estudio se muestra en el mapa 15, zonificada de acuerdo a la metodología Corine Land Cover establecida para Colombia por el IDEAM (2010) por medio de una Leyenda Nacional de Coberturas; en el que se observa que en la parte alta de la microcuenca se presenta la mayor parte de bosque y arbustos densos, y en la parte baja, los grupos de pastos y áreas de cultivos. El mayor área de cobertura de la tierra que ocupa la zona (figura 25 y tabla 30), es del 53,4% del área total para Bosque denso, en segundo lugar con 15,2% es el Arbustal denso, y le siguen: Pastos enmalezados con 8,2%, Pastos limpios con 7%, Pastos arbolados con 6,8%, y Bosque abierto con 6,2%; siendo el área de cultivos como mínima. La cobertura referida a red vial, en la microcuenca lo ocupa la vía perteneciente a Pamplona – Cúcuta.

**Mapa 15.** Mapa de cobertura vegetal según CORINE LAND COVER en la zona de estudio.



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Figura 25.** Proporciones de área de cobertura vegetal en la zona de estudio



Fuente: Barroso Anteliz (2017).

**Tabla 30.** Proporciones de la cobertura vegetal en la zona de estudio.

COBERTURA	ÁREA TOTAL	% AREA
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	0,004	0,086
1.3.1. Zonas de extracción minera	0,003	0,058
2.1.2. Cereales	0,001	0,013
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	0,002	0,047
2.1.4. Hortalizas	0,006	0,113
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	0,001	0,015
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	0,004	0,076
2.3.1. Pastos limpios	0,357	6,853
2.3.2. Pastos arbolados	0,331	6,366
2.3.3. Pastos enmalezados	0,427	8,214
3.1.1. Bosque denso	2,803	53,860
3.1.2. Bosque abierto	0,323	6,210
3.2.1.1. Herbazal denso	0,005	0,098
3.2.2.1. Arbustal denso	0,793	15,237
3.2.2.2. Arbustal abierto	0,066	1,273
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	0,011	0,206
3.3.2. Afloramiento rocoso	0,014	0,263
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	0,053	1,012
<b>Total</b>	<b>5,204</b>	<b>100,000</b>

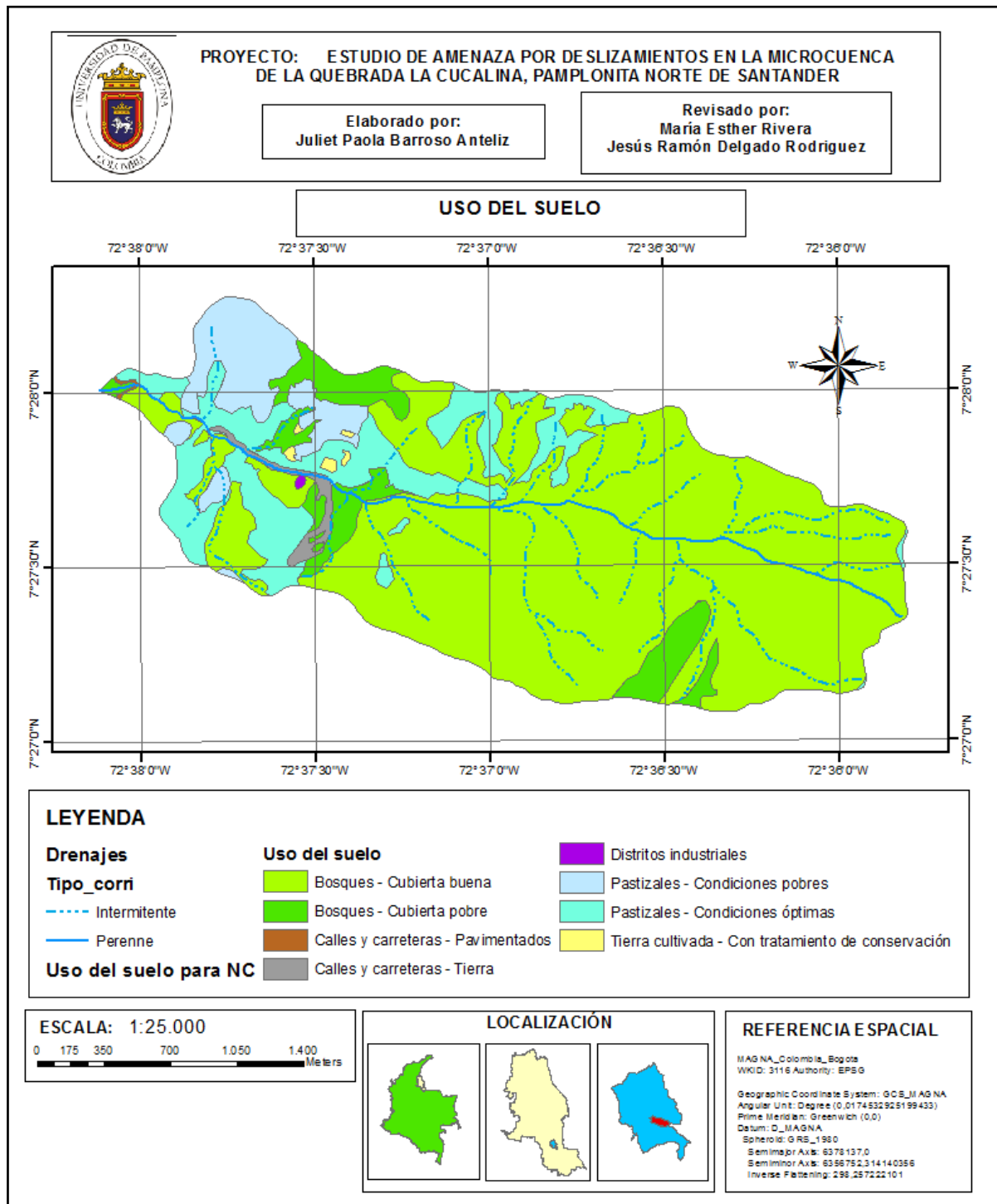
Fuente: Barroso Anteliz (2017)

En la zona de estudio se encuentran presentes cultivos de café, que es un cultivo permanente arbustivo; un cultivo de plátano, que es un cultivo permanente herbáceo; un cultivo de maíz, como un cereal; cultivos de arveja, que es una leguminosa; un cultivo de ajo y un cultivo de tomate y pimentón, que son hortalizas.

Teniendo en cuenta como base la cobertura vegetal zonificada de acuerdo a la leyenda nacional de coberturas según Corine Land Cover, se permite clasificar el uso de suelo de acuerdo al método de Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos SCS de los Estados Unidos.

En el mapa 16, se muestran los Usos de suelo para la zona de estudio. Los bosques con cubierta buena cubren la parte media y alta de la cuenca; y los pastizales, en su mayoría en la parte en la parte baja. De acuerdo con la figura 26 y la tabla 31, los bosques con cubierta buena cubren un 69% del área total de la cuenca; en segundo lugar, son los Pastizales con condiciones óptimas con 14,7%; y le siguen los Bosques con cubierta pobre con 7,5%, y Pastizales con condiciones pobre con 7,3%. Las tierras cultivadas presentes en la microcuenca, tienen tratamiento de conservación, por lo que el suelo utilizado no se encuentra degradado. Parte del área referido a Caminos y Carreteras – Tierra, es debido al deslizamiento ocurrido, y por lo que no presenta cobertura vegetal alguna; y lo demás hace referencia al camino que se encuentra destapado. Además, el uso establecido como Caminos y carreteras – Pavimentos, en la zona de estudio hace referencia a la vía nacional que atraviesa la parte baja de la microcuenca.

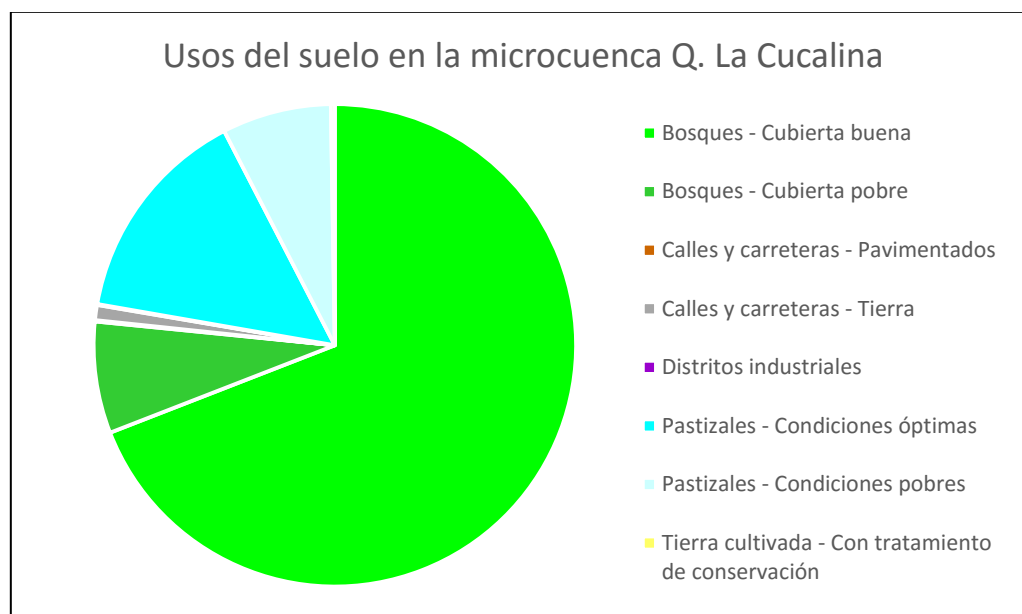
**Mapa 16.** Uso del suelo de acuerdo al método de Número de Curva para la microcuenca Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)



**Figura 26.** Proporciones de área de usos del suelo en la zona de estudio



Barroso Anteliz (2017)

**Tabla 31.** Proporciones de los usos del suelo en la zona de estudio.

USO DEL SUELO	ÁREA TOTAL	% AREA
Bosques - Cubierta buena	3,596	69,097
Bosques - Cubierta pobre	0,389	7,484
Calles y carreteras - Pavimentados	0,004	0,086
Calles y carreteras - Tierra	0,053	1,012
Distritos industriales	0,003	0,058
Pastizales - Condiciones óptimas	0,764	14,677
Pastizales - Condiciones pobres	0,381	7,321
Tierra cultivada - Con tratamiento de conservación	0,014	0,264
<b>Total</b>	<b>5,204</b>	<b>100,000</b>

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

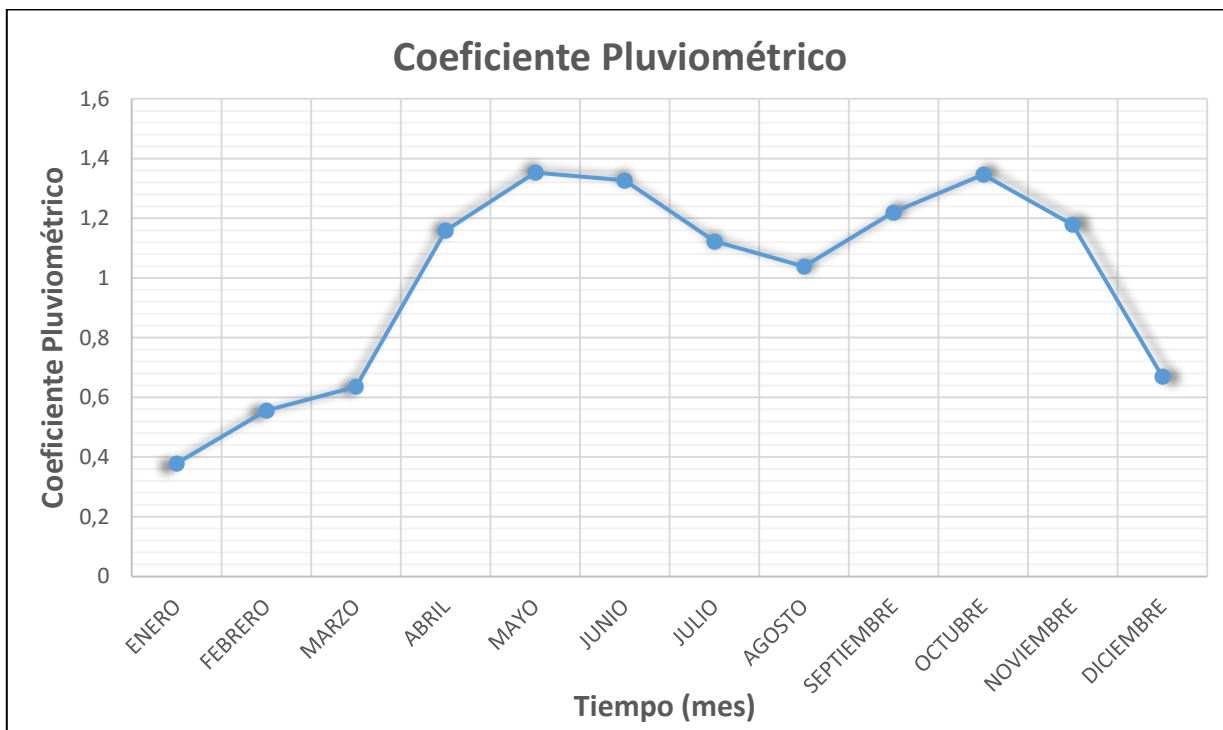
#### d) CLIMATOLOGÍA

##### PRECIPITACIÓN:

La zona de estudio se caracteriza por tener un régimen de lluvias bimodal de acuerdo con su localización, por la actividad convectiva en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Según como se muestra en el coeficiente pluviométrico calculado (figura 27), se muestran las temporadas de lluvia de carácter bimodal. Graficando las precipitaciones totales mensuales a lo largo de los años con información, como se observa en la figura 28, también se deducen estas dos épocas lluviosas, aproximadamente en los meses de abril-mayo-junio y septiembre-octubre-noviembre.

A principios del año las precipitaciones son las mínimas respecto al resto del año y va aumentando hasta entrar en la primera temporada de lluvia con el pico en el mes de mayo; luego las lluvias disminuyen hasta el mes de agosto, pero aun así manteniéndose por encima de la época seca; después aumentan de nuevo debido a la segunda temporada de lluvia con el pico en el mes de octubre; para luego empezar a disminuir hasta las mínimas precipitaciones en el mes de enero (Figura 27).

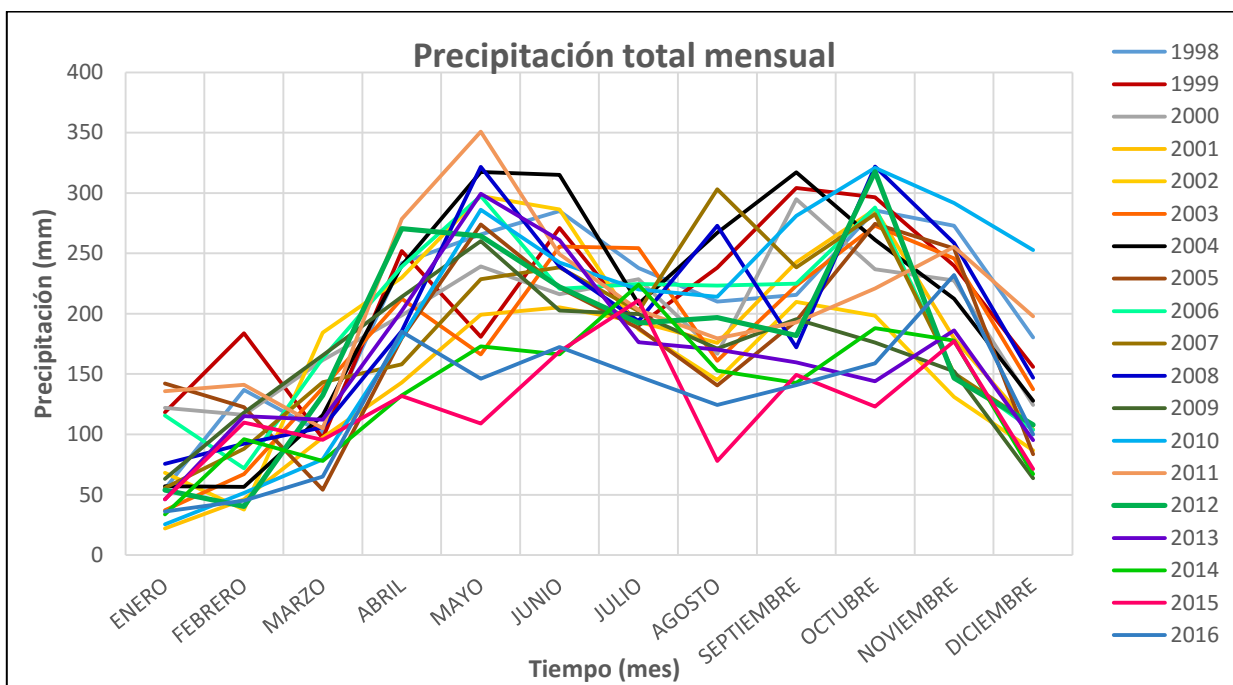
**Figura 27.** Coeficiente pluviométrico mensual de la zona



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Según el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (1981), el coeficiente pluviométrico define además de la distribución de las precipitaciones a través de año, la época seca y la húmeda según el coeficiente se encuentre por debajo de 1 ó por encima de 1 respectivamente. Para la zona de estudio, los meses de enero-marzo y diciembre se consideran parte de la época seca por el valor del coeficiente inferior a 1; y para los meses del período abril-noviembre resultan siendo de la época húmeda con valores del coeficiente por encima de 1.

**Figura 28.** Comportamiento de la precipitación total mensual a lo largo de 18 años en la zona



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

En la figura 28 también se alcanza a observar la tendencia bimodal, como en el gráfico resultante del coeficiente pluviométrico (figura 27); pero, se notan variaciones en el comportamiento de las lluvias respecto a cada año, y esto es debido a la variabilidad climática producida por el Fenómeno del Niño y la Niña. Según (SIAC), el ciclo conocido como “el Niño” y su fase opuesta “la Niña” son la causa de la mayor señal de variabilidad climática en la franja tropical del océano Pacífico, en la escala interanual; con estos fenómenos corresponde la aparición de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) que lo normal en el Pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia.

De acuerdo con IDEAM (2014), las alteraciones que se producen en el régimen de lluvias derivadas de estos fenómenos han sido causa de sequías extremas y lluvias extraordinarias en diferentes regiones del país, ocasionando un efecto negativo sobre el medio físico natural y un impacto social y económico de grandes proporciones.

El efecto de La Niña en el país se caracteriza por un aumento considerable de las precipitaciones, lo que se traduce en excedentes de agua lluvia, y una disminución de las temperaturas en las regiones Andina, Caribe y Pacífica, así como en áreas del piedemonte de los Llanos orientales (SIAC). De acuerdo con (IDEAM, 2014), cuando se presenta el fenómeno El Niño hay una clara tendencia hacia la disminución generalizada de los volúmenes de precipitación, particularmente en las regiones Andina y Caribe. Durante el fenómeno El Niño, debido a la reducción de la precipitación y al aumento de

la evaporación y la evapotranspiración, se produce una disminución de la disponibilidad hídrica en las diferentes regiones hidrográficas del país ((Rivera & Pabón, 1993; Poveda, 1994), citado por (IDEAM, 2014)). El déficit en los rendimientos hídricos reduce considerablemente la oferta natural de agua para el abastecimiento de la población, la generación de energía, los sistemas de riego para la agricultura y la navegación, entre otros (IDEAM, 2014).

Según IDEAM (2014), en los años 1997-1998, 2006, 2009-2010, ocurrieron los fenómenos El Niño, con una intensidad fuerte, débil y débil respectivamente, los cuales concuerdan con el comportamiento pluviométrico en la figura 27, donde se observa una baja precipitación; y en los años 1999-2000, 2007-2008, 2010-2011, ocurrieron los fenómenos La Niña, con intensidad moderada, fuerte y fuerte respectivamente, estos en la figura 16 concuerdan con lo expresado presentando mayor precipitación total mensual mayoritariamente durante las temporadas de lluvia.

