

**Factores geomorfológicos asociados con la susceptibilidad y amenaza por movimientos
en masa. Vereda El Tobo, en Timaná - Huila**

Camilo Alexander Morales Alvis

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Directora

María Victoria Mejía Ramírez

Geóloga

Universidad Santo Tomás, Bogotá

División de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Civil

2019

Dedicatoria y agradecimientos

Dedicado a mis abuelos por ser mi soporte a lo largo de toda la carrera.

Quiero dar gracias especialmente a mi directora de proyecto de grado, María Victoria Mejía Ramírez, por su apoyo, su paciencia, por brindarme sus conocimientos y por guiarme cuando el camino se hacía difícil, también agradezco a María Alejandra Salamanca Avila por su amor y solidaridad cuando más lo he necesitado.

Resumen

Visto desde un aspecto geológico, el territorio colombiano es considerado según el IDEAM (S.F), de formación reciente y en proceso de respuesta a los eventos estructurales y a las modificaciones bioclimáticas generadas y aún en proceso de desarrollo, en una condición de inestabilidad natural. Gran parte del territorio colombiano tiene una topografía de altas pendientes, la geología presenta, en algunos casos, suelos inestables, y, además, cuando se juntan ambos o alguno de estos dos factores con las altas precipitaciones, se potencia el desarrollo de los movimientos en masa, es aquí cuando el análisis de amenaza por deslizamientos toma importancia, ya que este permite identificar las zonas de alto riesgo y por ende hacer una buena gestión del recurso. En el municipio de Timaná (Huila, Colombia), precisamente en la vereda El Tobo, se tienen registros desde 1996 de un deslizamiento que actualmente tiene un área de afectación de aproximadamente 430.000 m², y que ha causado varios desastres durante las últimas décadas debido a sus constantes reactivaciones, allí, se han realizado diversos estudios geotécnicos y de gestión de riesgo, pero en ninguno se ha hecho un análisis geomorfológico detallado que permita entender la amenaza y la susceptibilidad a movimientos en masa debido a las características físicas del terreno, esto es significativo ya que la geomorfología es precisamente una característica que junta dos componentes naturales clave para la generación de deslizamientos (topografía y geología); En este sentido, este proyecto de grado está enfocado en identificar los factores geomorfológicos, y encontrar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa que genera este factor en la zona de estudio.

Objetivos

Objetivo general

Analizar los principales factores geomorfológicos asociados con la susceptibilidad y amenaza por el movimiento en masa ocurrido en la vereda El Tobo del Municipio de Timaná, Huila.

Objetivos específicos

- Realizar la interpretación de las fotografías aéreas de la zona de interés, registradas en las últimas décadas por el IGAC.
- Realizar un análisis geomorfológico de la zona de estudio.
- Estimar los principales factores de la susceptibilidad y la amenaza asociada con la geomorfología del terreno.

Tabla de contenido

Capítulo 1 Generalidades	1
Localización	1
Planteamiento del problema	2
Justificación	4
Antecedentes	4
Capítulo 2 Marco de referencia	7
Marco teórico	7
Deslizamientos	7
Caída.	7
Volcamiento.....	7
Desplazamiento	8
Flujo	9
Propagación lateral.....	10
Tipos de movimientos presentes en el deslizamiento de la vereda El Tobo - Timaná.....	10
Análisis de fotografías aéreas.	10
Expresión topográfica.	11
Sistema de drenaje y erosión.....	11
Tonalidad del suelo	12
Geomorfología.	12
Amenaza.	13
Sistemas de información geográfica (SIG) y Análisis temporal.....	13
Marco geológico	14
Marco geomorfológico	15
Marco metodológico	17
Adquisición de la información.....	17
Análisis geomorfológico.	19
Análisis de amenaza.	21
Capítulo 3 Desarrollo.....	22
Procesamiento de la información	22
Tratamiento de datos.....	22
Fotointerpretación.....	25
Digitalización de la topografía y de la cuenca hidrográfica.	28
Vegetación	30
Mapa geológico.	32
Mapa de pendientes con Modelo Digital de Elevación –DEM.	34
Mapa geomorfológico.	35
Análisis geomorfológico	37
Morfogénesis.....	37
Morfodinámica.....	42
Morfología.	45
Ambiente Estructural.....	45
Ambiente Fluvial.....	47
Ambiente Cárstico.....	49
Ambiente Denudacional.	51

Morfometría	53
Morfometría de la cuenca.	53
Distribución de la variable pendiente en la zona de estudio.	56
Distribución de las geoformas en la zona de estudio.	57
Análisis de susceptibilidad y amenaza	58
Mapas de susceptibilidad.	59
Susceptibilidad por pendiente.	59
Susceptibilidad por Litología.	61
Susceptibilidad por geomorfología.	64
Factores externos.	66
Precipitación.	66
Amenaza relativa.	68
Capítulo 4 Conclusiones y recomendaciones	72
Conclusiones	72
Recomendaciones	74
Referencias	75
Bibliografía	77

Lista de figuras

Figura 1. Zona de estudio, adaptada y modificada de “Carta topográfica 389IC de 2013, Timaná, departamento del Huila”, por autor, 2019.	2
Figura 2. Árbol de problemas, por autor, 2019.	3
Figura 3. Deslizamientos rotacionales y traslacionales, por Cruden y Varnes, 1996.	9
Figura 4. Geología de la zona de estudio por INGEOMINAS, adaptada de “Mapa geológico 389 Magna”, por autor, 2019.	15
Figura 5. Ubicación de estaciones hidrológicas y climatológicas, por autor, 2019.	19
Figura 6. Esquema de jerarquización geomorfológica, modificada de “Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia”, por autor, 2018.	20
Figura 7. Curva de doble masa para la estación hidrológica VISO EL, por autor, 2018.	23
Figura 8. Curva de doble masa para la estación hidrológica PTE SALADOBLANCO R, por autor, 2018.	23
Figura 9. Curva de doble masa para la estación hidrológica ACEVEDO, por autor, 2018.	24
Figura 10. Curva de doble masa para la estación hidrológica INSFOPAL, por autor, 2018.	24
Figura 11. Interpretación de la fotografía 9274 del año 2010, por autor, 2018.	26
Figura 12. Ejemplo de proceso de georreferenciación para la fotografía aérea 39770 de 1966, por autor, 2018.	27
Figura 13. Fotointerpretación digitalizada, por autor, 2018.	28
Figura 14. Topografía y subcuenca de la zona de estudio en el año 1982, adaptada y modificada de “Carta topografica 389IC de 1982, Timaná, departamento del Huila”, por autor, 2018.	29
Figura 15. Topografía y subcuenca de la zona de estudio en el año 2013, adaptada y modificada de “Carta topografica 389IC de 2013, Timaná, departamento del Huila”, por autor, 2018.	30
Figura 16. Vegetación saludable de la zona de estudio, adaptada y modificada de “LANSAT8 9058 de 2018”, por autor, 2018.	31
Figura 17. Imagen para análisis de vegetación en la zona de estudio, adaptada y modificada de “LANSAT8 9058 de 2018”, por autor, 2018.	32
Figura 18. Mapa geológico, por Mejía M, 2019.	33
Figura 19. Mapa de pendientes con base en DEM ASTGT del año 2011, por autor, 2019.	35
Figura 20. Mapa geomorfológico, por autor, 2019.	37
Figura 21. Mapa de ambientes geomorfológicos, por autor, 2019.	38
Figura 22. Plano estructural, adaptada de “Fotografías Proyecto FODEIN- Timaná”, por autor, 2019.	39
Figura 23. Vista en ArcScene del valle coluvio aluvial 2010, por autor, 2019.	40
Figura 24. Terrazas fluviales, adaptada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.	40
Figura 25. Dolina, adaptada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019. ...	41
Figura 26. Ambiente denudacional, adaptada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.	42
Figura 27. Fallas y pliegues en la zona de estudio de INGEOMINAS, adaptada de “Mapa geológico 389”, por autor, 2019.	43
Figura 28. Ladera estructural, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.	45
Figura 29. Escarpe estructural de contrapendiente, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.	46

Figura 30. Escarpes poco activos, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.	47
Figura 31. Valle coluvio-aluvial, adaptada de “Fotografía aérea 9274”, por autor, 2019.	48
Figura 32. Planicie Aluvial, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.	49
Figura 33. Dolina de origen Cárstico, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.	50
Figura 34. Valle Cárstico, adaptada de “Fotografía aérea 9274”, por autor, 2019.	51
Figura 35. a) Ladera denudacional estable y ladera denudacional activa, b) Ladera denudacional muy activa, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.	52
Figura 36. a) Perfil del cauce principal extraído del mapa topográfico, b) Perfil del cauce principal extraído del DEM, por autor, 2019.	54
Figura 37. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la subcuenca, por autor, 2019.	55
Figura 38. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión, por Strahler, 1964.	55
Figura 39. Distribución de la variable pendiente, por autor, 2019.	56
Figura 40. Distribución de las geoformas en la zona de estudio, por autor, 2019.	58
Figura 41. Distribución de susceptibilidad por pendiente en la cuenca, por autor, 2019.	60
Figura 42. Mapa de susceptibilidad por pendiente, por autor, 2019.	61
Figura 43. Distribución de susceptibilidad por litología en la cuenca, por autor, 2019.	62
Figura 44. Mapa de susceptibilidad por litología, por autor, 2019.	63
Figura 45. Distribución de susceptibilidad por geomorfología en la cuenca, por autor, 2019.	65
Figura 46. Mapa de susceptibilidad por geomorfología, por autor, 2019.	66
Figura 47. Precipitación media anual en la cuenca, por autor, 2019.	67
Figura 48. Mapa de pendientes sumado con mapa de precipitación, por autor, 2019.	68
Figura 49. Distribución porcentual de la amenaza en la cuenca, por autor, 2019.	70
Figura 50. Amenaza relativa en la cuenca, por autor, 2019.	71

Lista de tablas

Tabla 1 Descripción de las fotografías, cartografías y modelos digitales de elevación	17
Tabla 2 Descripción de las estaciones.....	18
Tabla 3 Descripción de la Litología de la zona de estudio.....	33
Tabla 4 Pliegues y fallas en la zona de estudio.	43
Tabla 5 Formas de la cuenca de acuerdo el índice de compacidad.....	53
Tabla 6 Distribución y clasificación de las pendientes en la zona de estudio	56
Tabla 7 Distribución de las geoformas en la zona de estudio.	57
Tabla 8 Distribución de la susceptibilidad en la cuenca, y Clasificación de nivel de amenaza por el criterio pendiente.	59
Tabla 9 Distribución de la susceptibilidad en la cuenca, y Clasificación de nivel de amenaza por el criterio litología	61
Tabla 10 Distribución de la susceptibilidad en la cuenca, y Clasificación de nivel de amenaza por el criterio geomorfología.....	64
Tabla 11 Precipitación media anual de las estaciones	67
Tabla 12 Rangos de reclasificación	69
Tabla 13 Distribución porcentual de la amenaza	70

Lista de abreviaturas y simbología

IGAC: Instituto Geológico Agustín Codazzi

IDEAM: Instituto de Medio ambiente

SGC: Servicio Geológico Colombiano

SIG: Sistemas de información geografica

CAM: Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena

Anexos

- Anexo 1. Carta topográfica - 389IC (2013)
- Anexo 2. Geología de la plancha 389 Timaná
- Anexo 3. Mapa geomorfológico CAM
- Anexo 4. Análisis de precipitación de subcuenca del Rio Timaná
- Anexo 5. Mapa geomorfológico
- Anexo 6. Memoria geológica de la plancha 389 Timaná
- Anexo 7. Memoria explicativa del mapa geológico del departamento del Huila
- Anexo 8. Carta topográfica - 389IC (1982)
- Anexo 9. Mapa Geológico CAM
- Anexo 10. Cálculos análisis morfométrico de subcuenca del Rio Timaná
- Anexo 11. Cálculos distribución de pendientes en la zona de estudio
- Anexo 12. Cálculos distribución de geoformas en la zona de estudio
- Anexo 13. Cálculos de la susceptibilidad
- Anexo 14. Fotografías aéreas
- Anexo 15. Procesamientos y mapas en ArcMap
- Anexo 16. Fotografías proyecto FODEIN
- Anexo 17. Generalidades sobre Timaná y el deslizamiento de la vereda El Tobo
- Anexo 18. Cálculos de la distribución de amenaza en la zona de estudio

Capítulo 1

Generalidades

Localización

La zona de estudio se ubica en el municipio de Timaná, en el departamento de Huila, Colombia, subregión que corresponde a las estribaciones de la Cordillera Central y Oriental. Timaná se localiza hacia el sur del departamento, en el valle montañoso del Magdalena, a una distancia aproximada de 166 Km de Neiva, capital del departamento de Huila.

Actualmente Timaná tiene una comunidad de 20.690 personas según las proyecciones municipales del DANE, representando cerca del 2% de la población total estimada para el departamento de Huila. El municipio está conformado por sector urbano y por sector rural, este último integra dos centros poblados, Cosanza, Naranjal, y treinta y siete veredas; la vereda El Tobo es una de estas, cuenta con un área de 4,9 Km², cerca del 3% del área total del municipio, allí se localiza uno de los más grandes deslizamientos del departamento, este movimiento en masa tiene un área de afectación de 430.000 m² y una longitud de aproximadamente 3 Km; debido a este deslizamiento, y al trabajo de investigación que lidera el ingeniero civil, Viveros, L, “Factores geológicos e ingenieriles relacionados al origen y evolución del deslizamiento de tierra en Timaná, Huila – Colombia”, se concibe el siguiente análisis geomorfológico y de amenaza, donde la zona de estudio está acotada por las coordenadas (710.000 m N; 1.122.000 m E), (710.000 m N; 1.129.000 m E), (706.000 m N; 1.129.000 m E), (706.000 m N; 1.122.000 m E) (MAGNA Colombia Oeste) como muestra la Figura 1.

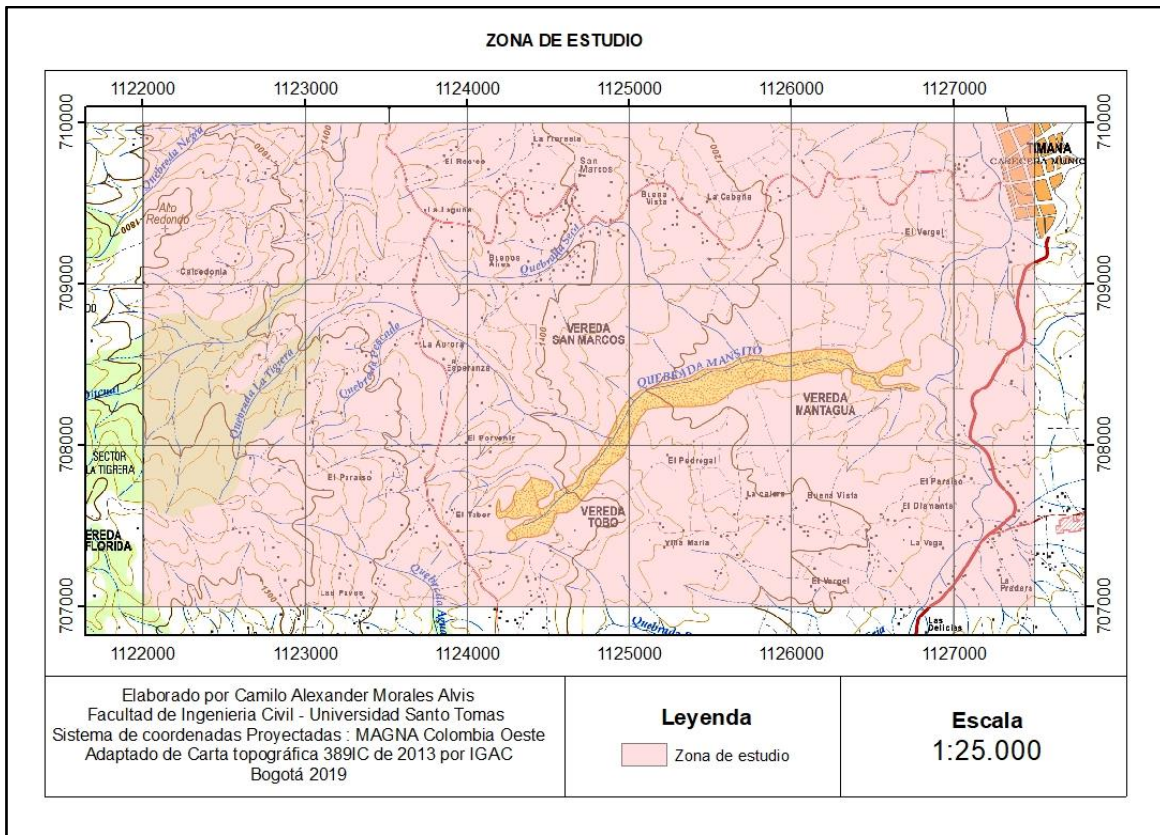


Figura 1. Zona de estudio, adaptada y modificada de "Carta topográfica 3891C de 2013, Timaná, departamento del Huila", por autor, 2019.

Observando la carta topográfica 3891C (2013) (Anexo 1) y la anterior ilustración, se puede identificar que la cota más alta dentro de la zona de estudio es la 1800, esta se encuentra en lugares como Caicedonia, El paraíso, y Quebrada la Tigrera, lugar donde nace el cauce principal de la subcuenca de la quebrada Mansito, mientras que la elevación más baja se encuentra la cabecera municipal de Timaná, a aproximadamente 1000 msnm.

Planteamiento del problema

Con el fin de esquematizar la problemática, encontrar la relación causa-efecto, y determinar un alcance del proyecto, se hará uso de la herramienta árbol de problemas, que hace analogía a un árbol donde las raíces son las causas, su tronco es el problema central, y las distintas ramificaciones son los efectos.

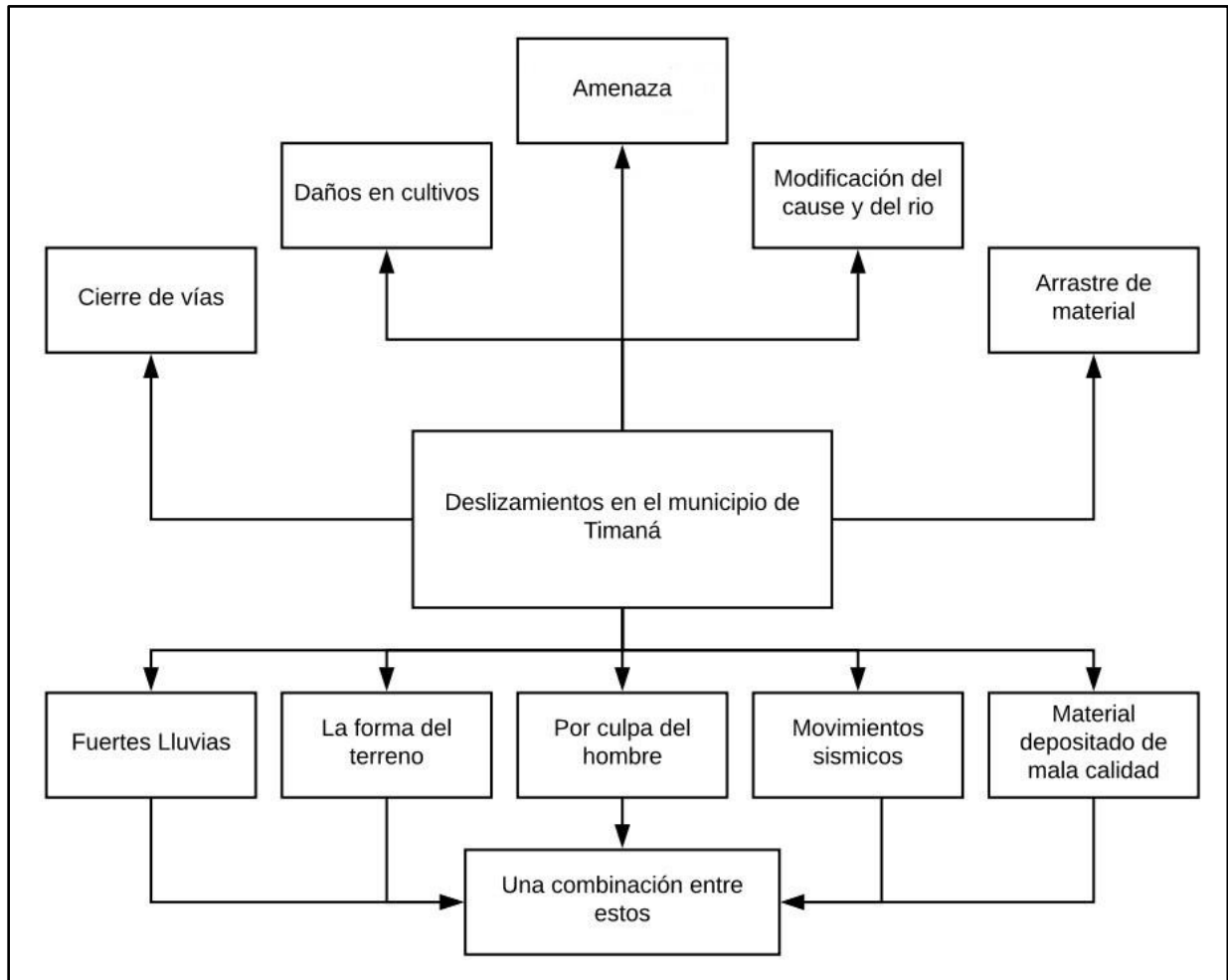


Figura 2. Árbol de problemas, por autor, 2019.