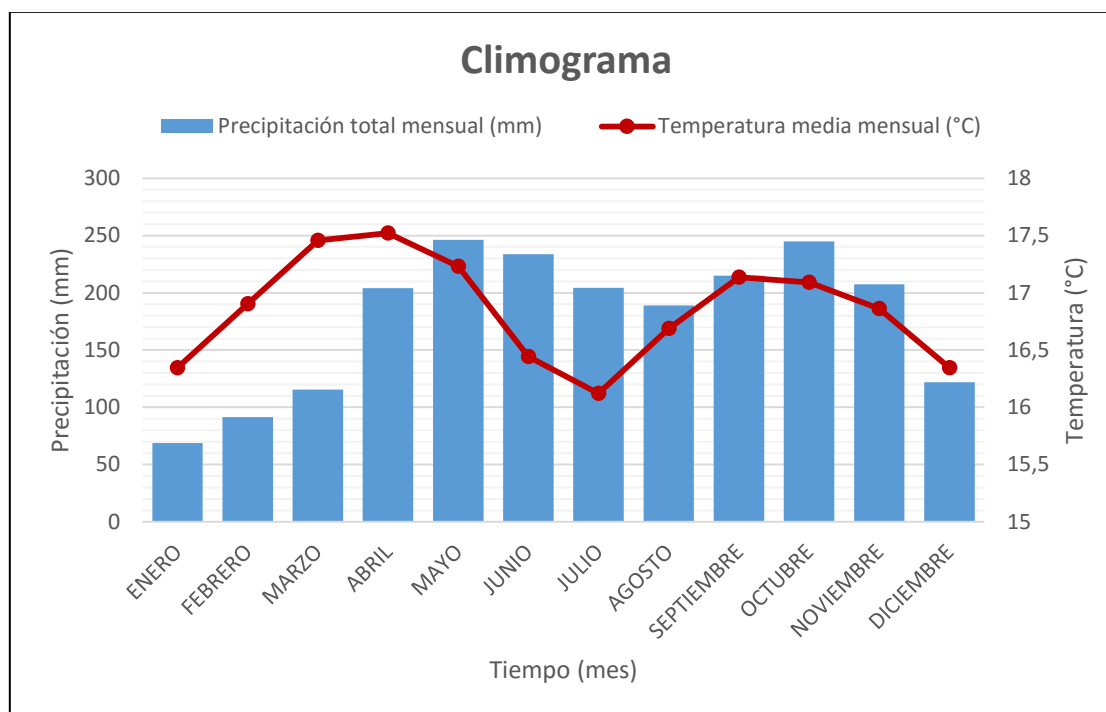
### **TEMPERATURA:**

En la figura 29, se muestra la temperatura media mensual con una oscilación entre los 16 y 17,5°C, dentro de un climograma junto con la precipitación total media mensual. Se deduce que la temperatura a lo largo del año posee un comportamiento bimodal presentando mayor temperatura durante marzo-abril-mayo y agosto-septiembre-octubre-noviembre, con valor medio máximo de 17,5°C en abril y 17,1°C en septiembre; y se presentan temperaturas menores en enero, junio-julio, y diciembre, con un valor medio mínimo en julio de 16,1°C.

En comparación respecto a la precipitación media mensual presentada, en los meses de enero-febrero-marzo-abril y diciembre, se observa un déficit de lluvias y un aumento de temperatura, lo que se traduce en épocas secas; y en los períodos de junio-julio y octubre, un exceso de las mismas y una disminución de temperatura, significando épocas frías y húmedas.

También se calcula a partir del gráfico (figura 29), una precipitación media anual de 2141,9 mm, y una temperatura media de 16,8°C para la zona de estudio.

**Figura 29.** Climograma de la zona de estudio



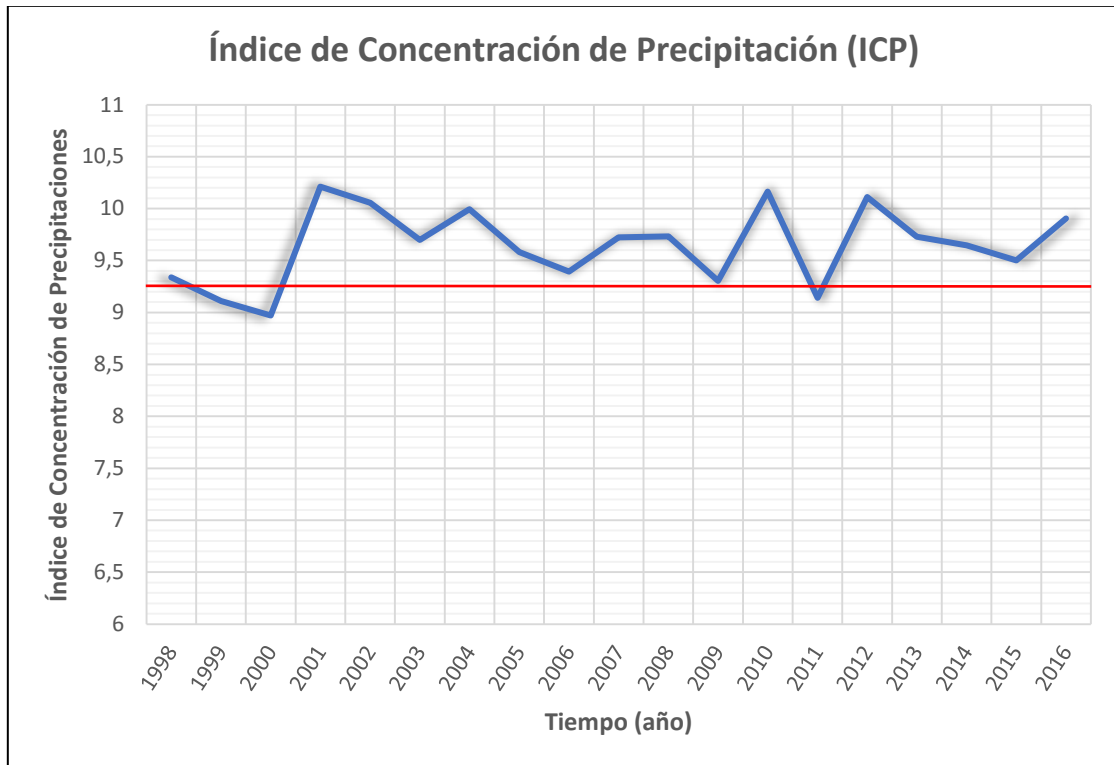
Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Teniendo en cuenta la clasificación climática mensual, según la tabla 11, de acuerdo con la U.S. Air Force, Aeronautical Chart Service, para una precipitación media mensual de carácter anual de 178,5 mm y una temperatura media de 16,8°C, la zona se clasifica como de clima templado húmedo.

### ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (ICP)

Para la zona de estudio, al revisar la tendencia de la concentración de las precipitaciones, se pudo constatar que no existe una tendencia clara al incremento o la disminución en los valores del ICP en función del tiempo (figura 30); y se evidenció que la concentración de las precipitaciones se ha mantenido relativamente estable en el tiempo con un ICP medio de 9,26% (línea roja) como índice de estacionalidad. Con este valor y de acuerdo con la clasificación propuesta por Lobo (2005), en la tabla 12, se refleja un comportamiento de las lluvias de tipo “uniforme”. Según IDEAM (2014), para Colombia el ICP toma valores desde 8,0 para el Pacífico hasta mayor de 14 para la Guajira, de acuerdo con el Mapa de Índice de estacionalidad de la Precipitación de (IDEAM, 2014), para el área que cubre a Pamplonita, el índice se encuentra dentro del rango 9,5 a 10,0. Lo que indica que existe baja diferencia entre los meses lluviosos y meses secos para la microcuenca de la Q. La Cucalina.

**Figura 30.** Índice de Concentración de Precipitación (ICP) para la zona de estudio



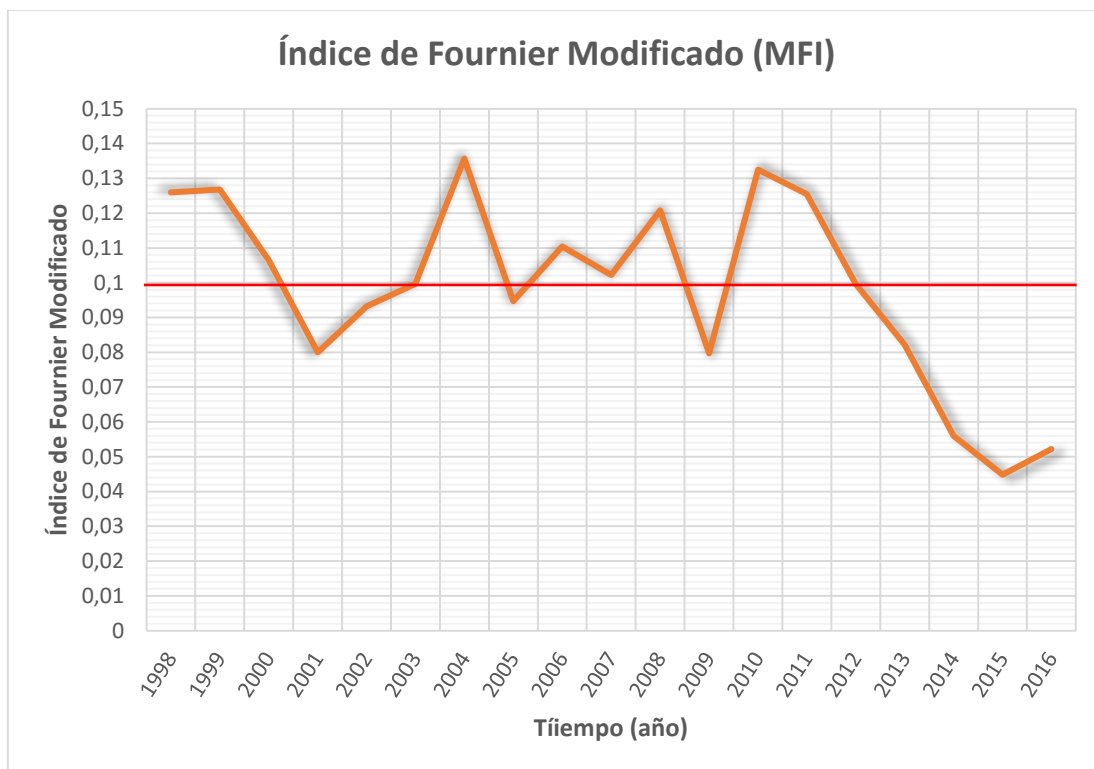
Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## **AGRESIVIDAD DE LAS LLUVIAS**

### **Índice Modificado de Fournier (MFI)**

Al observar la tendencia del índice MFI a través del tiempo (figura 31), se deduce que no tiene una tendencia clara de acuerdo a su comportamiento, y que con el valor de MFI medio de 0,098 (línea roja) como índice de agresividad de las lluvias, y de acuerdo con la clasificación propuesta para el MFI de CEC (1992), en la tabla 13, se refleja una Agresividad Muy Baja de las lluvias en la microcuenca de la Q. La Cocalina

**Figura 31.** Índice Modificado de Fournier (MFI) para la zona de estudio



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

### ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE

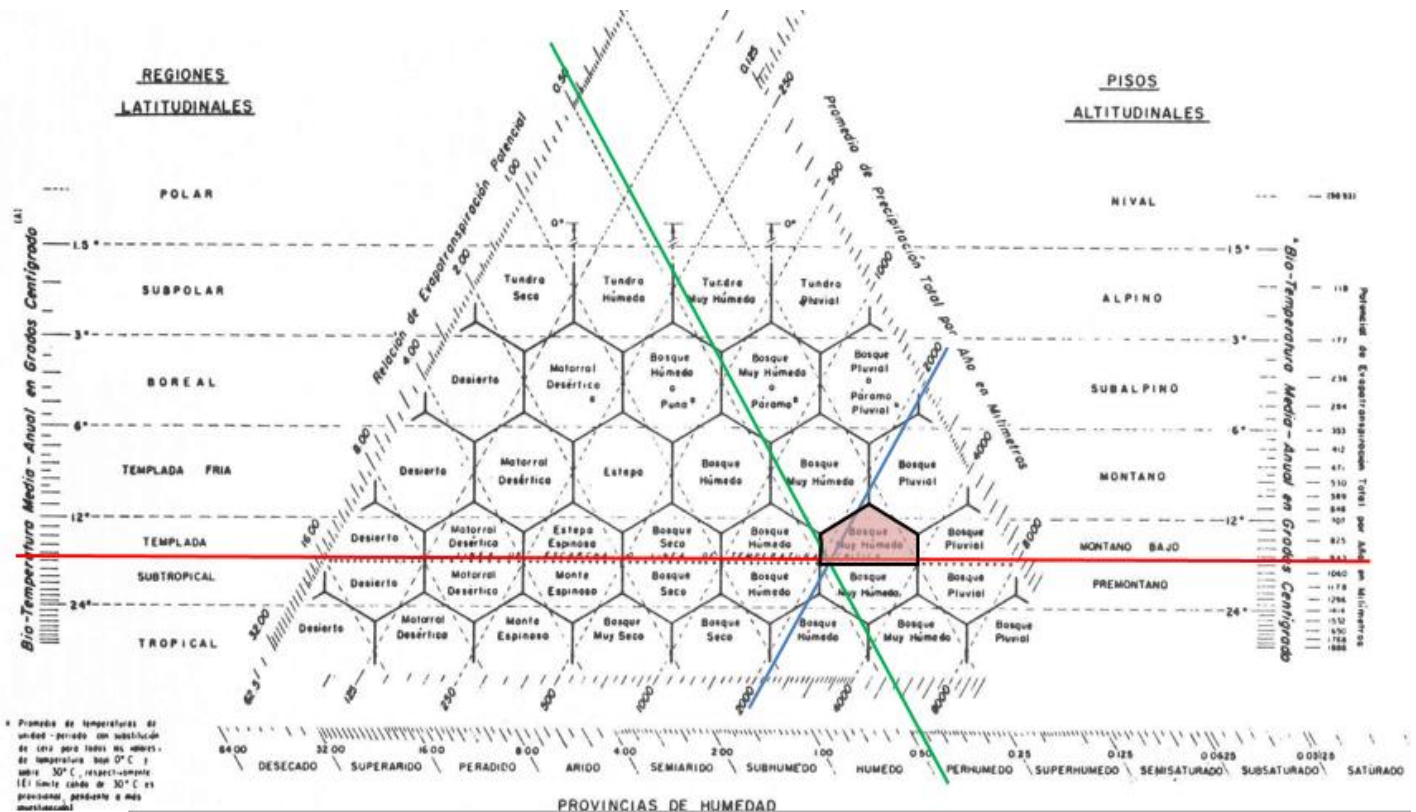
De acuerdo con Holdridge, en la figura 32 se observa la ubicación del hexágono perteneciente a la zona de vida clasificada para la microcuenca de la Q. La Cocalina, respecto a los valores de los factores (tabla 32). La línea color rojo pertenece a la ubicación del valor para la temperatura, la azul para la precipitación media anual, y la verde para la relación de evapotranspiración potencial.

**Tabla 32.** Factores para la clasificación de la zona de vida de Holdridge para la zona de estudio

Factor	Símbolo	Valor	Unidades
Temperatura media anual	T	16,8	°C
Precipitación media anual	P	2141,9	mm
Evapotranspiración potencial	ETP	992,7	mm
Relación de evapotranspiración potencial	RETP	0,46	-

Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Figura 32.** Clasificación de la zona de vida de Holdridge de la microcuenca de la Q. La Cuculina



Editado por: Barroso Anteliz (2017)

Según como se muestra en la figura 32, la microcuenca presenta una zona de vida: Bosque muy húmedo – Montano Bajo (bmh-MB), con una región latitudinal templada y una provincia de humedad como Perhúmedo. De acuerdo como explica UNAD (2013) y Eco-Hispaniola (2014), las condiciones climáticas de la zona de vida bmh-MB se caracterizan por la presencia de escarchas temporales y por recibir una mayor precipitación que el Bosque húmedo – Montano Bajo (bh-MB); se puede estimar que las precipitaciones llegan a alcanzar cantidades mayores a los 2000 mm y por debajo de los 4000 mm totales anuales. El régimen pluviométrico es similar al de bh-MB, aunque las precipitaciones orográficas son más intensas; y además, cerca del 50% del agua de lluvia no es evapotranspirada, por lo que los ríos llevan agua en gran parte del año.

De acuerdo con Eco-Hispaniola (2014), la topografía de los terrenos de esta zona de vida es generalmente accidentada y su elevación varía desde 850 hasta los 2100 m.s.n.m., lo cual, de acuerdo con la elevación media de la microcuenca (tabla 28) de 2088 m.s.n.m. concuerda.

La vegetación natural está constituida principalmente por especies arbóreas, y entre las principales especies indicadoras, que ayudan a identificar esta zona se encuentran *Garrya fadyenii*, *Weinmannia pinnata*, *Oreopanax capitatus*, *Brunellia comocladifolia* y



palo de viento (*Didymopanax tremulus*) (Imagen 7). Las especies más valiosas del bosque natural de estas áreas están constituidas por pino y especies de hoja ancha, tales como el ébano (*Diospyros revoluta*) y el almendro (*Prunus occidentalis*). En esta zona de vida las especies nativas tienen una regeneración natural fácil y de un crecimiento moderado. Desde el punto de vista ecológico, los terrenos de esta zona de vida ofrecen pocas posibilidades para las actividades agropecuarias; son netamente forestales y su vegetación natural, en algunos lugares, debe permanecer sin explotarse para controlar el escurrimiento de las lluvias y evitar la erosión de los suelos de las cuencas hidrográficas (Eco-Hispaniola, 2014).

En la imagen 7 aparece el *Didymopanax tremulus*, conocido comúnmente como palo de viento, este se desarrolla en bosques húmedos, originario de Sur y Centro América. En la imagen 8 aparece el musgo español o como su nombre científico *Tillandsia usneoides*, y se encuentra en varios lugares de la microcuenca colgando de árboles, esta especie crece donde el clima sea templado y con alta humedad, como lo es esta zona.

**Imagen 7.** *Didymopanax tremulus* (palo de viento) en la zona de estudio



**Imagen 8.** *Tillandsia usneoides* (musgo español ó heno) en la zona de estudio



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## 7.1.2. FACTORES DETONANTES

### e) LLUVIA

#### INTENSIDAD DE LA LLUVIA

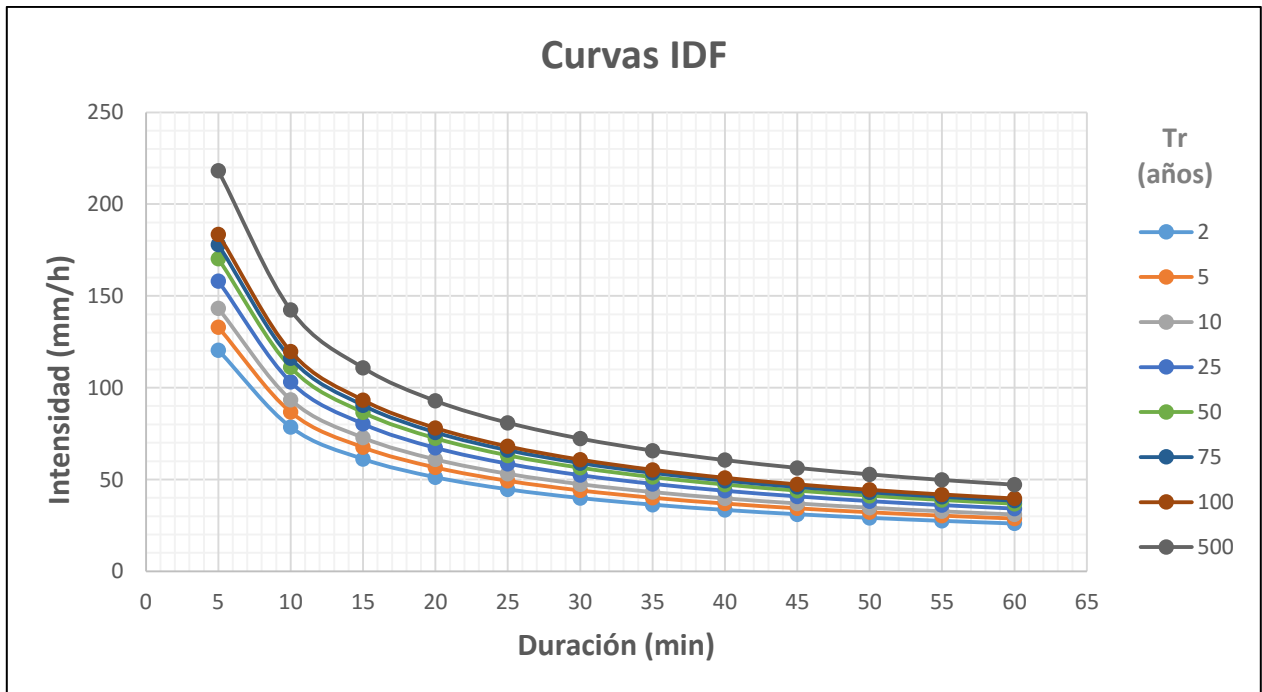
Para analizar el factor detonante Lluvia en la ocurrencia de deslizamientos de acuerdo al régimen de precipitación de la zona, se calcularon las curvas IDF para estimar la intensidad de tormentas intensas de distintas duraciones y para diferentes períodos de retorno

En la figura 33, se presenta la representación gráfica de las curvas IDF de la zona de estudio, de acuerdo con las intensidades máximas de lluvia para diferentes frecuencias en años y duraciones en minutos, calculadas a partir de la ecuación particular (Ecuación 43) según la ecuación general (Ecuación 28) de Bernard (1932), validada por Aparicio (1997), para calcular Intensidad (I), en función de los coeficientes, y la Duración (t) y Frecuencia requerida (T).

$$I \text{ máx} = \frac{A * T^a}{t^C} \quad \text{Ec. (28)}$$

$$I \text{ máx} = \frac{301,44 * T^{0,107}}{t^{0,6164}} \quad \text{Ec. (43)}$$

Figura 33. Curvas IDF de la zona de estudio.