En la mayoría de los casos un deslizamiento ocurre cuando se combinan factores condicionantes como la geomorfología y la geología del lugar, con factores detonantes como las lluvias y sismos, sin embargo, también existen registros de movimientos en masa provocados por el hombre, estos se dan cuando se hace una inapropiada gestión territorial. Los deslizamientos pueden generar el cierre temporal o definitivo de vías, daños irremediables de propiedades, y en los peores casos ocasionar muertes.

Para lograr generar la menor afectación de este deslizamiento sobre la población de Timaná, se tiene que estudiar la geomorfología, la geología, la hidrología y la geofísica con detalle, la

mayoría de estos estudios requieren de grupos de trabajo con bastante experiencia en los diversos temas, y, además, invertir muchos recursos; teniendo en cuenta que el siguiente trabajo es del nivel de un pregrado, se analizará uno solo de estos aspectos, en este caso, la geomorfología, con el fin de crear mapas de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, y de esta forma dar un panorama para que se tomen medidas con el fin de evitar desastres.

En este orden de ideas y determinando un alcance propio de este trabajo de grado, el problema central sería: ¿Cómo es la geomorfología en la zona asociada al deslizamiento de la vereda El Tobo, y cómo las susceptibilidades de estos parámetros al deslizarse pueden darnos indicios de amenaza?

Justificación

Este proyecto de grado apunta a resolver uno de los aspectos claves que permitirá comprender de manera retrospectiva formación, y, evolución del deslizamiento como complemento útil del proyecto: “Factores geológicos e ingenieriles relacionados al origen y evolución del deslizamiento de tierra en Timaná, Huila-Colombia“, además, servirá para zonificar, desde la geomorfología, la amenaza por movimientos en masa, esto con el objetivo proponer ideas para disminuir la afectación generada por los deslizamientos en la zona de estudio, y para que se tomen medidas convenientes en el esquema de ordenamiento territorial, finalmente, la razón de mayor peso es la seguridad de la población, pues esta se verá afectada si no se toman las medidas necesarias para dar una pronta solución a todos los problemas vinculados con este movimiento de tierra.

Antecedentes

En Colombia han acontecido desastres naturales que han marcado de forma negativa al país, entre los de mayor importancia según Galindo (2017), está, la tragedia de armero en el 85, que

tras la explosión del volcán Nevado del Ruiz, dejó un saldo aproximado de 23.000 muertes y una gran cantidad de damnificados, el deslizamiento de Villatina en 1987, generado por la ladera nororiental del Cerro Pan de Azúcar, en Medellín, este ocasionó la muerte de aproximadamente 640 personas.

En el departamento de Huila, debido a los diferentes deslizamientos e inundaciones que se han presentado desde hace décadas en el municipio de Timaná, la gobernación ha solicitado diversos estudios a INGEOMINAS (actualmente SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), con el propósito de ir encontrando diferentes aspectos técnicos que permitan entender el origen y evolución de los movimientos de tierra, y además, las amenazas y riesgos que generan en la zona, para así darle una solución a esta problemática que somete a los habitantes de Timaná.

Uno de los deslizamientos más estudiados debido a las calamidades públicas que ha provocado es el que se presenta en la vereda el Tobo, según El Tiempo (1996), se informa que: “Alrededor de 850 personas damnificadas, unas 200 familias, y 250 millones de pesos en pérdidas deja como saldo una avalancha en el municipio de Timaná, Huila, tal deslizamiento fue provocado por las crecientes del río Timaná y la quebrada El Tobo”, en el informe de la CAM producto de la visita de los geólogos Freddy Angarita e Isauro Trujillo aclaran que el fenómeno se produjo por factores externos como internos, dentro de los externos figura la acción antrópica como factor acelerante, y las fuertes lluvias, por otra parte en los factores internos figuran las características geológicas y geográficas de la zona.

En un estudio de mayor detalle realizado por la CAM, publicado el 24 de febrero de 2017, se analiza la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de origen geomorfológico e hidrológico, en este, solo se estudia la geomorfológica desde el aspecto morfométrico, hasta

ahora, no se ha estudiado la geomorfología de la zona desde las ramas de la morfogénesis y la morfología, si se combinarán con el aspecto morfométrico, se lograrían obtener resultados con mayor detalle.

Capítulo 2

Marco de referencia

Es importante tener conocimiento claro de los conceptos básicos, las teorías, y de algunas características de la zona asociadas a este proyecto de grado, por esta razón, a continuación, se presentan los marcos que se consideran indispensables para la comprensión del proyecto.

Marco teórico

A continuación, se presenta de manera resumida la teoría básica para el desarrollo del trabajo de grado, se hace referencia a temas como los deslizamientos, la geomorfología, la fotointerpretación, los SIG, y amenaza como concepto de gestión del riesgo.

Deslizamientos

Existen numerosas clasificaciones de movimientos en masa, estas pueden variar según el perfil profesional de los autores, escuelas y otros factores, a continuación, se describen los movimientos definidos en el sistema de clasificación desarrollado por Cruden y Varnes en 1996, debido a que son con los que se trabaja la caracterización y clasificación de deslizamientos a nivel global.

Caída.

Separación de una masa de roca o suelo desde un talud empinado, a lo largo de una superficie sobre la cual se puede presentar o no desplazamiento por cortante. Una vez ocurrido el desprendimiento, el material desciende a través del aire, principalmente en caída libre, rebotando o rodando (Cruden & Varnes 1996, 53).

Volcamiento.

Comprende la rotación hacia delante de una masa de roca o suelo en una ladera, alrededor de un eje, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza (Varnes 1978; Cruden &

Varnes 1996). Consideran tres tipos, volcamiento de bloques de roca, delimitados por discontinuidades preexistentes, volcamiento de bloques aislados liberados por tensión y el volcamiento de detritos.

Desplazamiento

Montero (2017) dice que Cruden & Varnes (op. cit., 56) definen este tipo de desplazamiento como un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas relativamente delgadas sometidas a intensos esfuerzos de corte. Según estos autores, la superficie de ruptura no se desarrolla de manera simultánea a lo largo de la masa que va a ser desplazada, sino que se inicia por agrietamientos en el terreno en la parte superior de la ladera, donde más tarde se conforma la corona del deslizamiento. En la parte inferior de la masa desplazada se conforma la pata del deslizamiento, la cual puede ser rebasada por la masa movilizada. Estos autores proponen tres tipos básicos de deslizamientos: rotacional, traslacional y compuesto, dependiendo de la manera como falla el terreno.

En este tipo pueden existir deslizamientos tipo hundimiento, rotacional retrogresivo, traslacional planar, y compuesto.

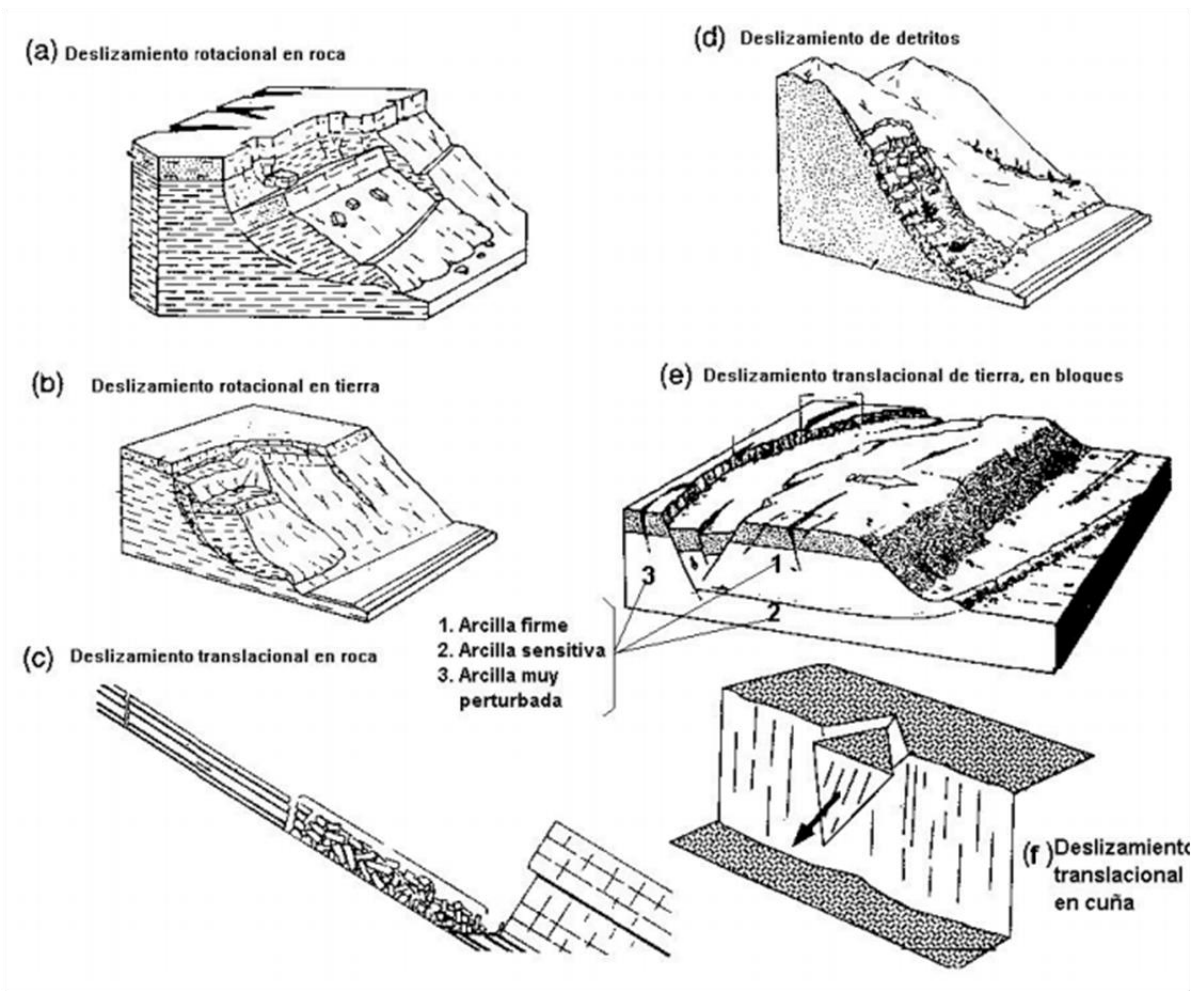


Figura 3. Deslizamientos rotacionales y traslacionales, por Cruden y Varnes, 1996.

Flujo

Según Montero (2017) para Cruden & Varnes (1996.), el término flujo se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de corte efímeras y estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada se asemeja a la de un líquido viscoso. Su límite inferior puede ser una superficie a lo largo de la cual se ha presentado un movimiento diferencial apreciable o una zona espesa de cizallamiento distribuido.

Propagación lateral

Para Cruden & Varnes (1996), citado por Montero (2017), este proceso se define como la extensión o dilatación lateral de un suelo cohesivo o masa de roca blanda, combinada con subsidencia general del material fracturado suprayacente en ese material blando, sin que se forme una superficie de falla bien definida. La extensión se manifiesta como la extrusión de material propenso a licuación o flujo plástico. Se pueden presentar dos casos generales propagación lateral en bloque y propagación lateral por licuación.

Tipos de movimientos presentes en el deslizamiento de la vereda El Tobo - Timaná

Según Viveros et al. (2018), el movimiento que se presenta en la vereda El Tobo, es de tipo variable. Incluye hundimientos, deslizamientos de tipo rotacional, retrogresivo y traslacionales de diferente índole. Los movimientos rotacionales se ubican en la corona y cuello del deslizamiento, ligada a materiales como arcillolitas y lodolitas, estos movimientos rotacionales hacen que se desarrollen movimientos retrogresivos, lo cual significa que la superficie de falla se extiende en sentido opuesto al movimiento, los movimientos de tipo traslacional se presentan en la zona central del deslizamiento en forma de resbalamiento, donde los materiales tipo suelo y roca se mueven como una sola masa compactada.

Análisis de fotografías aéreas.

La interpretación de fotografías aéreas está probada que es uno de los sistemas más efectivos para el reconocimiento y demarcación de deslizamientos. Ninguna otra técnica ofrece una vista tridimensional del terreno. Se estiman precisiones de más del 95% en la identificación de deslizamientos en los mapas a escala 1: 5.000 o mejor. La escala es muy importante y la mayoría de las fotografías antiguas se encuentran en escalas que no permiten la identificación precisa de deslizamientos; Sin embargo, el análisis de fotografías tomadas 5, 10 o 50 años antes, puede

ofrecer información muy importante para el diagnóstico de los problemas actuales al compararlas con fotografías más recientes.

Para el análisis de las fotografías aéreas se pueden seguir los siguientes lineamientos:

Expresión topográfica.

Se debe estudiar la topografía en sí, las formas del terreno y los cambios de relieve. De este análisis se pueden separar los varios tipos de forma del terreno y se obtienen algunas claves tales como la naturaleza y estabilidad de los materiales que conforman una determinada topografía. La claridad de la información depende de la hora de toma de las fotografías y en ocasiones se obtienen fotografías que hacen muy visibles los escarpes y discontinuidades topográficas.

Sistema de drenaje y erosión.

La densidad y el sistema de los canales de drenaje natural reflejan la naturaleza del suelo y la roca que conforman la superficie del terreno. Por ejemplo, si los sistemas de drenaje presentan canales muy cercanos el uno al otro, indican que el suelo es relativamente impermeable y si están muy separados, que el suelo es permeable. En general, un drenaje en forma de árbol indica un material uniforme y zonas planas y un sistema de drenaje paralelo indica la presencia de discontinuidades y pendientes fuertes.

Los sistemas rectangulares son evidencia del control por parte de la roca subyacente y un sistema desordenado indica la presencia de coluviones y residuos superficiales.

Un sistema de hoja de árbol es común en zonas de erosión muy severa por la presencia de limos y suelos erosionables.

Las formas de la sección de los canales de drenaje o erosión también son muy útiles para detectar el tipo de material; un canal redondeado indica la presencia de arcillas, un canal en U indica limos y uno en V muestra la existencia de arenas y gravas.

Tonalidad del suelo

Los tonos grises son indicativos de la humedad del suelo, así un tono oscuro indica gran humedad y otro claro indica poco contenido de agua.

En las fotografías aéreas se pueden identificar zonas de concentración de infiltración o afloramiento de agua por su coloración más oscura, debida a la vegetación verde y espesa y a la capacidad reflectiva del suelo húmedo.

Geomorfología.

La geomorfología es el estudio de las formas de la superficie terrestre, busca entender el origen y evolución de las formas del terreno, según Carvajal (2012), uno de los pioneros en el estudio de la geomorfología en Colombia, define la geomorfología como la ciencia que trata la descripción y el estudio de la génesis, clasificación, procesos y evolución de las formas antiguas y actuales del terreno y su relación con las estructuras infrayacentes. Los procesos geomorfológicos corresponden a todos los cambios que ha tenido la superficie terrestre desde sus comienzos, tanto aquellos que son originados en su interior, como los que suceden en la superficie.

Con respecto al análisis geomorfológico, puede dividirse en cuatro ramas, como primer división se tiene la morfogénesis que se encarga de estudiar los procesos y condiciones que produjeron la forma original del relieve, la segunda rama se enfoca en analizar cuantitativamente las características del terreno y se le conoce con el nombre de morfometría, la tercer parte es la morfodinámica que se refiere a la descripción y estudio de los procesos internos y externos que moldean la superficie, y por ultimo esta la morfología que se encarga de describir las geoformas.

Amenaza.

En el campo de la ingeniería se define amenaza como la probabilidad de que ocurra un riesgo frente al cual una comunidad es vulnerable. Cardona (1992) dice: Fenómenos naturales de origen geológico, hidrológico y atmosférico, tales como terremotos, erupciones volcánicas, movimientos en masa, maremotos, inundaciones, huracanes o posibles eventos desastrosos provocados por el hombre, representan un peligro latente que bien puede considerarse como una amenaza para el desarrollo social y económico de una región o un país.

Las amenazas naturales son causadas por procesos ajenos a los seres humanos, pero en la gran mayoría de los casos, la vulnerabilidad surge como consecuencia de acciones llevadas a cabo por las personas. Según el Ministerio de Ambiente, Minambiente, en una noticia publicada en su portal web, S.F; Colombia desarrolló un sistema nacional de gestión del riesgo de desastres, que tiene como propósito contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible, a través del conocimiento del riesgo, su reducción y el manejo de los desastres asociados con fenómenos de origen natural, sicionatural, tecnológico y humano no intencional.

Sistemas de información geográfica (SIG) y Análisis temporal.

Según la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital-UAECD, el concepto de SIG se puede entender como un conjunto de herramientas que permiten realizar operaciones de forma eficiente, relacionando diferentes componentes (usuarios, hardware, software, procesos), logrando la organización, integración, almacenamiento, manipulación y análisis de grandes cantidades de datos espaciales y facilitando a los usuarios la creación de consultas interactivas, examinando la información espacial, modificando datos, mapas y presentando resultados de todas estas operaciones. El análisis temporal surge de la unión de diferentes procesamientos

digitales aplicados a la información geográfica como: mapas topográficos, geológicos, modelos digitales de elevación, fotografías aéreas y demás insumos, estos procesamientos pueden ir separados en capas temáticas, facilitando la posibilidad de relacionar dicha información, convirtiéndose en apoyo para los diferentes actores en la toma de decisiones espaciales acertadas, y permitiéndoles una eficiente solución de problemas complejos tanto de planificación como de gestión con respecto a la información geográfica.

Marco geológico

Con respecto a la geología de la zona, se tiene un mapa geológico escala 1:100.000 elaborado por INGEOMINAS y la firma Geoestudios Ltda (Ver figura 4 y Anexo 2), en esta cartografía se pueden identificar siete unidades geológicas asociada a las eras Cenozoica, Mesozoica y Paleozoico, ordenadas de una manera ascendente, de la más antigua a la más joven, se tiene: la Formación Saldaña (TJsal), Formación Caballos (K1K2cb), Formaciones Hondita y Loma Gorda (K2hdlg), Formaciones Oliní y La Tabla (K2olta), Formación Seca (K2E1sc), y los depósitos coluviales (Qc) y Aluviales recientes (Qal).