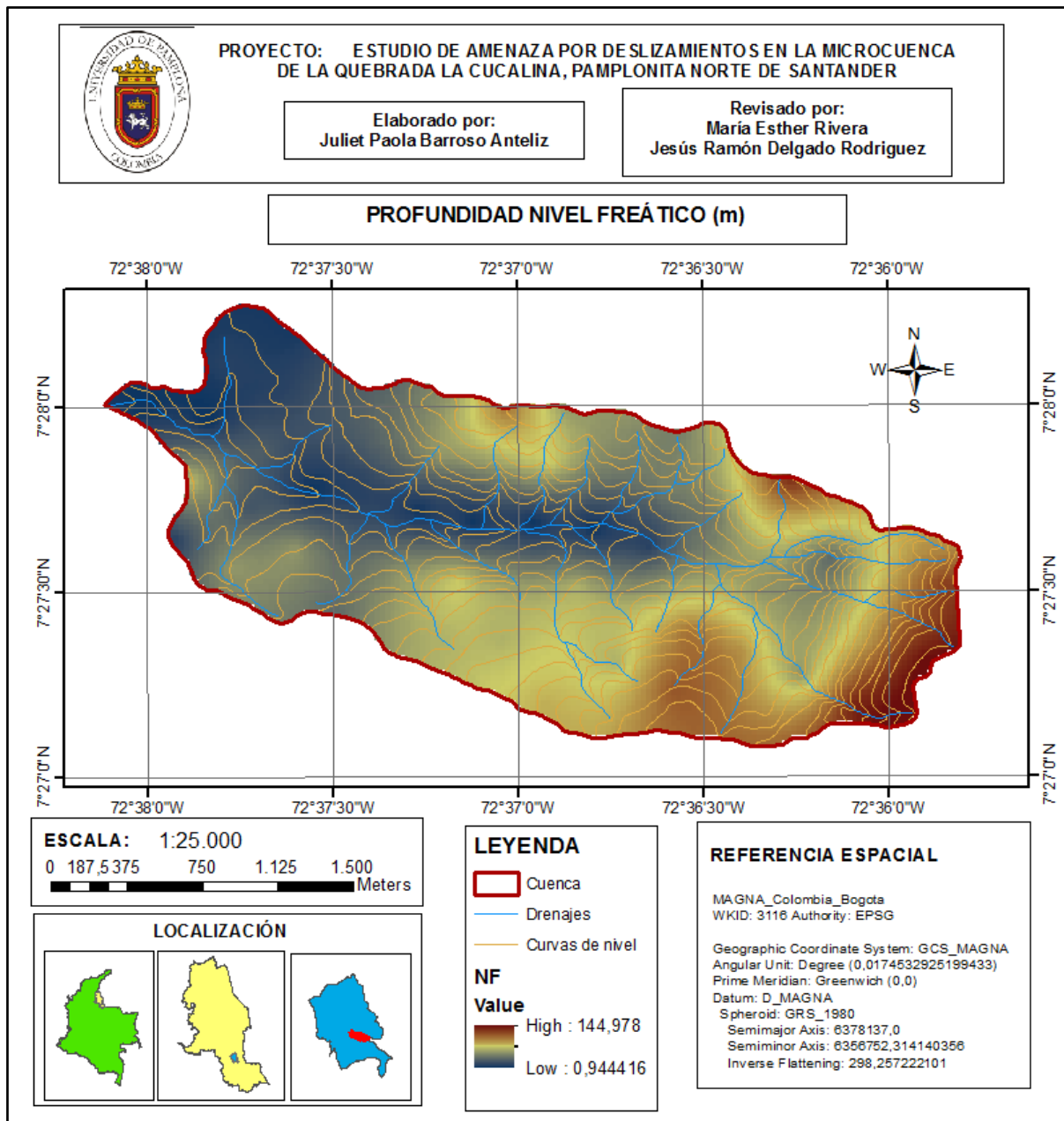
Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Estas curvas IDF aportan patrones de conductas de las lluvias. Se observa que a mayor período de retorno mayor es la intensidad; la mayor frecuencia, de 500 años, es la que presenta mayores intensidades, respecto a menores frecuencias. También que, a mayor duración de las precipitaciones menor es su intensidad. Para un período de retorno de 25 años, la máxima intensidad es de 158 mm/h para 5 minutos de duración de la lluvia, y la mínima intensidad es de 34 mm/h para 60 minutos de duración.

### **PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO**

En el mapa 17, se observa la profundidad estimada del nivel freático, y en el que se muestra de acuerdo con Laurencena, y otros (2002), que se presenta una menor profundidad del nivel freático (morado oscuro) en las zonas próximas de las planicies de inundación, en zonas de depósitos, y en zonas de menor pendiente, correspondientes principalmente a la zona baja de la microcuenca, y las zonas de alrededor del curso principal de la quebrada; y una mayor profundidad (amarillo y rojo), en las áreas cercanas de la divisoria de aguas y áreas con mayor pendiente. El nivel freático es raramente horizontal, en cambio, su forma suele ser una réplica suavizada de la topografía superficial de la topografía superficial, alcanzando sus mayores elevaciones debajo de las colinas y luego descendiendo hacia los valles.

**Mapa 17.** Profundidad del nivel freático en la microcuenca Q. La Cucalina



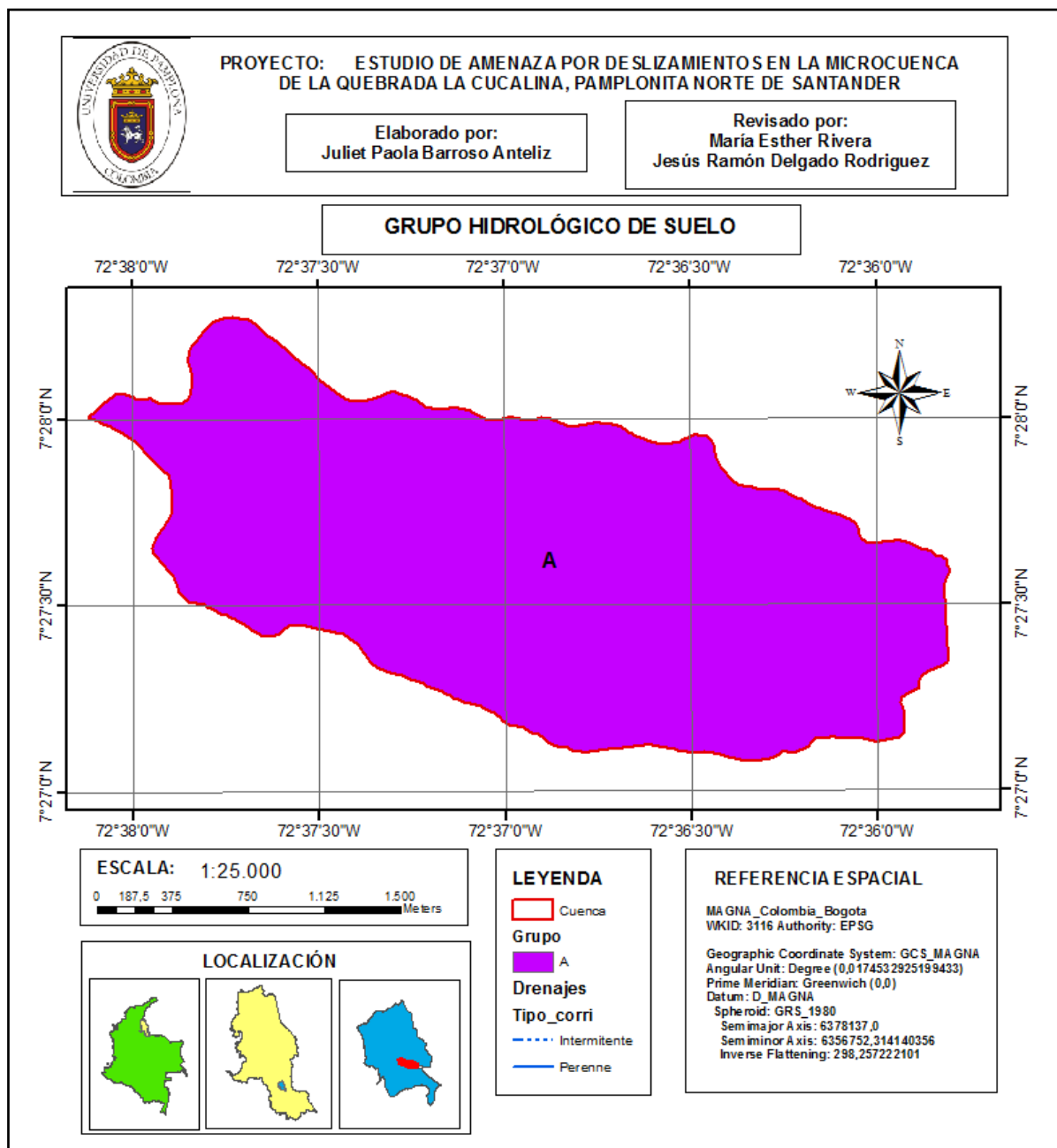
Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## NÚMERO DE CURVA

La metodología del Número de Curva, usa para su determinación el grupo hidrológico del suelo, que de acuerdo con la clasificación de suelo, se encuentra que para toda la cuenca se presentan tipo de suelos arenosos; por lo tanto, el grupo hidrológico del suelo es el A, el cual encierra a "Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos

agregados”, siendo un atributo constante para toda la zona de microcuenca como se muestra en el mapa 18.

**Mapa 18.** Grupo hidrológico del suelo según el Número de Curva para la microcuenca Q. La Cucalina

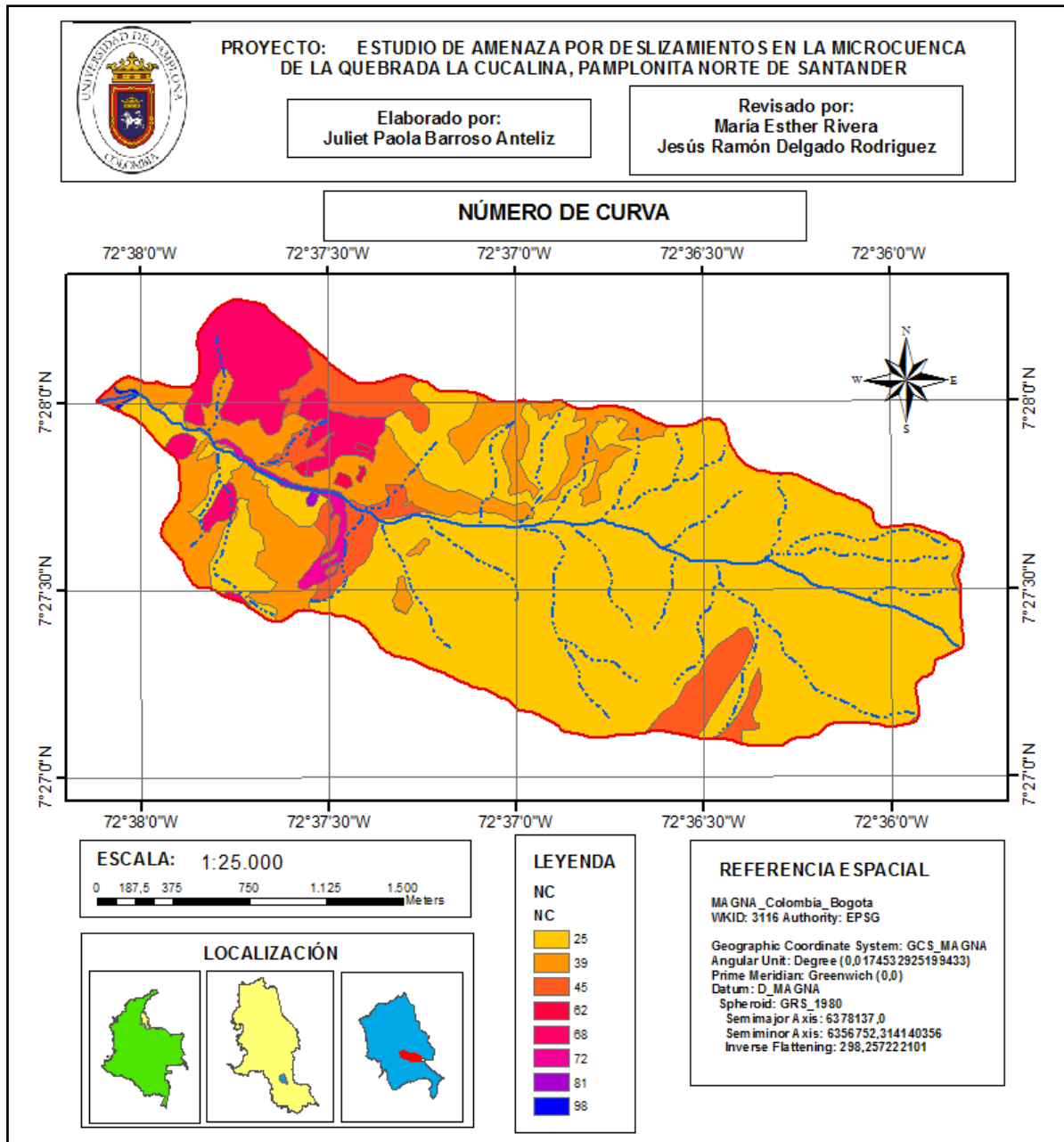


Fuente: Barroso Anteliz (2017)

En el mapa 19, se muestra el mapa de Número de Curva para la microcuenca, en el que se indica que para la mayor parte, de acuerdo con proporciones de área, y principalmente

para la parte media y alta, se presenta que la máxima infiltración potencial es mayor que la proporción de escurrimiento posible, siendo el valor de CN mayor que 50; ya que un número de la curva CN = 100, indica que toda la lluvia escurre y un CN = 1, indica que toda la lluvia se infiltra, según como lo plasma Lavao Pastrana (2014).

**Mapa 19.** Número de Curva NC para la microcuenca Q. La Cucalina

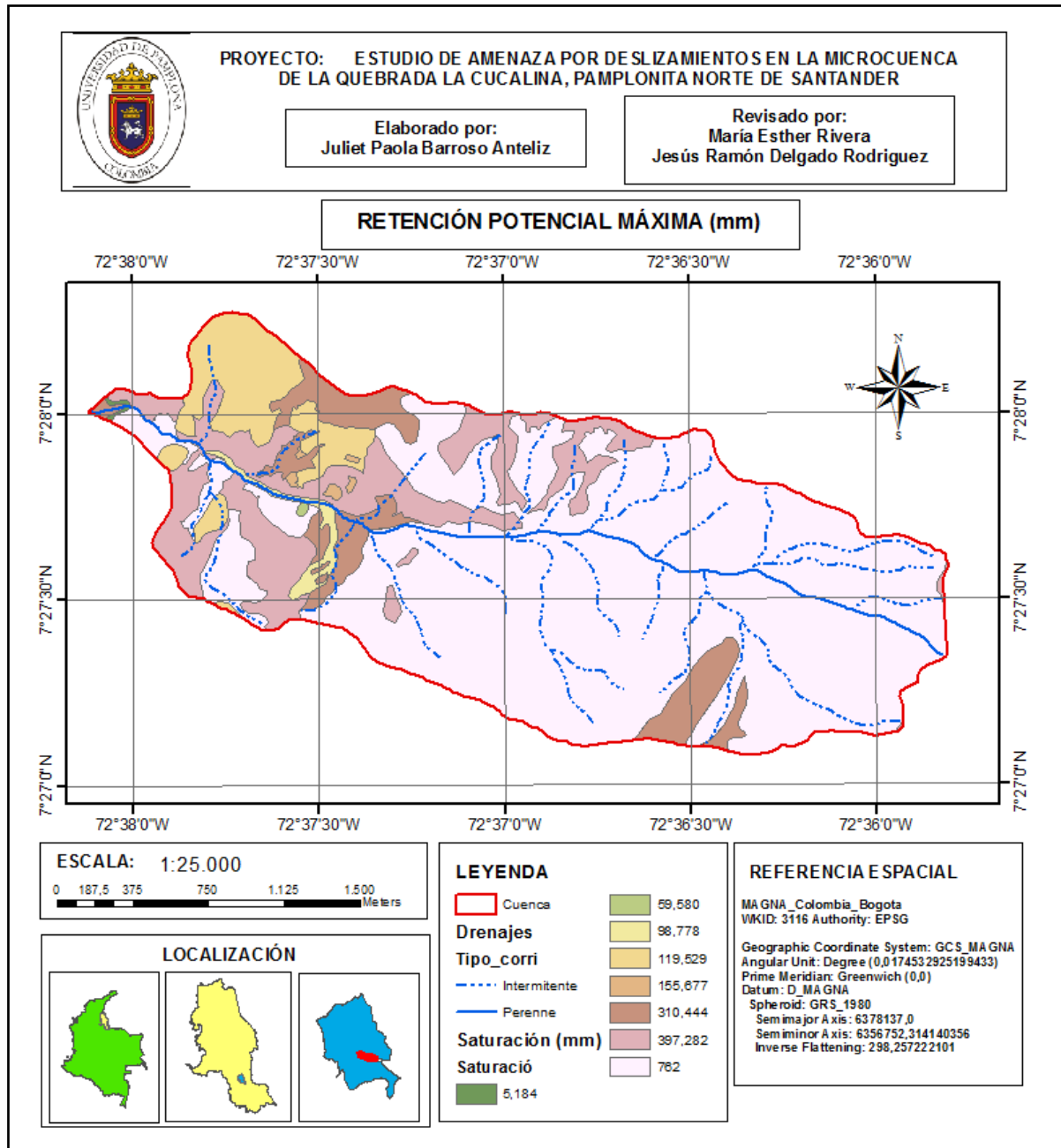


Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## **RETENCIÓN POTENCIAL MÁXIMA**

El mapa de retención potencial máxima se muestra en el mapa 20, y se observa que en las zonas donde se encuentran los menores números de curva, se presenta mayor retención potencial, es decir, mayor diferencia potencial máxima entre  $P$  y  $P_e$  a la hora que se inicia la tormenta y representa proporcionalmente la pérdida de escorrentía por infiltración, intercepción y almacenamiento superficial, de acuerdo con Lavao Pastrana (2014). Las zonas con mayor retención potencial máxima coinciden con las zonas de Bosques densos para  $S = 762$  mm (blanco), en primer lugar; Pastizales en condiciones óptimas con  $S = 397$  mm (rosado); y en tercer lugar, Bosques con poca cobertura con  $S = 310$  mm (rojo).

**Mapa 20.** Retención Potencial Máxima para la microcuenca Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## PRECIPITACIÓN EFECTIVA

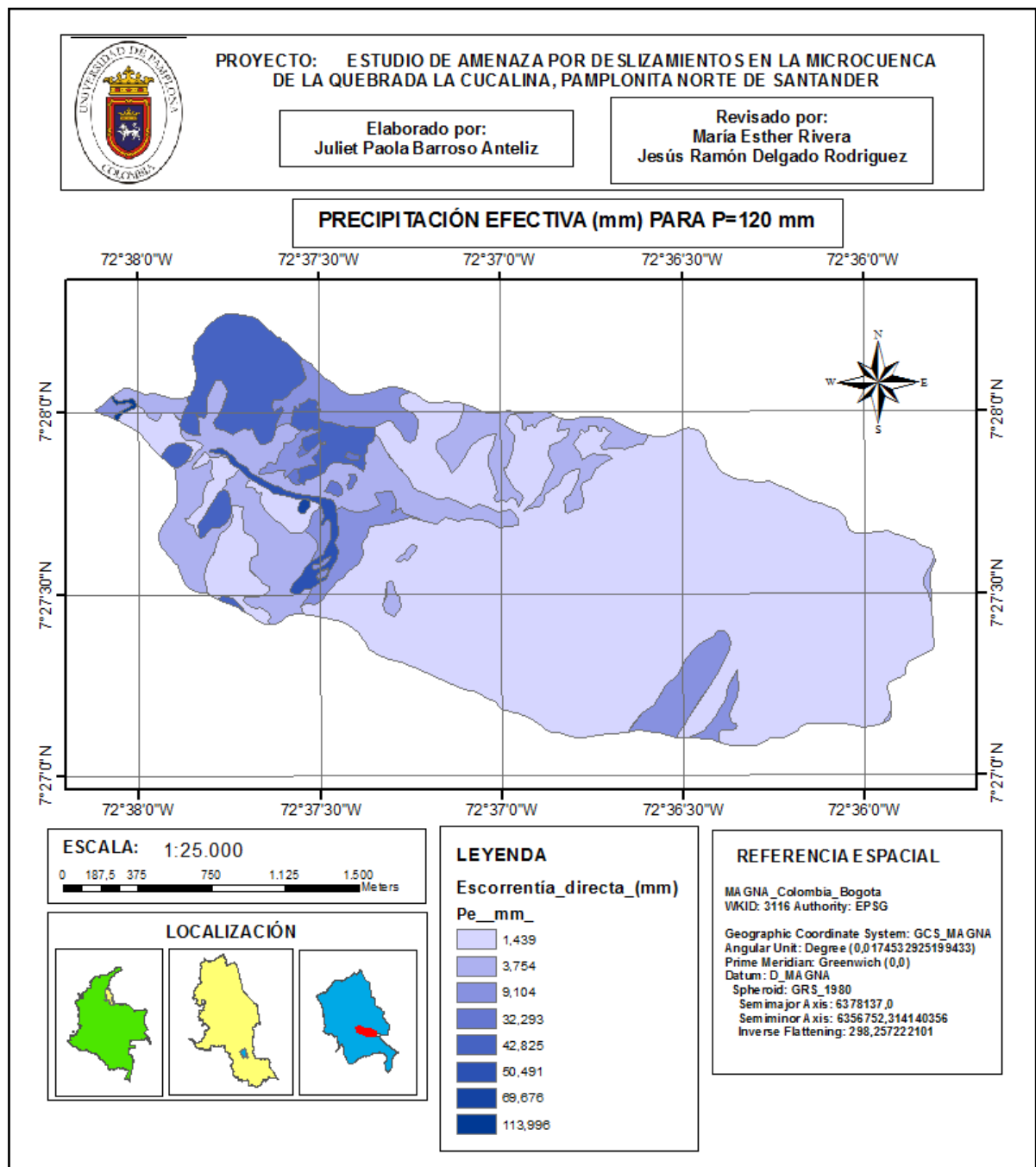
De acuerdo al método propuesto de lluvia – escorrentía por el Soil Conservation Service – SCS; en los mapas 21 y 22, se muestra la precipitación efectiva  $P_e$  que se convierte en escorrentía directa, para dos tipos de precipitaciones; siendo esta siempre menor que la altura de precipitación  $P$ . De acuerdo con (Lavao Pastrana, 2014), la escorrentía directa



o precipitación efectiva, se establece como la respuesta que se espera a una precipitación, y se obtiene de acuerdo a la precipitación considerada, y a la retención potencial máxima.