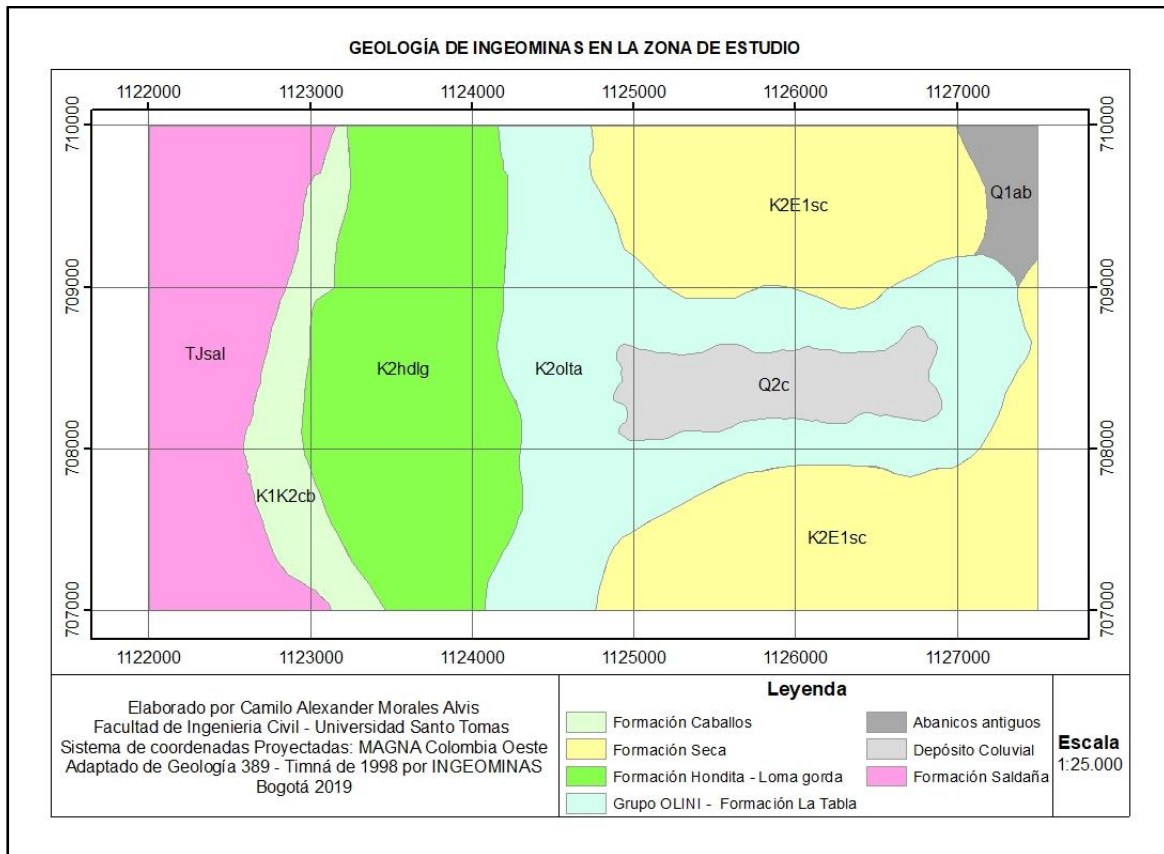


Figura 4. Geología de la zona de estudio por INGEOMINAS, adaptada de “Mapa geológico 389 Magna”, por autor, 2019.

Marco geomorfológico

Colombia se encuentra ubicado en el noroccidente de Suramérica junto al océano pacífico y mar caribe, según Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2011) en la zona en la que se encuentra Colombia, acontece un movimiento de subducción, en el que se sumerge la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, y este es el causante del levantamiento de la cordillera de los andes, conformada por tres cadenas montañosas (Occidental, Central y Oriental), y está a su vez es generadora de biodiversidad, de topografía compleja, numerosos microclimas y hábitats variados. Los procesos internos como el choque entre placas y agentes externos como la lluvia y el viento han moldeado la superficie del terreno colombiano durante años, y han dado como

resultado el relieve que hoy se puede apreciar, a su vez, estos procesos y agentes también son generadores de fenómenos naturales como los deslizamientos.

Huila al suroeste del país, se caracteriza por formar parte de la cuenca hidrográfica del río Magdalena y por contener en su geografía dos cadenas montañosas pertenecientes a la cordillera de los Andes, la central y la oriental, según Vargas (S.F), estas zonas montañosas son áreas susceptibles a sufrir fenómenos de remoción en masa porque reúne varios de los elementos más importantes para su ocurrencia como son: topografía, tipo de roca y alto grado de descomposición de ellas, lluvias intensas, eventos sísmicos y deforestación para ampliar la frontera agropecuaria y cultivos ilícitos.

Timaná se encuentra ubicado en un gran sinclinal, la geomorfología del deslizamiento en la vereda el Tobo y sus alrededores, según la CAM (2017), está constituida por una depresión topográfica generada por hundimientos del terreno con componente traslacional y progradación a flujos de tierra. Internamente se presentan lomos alargados de muy poca altura que salen desde la parte alta del derrumbe hasta la zona de acumulación; en esta última zona se observan ondulaciones por escorrentía superficial concentrada, sumideros locales. Y, en el depósito del derrumbe, superficies abombadas por la presión generada por el empuje desde arriba que genera el material en movimiento; en este mismo estudio, la CAM presenta un mapa geomorfológico (Anexo 3) en el cual identificaron tres ambientes principales, el ambiente estructural, el denudacional, y el fluvial, y lograron ver diferentes geoformas asociadas a estos ambientes como: sierras, escarpes de falla, laderas de cuesta, conos coluviales, terrazas de acumulación, planicies de inundación, etcétera.

Marco metodológico

El proceso metodológico será de enfoque práctico y analítico. En primera instancia se reunirá toda la información geográfica posible y útil sobre la zona de estudio, como fotografías aéreas, modelos digitales de elevación, imágenes satelitales, y demás datos de las últimas décadas. Como primer paso se hará una fotointerpretación que tiene como fin reconocer algunas características geomorfológicas como drenajes, geoformas, cambios litológicos y reconocimiento de la zona, posteriormente se subirá en forma de elementos tipo ráster al software ArcMap para su análisis, luego, con ayuda de sus distintas herramientas se realizarán distintos procesamientos a la información geográfica recogida, con el objetivo de realizar un análisis geomorfológico y de amenaza de la zona de estudio.

Adquisición de la información.

Para la elaboración del estudio temporal se cuentan con seis fotografías aéreas ligadas a la zona del deslizamiento suministradas por el proyecto de investigación principal, cinco modelos digitales de elevación de diferentes años descargados del satélite de la nasa UAF (Alaska Satellite Facility), dos planchas topográficas del ICAG, un mapa de suelos descargado del portal del SGC, e información hidrológica y climatológica suministrada por el IDEAM.

En las tablas 1 y 2 que se presentan continuación, se muestra la descripción detallada de todos los insumos recolectados, además en la figura 5 se aprecia la ubicación de las estaciones de las que se tiene información hidrológica.

Tabla 1
Descripción de las fotografías, cartografías y modelos digitales de elevación

Item	Tipo	Año	Vuelo	Código	Escala	Tamaño de celda
Foto 1	Aérea	1966	M 1379	39770	1:50.000	No Aplica
Foto 2	Aérea	2010	Privado	9272	Desconocida	No Aplica
Foto 3	Aérea	2010	Privado	9273	Desconocida	No Aplica

FACTORES GEOMORFOLÓGICOS, SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA, EN TIMANÁ.

18

Foto 4	Aérea	2010	Privado	9274	Desconocida	No Aplica
Foto 5	Aérea	2010	Privado	9275	Desconocida	No Aplica
Foto 6	Aérea	2010	Privado	9276	Desconocida	No Aplica
Mapa	Geológico	1998	No Aplica	398-Magna	1:100.000	No Aplica
Mapa	Topográfico	2013	No Aplica	398-I-C	1:25.000	No Aplica
Mapa	Topográfico	1982	No Aplica	398-I-C	1:25.000	No Aplica
DEM	ALOS PALSAR	2007	No Aplica	26185	No Aplica	12,5, 12,5
DEM	ALOS PALSAR	2008	No Aplica	10598	No Aplica	12,5, 12,5
DEM	ALOS PALSAR	2010	No Aplica	10081	No Aplica	12,5, 12,5
DEM	ASTGT	2011	No Aplica	N01W076	No Aplica	30,0, 30,0
IMGD	LANDSAT8	2018	No Aplica	9058	No Aplica	30,0, 30,0

Nota: Información detallada de la cartografía topográfica y de suelos, de las fotografías aéreas, y modelos digitales de elevación para la elaboración del análisis temporal. Elaborada por el autor.

Tabla 2

Descripción de las estaciones

Estación		Coordenadas Geográficas		Coordenadas planas	
Código	Nombre	Longitud	Latitud	N	E
21027010	PERICONGO	-75,852	2,053	1136358,712	718848,221
21030050	GUADALUPE	-75,775	2,026	1144876,828	715877,815
21017040	SALADO BLANCO	-76,012	1,988	1118544,625	711640,596
21020040	VISO EL	-75,907	2,017	1130204,538	714858,953
21035040	LIBANO EL	-75,800	1,917	1142144,331	703755,401
21020050	PTE SALADOBLANCO R	-76,014	1,984	1118353,291	711210,370
21010040	LAGINA LA	-76,086	1,961	1110349,497	708689,424
21047020	ESPINAL EL	-75,950	2,017	1125444,519	714803,391

Nota: Ubicación geográfica, códigos y nombres de las estaciones hidrológicas y climatológicas de la cual el IDEAM facilitó información. Elaborada por el autor.

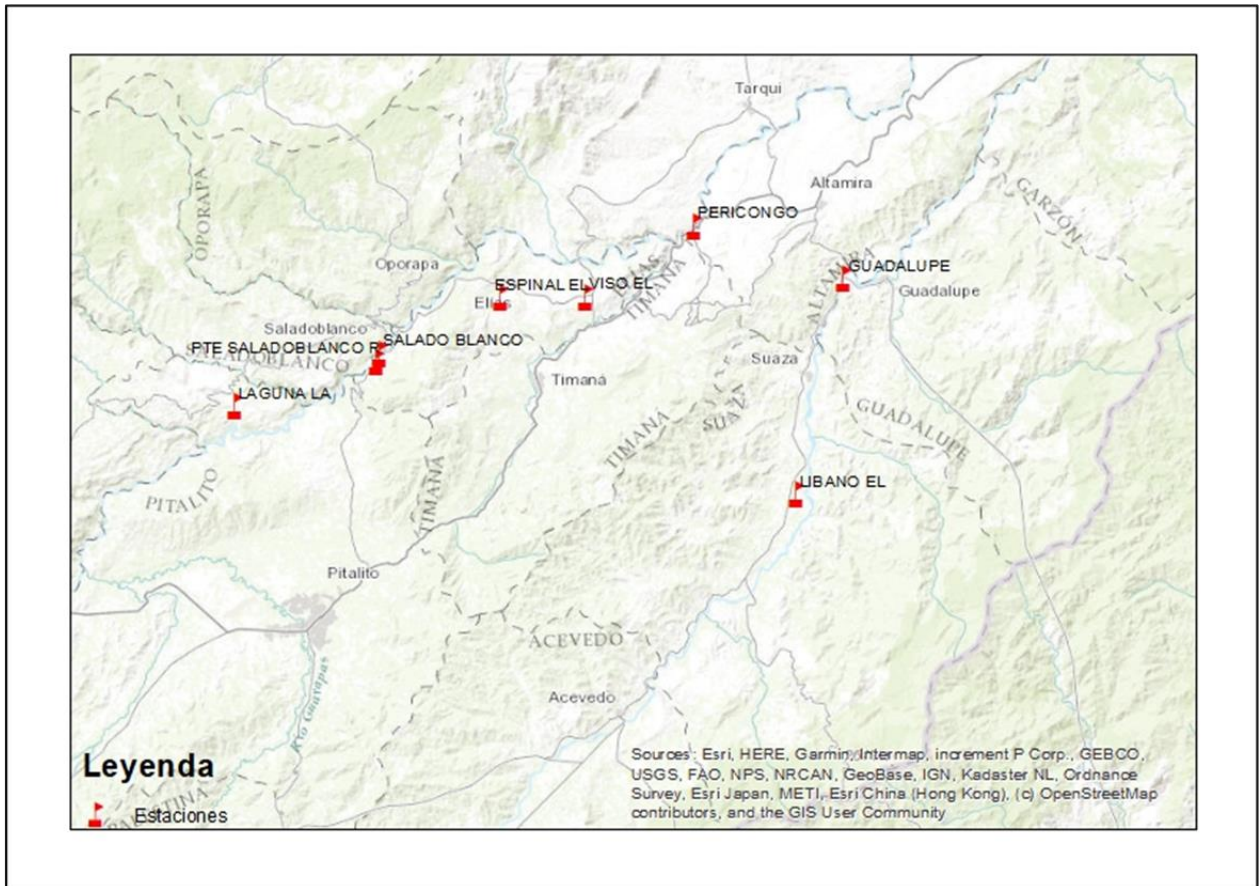


Figura 5. Ubicación de estaciones hidrológicas y climatológicas, por autor, 2019.

Análisis geomorfológico.

El análisis geomorfológico contempla cuatro subdivisiones que deben estudiarse, la morfogénesis, morfodinámica, morfología y la morfometría, por esta razón el análisis geomorfológico se presenta dividido en distintas categorías y para cada una se encontrarán algunos parámetros clave.

Con respecto a la cartografía geomorfológica se seguirá la propuesta de estandarización de cartografía geomorfológica en Colombia elaborada por Carvajal en 2013, y la guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100.000 del IDEAM, en estas guías se plantea una caracterización propuesta por INGEOMINAS, pero modificando los nombres con el

fin de unificar criterios y estandarizar la información siguiendo los lineamientos de la metodología ITC de Holanda para elaboración de mapas geomorfológicos, en estas se propone una notación cartográfica de abreviaturas hasta de seis caracteres, haciendo alusión al ambiente morfogenético, tipo de material, disposición estructural y otras características del lugar; también se propone un nivel de estudio teniendo en cuenta el esquema de jerarquización geomorfológica, este se divide en seis sistemas, donde cada uno de estos representa una escala de trabajo como se muestra en la figura 6.

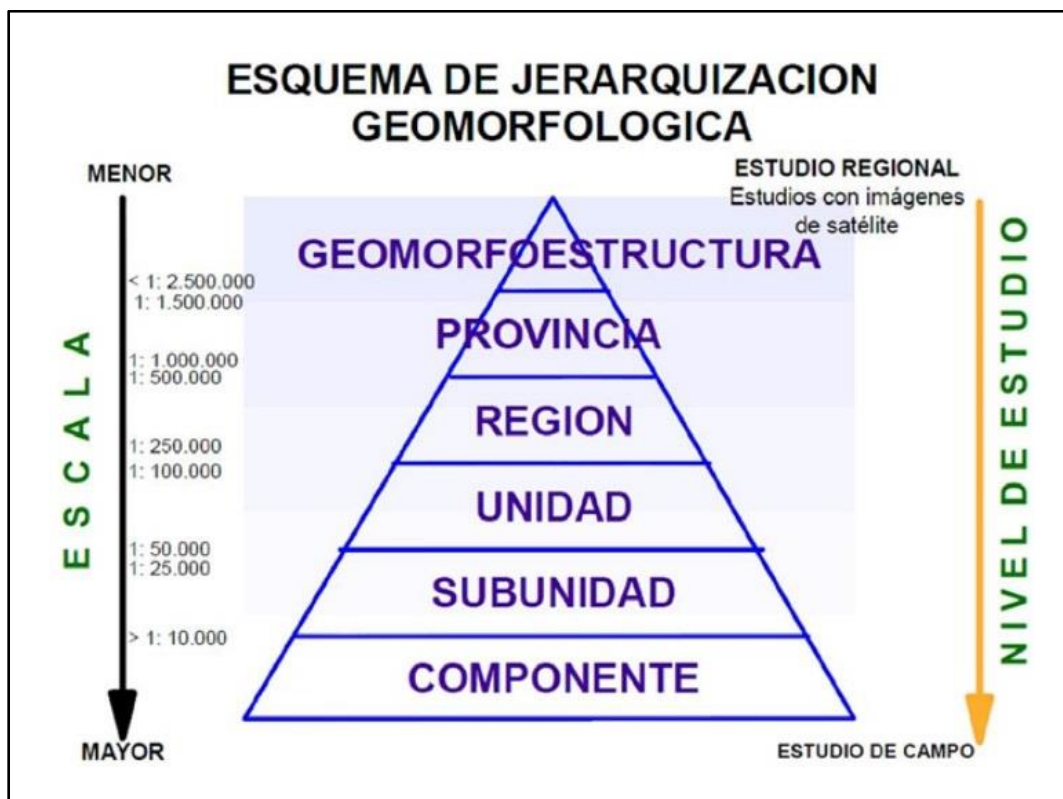


Figura 6. Esquema de jerarquización geomorfológica, modificada de “Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia”, por autor, 2018.

La información recolectada permite que el trabajo se desarrolle en un nivel de estudio de subunidad, el cual oscila entre las escalas 1:10.000 a 1:25.000.

Análisis de amenaza.

Para el análisis de amenaza y la zonificación se tomará como ayuda la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000 (2017) del Servicio Geológico Colombiano y algunos estudios geomorfológicos realizados por el mismo SGC, en esta guía se proponen dos métodos para realizar el análisis de amenaza, un método estadístico y un método cualitativo, partiendo siempre con información indispensable de la zona como geología, geomorfología, clima, sismicidad, materiales, litología, meteorización, relacionando estas características con la ocurrencia de movimientos en masa.

Otro método que se tendrá en cuenta para desarrollar el análisis de amenaza será el método Mora - Vahrson aplicado en diversos proyectos de zonificación de amenaza, consiste en encontrar un nivel de amenaza relativo, a partir de crear mapas de susceptibilidad de algunas características geográficas e hidrológicas de la zona de estudio, luego, obtener el mapa de amenaza al combinar la precipitación y la sismicidad, esto con ayuda de las distintas herramientas de procesamiento que brindan los programas SIG.

Capítulo 3

Desarrollo

Procesamiento de la información

Tratamiento de datos.

Para realizar un análisis superficial de precipitación surge la necesidad de tener datos lógicos y lo más reales posibles de las estaciones hidrológicas involucradas, para este caso, de los valores totales mensuales de precipitación entregados por el IDEAM el 99% de los datos faltantes ya ha sido completado por el instituto.

Debido a lo mencionado anteriormente, para verificar la homogeneidad de los datos de precipitación se realizan las curvas de doble masa para las estaciones que afectan el área de estudio (VISO EL, PTE SALADOBLANCO R, ACEVEDO E INSFOPAL), observando estos gráficos (figuras 7, 8, 9 y 10) se pueden identificar los datos que se deben o no ser corregidos.

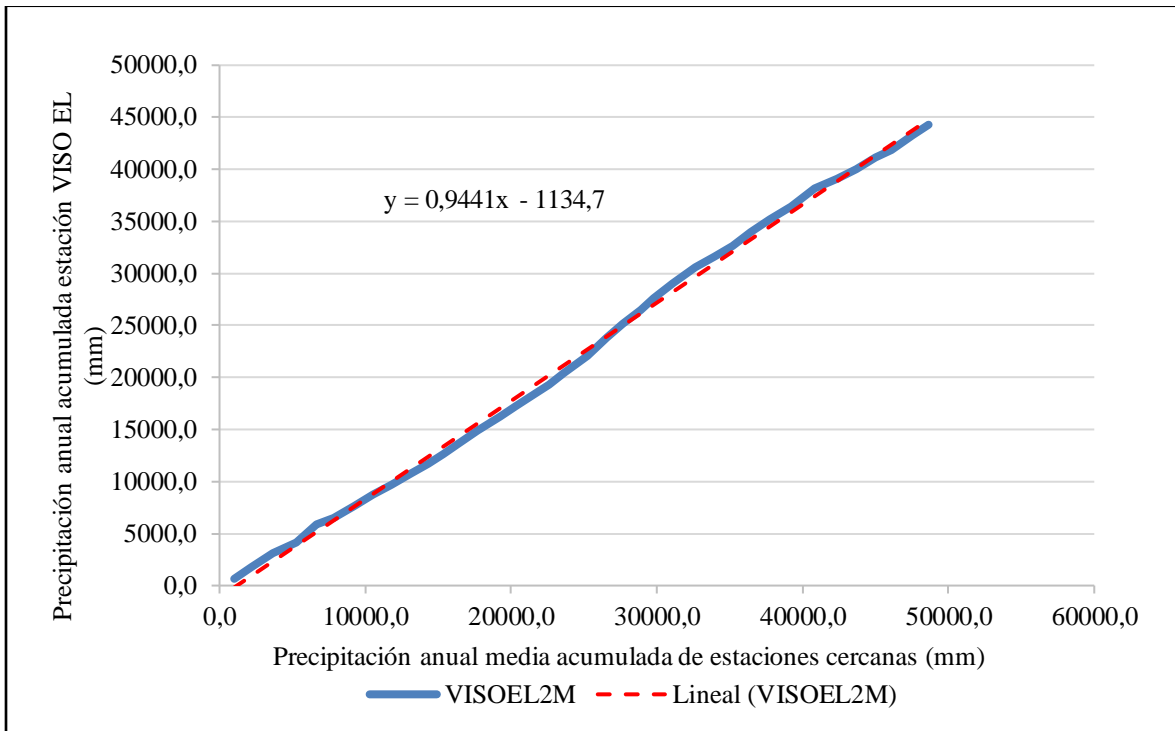


Figura 7. Curva de doble masa para la estación hidrológica VISO EL, por autor, 2018.

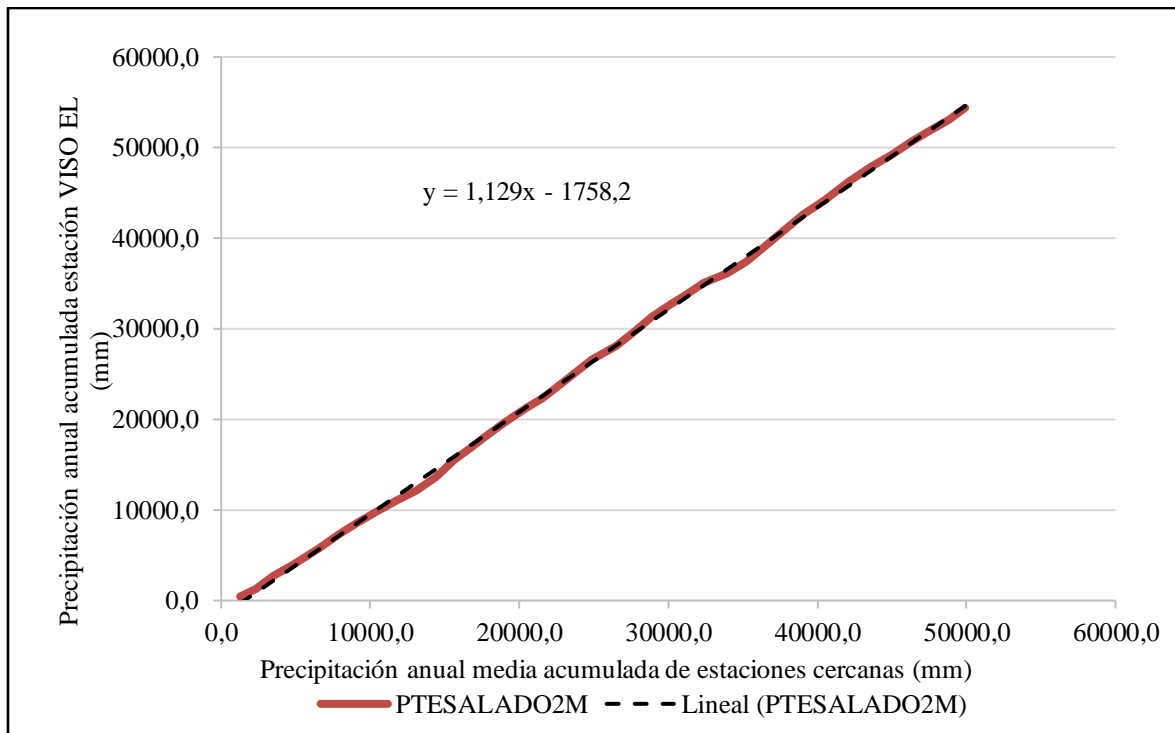


Figura 8. Curva de doble masa para la estación hidrológica PTE SALADOBLANCO R, por autor, 2018.

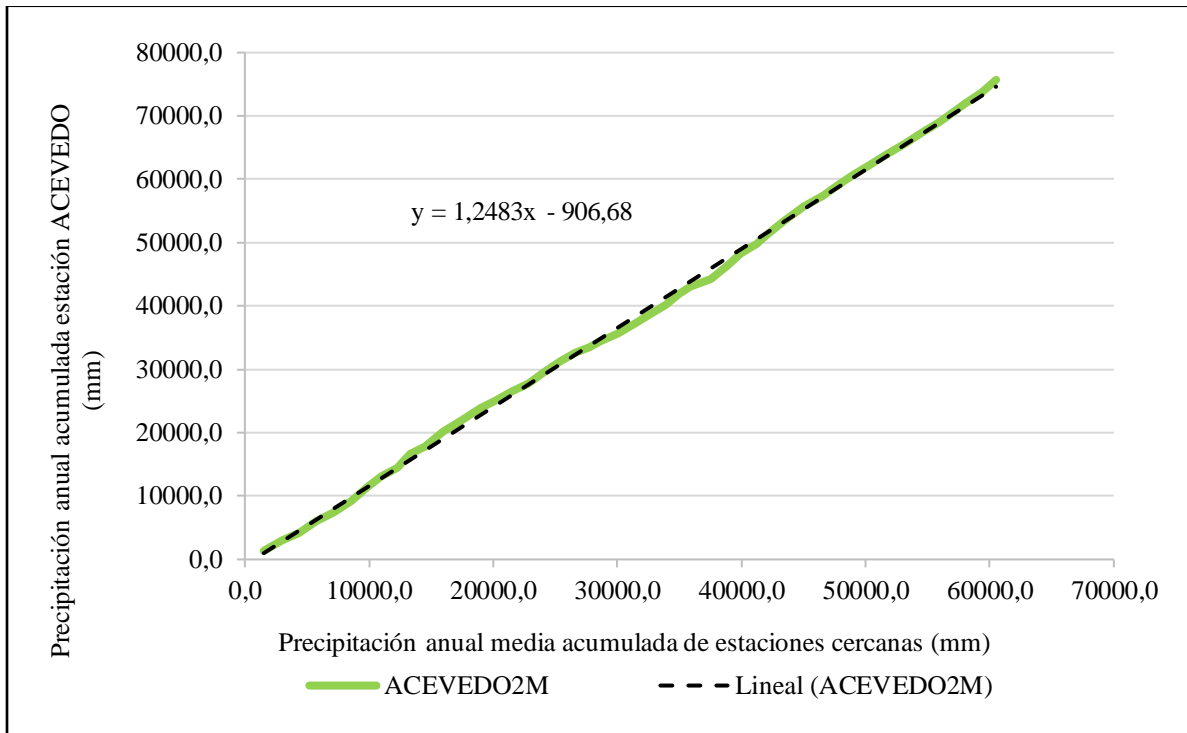


Figura 9. Curva de doble masa para la estación hidrológica ACEVEDO, por autor, 2018.

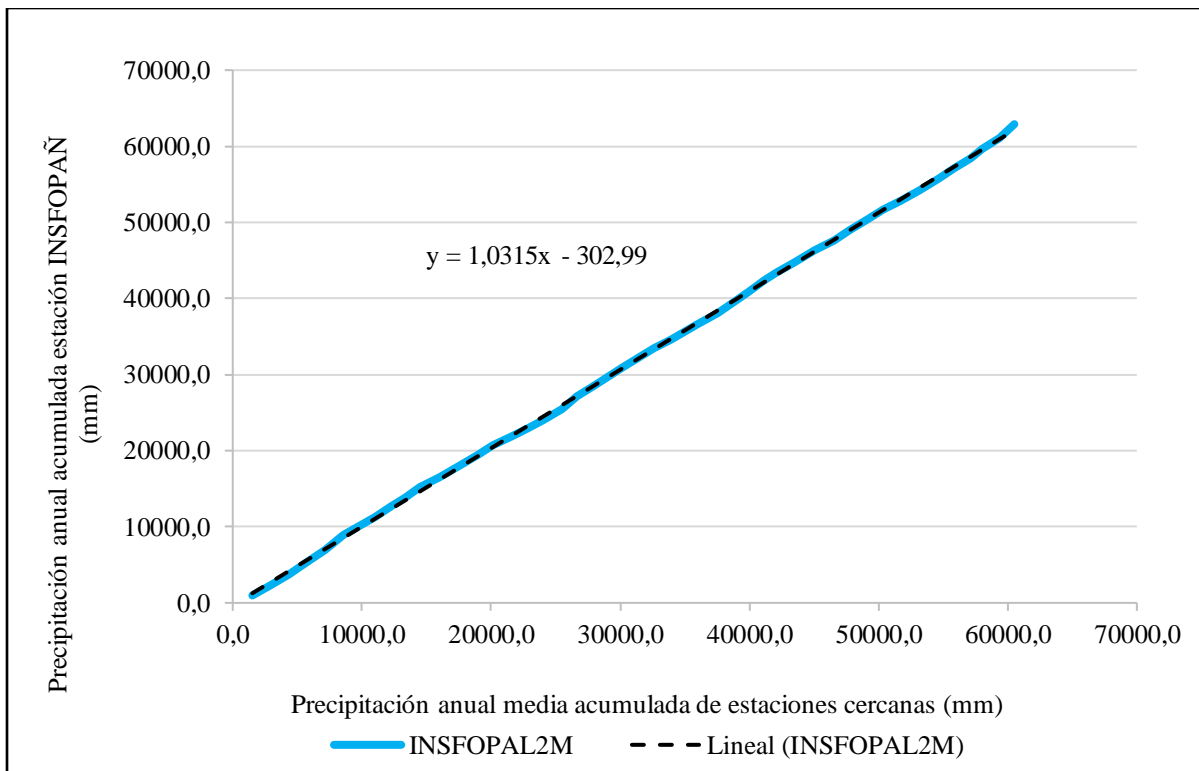


Figura 10. Curva de doble masa para la estación hidrológica INSFOPAL, por autor, 2018.

Se concluye que los datos de precipitación para las estaciones de VISO EL, PTE SALADOBLANCO R, ACEBEDO E INSFOPAL son homogéneos, ya que no se evidencian cambios drásticos en las gráficas de doble masa.

por último, está la depuración de datos, en este caso solo se debe agregar el dato de precipitación total mensual para el mes de Julio de 1988 de la estación PTE SALADOBLANCO R, para esto, se utilizó el método de la razón normal, debido a que la precipitación total para ese año difiere en más del 10%, al total de la precipitación media de cada una de las estaciones cercanas, finalmente, aplicando el método que se mencionó anteriormente se obtuvo un valor de precipitación media de 89,5 mm para el mes de julio de 1988 (para mayor detalle Anexo 4).

Fotointerpretación.

Este análisis se puede dividir en dos grandes procesos, la fotointerpretación inicial por estereoscopio, y la georreferenciación y digitalización de las fotografías en ArcMap.

La interpretación por estereoscopio, consiste en observar las fotografías aéreas por medio de un estereoscopio de espejos, gracias a este instrumento se logra tener una visualización de la aerofotografía en tres dimensiones, logrando este efecto visual se procede a identificar y dibujar cualquier tipo de información geográfica que se considere relevante como se muestra en la figura 11 (Anexo 14. Fotografías aéreas), gracias a esta técnica se pudo recolectar información visual de redes de drenaje, posibles contactos litológicos, geoformas, coronas de zonas erosionadas, vías, edificaciones y zonas de cultivos, esta información es básica para el reconocimiento de la zona de estudio, será útil para el trazo de la divisoria de aguas, definir límites de geoformas y para encontrar otros aspectos geomorfológicos.

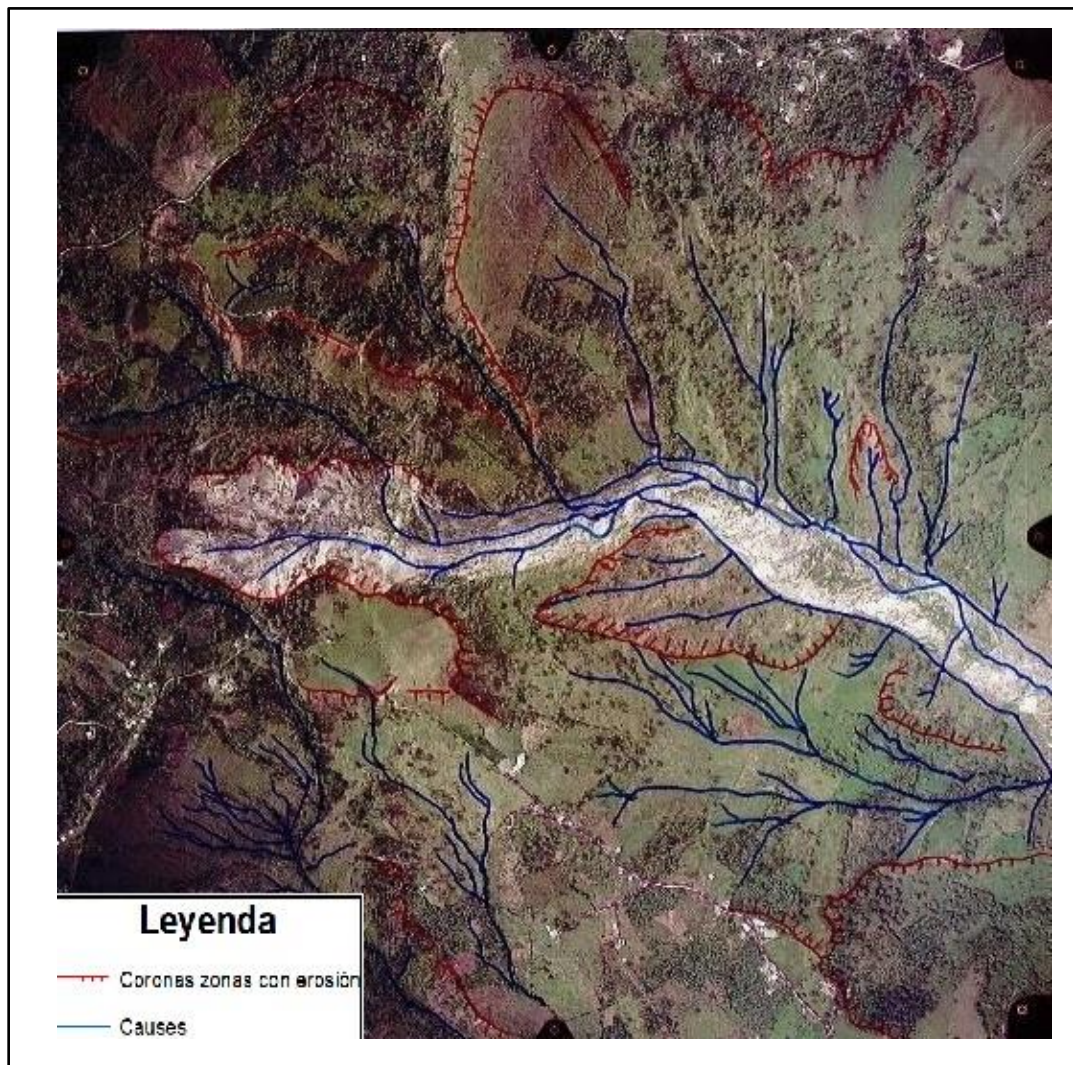


Figura 11. Interpretación de la fotografía 9274 del año 2010, por autor, 2018.

El segundo tratamiento que se le realizó a las aerofotografías fue el de georreferenciación, para cada fotografía aérea se crearon diferentes puntos control distribuidos en toda el área que contiene la foto, y se ligaron a un basemap, es importante conocer las coordenadas de los n puntos que se decidan seleccionar y distribuirlos por toda la fotografía, para que esta se ajuste con alta exactitud y precisión a la representación en superficie plana; estos puestos de control tienen que ser sitios sin mucha variabilidad en el tiempo, debido a que las fotografías son de épocas más antiguas a las del basemap, (si se llega a seleccionar una zona que tiende a tener

muchos cambios, la imagen queda mal georreferenciada), estos lugares de control pueden ser edificaciones, límites de lotes, en ocasiones árboles y hasta algunas vías, como se muestra en el ejemplo de la figura 12.

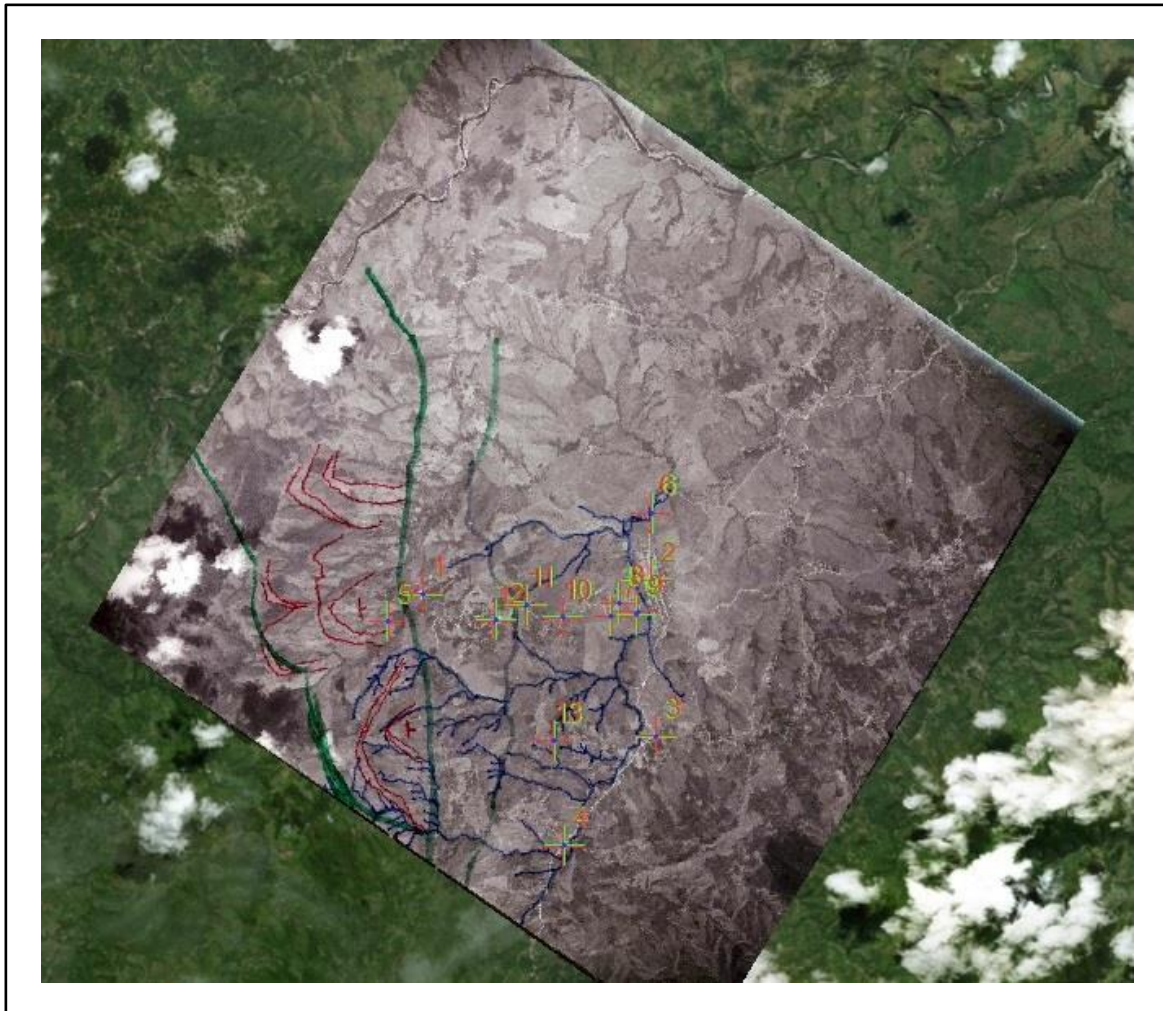


Figura 12. Ejemplo de proceso de georreferenciación para la fotografía aérea 39770 de 1966, por autor, 2018.

Con las aerofotografías georreferenciadas se genera un mosaico, este posibilita observar la cadena de imágenes capturadas en el vuelo como una sola, esta sucesión de capturas es importante ya que admite contemplar las imágenes de detalle simultáneamente y a una mayor; permite tener un mayor campo de visión de la zona de estudio.

El último proceso consistió en convertir la información dibujada sobre la fotografía a información digital, esto se hizo por medio de shapes y de la herramienta draw de ArcMap, obteniendo finalmente el resultado que se presenta en la figura 13.