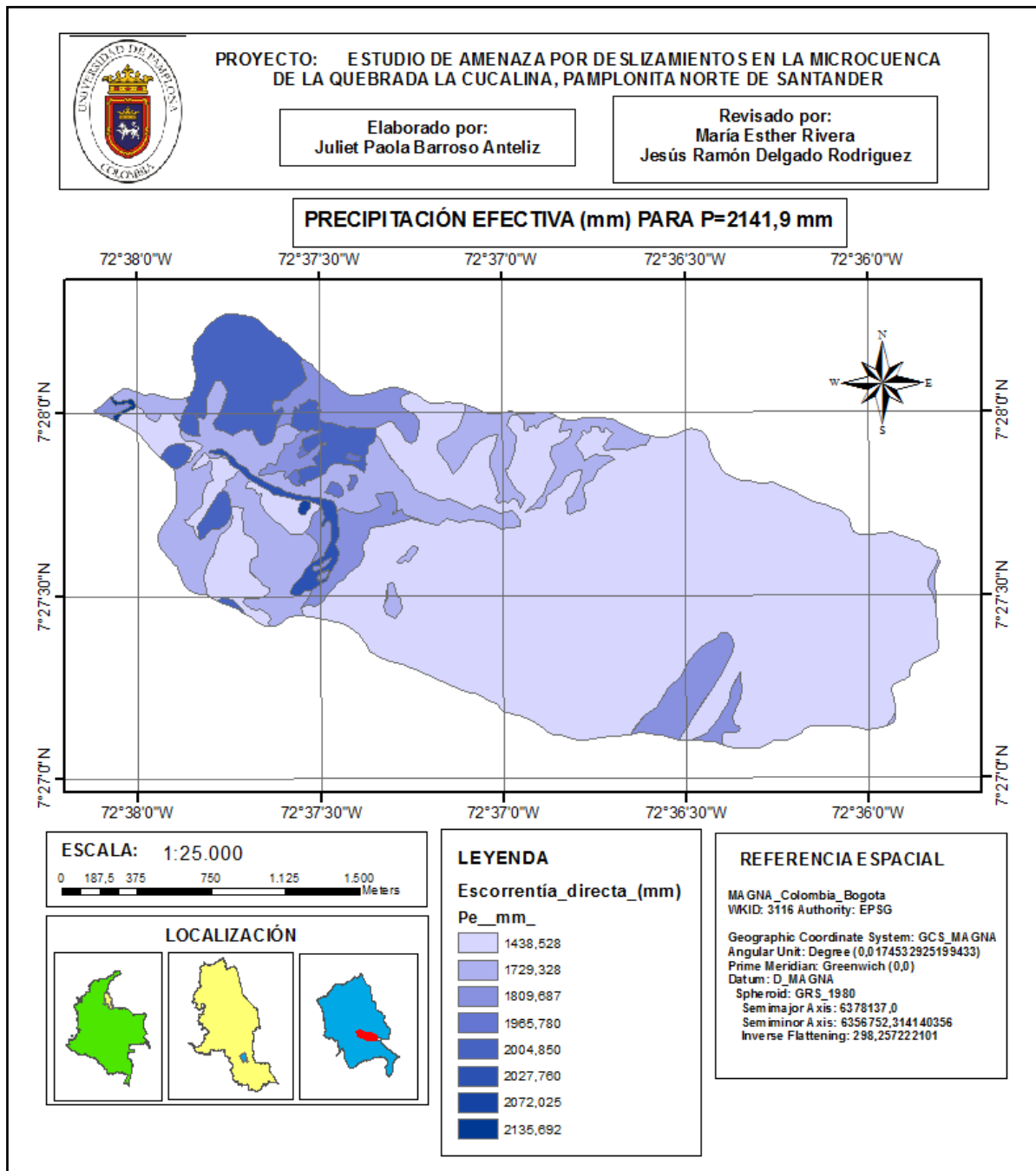
En el mapa 21, se muestra la precipitación efectiva para la precipitación considerada de 120 mm de 20 años de período de retorno y una duración de 24 horas, de acuerdo con la tendencia de las curvas IDF de la zona. Y en el mapa 22, se presenta el mapa de precipitación efectiva para la precipitación de 2141,9 mm, correspondiente a la precipitación media anual resultante de 18 años de registro de precipitación diaria; mostrando a la vez, la cantidad de agua de lluvia que se convierte en escorrentía, en promedio, al finalizar un año.

**Mapa 21.** Precipitación efectiva para una precipitación de 120 mm de 20 años de período de retorno y una duración de 24 horas, de la zona de estudio



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 22.** Precipitación efectiva para una precipitación de 2141,9 mm como la precipitación media anual para 18 años de registro, de la zona de estudio

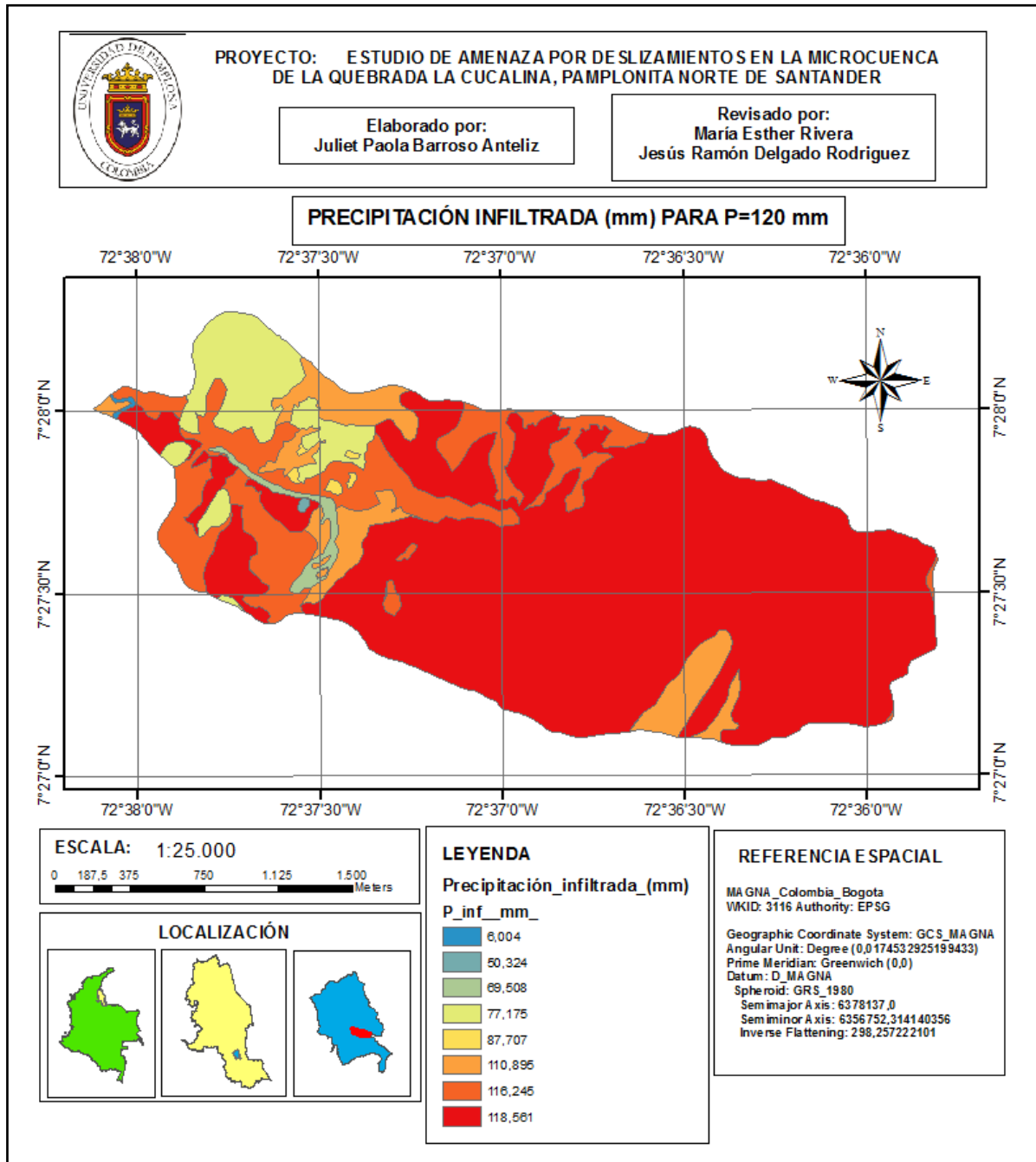


Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## **PRECIPITACIÓN INFILTRADA**

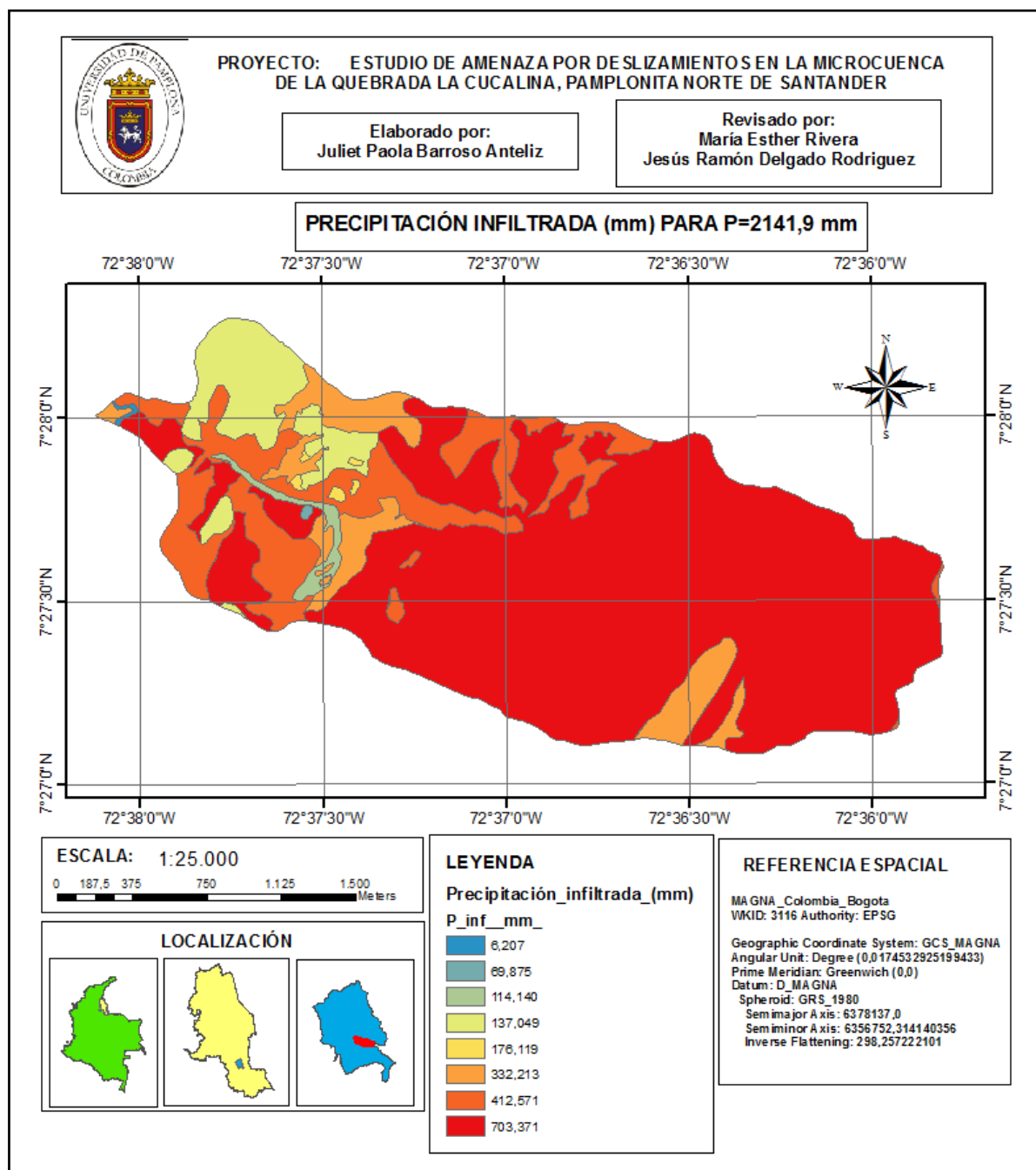
En los mapas 23 y 24, se presenta la precipitación infiltrada como la fracción que no se convierte en escorrentía directa a partir de una precipitación. El mapa 23, muestra la precipitación infiltrada para una precipitación de 120 mm, y el mapa 24, la precipitación infiltrada para una precipitación de 2141,9 mm. Comparando ambos mapas, aunque la diferencia de las dos precipitaciones es grande, la precipitación infiltrada no varía tanto una de la otra, como se ve en la precipitación efectiva; esto se debe, de acuerdo con Lavao Pastrana (2014), a que después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional de agua retenida en la cuenca es menor o igual a alguna retención potencial máxima  $S$ . La mayor retención potencial máxima calculada fue de 762 mm, y la máxima precipitación infiltrada para  $P = 2141,9$  mm es de  $P_{inf} = 703$  mm; siendo esta menor que  $S$ . Por otra parte, las áreas que presentan mayor precipitación infiltrada respecto a las otras, son los Bosques densos, los Pastizales con buenas condiciones y los Bosques con poca cobertura; y las que presentan menor precipitación infiltrada son la vía pavimentada, los caminos y tierras desnudas, y los pastos con pobres condiciones. Lo que indica que la infiltración tiene una relación directa con la cobertura vegetal y el uso del suelo.

**Mapa 23.** Precipitación infiltrada para una precipitación de 120 mm de 20 años de período de retorno y una duración de 24 horas, de la zona de estudio



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 24.** Precipitación infiltrada para una precipitación de 2141,9 mm como la precipitación media anual para 18 años de registro, de la zona de estudio

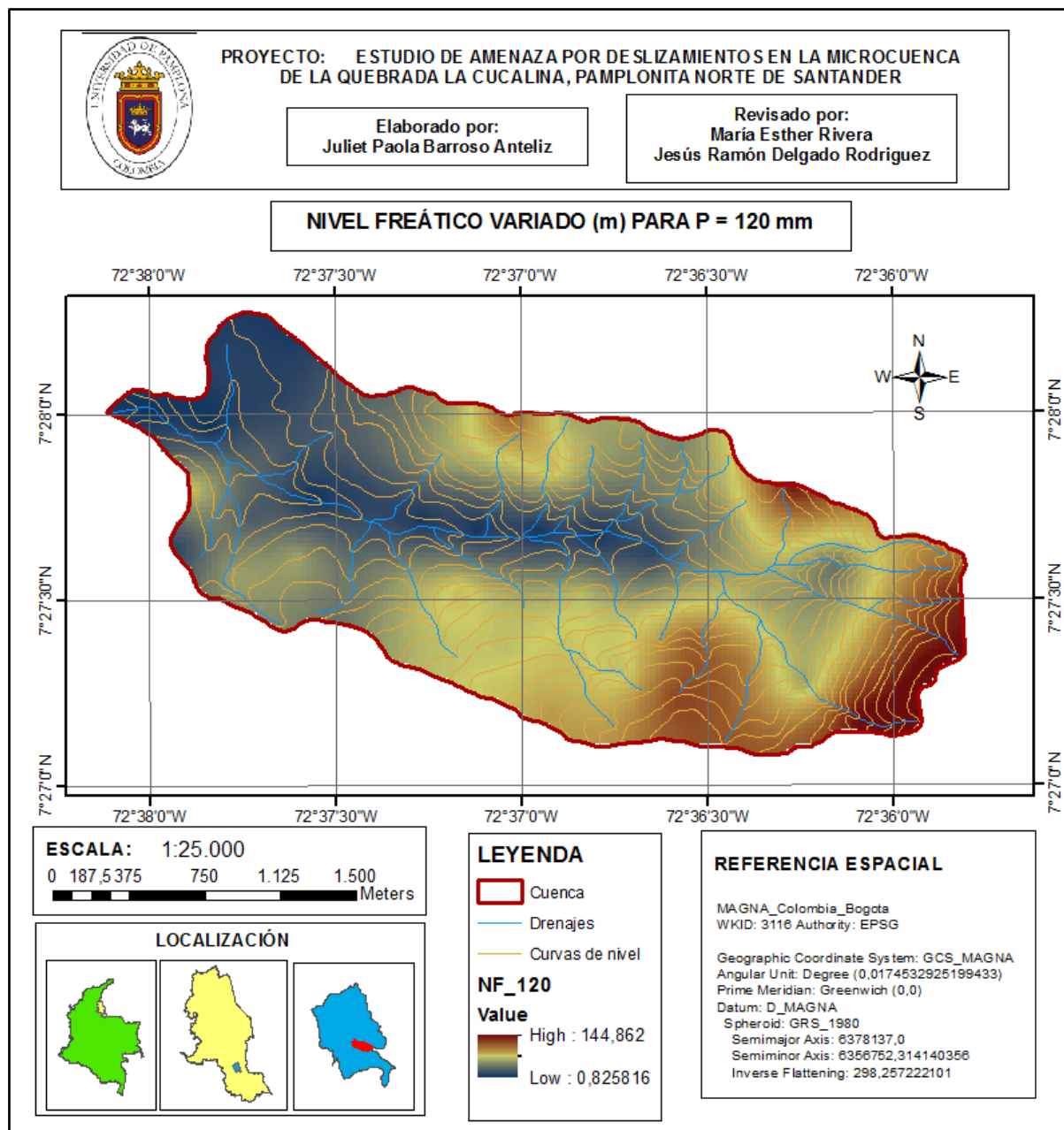


Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## **VARIABILIDAD DEL NIVEL FREÁTICO**

La variabilidad de la posición del nivel freático medio en un año típico para la localidad, se presume en base a que la precipitación que se infiltra en el suelo es la principal causa de la fluctuación del nivel freático. En el mapa 25, se muestra la profundidad del nivel freático variado para una precipitación de 120 mm, y en el mapa 26, el nivel freático variado con una precipitación de 2141 mm; ambos con unidades en m. Estos dos mapas en comparación, difieren entre sí hasta por 60 cm de profundidad aproximadamente; como resultado de la precipitación infiltrada para ambas, y como se explicó anteriormente según Lavao Pastrana (2014), la profundidad adicional de agua retenida en la cuenca es menor o igual a alguna retención potencial máxima  $S$ . Además se continúa viendo, de acuerdo con Laurencena, y otros (2002), el comportamiento del nivel freático, teniendo mayor profundidad en las zonas con mayor altitud de la microcuenca, y una menor profundidad en las zonas bajas. Del mapa 25, se deduce que para  $P=120$  mm la mayor profundidad del nivel freático variado es de 203,7 m aproximadamente; y del mapa 26, para  $P=2141$  mm una mayor profundidad de 203,1 m.