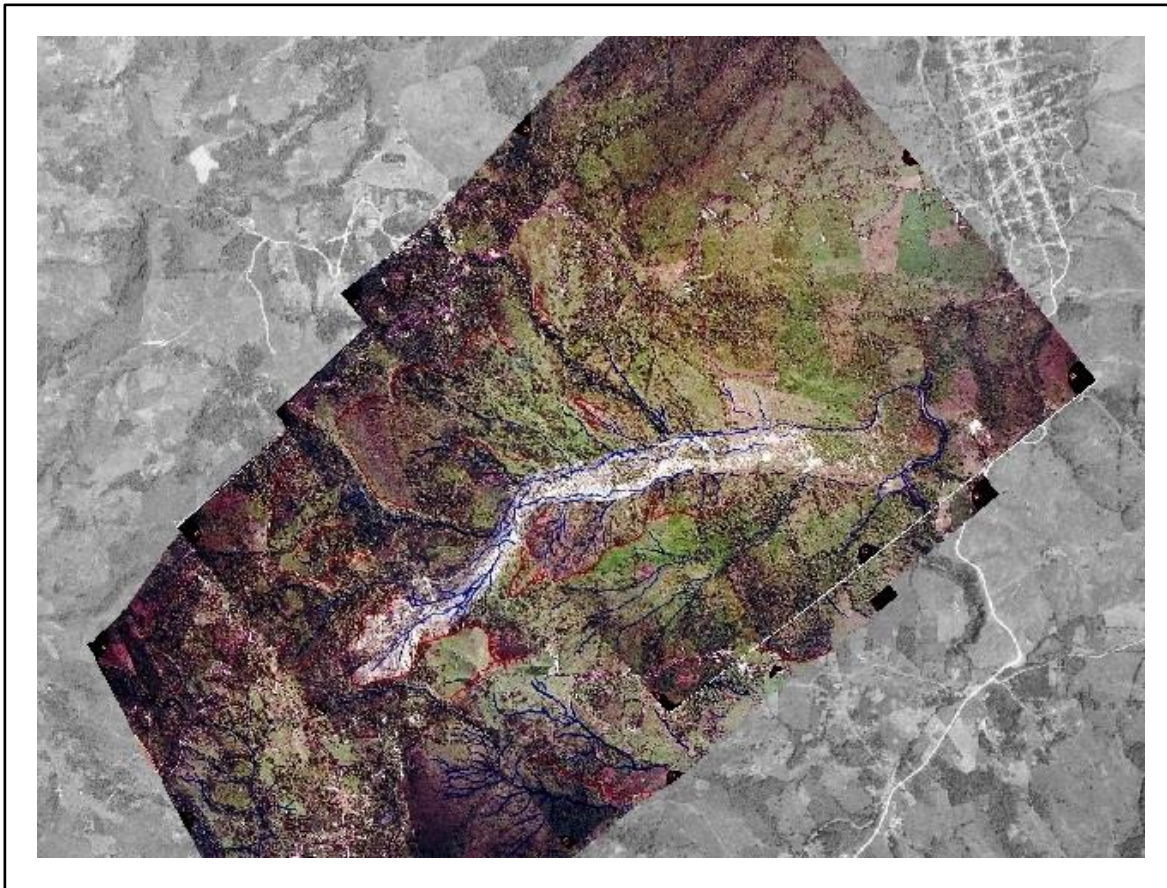


Figura 13. Fotointerpretación digitalizada, por autor, 2018.

Digitalización de la topografía y de la cuenca hidrográfica.

Como primera actividad, se efectuó la georreferenciación de los mapas topográficos de 1982 y 2013 en el sistema de coordenadas proyectadas Magna Colombia Oeste, esta acción consistió en situar los puntos de control en las grillas de las cartas topográficas, debido a que son lugares en donde las coordenadas son conocidas. El siguiente proceso radicó en la digitalización de las curvas topográficas, y en seguida, con ayuda de la hidrografía que se presenta en la topografía, se

trazó el límite de las subcuencas hidrográficas que se enmarcan en la zona de estudio y los cauces que las comprenden, teniendo como resultado las subcuencas que se presentan en la figura 14 y 15.

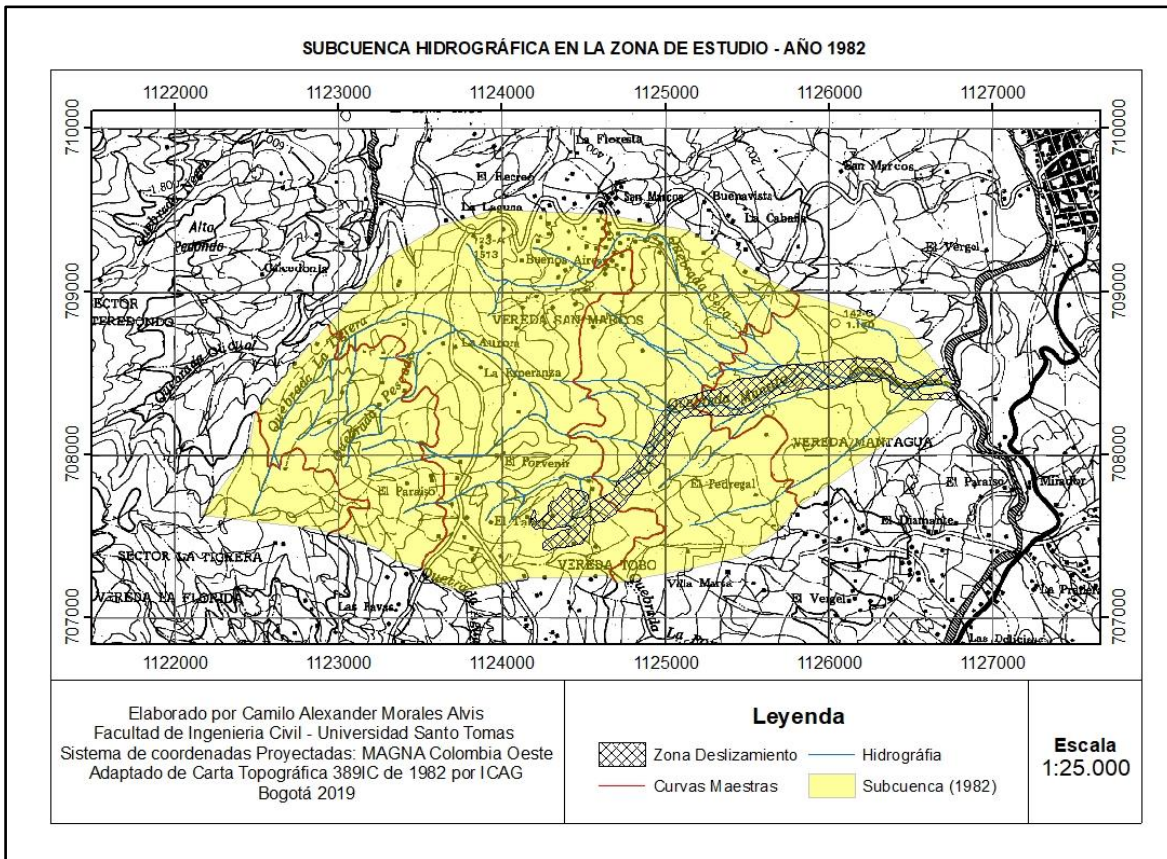


Figura 14. Topografía y subcuenca de la zona de estudio en el año 1982, adaptada y modificada de “Carta topográfica 389IC de 1982, Timaná, departamento del Huila”, por autor, 2018.

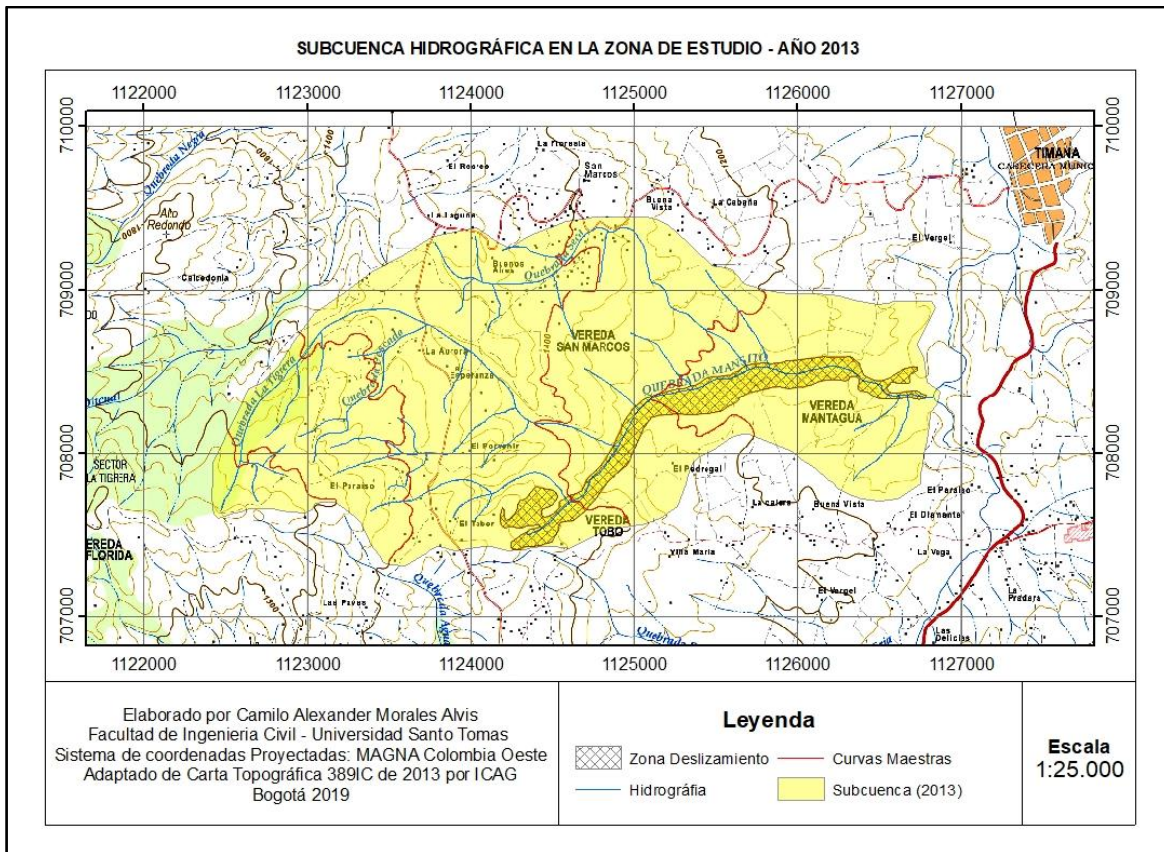


Figura 15. Topografía y subcuenca de la zona de estudio en el año 2013, adaptada y modificada de “Carta topografica 389IC de 2013, Timaná, departamento del Huila”, por autor, 2018.

Vegetación

Con el objeto de hacer un análisis visual de la vegetación en el área de estudio, se combinaron algunas de las diferentes bandas de la imagen satelital LANSAT8 9058 para la

creación de imágenes de vegetación en ArcMap, obteniendo así las imágenes que se presentan en las figuras 16 y 17.

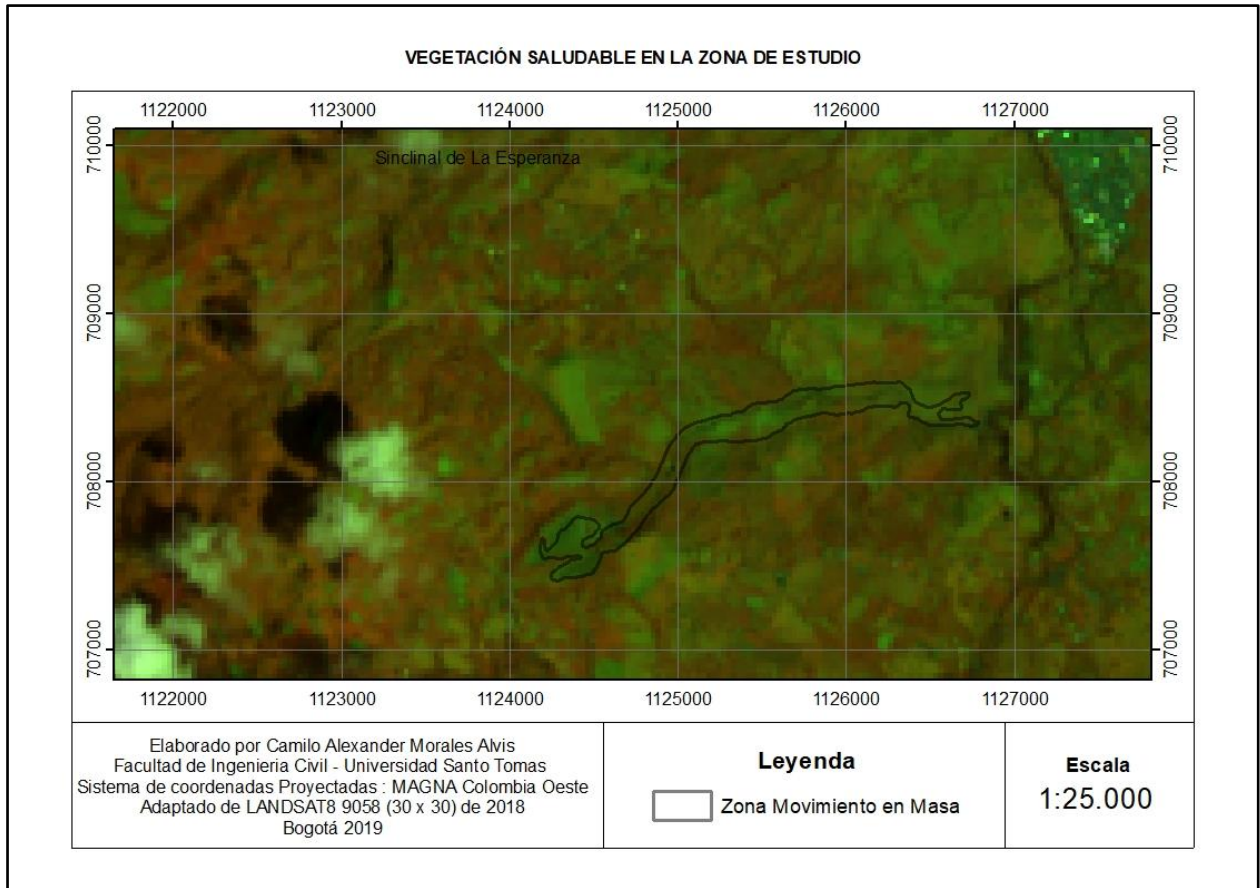


Figura 16. Vegetación saludable de la zona de estudio, adaptada y modificada de "LANSAT8 9058 de 2018", por autor, 2018.

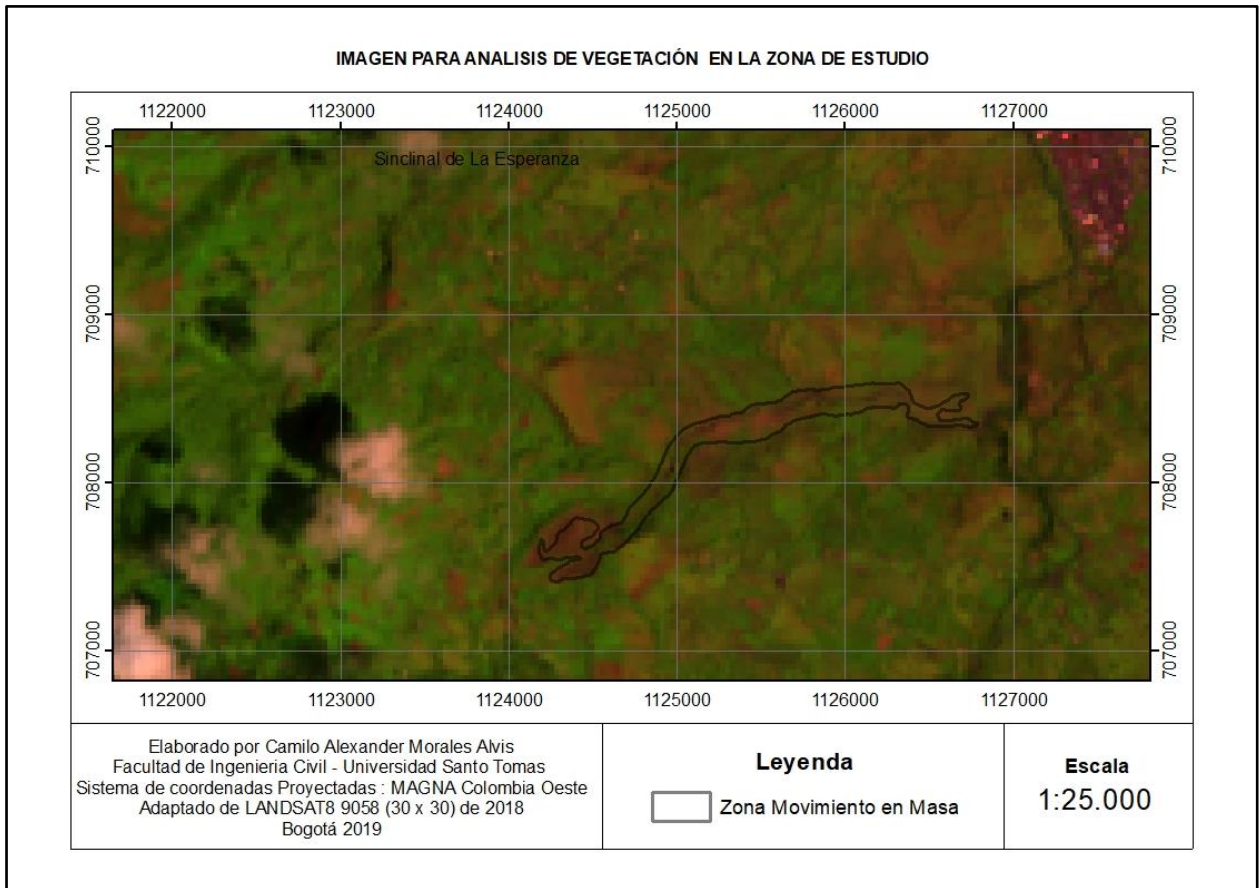


Figura 17. Imagen para análisis de vegetación en la zona de estudio, adaptada y modificada de "LANSAT8 9058 de 2018", por autor, 2018.

Estas imágenes permiten observar las zonas en donde la vegetación es escasa o por el contrario muy abundante, en ellas se puede identificar las áreas erosionadas y en algunos casos, cuando se tiene una buena resolución, geformas como las dolinas kársticas.

Mapa geológico.

También mediante la interpretación de las fotografías aéreas y se trazaron los contactos de las unidades geológicas con mayor detalle (figura 18, ver mapa geológico, producto de la fotointerpretación). Para elaborar esta geología se necesitó de los procesamientos de la fotointerpretación y de la digitalización en ArcMAP, en escala 1:25.000.

En la fotointerpretación se pudieron identificar algunos cambios litológicos, esta actividad consistió en ver transiciones de alturas y cambios de factores como drenajes y formas de cierto tipo de roca a otra, cuando se reconocían estas condiciones se entendía como un cambio litológico, y corroborando con la visita a campo y experiencia de la geóloga María Victoria Mejía se presentan estos resultados.

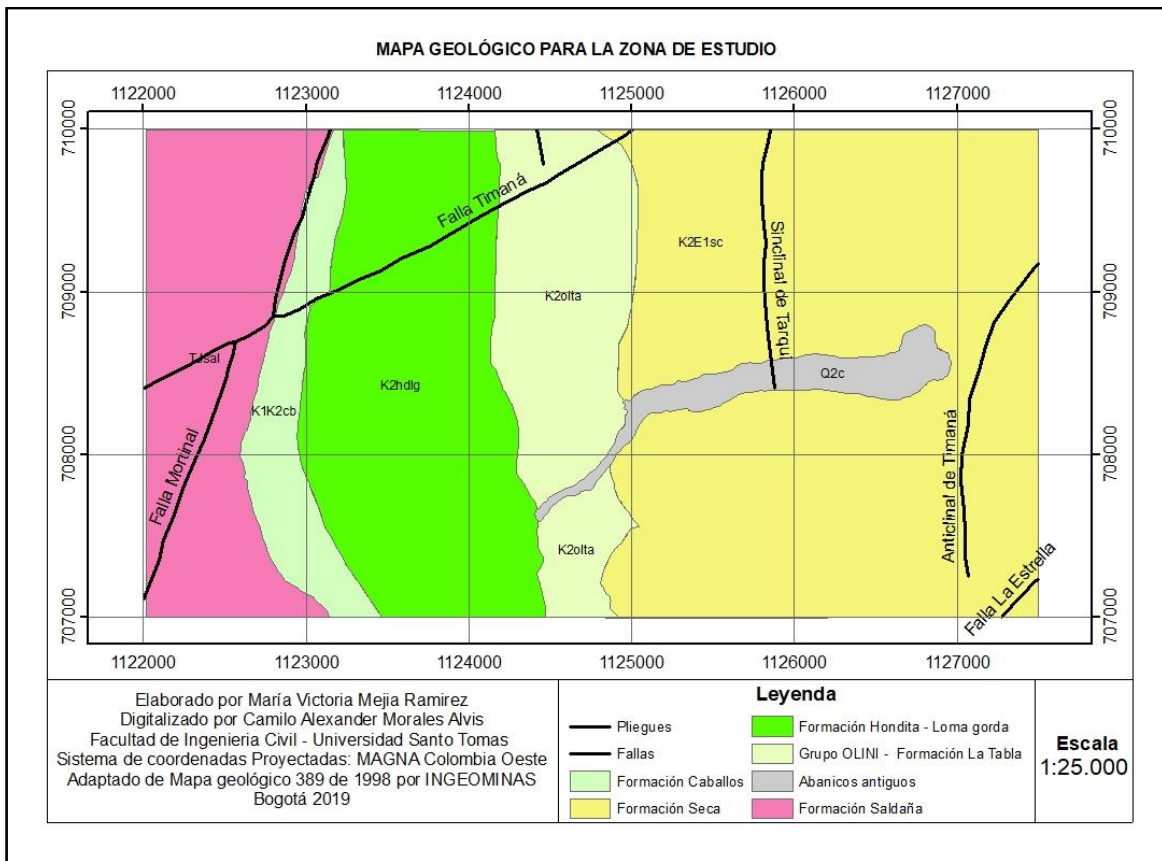


Figura 18. Mapa geológico, por Mejía M, 2019.

Tabla 3
Descripción de la Litología de la zona de estudio.

Roca	Símbolo	Nombre de la Formación	Litología
Sedimentaria	Q2c	Abanicos Antiguos	Depósitos de arena, gravas y arcillas.
	K2E1sc	Formación Seca	Lodolitas con intercalaciones de litoarenitas.
	K2olta	Formación Olini - La Tabla	Calizas fosilíferas y areniscas lodosas cuarzosas.

	K2hdlg	Formación Honda y Lomagorda	Lodolitas calcáreas y calizas fosilíferas.
	K1K2cb	Formación Caballos	Areniscas con niveles de algunos conglomerados, lodolitas y calizas.
Ígneas	TJsal	Formación Saldaña	Tobas, aglomerados, areniscas, lodolitas y diques andesíticos a dacíticos.

Nota: Nombre en código de la unidad geológica, nombre de la formación, y descripción de la litología. Adaptada de Mapa geológico 389 Magna, por INGEOMINAS. 1998.

Mapa de pendientes con Modelo Digital de Elevación –DEM.

Con el DEM subido en ArcMap se procede a realizar un análisis espacial con la función “Slope”(Pendiente), para cada celda la herramienta calcula el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus vecinas, lo que hace que se cree una clasificación de rupturas naturales, en donde los cortes de clase se caracterizan porque agrupan mejor los valores similares y maximizan las diferencias entre clases; las zonas más empinadas se somborean en rojo, mientras que las más bajas en verde oscuro. Luego, se usa la herramienta “reclassify” para reclasificar y agrupar estas elevaciones según los diferentes autores o entidades a las que se les hace seguimiento, en este caso, se seguirá la clasificación con la que trabaja Carvajal (2012) en la propuesta de estandarización, teniendo como resultado el mapa raster de la figura 19, esta reclasificación se hace con el fin de estandarizar la formación, manejar un lenguaje global que permita hacer comparaciones con estudios de otros países.

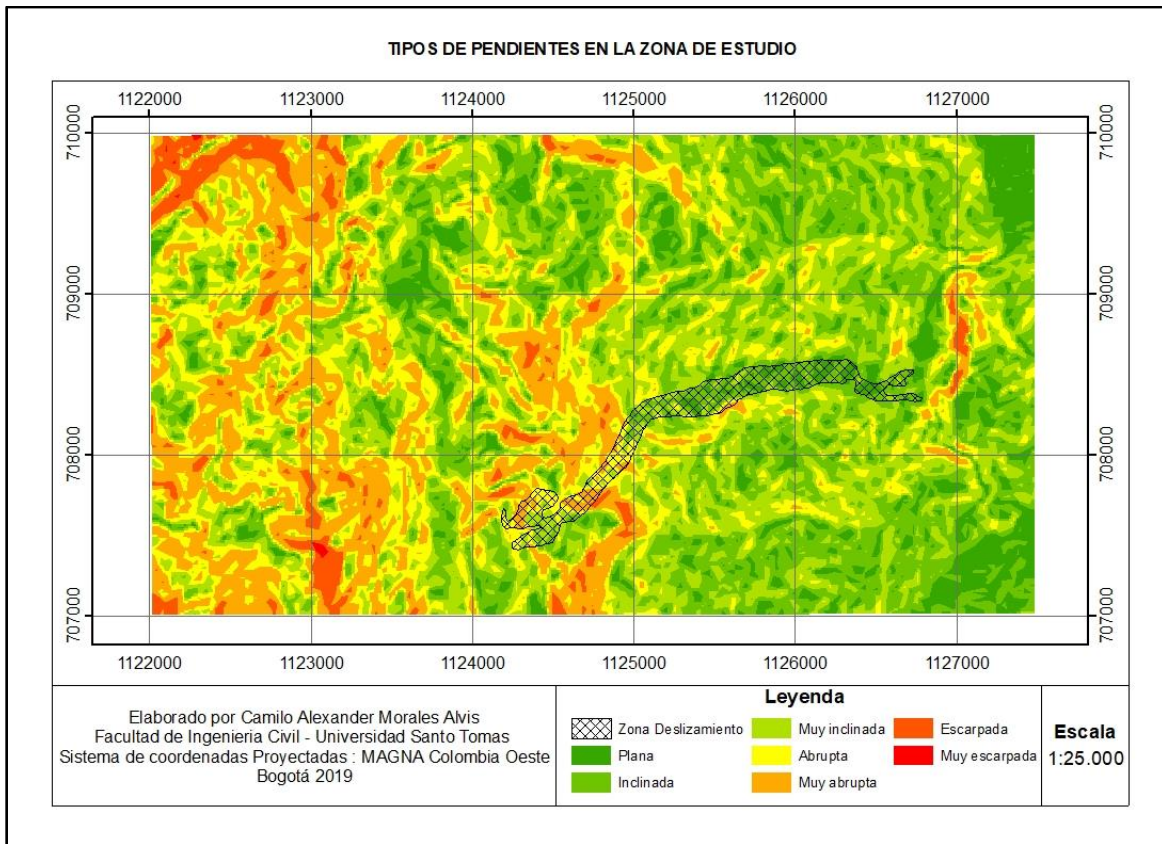


Figura 19. Mapa de pendientes con base en DEM ASTGT del año 2011, por autor, 2019.

Los índices de inclinación de ladera se pueden agrupar en los siguientes rangos: de 0 a 5 grados para laderas planas; de 6 a 10 para inclinadas, 11 a 15 muy inclinadas; 16 a 20 abruptas; 21 a 30 muy abruptas; 31 a 45 escarpadas y mayores de 45 grados muy escarpadas.

Mapa geomorfológico.

El mapa geomorfológico es el producto del análisis de los procesamientos que se llevaron a cabo anteriormente, en él, se muestran las diferentes geoformas encontradas en la zona de estudio, cabe resaltar que algunas geoformas son más fáciles de identificar que otras, por ejemplo, los planos estructurales o escarpes de contrapendiente, se distinguen con mayor facilidad en la fotografía y en campo por su forma y sus características no tan complejas, mientras que para lograr ver una dolina, se debe observar con mayor detalle la fotografía en el

estereoscopio, y haber estudiado la litología del lugar, o en su defecto, realizar un reconocimiento en campo. En ocasiones, la vegetación impide que se reconozcan con comodidad estas formas del terreno, por eso es importante estudiar la morfogénesis, para entender qué tipo de formas se encontrarán en la zona de estudio.

El primer paso para realizar la cartografía geomorfológica fue estudiar la morfogénesis del lugar y relacionarla con la geología elaborada, con esto, se identificaron las zonas en que se encontraban los ambientes morfogenéticos kárstico, estructural, denudacional y fluvial en las fotografías aéreas; el segundo paso consistió en reconocer y dibujar las geoformas ligadas a cada ambiente, para esto, se crearon shapes y se superpusieron las capas de procesamientos en el siguiente orden ascendente: mapa de pendientes, fotointerpretación, mapa geológico e hidrografía, determinada la forma, se empieza a dibujar el contorno de esta, la hidrografía, topografía y litología ayudan a establecer los límites de la figura, una vez trazada se nombra, se codifica, se selecciona el color y se describe en la tabla de atributos asociada al shape geoformas, estos parámetros se eligen siguiendo las guías metodológicas para elaboración de mapas geomorfológicos del IDEAM y de Carvajal, obteniendo así el mapa que se presenta en la siguiente figura (para ver con mayor detalle mirar anexo 5).

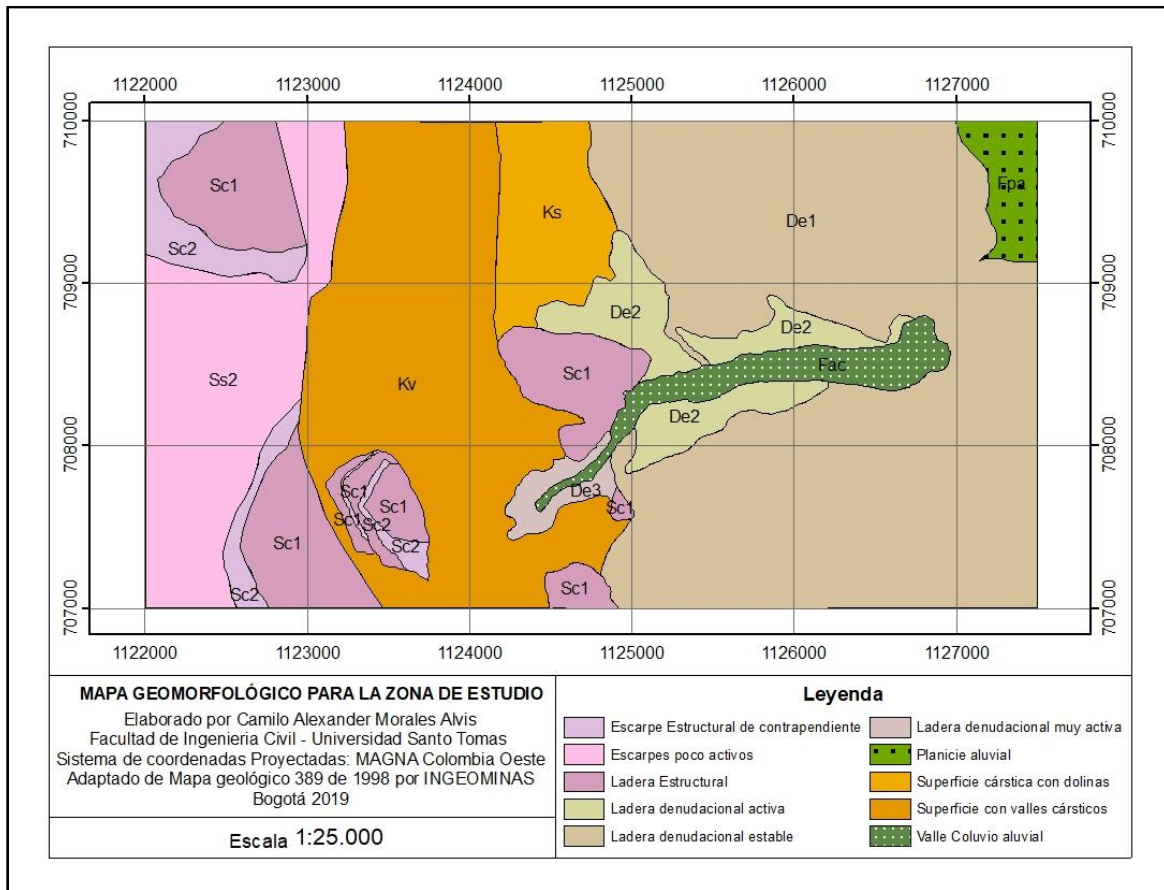


Figura 20. Mapa geomorfológico, por autor, 2019.

Análisis geomorfológico

Morfogénesis.

Se pudo identificar cuatro tipos de ambientes geomorfológicos que interactúan en la zona de estudio como se observa en la figura 21.

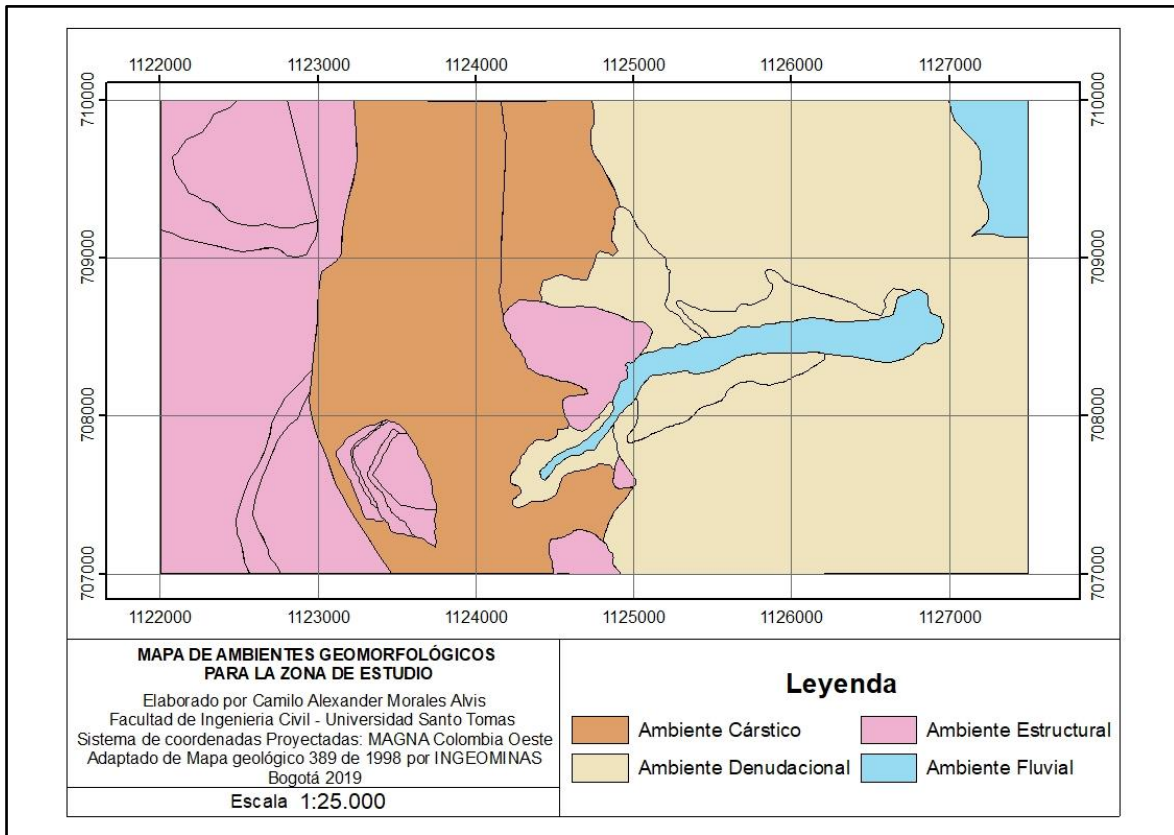


Figura 21. Mapa de ambientes geomorfológicos, por autor, 2019..

El ambiente estructural, corresponde a la formación de relieves por la dinámica interna de la tierra, está asociado especialmente a los pliegues y fallas identificadas en el mapa geológico y en la fotointerpretación, donde se observa con claridad la existencia de estas en la zona de estudio, además, en campo, se lograron encontrar geformas típicas del ambiente como lo son los planos estructurales (figura 22).



Figura 22. Plano estructural, adaptada de “Fotografías Proyecto FODEIN- Timaná”, por autor, 2019.

El segundo ambiente es el ambiente fluvial, está ligado a las formas generadas por corrientes de ríos y arroyos, en este caso se generan debido a las corrientes de los cauces que componen la subcuenca de la zona de estudio, ejemplos claros pueden ser: el valle coluvio aluvial representado en el deslizamiento (figura 23), y las terrazas fluviales (figura 24) que se presentan al costado oriental de la zona de estudio, cuando la quebrada Mansito se une al río Timaná.

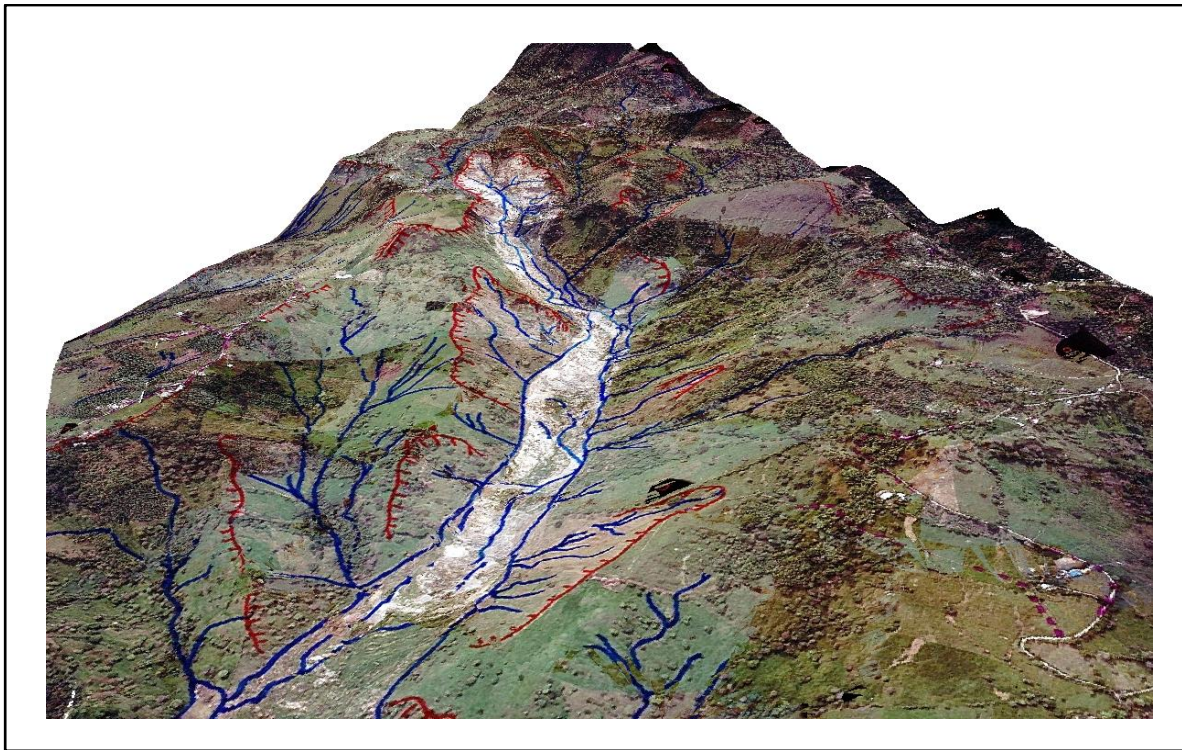


Figura 23. Vista en ArcScene del valle coluvio aluvial 2010, por autor, 2019.



Figura 24. Terrazas fluviales, adaptada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.

El tercer ambiente es el Cárstico, contiene formas que son producto de la meteorización y de la disolución de rocas calizas, como se puede observar en el mapa geológico se ve con claridad la existencia de formaciones que contienen en mayor medida calizas, esto se verificó en campo, y se encontraron geoformas como dolinas (figura 25) y valles de origen kárstico.

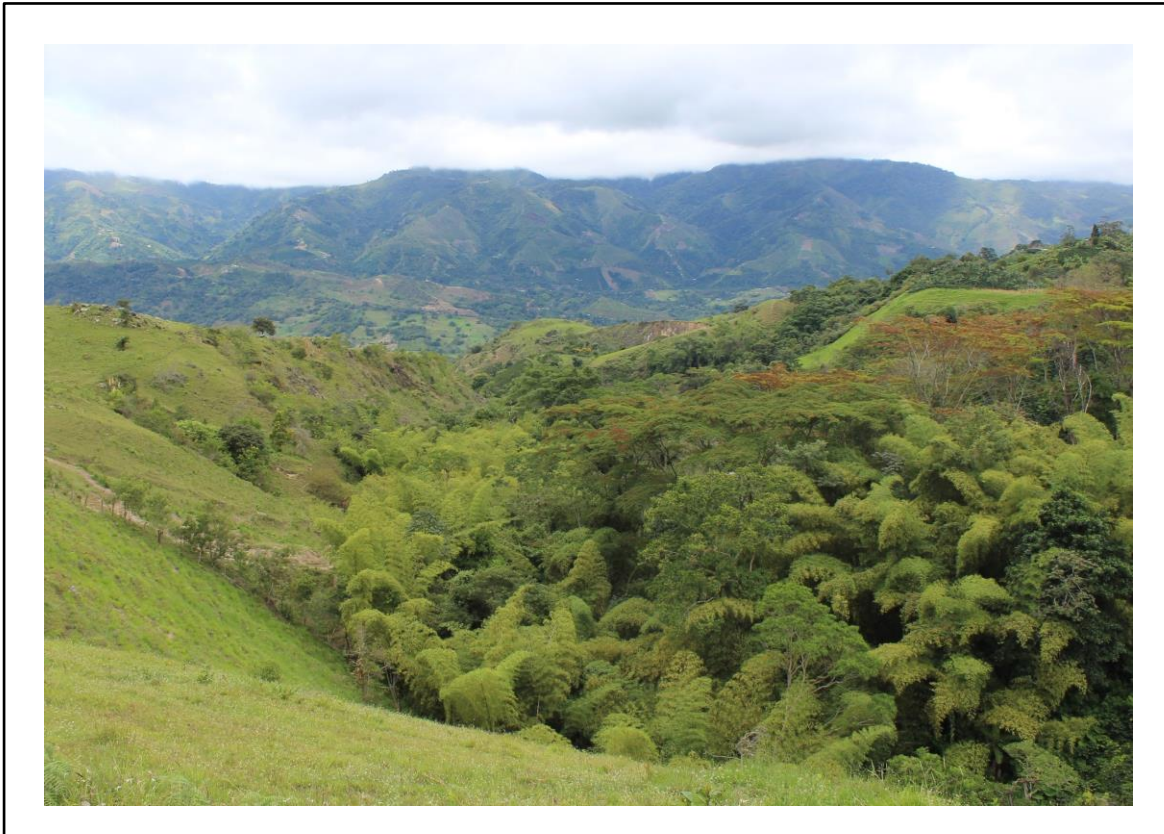


Figura 25. Dolina, adaptada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.