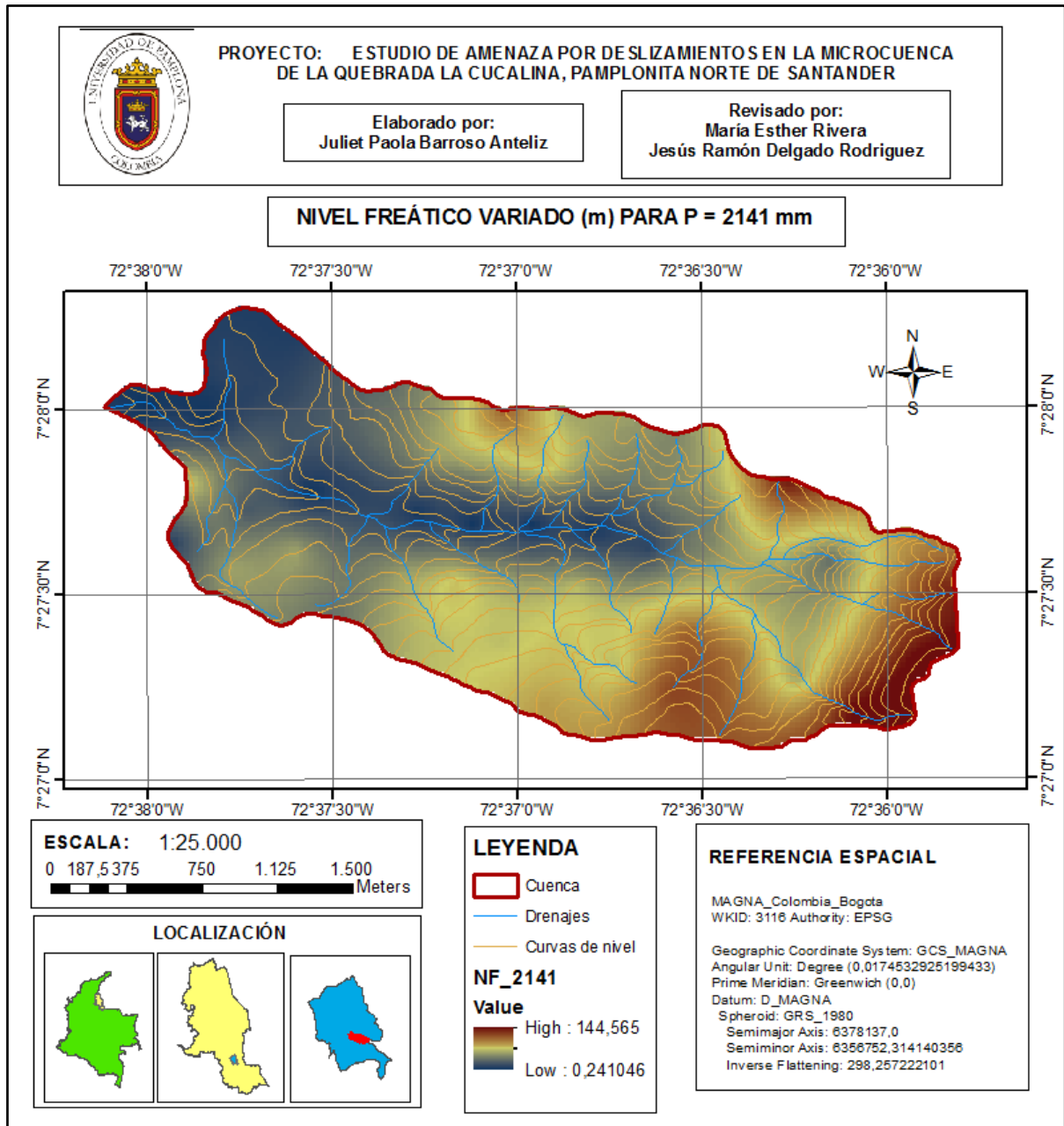
**Mapa 25.** Nivel freático variado con una precipitación de 120 mm.



Fuente: Barroso Anteliz (2017)



**Mapa 26.** Nivel freático variado con una precipitación de 2141 mm



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## f) SISMO

En el mapa 27, se muestra el Mapa de zonificación sísmica de Colombia, y en el mapa 28, el mapa de valores de Aa, contenidos en el reglamento NSR-10; el cual para su efecto, es de un sismo cuyos efectos en el lugar de interés tienen una probabilidad de sólo 10% de ser excedidos en un lapso de 50 años, lo cual conduce a un período promedio de retorno de 475 años. La zonificación está determinada por los valores de Aa

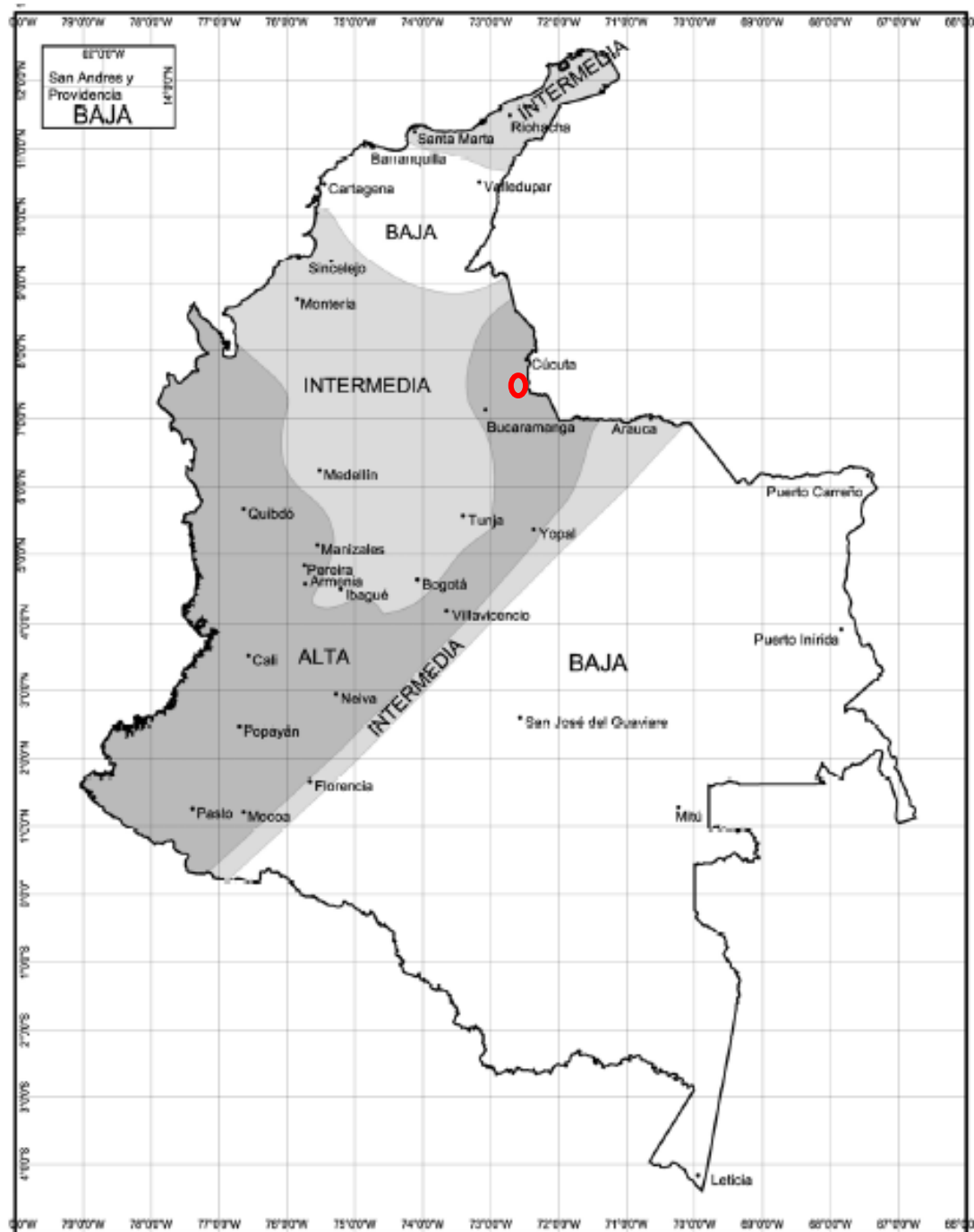
y  $A_v$ ; y el nivel de amenaza sísmica se clasifica como alta, intermedia o baja (Tabla 33). De acuerdo con los mapas 27 y 28, y con la tabla 33, Pamplonita (rojo) tiene amenaza sísmica Alta, y presenta un valor del coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva como de 0.35; y la percepción del movimiento es muy fuerte, con PGA esperada de 0.18 a 0.35.

**Tabla 33.** Nivel de amenaza sísmica según valores de  $A_a$

<b>Valor de <math>A_a</math></b>	<b>Asociado en mapas a Región N°</b>	<b>Amenaza Sísmica</b>
0.50	10	Alta
0.45	9	Alta
0.10	8	Alta
0.35	7	Alta
0.30	6	Alta
0.25	5	Alta
0.20	4	Intermedia
0.15	3	Intermedia
0.10	2	Baja
0.05	1	Baja

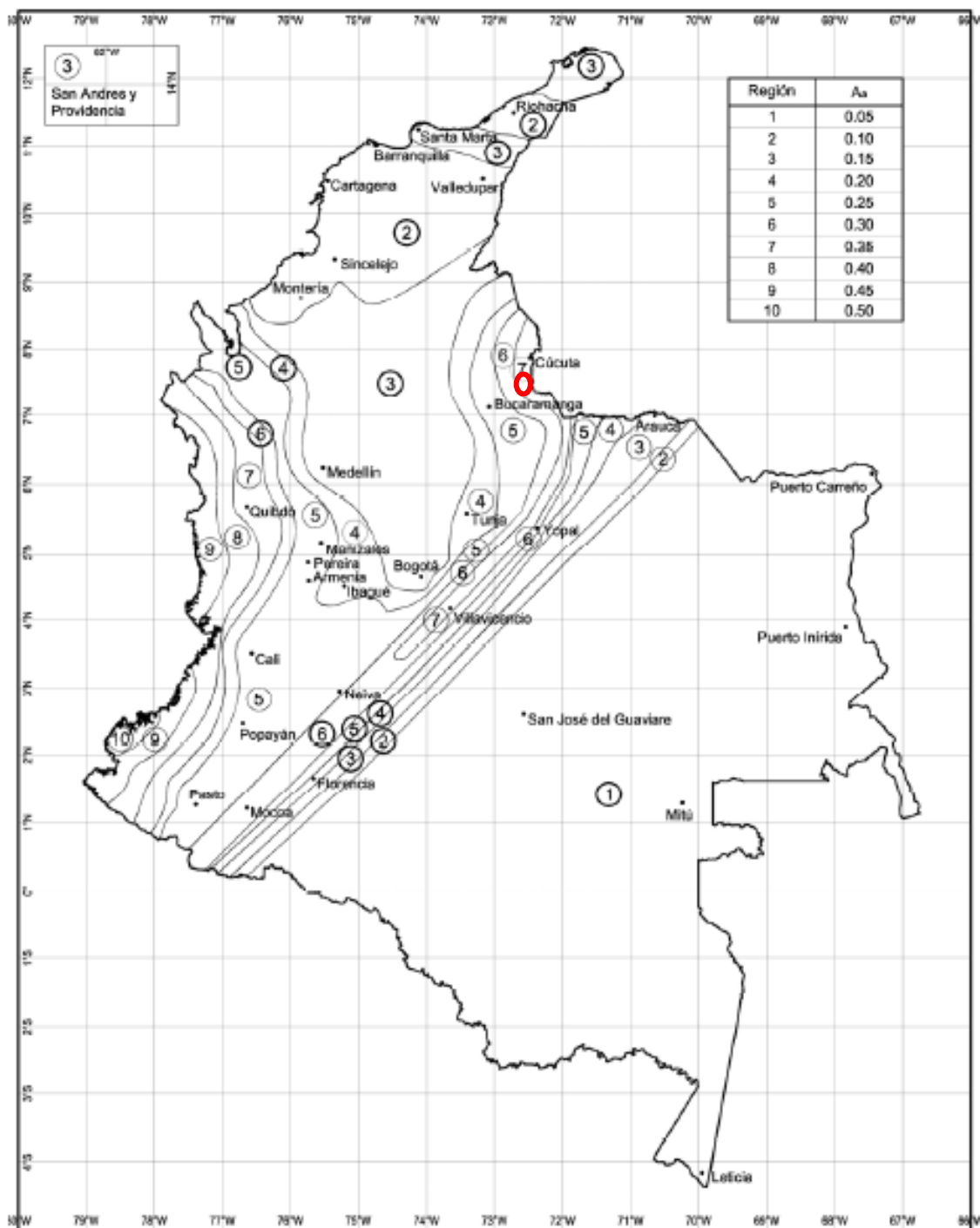
Fuente: NSR-10 (2010)

Mapa 27. Mapa de Zonas de Amenaza Sísmica en función de  $A_a$  y  $A_v$ .



Fuente: NSR-10 (2010), editado por Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 28.** Mapa de valores de  $A_a$



Fuente: NSR-10 (2010), editado por Barroso Anteliz (2017)

Según el mapa 27, el municipio de Pamplonita presenta valores de amenaza sísmica alta, mostrados en la tabla 34, siendo PGA, la aceleración pico del terreno en  $\text{cm/s}^2$ , para un período de ocurrencia de 75 años, su valor es de  $150 \text{ cm/s}^2$ , para 225 años,  $230 \text{ cm/s}^2$ ,

para 475 años de período de retorno, una aceleración de  $310 \text{ cm/s}^2$  indicando así amenaza sísmica desde intermedia a alta según la tabla 33, y concluyendo según SGC (2010), que estas probabilidades se asocian con la frecuencia de ocurrencia de los sismos potencialmente destructores: de ocurrencia excepcional ( $Tr = 2475$  años), frecuentes ( $Tr = 475$  años) o muy frecuentes ( $Tr = 75$  años); y resultando que a mayor frecuencia de ocurrencia, menor intensidad sísmica (aceleración).

**Tabla 34.** Valores de amenaza sísmica para Pamplonita, Norte de Santander

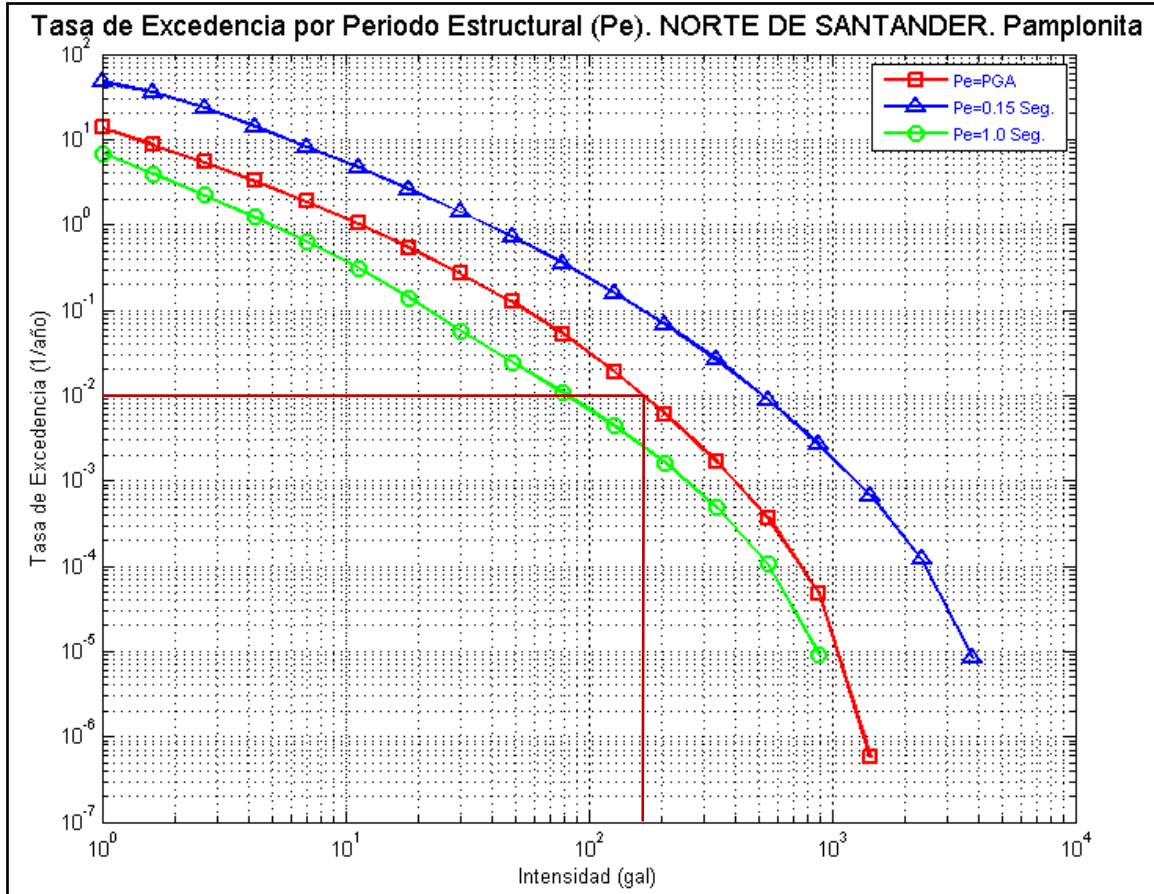
<b>Departamento</b>	Norte de Santander	
<b>Municipio</b>	Pamplonita	<b>Coefficiente respecto a gravedad (<math>980 \text{ cm/s}^2</math>)</b>
<b>PGA75</b>	150	0.15
<b>PGA225</b>	230	0.23
<b>PGA475</b>	310	0.32
<b>PGA975</b>	390	0.40
<b>PGA2475</b>	530	0.54
<b>Nivel de amenaza NSR-10</b>	Alta	
<b>Aa</b>	0.35	
<b>Av</b>	0.25	
<b>Ae</b>	0.13	
<b>Ad</b>	0.06	

Fuente: SGC (2010), modificado por Barroso Anteliz (2017)

En la figura 34, se presenta la tasa de excedencia de intensidad como la curva sísmica para el municipio de Pamplonita; en la que se indica qué tan frecuentemente se exceden en la zona, intensidades sísmicas de cierto valor (CSNF, 2010).

Con base en esta curva, se requiere la intensidad para un período de retorno de 100 años, y siendo el período de retorno inverso a la tasa de excedencia, esta sería de  $0.01$  ó  $10^{-2}/\text{año}$ . De acuerdo con la curva de amenaza para un período estructural de PGA, se espera una intensidad de  $175 \text{ gal}$ , lo que es igual a  $175 \text{ cm/s}^2$ . Por lo tanto, el porcentaje de la aceleración horizontal respecto a la aceleración de la gravedad ( $980 \text{ cm/s}^2$ ) es de  $0.18$ . Por otra parte, de acuerdo con CSNF (2010), una intensidad  $S_a = 175 \text{ cm/s}^2$ , se excederá, en promedio, una vez cada 100 años. Además, según la tabla 33, el coeficiente de aceleración horizontal de  $0.18$  para un  $Tr = 100$  años, indica que la amenaza sísmica se categoriza como intermedia.

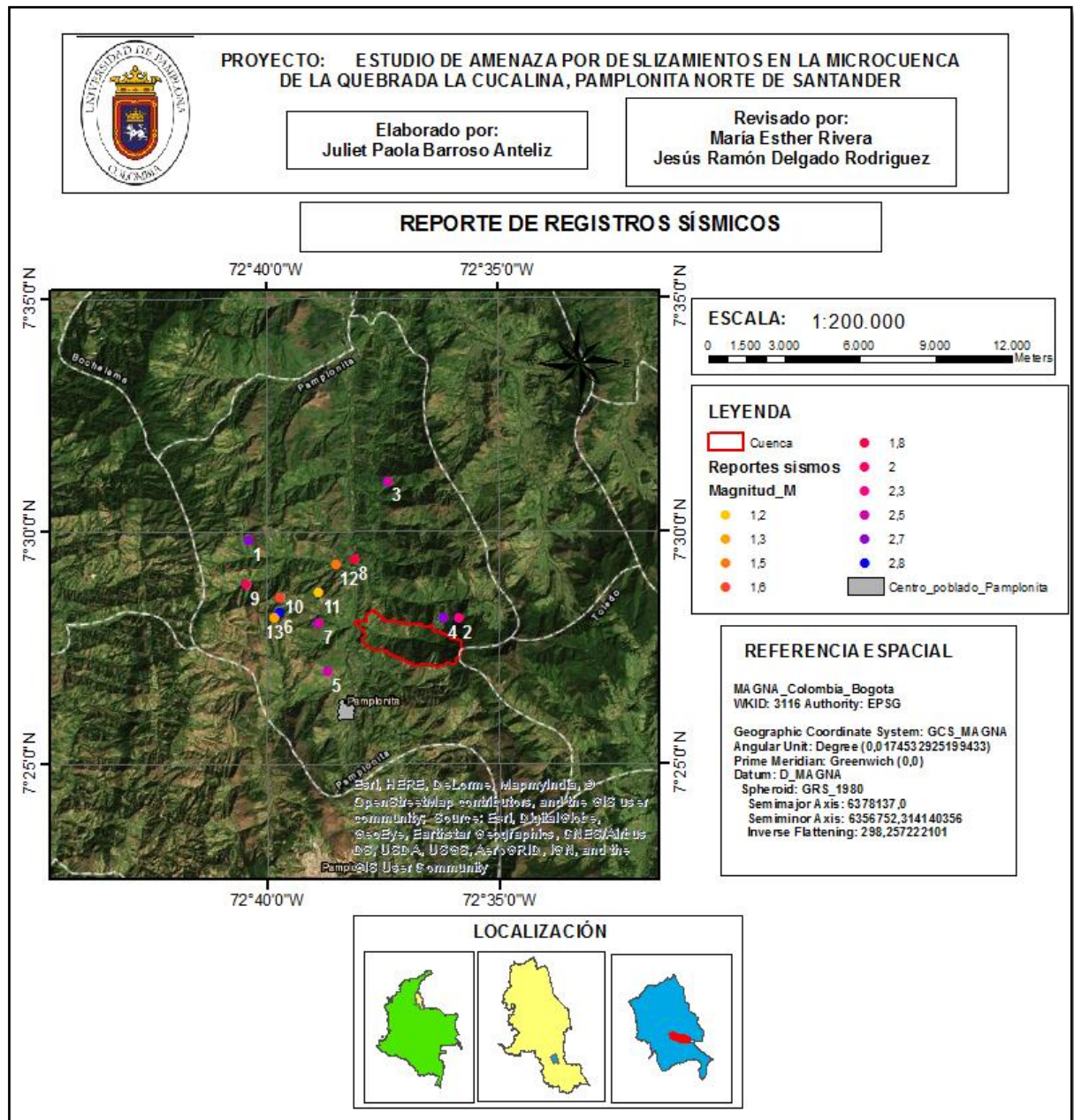
**Figura 34.** Curva de excedencia para Pamplonita, Norte de Santander



Fuente: SGC (2010)

En el mapa 29, se muestra el mapa de Reportes Sísmicos para el municipio de Pamplonita, en el cual se observan los sismos que han ocurrido desde 1993 hasta la actualidad, según SGC (2017); y con su valor en rampa de color, mostrando desde el color amarillo la magnitud baja y el color azul las mayores magnitudes. En la tabla 35 se plasma la información sismológica para cada evento, como la fecha, hora, ubicación, magnitud en escala Richter y profundidad. Estas magnitudes registradas, según la tabla 16, representan sismos de tipo micro y menor, y generalmente no son perceptibles, pero son registrados.

**Mapa 29.** Reporte de sismos desde 1993 con epicentro en el municipio de Pamplonita por la Red Sismológica Nacional de Colombia



Fuente: Barroso Anteliz (2017), a partir de SGC (2017)

**Tabla 35.** Registros de sismos desde junio-1993 para el municipio de Pamplonita, Norte de Santander.

Punto	Fecha (aaaa/mm/dd)	Hora UTC (hh:mm:ss)	Magnitud MI (Ritcher)	Longitud (grados)	Latitud (grados)	Profundidad (km)
1	14/08/1993	2:22:00	2,7	-72,673	7,497	166,8
2	29/01/1998	17:44:22	2,3	-72,598	7,469	120
3	1/07/1999	13:43:32	2,5	-72,623	7,518	91
4	4/11/1999	19:34:45	2,7	-72,603	7,469	154,9
5	12/10/2003	23:41:56	2,5	-72,645	7,45	175
6	19/02/2004	20:58:33	2,8	-72,662	7,471	142,6
7	16/01/2006	6:19:40	2,5	-72,648	7,467	7,5
8	2/02/2008	8:24:49	1,8	-72,635	7,49	120
9	8/02/2008	1:12:57	2	-72,674	7,481	7,481
10	9/04/2012	21:19:59	1,6	-72,662	7,476	0
11	25/08/2013	9:18:40	1,2	-72,648	7,478	0
12	27/01/2017	9:25:01	1,5	-72,642	7,488	0
13	13/02/2017	10:27:49	1,3	-72,664	7,469	0

Fuente: SGC (2017)

La historia del país registra más de un centenar de sismos destructores, ubicados principalmente en la región andina, el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental y el Océano Pacífico, y con menor frecuencia en el Caribe (SGC, 2010). Aunque en los últimos años la sismicidad en la zona no es tan alta, como se observa en la tabla 35, históricamente han habido sismos con bastante magnitud cercanos a la zona de estudio; como se muestra en la tabla 36, y su ubicación en el mapa 30. Lo que se relaciona con la alta amenaza potencial para la cordillera Oriental del país. A partir de los datos, se calcula la aceleración horizontal media sentida en la zona de estudio a partir del epicentro, las cuales, siendo los más cercanos los sismos de Pamplona, la intensidad sísmica no se excederá dentro del período de retorno de alrededor de 100 años.

**Tabla 36.** Sismicidad Histórica cercana a la zona de estudio

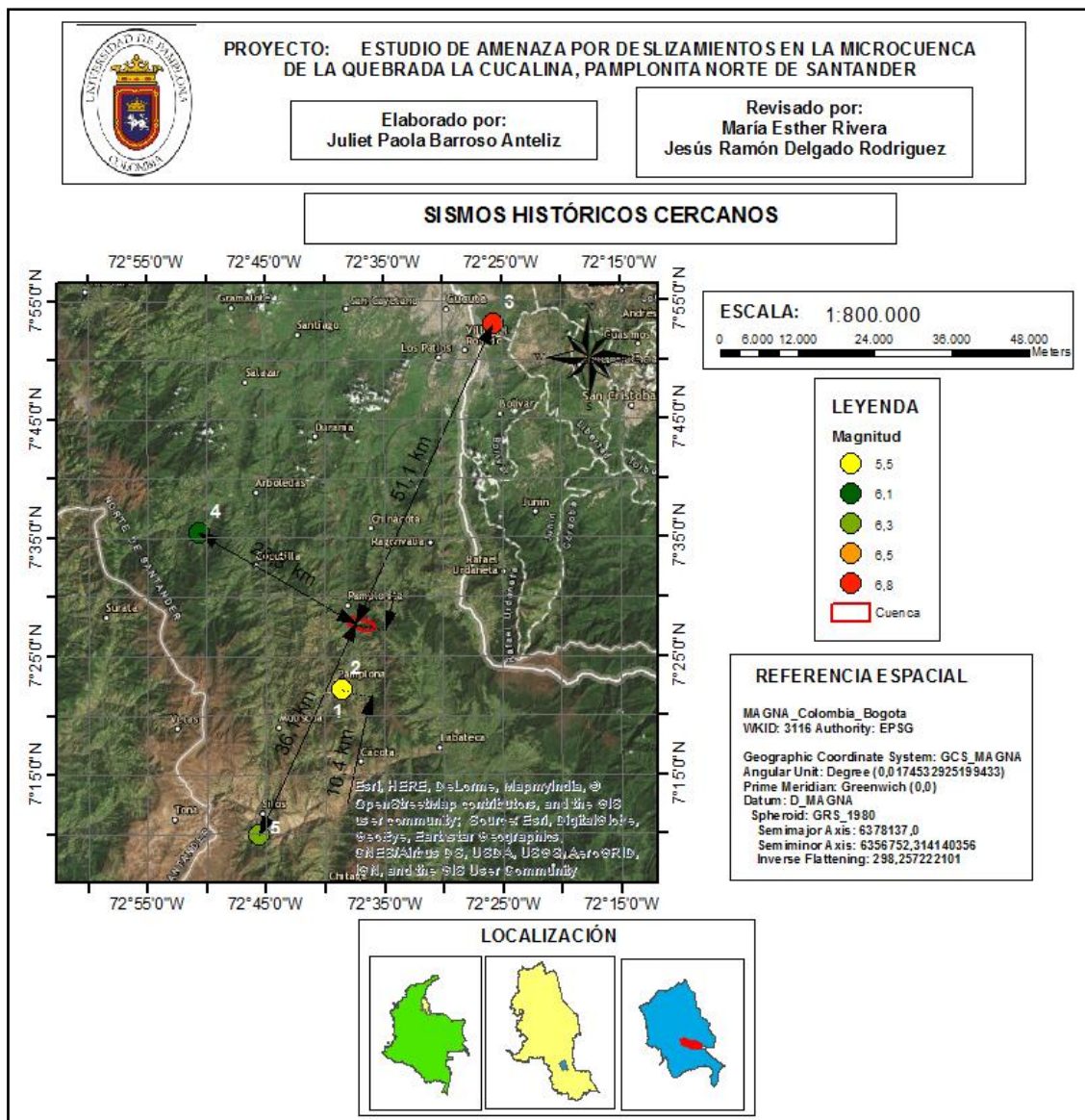
Fecha del sismo	Hora local	Área epicentral	Longitud	Latitud	Magnitud	Prof	Distancia al área de estudio	Aceleración horizontal en el área de estudio
aaaa/mm/dd	UTC		grados	grados	MW	km	km	cm/s <sup>2</sup>
1644/01/16	05:00	Pamplona, Norte de Santander	-72.642	7.369	6.5	15	10.4	169.31
1796/02/15	00:00	Pamplona, Norte de Santander	-72.642	7.369	5.5	15	10.4	87.24



1875/05/18	11:15	Cúcuta, Norte de Santander	-72.428	7.883	6.8	15	51.1	94.25
1950/07/08	21:35	Arboledas, Norte de Santander	-72.844	7.589	6.1	15	28.3	87.37
1973/08/30	13:25	Convención, Norte de Santander	-72.760	7.164	6.3	180	36.1	12.30

Fuente: SGC (2017), modificado por Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 30.** Ubicación de los sismos históricos cercanos y distancia respecto a la zona de estudio.



Fuente: Barroso Anteliz (2018), a partir de SGC (2017)

## 7.2. EVALUAR Y ZONIFICAR LA AMENAZA RELACIONADA CON LOS FACTORES QUE INCIDEN EN LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

El cálculo de la amenaza mediante el factor de seguridad con el método de talud infinito, se observa en los mapas 31 y 32. Ambos presentan el factor detonante de sismo, con el coeficiente de aceleración horizontal para un Tr de 100 años. El mapa 31, presenta la categorización de la amenaza para una precipitación de 120 mm, resultante de una duración de 24 horas y período de retorno de 25 años; y el mapa 32, presenta la amenaza con una precipitación de 2141 mm, que es la precipitación media anual.

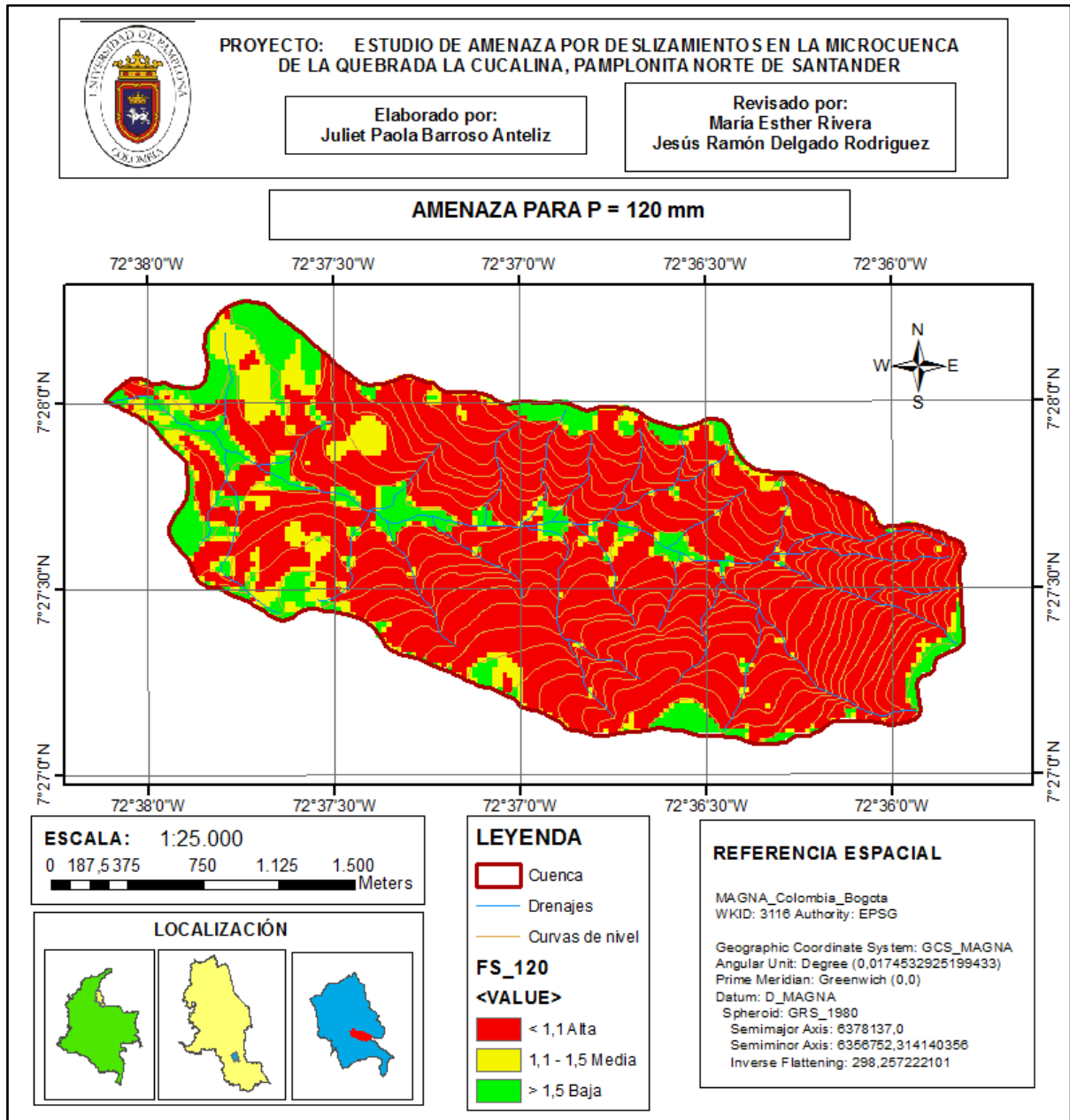
En la tabla 37, se presentan los valores constantes identificados para el cálculo de factores de seguridad.

**Tabla 37.** Constantes utilizadas en el cálculo de factor de seguridad para talud infinito

<b>Variable</b>	<b>Nombre</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>y<sub>w</sub></b>	Peso unitario del agua	9.81	kN/m <sup>3</sup>
<b>k</b>	Coeficiente de aceleración horizontal para un Tr = 100 años	0.18	-
<b>b</b>	Ancho de la celda	25	m

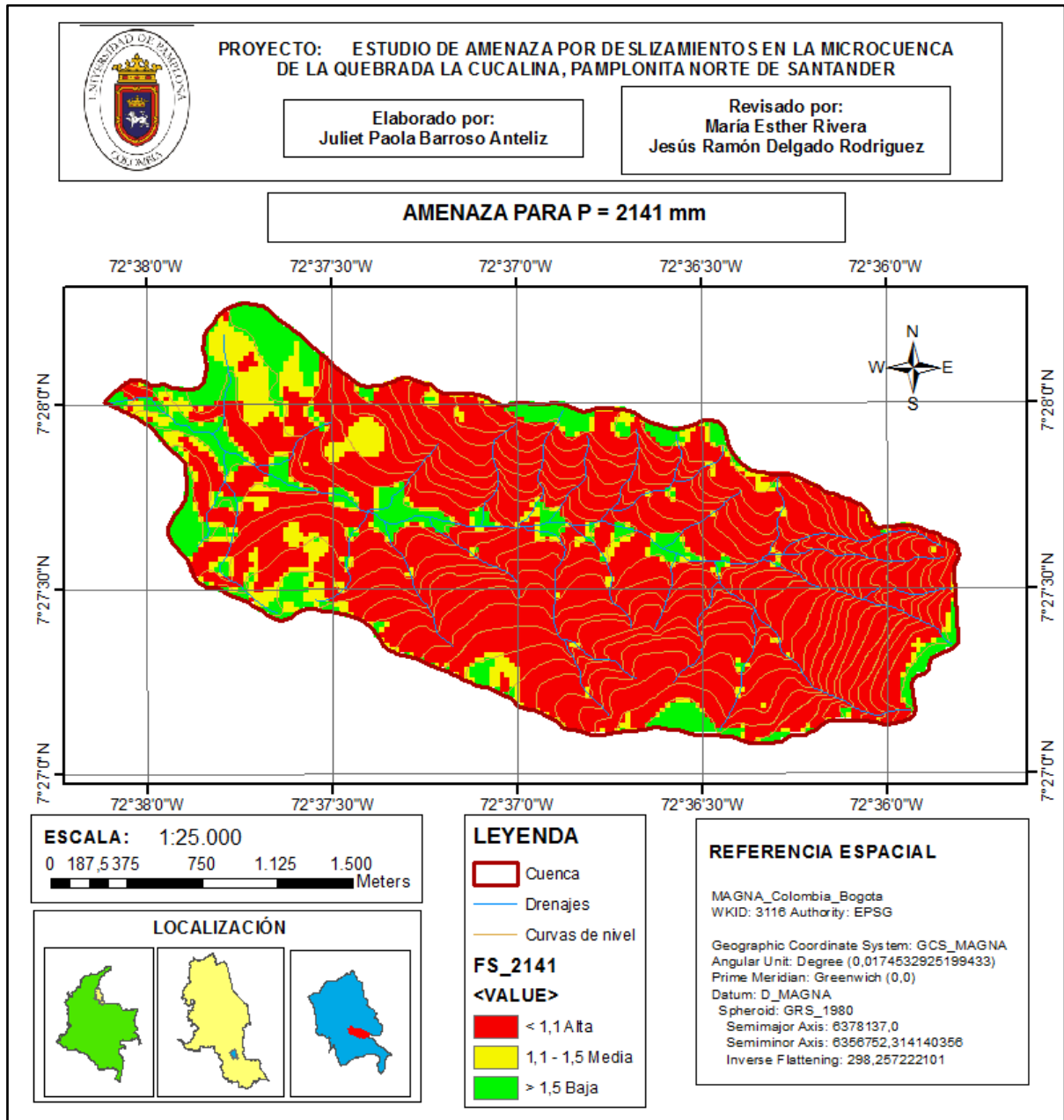
Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 31.** Mapa de valores de factor de seguridad por talud infinito para la zonificación de la amenaza con una precipitación de 120 mm.



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

**Mapa 32.** Mapa de valores de factor de seguridad por talud infinito para la zonificación de amenaza con una precipitación de 2141 mm.

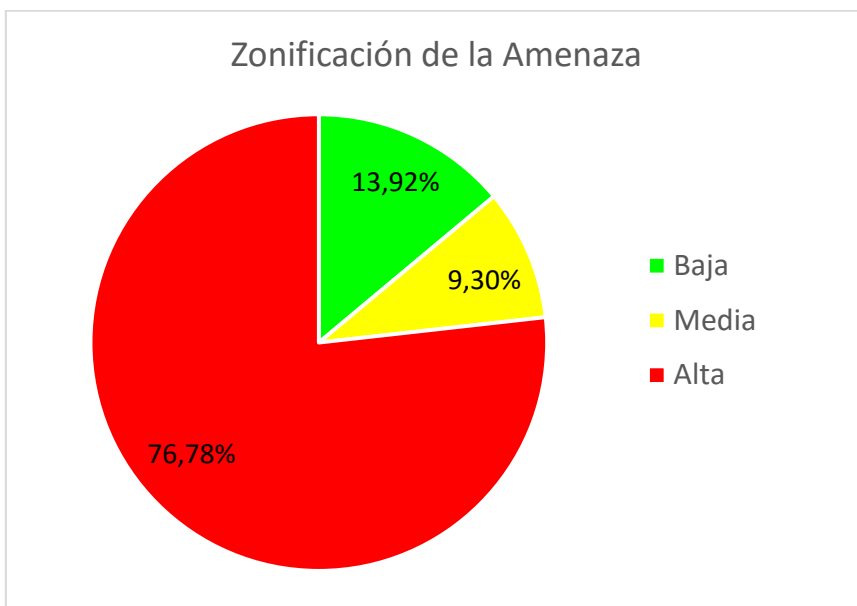


Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Como se observa en los mapas 31 y 32, a pesar de que para los dos escenarios de precipitación las zonas para cada tipo de amenaza es la misma, de acuerdo con los resultados para cada unidad de trabajo, el escenario de precipitación de 2141 mm presenta valores de factor de seguridad menores que para el de precipitación de 120 mm, lo que significa que con la precipitación infiltrada acumulada anual se tiene una mayor amenaza.

En la zona de estudio, como se muestra en la figura 35, la mayor parte presenta una amenaza Alta por movimientos en masa con un 76,8% respecto al área total de la microcuenca, seguida de un 13,9% para amenaza Baja, y por último con la menor proporción, la Amenaza Media con un 9,3%.

**Figura 35.** Porcentajes de área de tipo de amenaza por deslizamiento en la microcuenca Q. La Cucalina



Fuente: Barroso Anteliz (2017)

## CONCLUSIONES

Las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio son de tipo sedimentaria. La localización de Cuervos por su composición de carbonáceas coincide con la ubicación de la mina de carbón Santa Helena, y la mayor proporción para la zona pertenece a la formación Bocas. Los suelos presentes son arenas, las arenas arcillosas se encuentran alrededor del deslizamiento rotacional activo de la mina Santa Helena, y la arena limosa en la desembocadura. Además, los suelos se presentan cada vez más gravosos al acercarse al macizo rocoso de la parte alta de la cuenca.

Cada tipo de suelo presenta diferentes características respecto a la estabilidad. En la zona, aunque los suelos presentes corresponden a arenas, estas contienen una cantidad apreciable de finos pasantes del tamiz 40, por lo que se consideran arenas finas. Los cuales son los suelos que se encuentran en los depósitos, y los que a la vez presentan menos resistencia y mayor susceptibilidad a movimientos en masa. Estos suelos tienen baja plasticidad, no son compresibles, y tienen buena capacidad de drenaje.

La morfodinámica establece los movimientos en masa que afectaron o afectan a la zona de estudio, y a mayor frecuencia de morfodinámica, aumenta la susceptibilidad a deslizamientos. Los movimientos en masa encontrados son reptación, deslizamientos rotacionales y traslacionales y flujo de detritos. La gran parte de ellos, se encuentran en la parte baja de la microcuenca, coincidiendo con las áreas de depósitos; y otros, como los flujos de detritos superficiales, en las zonas con mayor pendiente. Aunque los mismos, implican una mayor susceptibilidad, estos en su mayoría se encuentran en zonas de amenaza media y baja, probablemente por presentar allí menor pendiente que el resto de la cuenca.