Por último, se tiene el ambiente denudacional, este se da cuando ocurren procesos erosivos hídricos y gravitatorios o una combinación de los dos (figura 26), en este caso el ejemplo más claro y que evidencia la presencia del ambiente, sería el deslizamiento que enmarca la zona de estudio.

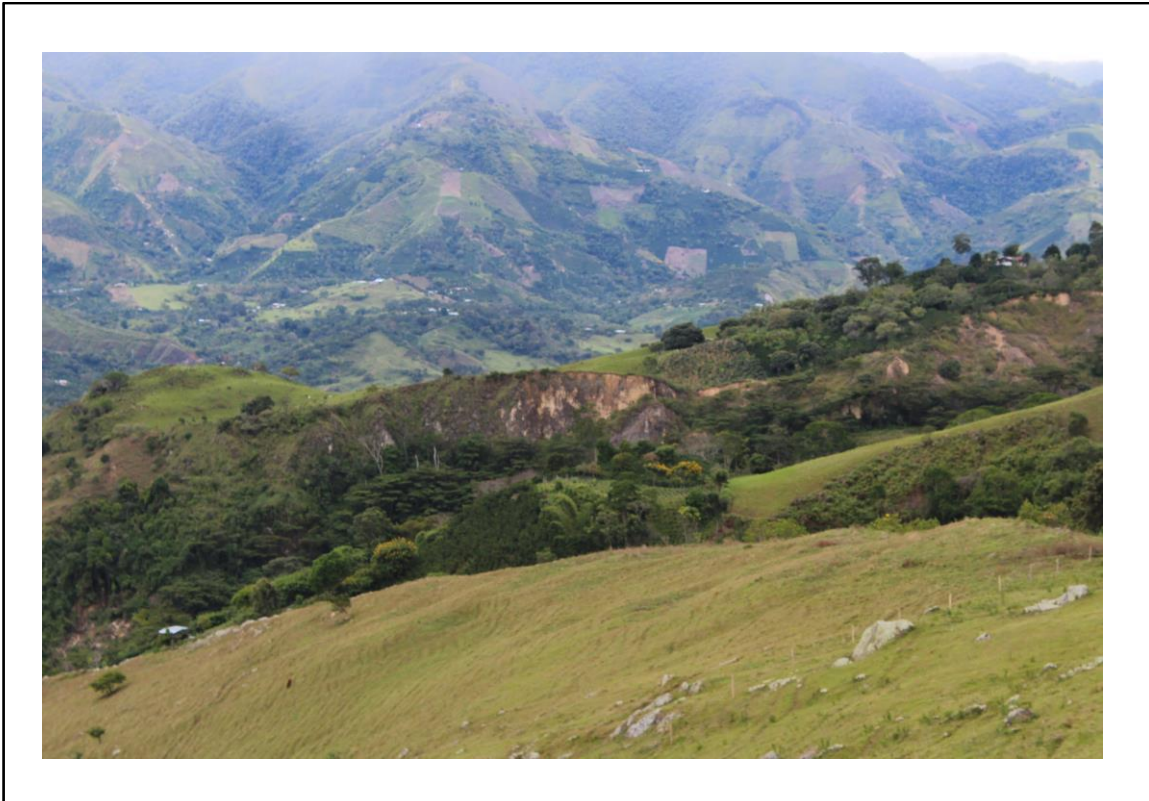


Figura 26. Ambiente denudacional, adaptada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.

Morfodinámica

La zona de estudio está casi que delimitada por una serie de pliegues y fallas (figura 27), con ayuda de la memoria geológica de la plancha 389 Timaná elaborada por el INGEOMINAS (Anexo 6), y de la memoria explicativa del mapa geológico del departamento del Huila (Anexo 7) elaborado por el mismo, se describen a continuación.

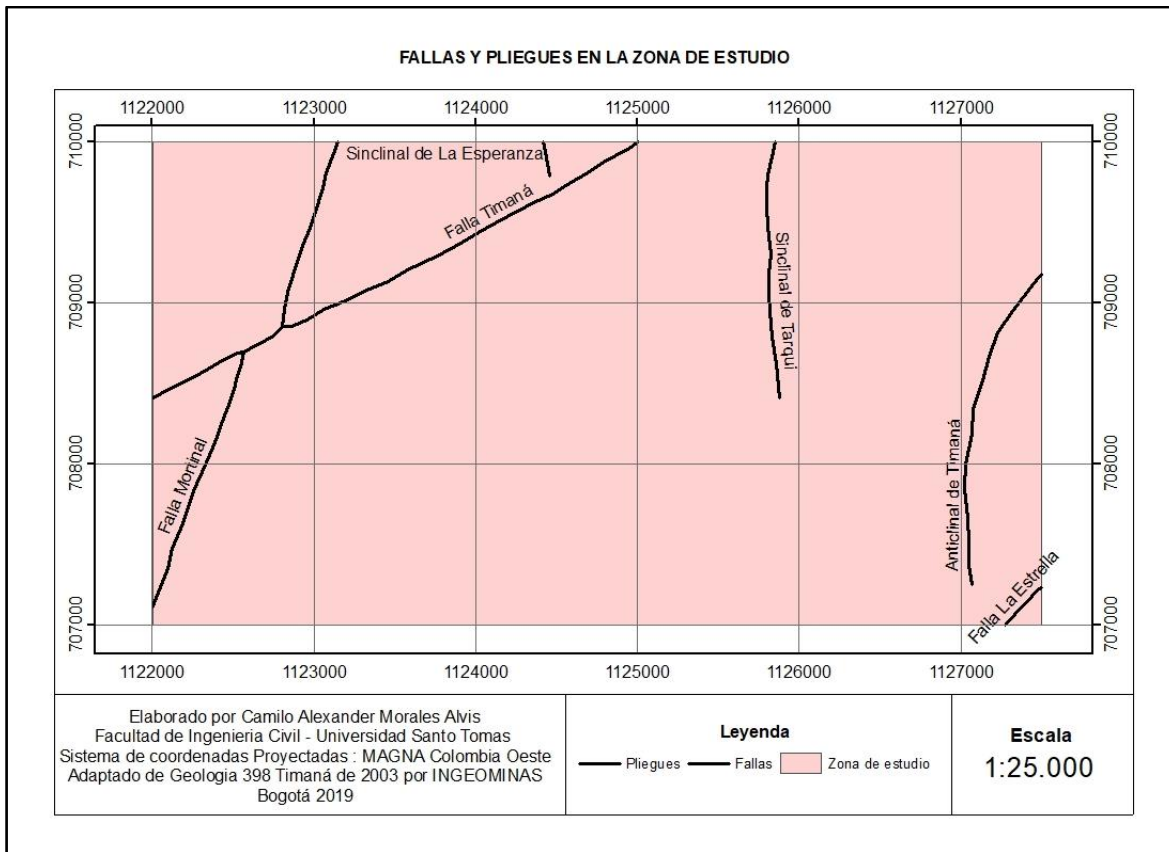


Figura 27. Fallas y pliegues en la zona de estudio de INGEOMINAS, adaptada de “Mapa geológico 389”, por autor, 2019.

Tabla 4
Pliegues y fallas en la zona de estudio.

Nombre	Descripción
Falla Mortiñal	Se desprende de la Falla El Agrado - Betania en su extremo norte; Tiene un largo de 12 km, con una dirección preferencial N20°E, y es clasificada como una falla de tipo inverso, con ángulo de inclinación medio a alto hacia el SW. Esta falla pone en contacto la Formación Saldaña con las formaciones Caballos y Hondita - Loma Gorda, a las formaciones Saldaña y Caballos con las formaciones Hondita – Loma Gorda y La Tabla.

Falla Timaná	Se describe como una estructura de rumbo dextral con dirección NE, la cual controla parte del trazo del río Timaná. Hacia el norte aumenta su componente vertical, y se comporta como una rampa lateral que pone en contacto la Formación Seca con las formaciones Potrerillo y Doima, para luego ser sepultada por la Falla Altamira.
Falla La Estrella	Falla de tipo inverso de ángulo alto convergencia hacia el SE y dirección NE - SW. Se desconoce la magnitud del movimiento y en superficie pone en contacto la Formación Seca sobre la Formación Palermo y en el extremo norte choca contra la Falla Timaná.
Anticlinal de la Esperanza	Su eje tiene una longitud de aproximadamente 15 Km. Al norte está orientado en dirección N23°E. Está delimitado por las fallas de Timaná en el sur y la Falla Mortiñal en el norte; en el núcleo del anticlinal se encuentra la formación La Tabla y en sus flancos involucra las formaciones Seca, Hondita - Loma Gorda y el grupo Chicoral
Anticlinal de Timaná	Su eje posee una longitud de aproximadamente 7 Km. Al norte está orientado en dirección N14°E, mientras que en la parte sur está direccionado S31°W, allí tiene una capa horizontal antes de su choque con la falla la Estrella, sobre la formación Seca; en el núcleo del anticlinal está una formación cuaternaria de depósitos coluviales y en sus flancos involucra las formaciones La Tabla y la anteriormente nombrada Formación Seca.
Sinclinal de Tarquí	Su eje se extiende por aproximadamente 50 km y está orientado en dirección N50°E con cabeceo al SW. El cierre sur está cortado por la Falla Timaná y al norte por la Falla La Estrella. Involucra rocas del Cretácico Superior, Paleógeno y Neógeno; en el núcleo del sinclinal está la Formación Gigante, en la cual localmente se presentan estratos horizontales. En los flancos afloran la Formación Potrerillo, el Grupo Chicoral y la Formación Seca.

Morfología.

Las geoformas que se identificaron en la zona de estudio se deben a los ambientes que se estudiaron en la morfogénesis, están a una escala de unidad y se describen a continuación.

Ambiente Estructural.

Ladera estructural (Sc1): Se ubican al costado oeste del mapa geomorfológico, son laderas asimétricas de pendiente moderada a fuerte (7° - 60°), compuestas por rocas sedimentarias.



Figura 28. Ladera estructural, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.

Escarpe estructural de contrapendiente (Sc2): Los escarpes de contrapendiente que se lograron identificar están ligados a las laderas estructurales, ya que son la cara de mayor pendiente que conforman estas estructuras, por lo tanto se ubican también al costado oeste de la zona de estudio y se diferencian de las laderas por tener una pendiente fuerte a muy fuerte ($>30^{\circ}$), también está compuesto por rocas sedimentarias.

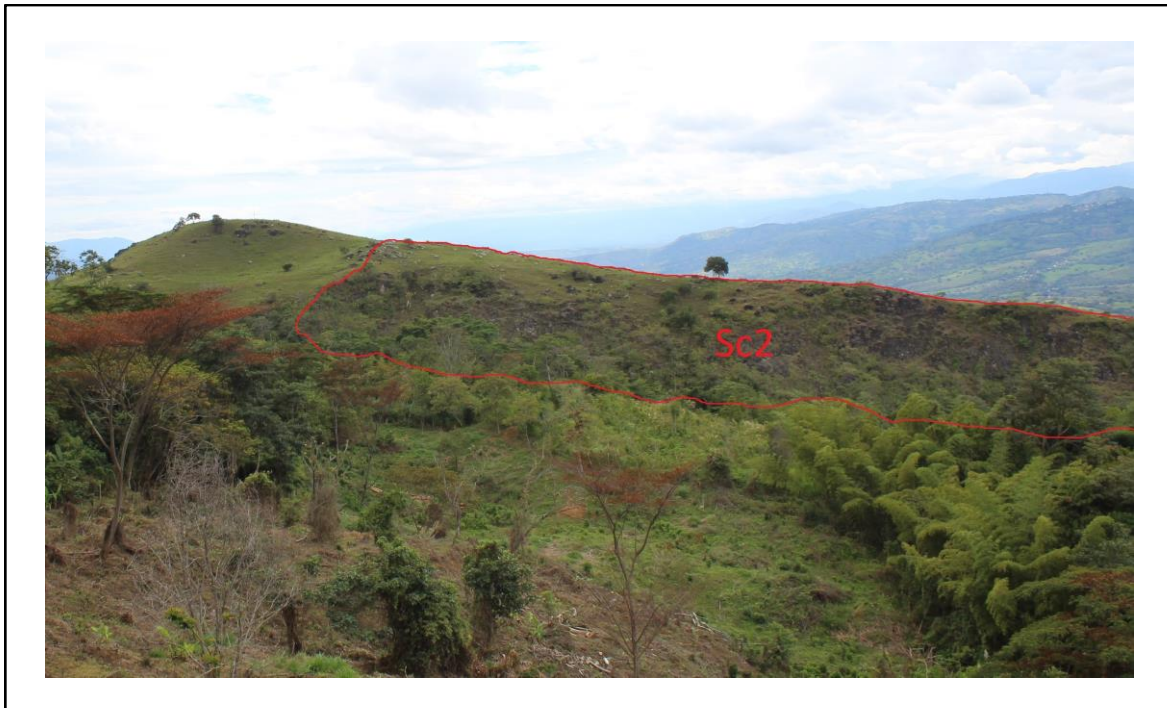


Figura 29. Escarpe estructural de contrapendiente, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.

Escarpes poco activos (Ss2): Escarpes asociados con movimientos corticales, con pendientes fuertes a muy fuertes ($>30^{\circ}$), se localizan al oeste de la zona analizada, sobre las formaciones Saldaña (areniscas, lodolitas, tobas, lavas, diques andesíticos a dacíticos) y Caballos (areniscas, lodolitas y calizas).

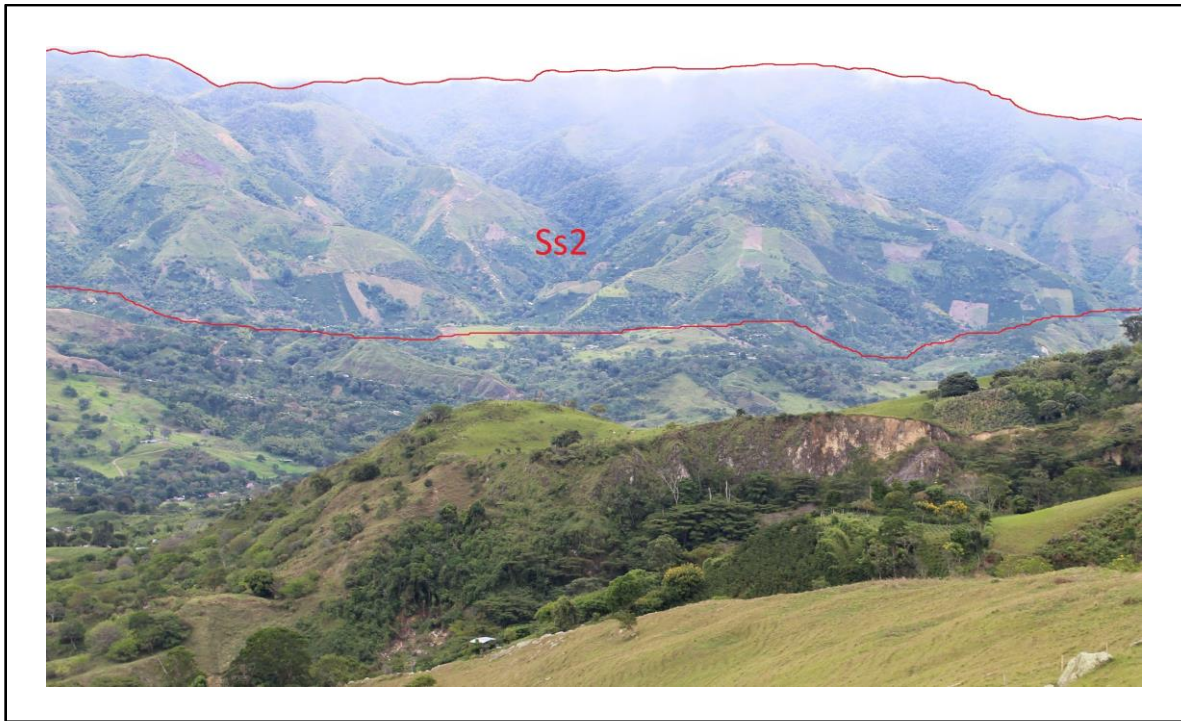


Figura 30. Escarpes poco activos, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.

Ambiente Fluvial.

Valle Coluvio aluvial (Fac): Se extiende desde la parte central del mapa geomorfológico con dirección hacia el este, está localizado desde el escarpe menor del deslizamiento, pasando por la zona de acumulación, hasta el pie o pata del movimiento en masa, es una acumulación aluvio-torrencial, formada por flujo de sedimentos heterométricos (de varios tamaños), tiene una pendiente moderada (7°- 14°).

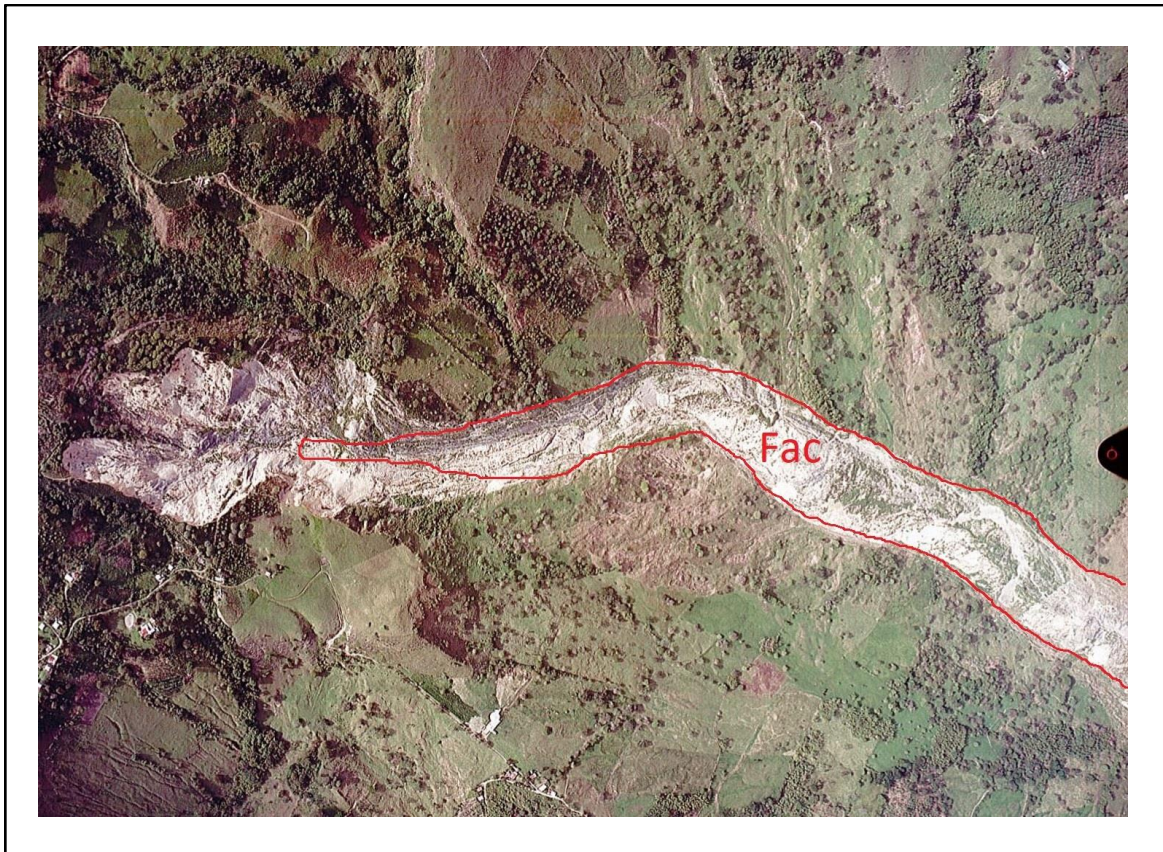


Figura 31. Valle coluvio-aluvial, adaptada de “Fotografía aérea 9274”, por autor, 2019.