Debido al impacto ambiental que conlleva la minería subterránea, se presenta como un factor que cambia la condicionalidad propia de la zona a generar movimientos en masa, generando una mayor susceptibilidad, afectando la estabilidad de la ladera. Antes de ocurrir el deslizamiento rotacional activo en la zona de estudio, cerca de la mina, esta ya se encontraba en funcionamiento tiempo atrás. Debido a la intensidad de las lluvias en la temporada del año 2013, más los efectos propios de la mina, el deslizamiento pudo detonarse. En esta zona se presenta una alta amenaza, y alta vulnerabilidad para los trabajadores y la infraestructura de la mina, por un posible nuevo movimiento.

La pendiente se puede considerar como un factor importante en la ocurrencia de movimientos en masa en la medida en que se relaciona directamente con las tensiones de corte, y por su influencia en la distribución de agua en la ladera. Esta es el principal factor geométrico a tener en cuenta en análisis de estabilidad. Las pendientes para la zona de estudio, deducen un terreno abrupto a muy abrupto, con procesos característicos como reptación, deslizamientos, presencia de afloramientos rocosos, y procesos denudacionales. También establece que se trata de un paisaje con pendientes moderadamente escarpadas, con una pendiente media de 70,70%, y con tendencia a presentar erosión severa por relieve.

La microcuenca de la Q. La Cucalina, es de tipo exorreica, su orientación es SE – NW, sus ramificaciones son de tipo de corriente intermitente y gran parte del cauce principal es perenne, la cual acarrea agua durante las temporadas de lluvia y hasta comenzar con la siguiente. La forma de la microcuenca es alargada y está menos sujeta a crecientes, por generar menor rapidez en la concentración de aguas superficiales, produciendo crecidas graduales y con menos violencia. Además, la curva hipsométrica infiere que la microcuenca se encuentra en una fase de equilibrio respecto a procesos erosivos. Presenta un gran desnivel altitudinal de 1460 m, para un área de 5,2 km<sup>2</sup>, por lo tanto, la cuenca es de tipo montañosa.

La microcuenca tiene un orden de corriente 3, una sinuosidad baja que indica que la quebrada es de lineamiento recto, y presenta una relación de bifurcación alto por ser una región muy montañosa y rocosa. Teniendo una densidad de drenaje de 4,10 km<sup>2</sup>, refleja una cuenca con suficiente drenaje para producir crecidas, lo que se asocia con materiales impermeables a nivel superficial, sin embargo presenta vegetación densa, un relieve montañosos, y la mayoría de drenajes son intermitentes; por lo tanto, presenta bajo caudal para las tormentas.

De acuerdo con Corine Land Cover, la parte alta de la zona presenta la mayor parte de cobertura de bosques densos con un 53,4% y arbustos densos con 15,2%, y en la parte baja, los grupos de pastos y cultivos. A partir de la cobertura, el uso de suelo según el Número de Curva, presenta para la zona de estudio un 69% de Bosques con cubierta buena y 7% de Bosques con poca cubierta, siendo los principales; los pastizales por otra parte se encuentran en la parte baja de la cuenca en el área de los depósitos.

La microcuenca se caracteriza por tener un régimen de lluvias bimodal, con épocas lluviosas en abril-mayo-junio y septiembre-octubre-noviembre. Sin embargo, los fenómenos del Niño y la Niña producen una variabilidad en este régimen, causando sequías extremas y lluvias extraordinarias; afectaciones que concuerdan con el comportamiento pluviométrico de cada año de registro de lluvias. Con base en la precipitación media mensual de 178,5 mm y la temperatura media de 16,8°C, la zona se clasifica como de clima templado húmedo. Y por otra parte, de acuerdo con una temperatura de 16,8°C, una precipitación media anual de 2141,9 mm, y una relación de evapotranspiración potencial de 0,46; la microcuenca presenta la zona de vida según Holdridge como Bosque muy húmedo – Montano bajo (bmn-MB), lo que indica que es una zona generalmente accidentada, forestal y con vegetación natural lo que concuerda con los resultados de los demás parámetros.

El índice de concentración de la precipitación (ICP) indicó que no existe una tendencia clara al incremento o disminución de la misma, y que la concentración de las precipitaciones se ha mantenido relativamente estable con un ICP medio de 9,26%, indicando un comportamiento de lluvias uniforme, con baja diferencia entre los meses lluviosos y secos. Por ello, el Índice Modificado de Fournier (MFI), para la zona con valor de 0,098 indica una Agresividad Muy Baja de las lluvias.

Mediante las curvas IDF es posible estimar la intensidad de tormentas intensas de distintas duraciones y para diferentes períodos de retorno que pueden incidir en la ocurrencia de deslizamientos. Las curvas IDF de la zona indican que para un período de retorno de 25 años (probabilidad de ocurrencia para la probabilidad de falla), la máxima intensidad es de 158 mm/h para 5 minutos de duración de la lluvia, y la mínima intensidad representada es de 34 mm/h para 60 minutos de duración.

Aunque la diferencia de las precipitaciones de 120 mm y 2141 mm es grande, la precipitación infiltrada no varía en la misma proporción una de la otra, debido a que la profundidad de agua retenida en la cuenca es menor a la retención potencial máxima, la cual presenta un máximo valor de 760 mm. Las máximas precipitaciones infiltradas se presentan en las zonas con mayor cobertura vegetal, ubicándose en la parte media y alta de la cuenca.

Para ambos escenarios de variabilidad del nivel freático, se presenta un comportamiento con mayor profundidad del mismo en las zonas con mayor altitud y pendientes, y una menor profundidad en las zonas bajas.

El coeficiente de aceleración horizontal se utiliza como el efecto de la carga sísmica, debido a la vibración que genera un sismo en el terreno. Pamplonita de acuerdo con el Mapa Nacional de Amenaza Sísmica tiene una amenaza sísmica alta con un coeficiente de aceleración horizontal de 0.35 para un período de retorno de 475 años; presentando destructores sismos a períodos de ocurrencia grandes. Sin embargo, según la curva de excedencia para el municipio se tiene un coeficiente de 0.18 para un período de retorno de 100 años, indicando amenaza sísmica intermedia. Por ser un relieve montañoso, según CSNF (2010), este probablemente puede modificar las características del movimiento sísmico. Donde existen depósitos de arena y pendientes inestables, pueden ocasionar la falla del suelo con desplazamientos o asentamientos. En estos depósitos se presenta el fenómeno de licuación, en el cual el suelo pierde su capacidad de carga debido al aumento de poro, y es más factible su ocurrencia en arenas sueltas que en compactas.

La zonificación de la amenaza por deslizamientos de la microcuenca La Cucalina, presenta a la mayor parte del área como de Amenaza Alta, con menores zonas con Amenaza Media y Baja; lo que concuerda con lo presentado por el Mapa Nacional de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa a escala 1:100.000, del SGC (2015), en la plancha 110IIA, en la cual se observa que en la zona de estudio la mayor parte presenta una amenaza Muy Alta.

Las zonas de amenaza son las mismas para las dos precipitaciones: una precipitación extraordinaria y la precipitación a lo largo de un año medio, probablemente debido por la humedad de la zona y el comportamiento uniforme de las lluvias entre meses húmedos y secos. Además, siendo la parte alta de la microcuenca la que presenta la mayor cobertura vegetal densa, se deduce que las raíces de la misma tienen la función de ofrecer estabilidad, sin embargo, en todas estas zonas, la amenaza es alta, definiendo



entonces, a la pendiente como un factor determinante en la susceptibilidad de movimientos.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda a la alcaldía del municipio, a las personas que deseen dar una mejora en el proyecto, o las cuales pretendan usar el mismo como guía para otros estudios, de acuerdo con la metodología utilizada en el presente estudio, los siguientes puntos:

- Tener en cuenta en la evaluación de amenaza otros escenarios de los factores desencadenantes, con el fin de simular situaciones que indiquen una probabilidad de ocurrencia, como el uso de diferentes coeficientes de aceleración horizontal sísmica, de acuerdo a períodos de retorno, e intensidad de lluvias para períodos de tiempo con continua precipitación.
- Aplicar una metodología de estabilidad específica para rocas, junto la de talud infinito para suelo, con el fin de realizar una evaluación más precisa de la zona de estudio.
- Respecto a la profundidad del nivel freático y espesor del terreno, se recomienda hacer perforaciones para una exploración del subsuelo, para obtener datos más aproximados; y realizar la mayor cantidad posibles de ensayos de laboratorio, para manipular información propia de la zona, como las propiedades de resistencia.
- Promover acciones de protección del recurso hídrico, contra la tala de árboles y la extracción ilegal del agua para diferentes usos, lo que ha permitido que los afluentes presenten un caudal muy mínimo y permanezcan secos durante un gran período de tiempo; así como también, mantener la vigilancia para la zona de protección de bosques de Corponor, la cual pertenece al área central y alta de la microcuenca.
- En lo posible, instalar pluviómetros, y demás instrumentos, para medir la lámina de agua que cae a la microcuenca, por el motivo de tener información característica de la zona, y evitar falta de precisión por parte de los sensores de satelitales meteorológicos.

## BIBLIOGRAFÍA

**Acevedo Aristizábal, Lina Alexandra. 2009.** Estimación Hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia. *Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos*. s.l., Medellín, Colombia : Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2009.

**Albentosa Sánchez, Luis Miguel. 1990.** La aplicación del método estadístico en climatología. El régimen anual de precipitaciones en Barcelona (II). *Climatología y medio ambiente*. s.l. : Universidad de Barcelona, 1990.

**Asocars & Universidad de Magdalena. 2011.** Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo del Complejo de Humedales de la Vertiente Occidental del Río Magdalena en el departamento del Atlántico y Detereminación de la Ronda Hídrica de los humedales de Sabanagrande, Santo Tomas y Palmar de Várela. *Identificación de Amenazas y Vulnerabilidades*. 2011.

**Bañón Blázquez , Luis. 1999.** Clasificación de suelos. [aut. libro] Luis Bañón Blázquez. *Manual de Carreteras*. Alicante, España : Universidad de Alicante Escuela Politécnica Superior, 1999.

**Bohórquez Ríos, Lucy. 2013.** Criterios para la evaluación de amenazas por deslizamientos e inundaciones. Honduras : COPECO & PNUD, 2013.

**Caracol Radio. 2011.** Colombia un país en riesgo permanente: Ingeominas. [En línea] 11 de 12 de 2011. [http://caracol.com.co/radio/2011/12/11/nacional/1323588540\\_590777.html](http://caracol.com.co/radio/2011/12/11/nacional/1323588540_590777.html).

**Cárdenas, Abad y Francisco, Kabir. 2006.** Ensayo metodológico para la evaluación y zonificación de la amenaza por remoción en masa, Cuenca de Loja. *Tesis Ingeniería Geológica*. Quito : Escuela Politécnica Nacional, 2006.

**Cardozo, Claudia Paola. 2013.** Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina). *Universidad Nacional de Córdoba*. Salta, Argentina : s.n., 2013.

**Cartaya, Scarlet, Méndez, Williams y Pacheco, Henry. 2006.** Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. Caracas : Asociación Interciencia, 2006. Vol. 31, 9.

**Ciencia Geográfica. 2014.** Escala Ritcher y escala Mercalli. *Carpeta Geográfica*. [En línea] Ciencia Geográfica, 2014. <http://cienciageografica.carpetapedagogica.com/2011/09/escala-richter-y-escala-mercalli.html>.

**Civilgeeks. 2011.** Valores referenciales sobre diferentes propiedades de los suelos. *Civilgeeks*. [En línea] 2011. <https://civilgeeks.com/2011/11/30/valores-referenciales-sobre-diferentes-propiedades-de-los-suelos/>.

**Cobos Miranda, Germán Alfonso, y otros. 2010.** Estudio detallado de amenaza por fenómenos de remoción en masa, municipio de Suratá. *Subdirección Gestión Ambiental Urbana Sostenible, Coordinación Gestión del Riesgo*. Suratá : s.n., 2010.

**Constructor Civil. 2011.** Sistema de Clasificación de Suelos Unificado. *Constructor Civil*. [En línea] 1 de enero de 2011. [Citado el: 30 de noviembre de 2017.] [http://civildocs.blogspot.com.co/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos\\_2161.html](http://civildocs.blogspot.com.co/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos_2161.html).

**CORPOAIRE. 2002.** Esquema de Ordenamiento Territorial 2002-2010. *Caracterización de Suelos*. Boavita, Boyacá : s.n., 2002.

**Corzo Oviedo, Fabian Antonio y Pinilla Mora, John Camilo. 2015.** Comparación de Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) reales y sintéticas. Caso de estudio municipio de Anapoima (Cundinamarca). *Especialización en Recursos Hídricos*. s.l., Bogotá, Colombia : Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, 2015.

**Cruz Velasco, Lucio Gerardo. 2009.** Clasificación de los suelos. *Facultad de Ingeniería Civil*. [En línea] 27 de septiembre de 2009. [Citado el: 29 de noviembre de 2017.] [ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/.cuentasbajadas29092009/lucruz/docs/Curso%20Mec%20E1nica%20de%20Suelos%20I/Mecanica%20de%20Suelos%20I%20ESLAGE%20\(28\\_29\\_30\).pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/.cuentasbajadas29092009/lucruz/docs/Curso%20Mec%20E1nica%20de%20Suelos%20I/Mecanica%20de%20Suelos%20I%20ESLAGE%20(28_29_30).pdf).

**CSNF. 2010.** Bases Técnicas para la determinación de la prima de riesgo y la pérdida máxima probable de los seguros de terremoto. [aut. libro] Comisión Nacional de Seguros y Fianzas. *Circular Única de Seguros*. México D.F. : s.n., 2010.

**Cuchillo Cayturo, Olga Zarepta. 2015.** Apuntes del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.). *Civilgeeks Ingeniería y Construcción*. [En línea] 2015. [Citado el: 29 de noviembre de 2017.] <https://civilgeeks.com/2015/07/11/apuntes-del-sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-s-u-c-s/>.

**Delgadillo Santander, Alejandro y Moreno Barrios, Ada. 2013.** Morfometría de Cuencas. *Hidrología*. 2013.

**Delgado, María Isabel y Gaspari, Fernanda Julia. 2010.** Caracterización morfométrica geoespacial. Estudio de caso: Arroyo Belisario, Argentina. *Medio ambiente y desarrollo sustentable*. Argentina : Tecnociencia Chichuahua, 2010. Vol. 4, 3.

**DISC GES. 2016.** M2TMNXFLX: MERRA-2 tavgM\_2d\_flux\_Nx: 2d,Monthly mean,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation,Surface Flux Diagnostics V5.12.4. *Gooddard Earth Sciences Data Services Center*. [En línea] 2016. [https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TMNXFLX\\_5.12.4/summary](https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TMNXFLX_5.12.4/summary).

**Eco-Hispaniola. 2014.** Zonas de Vida. *Ciencias naturales en la Hispaniola*. [En línea] 2014. [Citado el: 26 de noviembre de 2017.] <http://www.jmarcano.com/ecohis/zonas/montanos.html>.

**EcuRed. 2017.** Climograma. *EcuRed Conocimiento con todos y para todos*. [En línea] 2017. <https://www.ecured.cu/Climograma>.

**EDUC.AR. 2013.** Cómo construir y analizar climogramas. *Sociedad del Estado*. [En línea] 2013. [Citado el: 25 de septiembre de 2017.] [https://cdn.educ.ar/dinamico/UnidadHtml\\_\\_get\\_\\_5224f21e-7a07-11e1-83ab-ed15e3c494af/index.html](https://cdn.educ.ar/dinamico/UnidadHtml__get__5224f21e-7a07-11e1-83ab-ed15e3c494af/index.html).

**Estructurando. 2015.** ¿Qué relación existe entre la aceleración de cálculo del sismo y la escala sismológica de Richter y la de Mercalli? *Estructurando*. [En línea] 14 de septiembre de 2015. <http://estructurando.net/2015/09/14/que-relacion-existen-entre-la-aceleracion-de-calculo-del-sismo-y-la-escala-sismologica-de-richter-y-la-de-mercalli/>.

**Fuentes Junco, José de Jesús Alfonso. 2004.** Análisis Morfométrico de Cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. *Instituto Nacional de Ecología*. México : s.n., 2004.

**Gáfar Duarte, Mayra Alejandra. 2013.** Trabajo de grado para Ingeniero Agroforestal. *Zonas de Amenazas por Deslizamientos, a partir del modelamiento de datos espaciales para el casco urbano del municipio de San José de Cúcuta*. San José de Cúcuta : Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, 2013.

**García, Julian. 2014.** Amenaza por remoción en masa en Colombia. *Centro de Estudios Estratégicos Latinoamericanos – CEELAT*. [En línea] 15 de Mayo de 2014. <http://ceelat.org/mapas/amenaza-por-remocion-en-masa-en-colombia/>.

**GES DISC. 2017.** File Specification for TRMM Products. *Gooddard Earth Sciences Data and Information Services Center*. [En línea] 7 de Julio de 2017. <https://pps.gsfc.nasa.gov/Documents/filespec.TRMM.V7.pdf>.

**Gidahatari. 2016.** TRMM\_3B42\_Daily: TRMM (TMPA) Precipitation L3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree V7. *Gooddard Earth Sciences Data Services Center*. [En línea] 2016. [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM\\_3B42\\_Daily\\_7/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_Daily_7/summary).

**Gidahatari. 2017.** Tutorial de descarga de datos de Precipitación del Satélite TRMM desde el servidor NASA Giovanni. [En línea] 3 de Enero de 2017. <http://gidahatari.com/ih-es/tutorial-de-descarga-de-datos-de-precipitacion-del-satelite-trmm-desde-nasa-giovanni>.

**Goddard Space Flight Center. 2017.** Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2. *Global Modeling and Assimilation Office*. [En línea] NASA, 10 de mayo de 2017. [Citado el: 23 de noviembre de 2017.] <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>.

**Goddard Space Flight Center. 2011.** NASA Facts: TRMM Instruments. *TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission*. [En línea] 2011. [https://trmm.gsfc.nasa.gov/overview\\_dir/instrumentfacts.html](https://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/instrumentfacts.html).

**Goddard Space Flight Center. 2017.** TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission. [En línea] 17 de octubre de 2017. <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>.

**González de Vallejo, Luis I., y otros. 2002.** Ingeniería Geológica. Madrid : Pearson Educación, 2002.

**González Valencia, Juan Esteban . 2006.** Propuesta Metodológica basada en un Análisis Multicriterio para la Identificación de Zonas de Amenaza por Deslizamientos e Inundaciones. Medellín, Colombia : Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 2006. Vol. 5, 8.

**Grupo de Geotecnia. 2013.** Clasificación de Suelos. *Universidad Católica de Valparaíso*. [En línea] octubre de 2013. [Citado el: 29 de noviembre de 2017.] [http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/03\\_clases\\_catedra/clases\\_catedra\\_ms1/05\\_terzaghi\\_3.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf).

**Hidalgo Montoya, César Augusto y Vega Gutiérrez, Johnny Alexander. 2014.** Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia (Valle de Aburrá - Colombia). s.l. : Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, 2014. Vol. 11.

**IDEAM. 2014.** *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico*. Bogotá, D.C. : s.n., 2014.

**IDEAM. 2014.** Coberturas de la Tierra. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. [En línea] 2014. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>.

**IDEAM. 2014.** Curvas Intensidad Duración Frecuencia - IDF. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. [En línea] MinAmbiente, 2014. <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>.

**IDEAM. 2014.** Grupo Temático: Estado Coberturas de la Tierra. *Geoservicios*. [En línea] 2014. <http://www.ideam.gov.co/geoservicios-institucionales>.

**IDEAM. 2014.** Índice de Concentración de la Precipitación. *Índices Climatológicos: estacionalidad, disponibilidad hídrica y aridez*. 2014.

**IDEAM. 2010.** Leyenda Nacional para Coberturas de la Tierra. *Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia*. Bogotá, D.C. : s.n., 2010.

**IDEAM. 2010.** Metodología Corine Land Cover. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. [En línea] MinAmbiente, 2010. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>.

**IDEAM. 2012.** Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del terreno a los movimientos en masa. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Bogotá D.C. : s.n., 2012.

**IEEE Sección Panamá. 2013.** Geotecnia. *IEEE Sección Panamá*. [En línea] 2013. <http://sites.ieee.org/panama/files/2013/05/Capitulo-5-Geotecnia.pdf>.

**IGAC. 2008.** Cobertura de la Tierra. *SIG-OT*. [En línea] 2008. <http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/>.

**INETER & COSUDE. 2005.** Proyecto Metodologías para el Análisis Local de Amenazas Naturales y Riesgos en Nicaragua MET-ALARN. *Inestabilidad de laderas, Mapas de Amenaza: Recomendaciones técnicas para su elaboración*. Managua, Nicaragua : s.n., 2005.

**INGEOMINAS. 2013.** Geología de la Plancha 110 Pamplona. 2013.

**Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 1981.** Sección Clima. *Perfil de Área Distrito de Renacimiento, Volumen N° 11*. Santiago de Veraguas, Panamá : s.n., 1981.

**Jaimes, Miguel A., Niño, Mauro y Reinoso, Eduardo. 2013.** Una aproximación para la obtención de mapas de desplazamiento traslacional de laderas a nivel regional inducido por sismos. s.l. : Revista de Ingeniería Sísmica, 2013. Vol. 89.

**Jardí, Montserrat. 1985.** Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. Barcelona : Revista de Geografía, 1985. Vol. XIX.

**Laurencena, P, y otros. 2002.** Características de las variaciones freáticas en un área del noreste de la provincia de Buenos Aires. *Groundwater and human development*. Buenos Aires : Universidad Nacional de la Plata, 2002.

**Lavao Pastrana, Sergio Andrés. 2014.** Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña. Caso de estudio: Cuenca del río Murca, mediante a utilización de sistemas de información geográfica. *Diplomado SIG y sensores remotos aplicados a recursos hídrico*. Bogotá, D.C. : Universidad Militar Nueva Granada, 2014.

**Luengo Ugidos, Miguel Ángel. 2015.** Prácticas de Climatología Analítica para España: comentario e interpretación de las normales climáticas y gráficos ombrotérmicos (climogramas). *Departamento de Geografía - Facultad de Geografía e Hidrología*. Salamanca : Universidad de Salamanca, 2015.

**Lux Cardona, Benjamín. 2016.** Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hldrográficas. *Maestría en Energía y Ambiente*. Guatemala : Universidad de San Carlos, 2016.

**Marcano Montilla, Arismar y Catayra Ríos, Scarlet. 2012.** Análisis de la distribución espacial de la susceptibilidad a los movimientos de remoción en masa, empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG), en la cuenca del río San Julián, estado Vargas, Venezuela. s.l. : Universidad Pedagógica Experimental Libertador, 2012. Vol. 36, 75.

**Martinez Vargas, Alberto J. 1990.** Características generales de los materiales térreos. *Geotecnia para ingenieros*. 1990. Vol. 1.

**MinAmbiente. 2014.** Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS. *Anexo A. Diagnóstico*. 2014.

**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. 2014.** Ley 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*. 2014.

**Ministerio de Interior; Ministerio de Hacienda; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. 2012.** Ley 1523 de 2012 . *Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*. 2012.

**NC Arquitectura. 2012.** ¿Qué es la aceleración sísmica? *Intervención Técnica en Catástrofes*. [En línea] NC Arquitectura, 15 de marzo de 2012. <http://ncarquitectura.com/que-es-la-aceleracion-sismica/>.

**NSR-10. 2010.** Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. *Título A: Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente*. Bogotá D.C. : Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010.

**Obando García, María del Carmen y Alvarado Ríos, Miguel. 2015.** Método del Ensayo Estándar para la densidad y peso unitario del suelo in-situ, mediante el método del cono de arena. *Slideshare*. [En línea] Mayo de 2015. <https://es.slideshare.net/mariadelcarmenobandogarcia/ensayo-de-limite-liquido-y-plastico>.

**Oguerre. 2015.** Geomorfología de Cuencas. Mérida, Venezuela : Universidad de Los Andes, 2015.

**Pizarro T., Roberto, y otros. 2008.** Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones, en la zona central de Chile. *Universidad de Talca*. Talca, Chile : s.n., 2008.

**Pizarro T., Roberto, y otros. 2003.** Construcción de Curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) en zonas semiáridas de Chile Central. 2003.

**Pizarro Tapia., Roberto, y otros. 2005.** Módulo 2: Curvas Intensidad Duración Frecuencia. [aut. libro] Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda EIAS y Universidad de Talca. *Elementos de Ingeniería Hidrológica para el Mejoramiento de la Productividad Silvícola*. Chile : s.n., 2005.



**PMA: GCA. 2007.** Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. *Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas*. s.l. : Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, 2007. 4.

**Quesada Román, Adolfo y Barrantes Castillo, Gustavo. 2017.** Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. Heredia : Investigaciones Geográficas, 2017. 94.

**Quesada, Steven. 2016.** Clasificación de un suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). *Instituto Tecnológico de Costa Rica*. 2016.

**Racca, Juan M. G. 2007.** Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales de terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*. Rosario : s.n., 2007. Vol. 77.

**Rivera Carmona, Luisa Fernanda. 2017.** Zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa de acuerdo con el método de talud infinito, en el municipio de Girardota en el departamento de Antioquia. s.l. : Universidad Militar Nueva Granada, 2017.

**Rodríguez Solano, Juan Gabriel, y otros. 2013.** Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de análisis Mora y Vahrson: Estudio de caso. *Grupo de Investigación Gestión Integral del Territorio GIT*. Pamplona : Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo, 2013. Vol. 4, 1.

**Rodriguez, David. 2013.** Zonas de vida de Holdridge en Colombia. *Prezi*. [En línea] 6 de febrero de 2013. [Citado el: 26 de noviembre de 2017.] <https://prezi.com/3ol10vtxxvuo/zonas-de-vida-de-holdbridge-en-colombia/>.

**SGC. 2015.** Mapa Nacional de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa Escala 1:100.000. *Servicio Geológico Colombiano*. 2015.

**SGC. 2017.** Consultas de Sismicidad. *Red Sismológica Nacional de Colombia*. [En línea] 2018. <http://200.119.88.135/RSNC/index.php/consultas>.

**SGC. 2015.** *Guía Metodológica para estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa*. Bogotá D.C., Colombia : Colección, Guías y Manuales. Servicio Geológico Colombiano, 2015.

**SGC. 2017.** *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000*. Bogotá, D.C., Colombia : Colección Guías y Manuales. Servicio Geológico Colombiano, 2017.

**SGC. 2010.** *Mapa Nacional de Amenaza Sísmica*. Bogotá, D.C. : s.n., 2010.

**SGC. 2017.** Sismicidad Histórica de Colombia. *Red Sismológica de Colombia*. [En línea] 2017. <http://sish.sgc.gov.co/visor/>.

**SIAC.** Fenómenos del Niño y la Niña. *Sistema de Información Ambiental de Colombia*. [En línea] [Citado el: 23 de 11 de 2017.] <http://www.siac.gov.co/ninoynina>.

**Sismoclub. 2011.** Zonificación Sísmica de Colombia. *Sismoclub 2011-1*. [En línea] 2011. <https://sismoclub2011-1.wikispaces.com/Zonificaci%C3%B3n+S%C3%ADsmica+de+Colombia>.

**UNAD. 2013.** Ecosistemas colombianos según Holdridge. *Clasificación de los Ecosistemas Colombianos*. 2013.

**UNESCO, ITC, Universidad de Utrecht, CEPREDENAC. 2000.** Desarrollo de una Metodología para la Identificación de Amenazas y Riesgos a deslizamientos en la cuenca del río San Juan, República Dominicana. *Plan de Acción Regional para Centro América (PARCA) Construcción de Capacidades para la Reducción de Desastres Naturales (CBNDR)*. República Dominicana : s.n., 2000.

**UNESCO, y otros. 2007.** *Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia para la zona centro sur de Chile*. Talca, Chile : Universidad de Talca, 2007.

**USGS. 2017.** Earth Explorer. *USGS*. [En línea] 2017. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

**Vargas M., Rodrigo y Diaz-Granados O., Mario. 1998.** *Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Bogotá, Colombia : s.n., 1998.

**Vega Gutierrez, Johnny Alexander. 2010.** Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la geomática. La Plata : Universidad Nacional de La Plata, 2010.

**Velasco, I. y Cortés, G.** Índices de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión, en Sinaloa, México. *Erosión del Suelo y Desertificación*. Sinaloa, México : s.n.

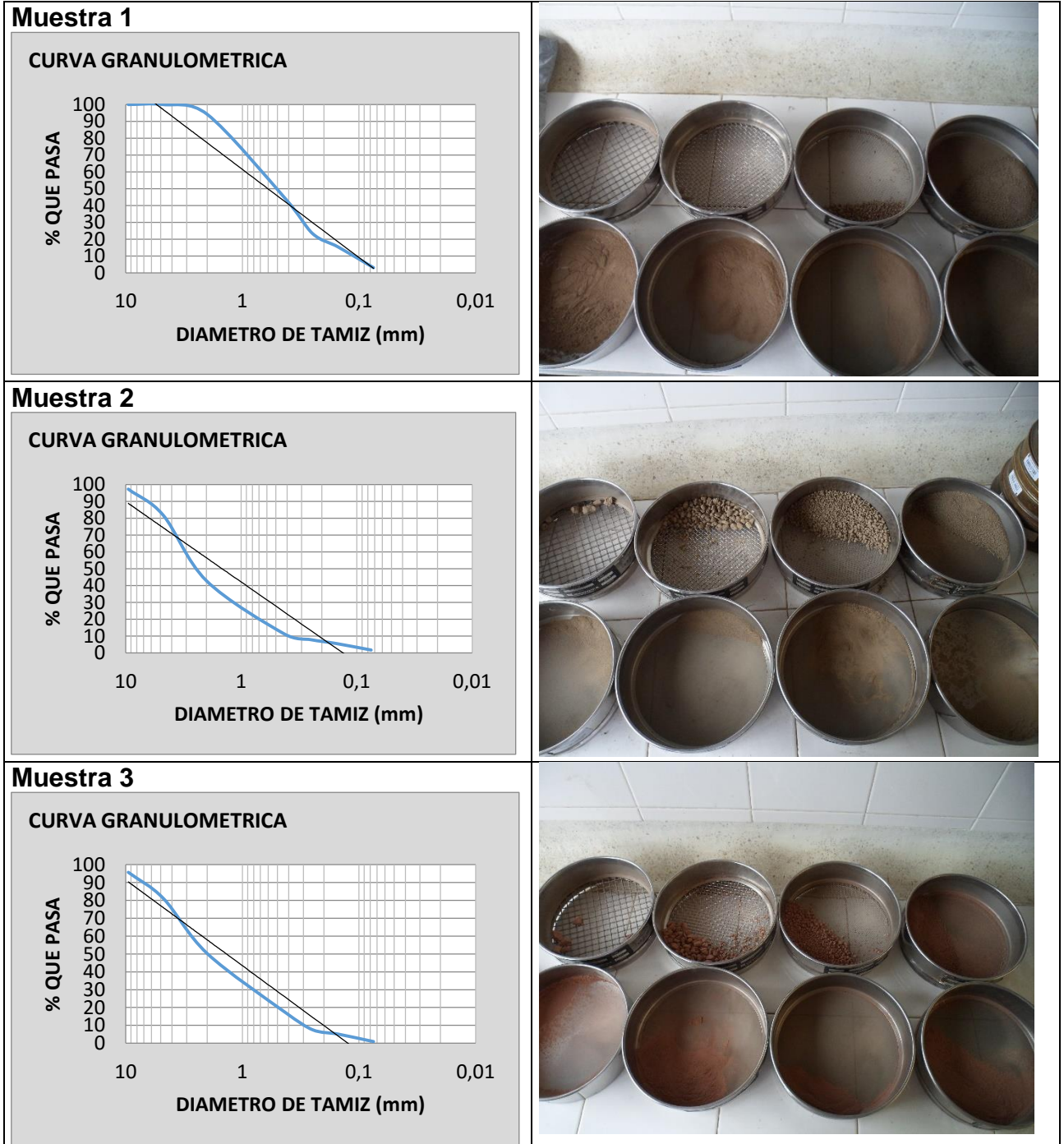
**Vélez Upegui, Jorge Julián y Botero Gutiérrez, Adriana. 2011.** Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales. Manizales : DYNA, 2011. Vol. 78, 165.

**Westen, Cees van. 2010.** Introducción a los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation*. 2010.

## ANEXOS

### Anexo 1. Análisis granulométrico y ensayo de límites líquido y plástico

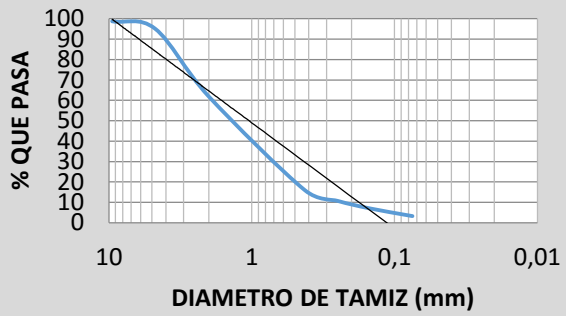
Figura 36. Curvas granulométricas y ensayo de granulometría para las muestras de suelo





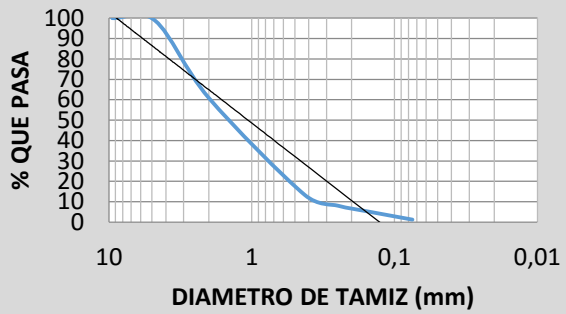
### Muestra 7

#### CURVA GRANULOMETRICA



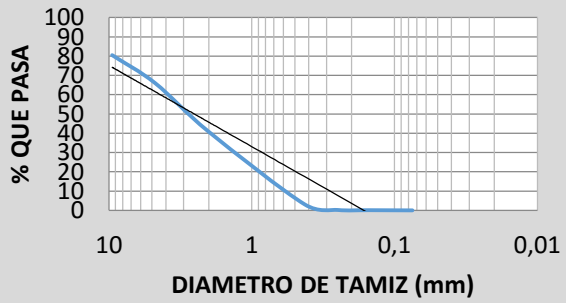
### Muestra 8

#### CURVA GRANULOMETRICA



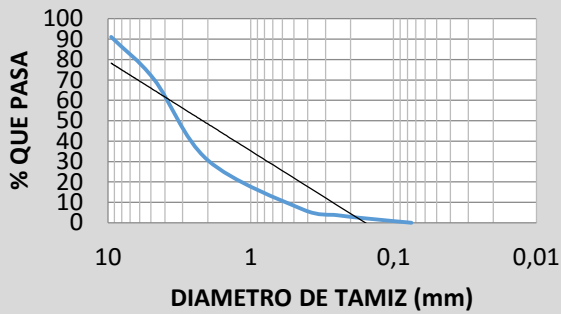
### Muestra 9

#### CURVA GRANULOMETRICA



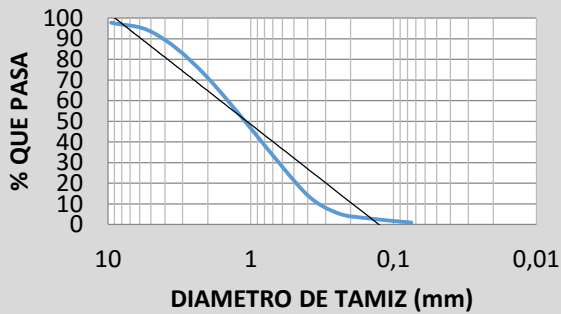
### Muestra 10

#### CURVA GRANULOMETRICA



### Muestra 11

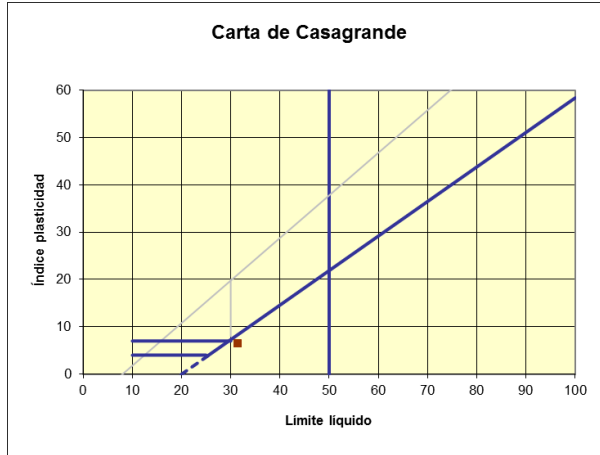
#### CURVA GRANULOMETRICA



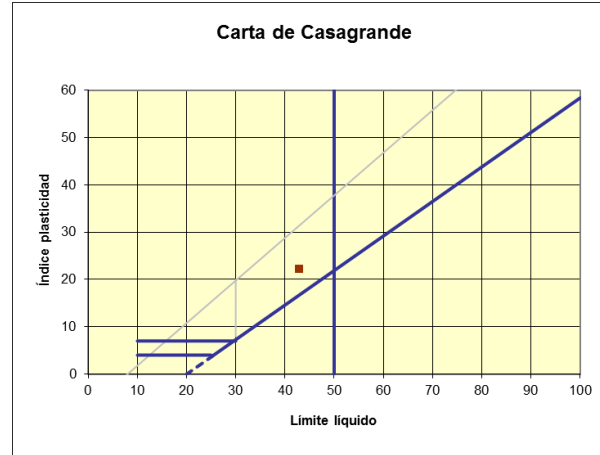
Fuente: Barroso Anteliz (2017)

Figura 37. Cartas de Casagrande para las muestras de suelo

### Muestra 1

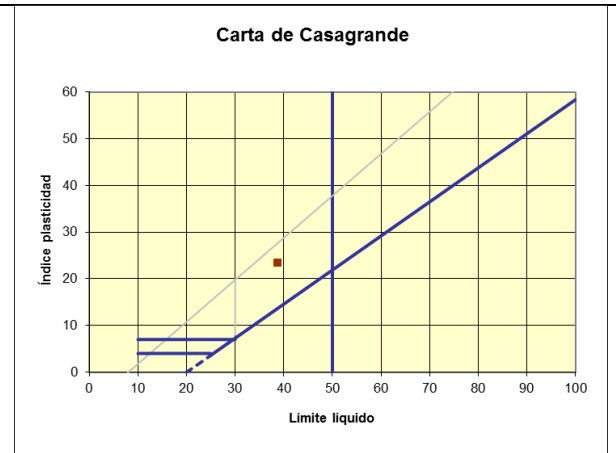
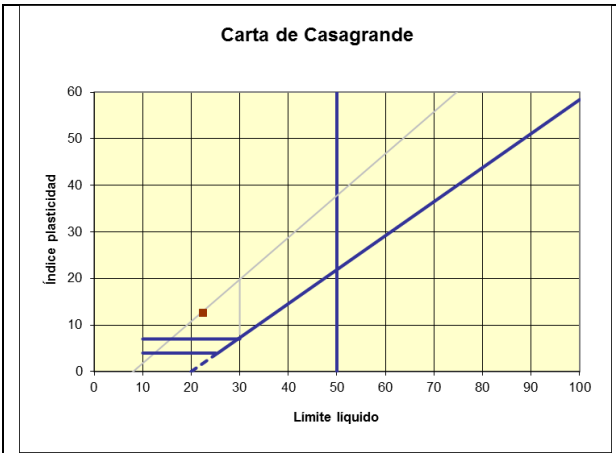


### Muestra 2



### Muestra 3

### Muestra 5



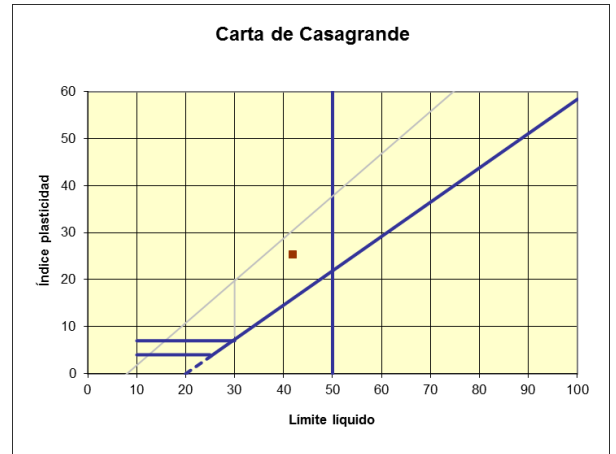
**Muestra 6**

**Muestra 7**



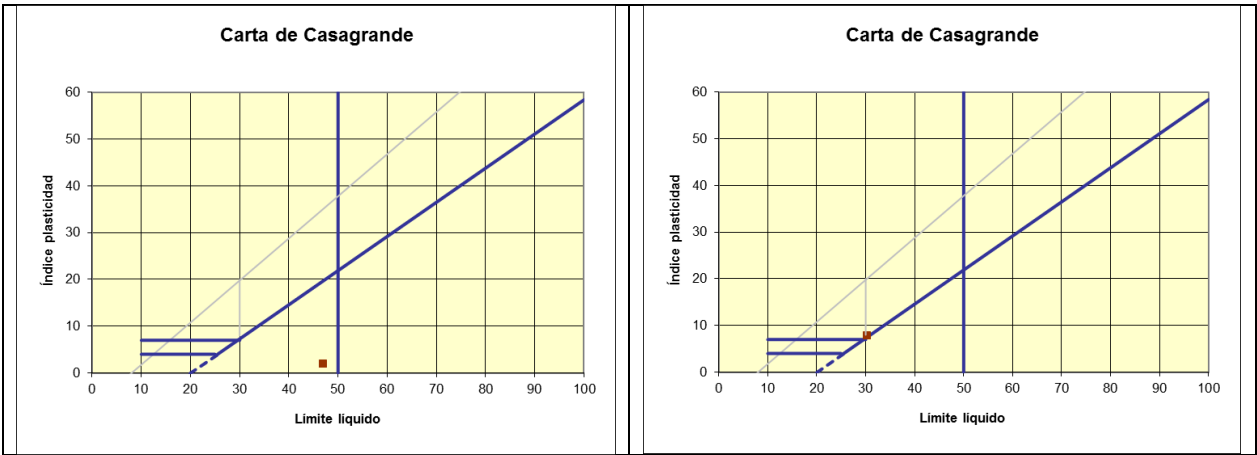
**Muestra 8**

**Muestra 9**



**Muestra 10**

**Muestra 11**



Fuente: Barroso Anteliz (2017)