Planicie Aluvial (Fpa): Es la geoforma sobre la que se encuentra la parte urbana de Timaná, al Noreste de la zona de estudio, se forma gradualmente cuando se depositan sedimentos por la inundación periódica de corrientes o ríos, se caracteriza por tener una topografía plana y ligeramente inclinada ($<5^{\circ}$).



Figura 32. Planicie Aluvial, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.

Ambiente Cárstico.

Superficie cárstica con dolinas (Ks): Está geofoma se encuentra al norte de la zona de estudio, sobre la formación La Tabla (calizas y areniscas). Son superficies afectadas por procesos de disolución de calizas, se ven como zonas de hundimiento, en la mayoría de los casos redondas, sobre las que la vegetación es abundante.



Figura 33. Dolina de origen Cárstico, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.

Superficie con valles cársticos (Kv): Son valles generados por procesos de disolución de calizas, se encuentra al oeste sobre las formaciones La Tabla, Hondita y Loma gorda, se identifican por ser incisiones muy profundas en la roca, con paredes verticales y muy próximas.

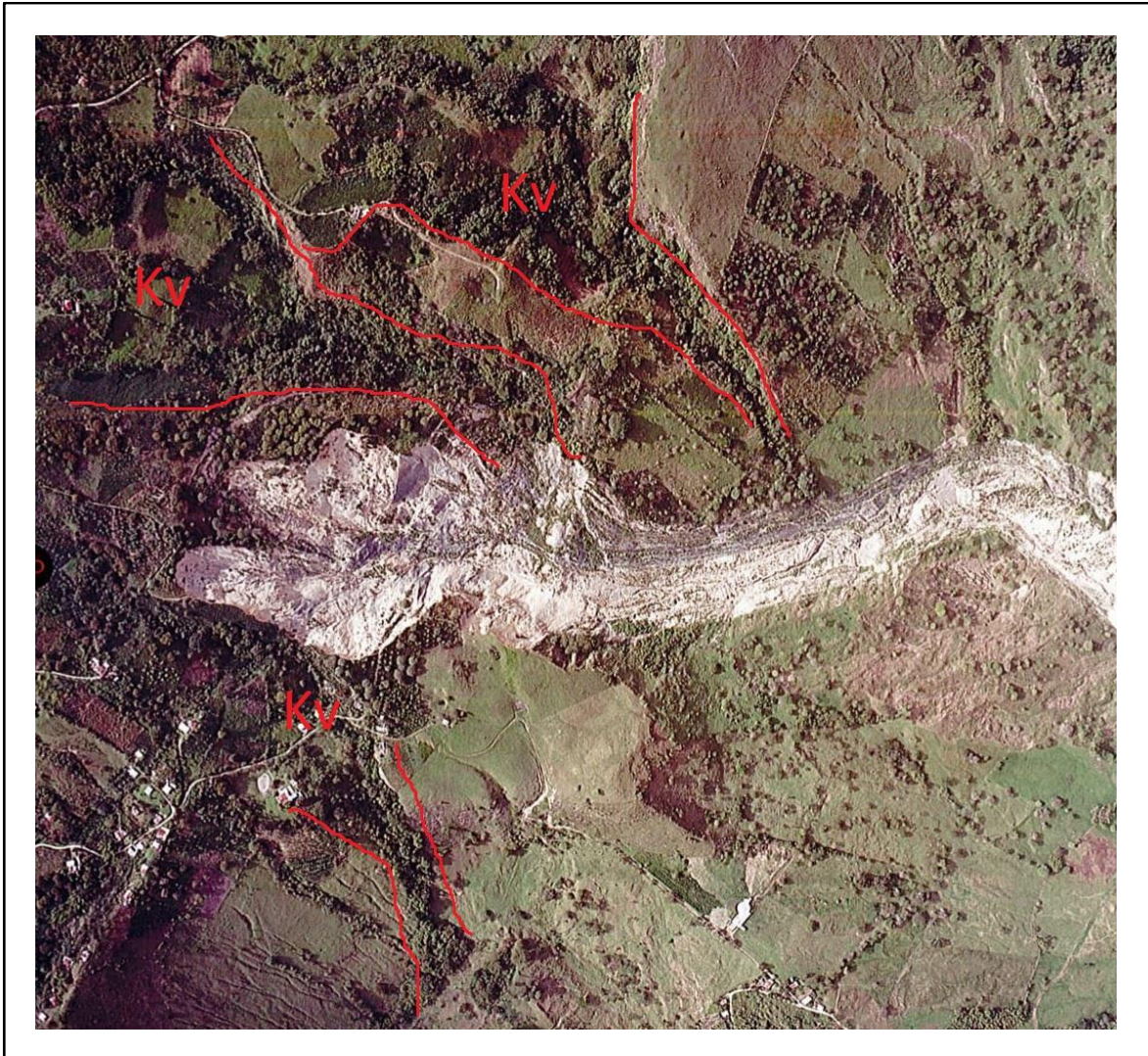


Figura 34. Valle Cárstico, adaptada de “Fotografía aérea 9274”, por autor, 2019.

Ambiente Denudacional.

Ladera denudacional estable (De1), Ladera denudacional activa (De2) y Ladera denudacional muy activa (De3): Son laderas afectadas por erosión y coluviación, con pendiente moderada a fuerte (7° - 60°), se diferencian únicamente por el estado de la erosión pueden ser estables, activas o muy activas, las laderas estables y activas se encuentran en la zona este del área de estudio, sin embargo la ladera más activa es la que se encuentra en la corona del deslizamiento,

estas geoformas se hallan sobre las formaciones Seca, La Tabla, y una pequeña parte con mayor grado de erosión en Hondita y Loma gorda.



Figura 35. a) Ladera denudacional estable y ladera denudacional activa, b) Ladera denudacional muy activa, adaptada y modificada de “Fotografías Proyecto FODEIN – Timaná”, por autor, 2019.

Morfometría.

Con respecto a la morfometría en la zona de estudio, se encontraron datos morfométricos de la cuenca enmarcada en la zona de estudio, se realizó una distribución de la variable pendiente en la zona y por último se hizo una distribución por porcentaje de geoformas en el sector analizado.

Morfometría de la cuenca.

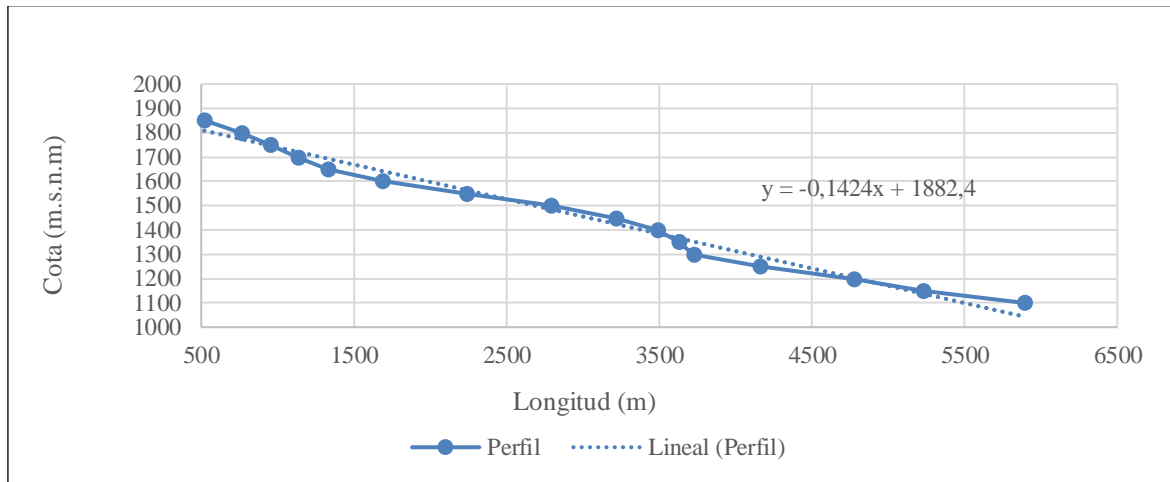
Haciendo una caracterización superficial de la subcuenca se resalta que esta tiene un área de drenaje de aproximadamente 7 Km², que la longitud del cauce principal es de 5,7 Km y que es una subcuenca de tercer orden. Con respecto a la morfometría, se encontró que el coeficiente de compacidad propuesto por Gravelius tiene un valor de 1,2, lo que la hace una cuenca casi redonda a ovalada (tabla 5).

Tabla 5
Formas de la cuenca de acuerdo el índice de compacidad

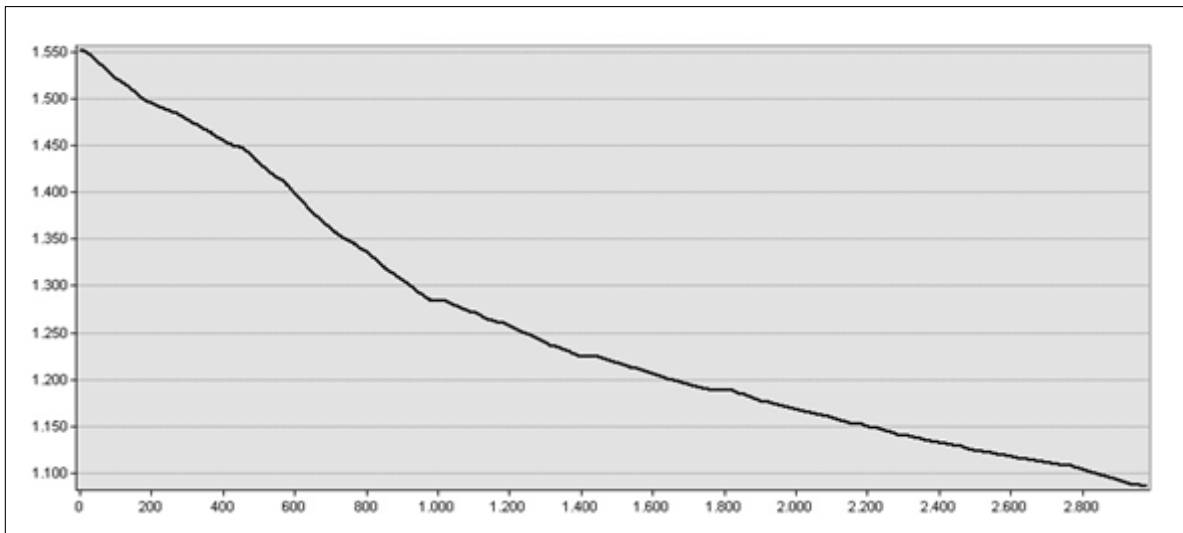
Clase de forma	Índice de compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval - redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval - Redonda a oval oblonga
Clase III	1.50 ó más de 2	Oval - obonga a rectangular - oblonga

Nota: Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río Bobo, departamento de Nariño, Colombia en base a Campos (1992).

Las características del relieve de la cuenca hacen que su cauce principal según IBAL, 2009, sea considerado fuertemente inclinado, pues la pendiente media del cauce principal es de 14% como se ve en la figura 36.



a) Obtenido del mapa topográfico del año 2013



b) Obtenido del DEM del año 2010

Figura 36. a) Perfil del cauce principal extraído del mapa topográfico, b) Perfil del cauce principal extraído del DEM, por autor, 2019.

Otro parámetro morfométrico que se encontró fue el gráfico de la curva hipsométrica y la frecuencia de altitudes, al comparar el gráfico que se mencionó anteriormente (figura 37) con la figura 38, se evidencia que la curva se asemeja a una curva tipo A, correspondiente a una cuenca con alto potencial erosivo.

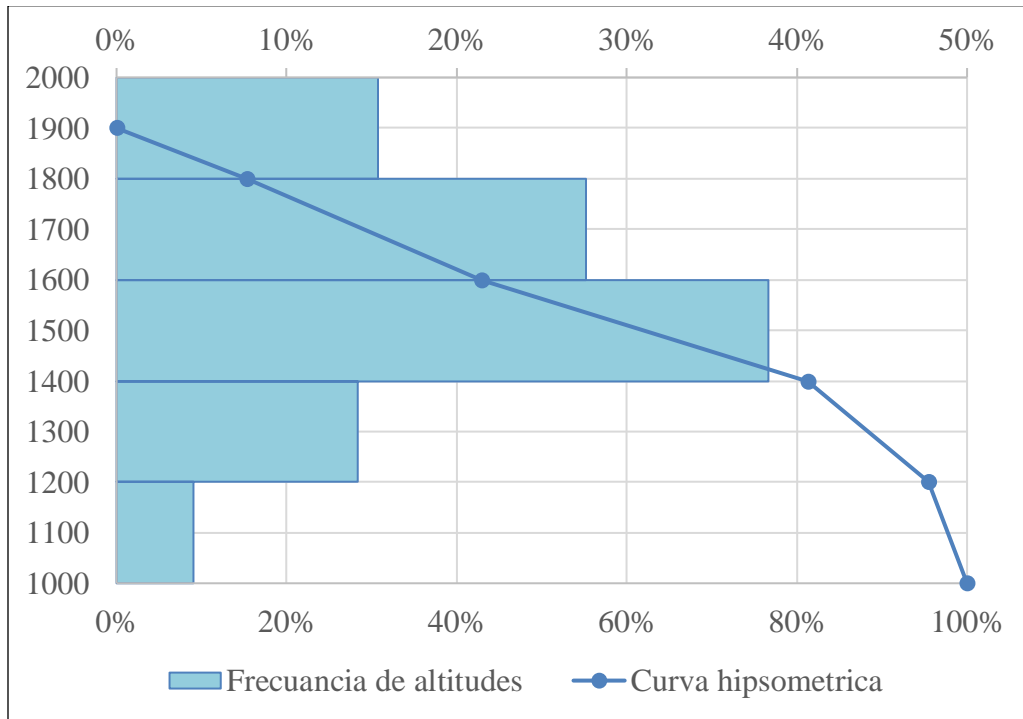


Figura 37. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la subcuenca, por autor, 2019.

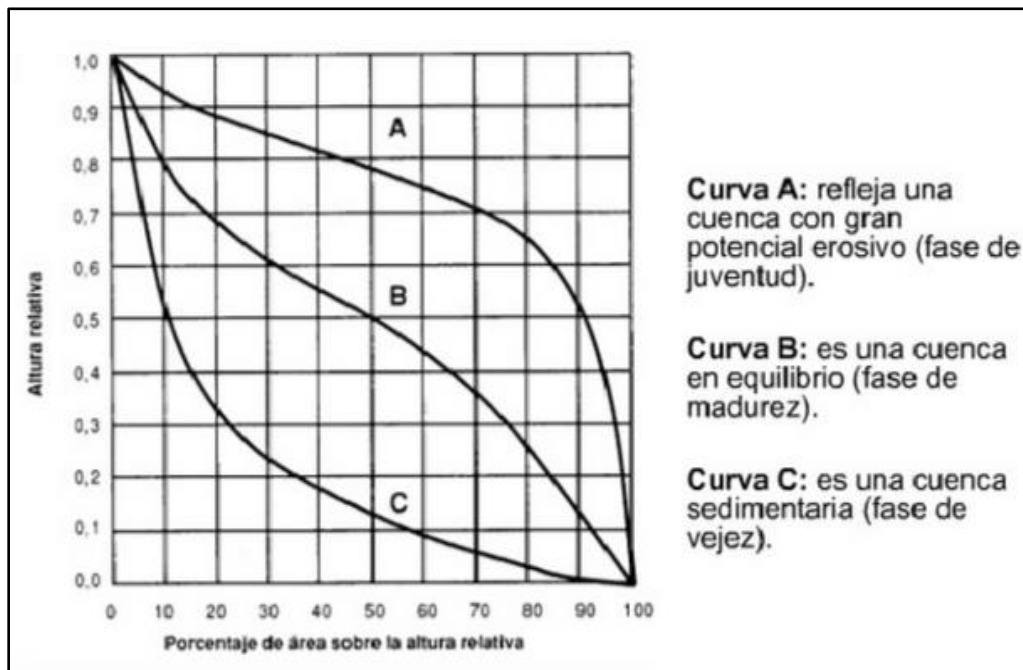


Figura 38. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión, por Strahler, 1964.

Distribución de la variable pendiente en la zona de estudio.

Del análisis del mapa de pendientes realizado en su respectivo procesamiento surge la distribución presentada en la figura 39, apoyada con la tabla 6.

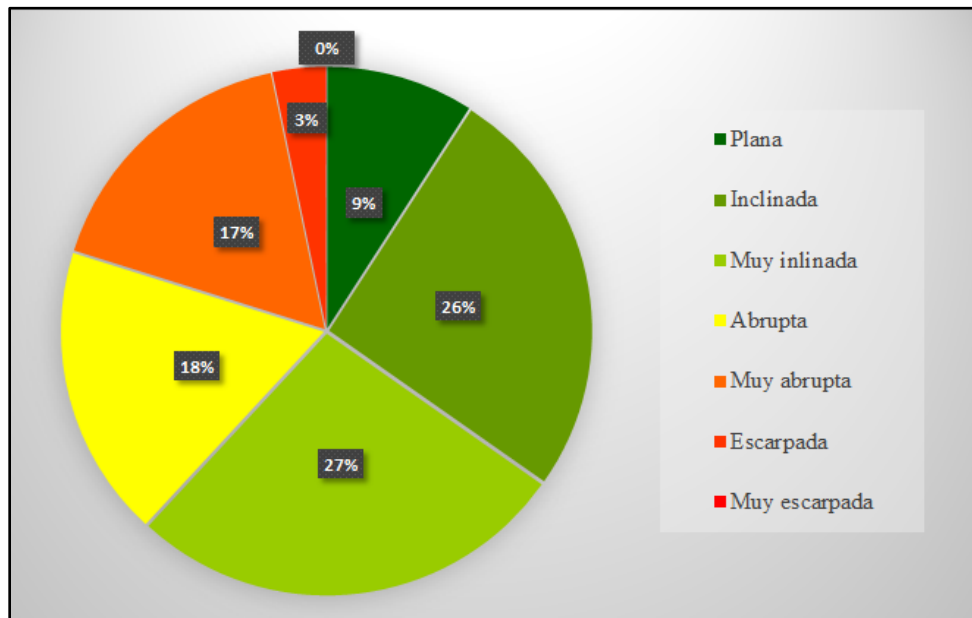


Figura 39. Distribución de la variable pendiente, por autor, 2019.

Tabla 6

Distribución y clasificación de las pendientes en la zona de estudio

Clasificación	Descripción	Área (Km ²)	%
< 5°	Plana	1,48	9,08
6 - 10°	Inclinada	4,19	25,68
11 - 15°	Muy inclinada	4,42	27,09
16 - 20°	Abrupta	2,93	18,00
21 - 30°	Muy abrupta	2,75	16,84
31 - 45°	Escarpada	0,53	3,25
> 45°	Muy escarpada	0,01	0,04
Total		16,30	100,00

Nota: Distribución de la variable pendiente en el área total de la zona de estudio, por auto, 2019.

Observando el gráfico y la tabla se evidencia que más del 50% de las pendientes se ubican en el rango de 5 a 15°, pendientes inclinadas a muy inclinadas, la siguiente distribución más amplia

se encuentra en las categorías de abrupta a muy abrupta, pendientes entre 16 a 30°, con aproximadamente un 35%, siguen las pendientes planas, menores a 5°, con un 9%, y por último se encuentra un 3% en el rango de escarpada a muy escarpada, pendientes mayores a 30°

Distribución de las geoformas en la zona de estudio.

Otro dato morfométrico trata de la distribución de las geoformas en la zona de estudio, consiste en encontrar las áreas de los polígonos que forman las geoformas y mirar la distribución de cada clase de geoforma sobre la zona de estudio, se obtuvo el gráfico presentado el a figura 40, a partir de la tabla 7.

Tabla 7
Distribución de las geoformas en la zona de estudio.

Ambiente	Código	Nombre de la unidad	Área	Porcentaje %
Denudacional	De1	Ladera denudacional estable	6376820,00	38,63
	De2	Ladera denudacional activa	827937,64	5,02
	De3	Ladera denudacional muy activa	174222,13	1,06
Fluvial	Fac	Valle Coluvio aluvial	497027,56	3,01
	Fpa	Planicie aluvial	290012,03	1,76
Cárstico	Ks	Superficie cárstica con dolinas	753384,54	4,56
	Kv	Superficie con valles cársticos	3366319,96	20,39
Estructural	Sc1	Ladera Estructural	1801191,21	10,91
	Sc2	Escarpe Estructural de contrapendiente	542179,33	3,28
	Ss2	Escarpes poco activos	1878888,35	11,38
Total			16507982,74	100,00

Nota: Distribución de las geoformas en el área total de la zona de estudio, por auto, 2019.

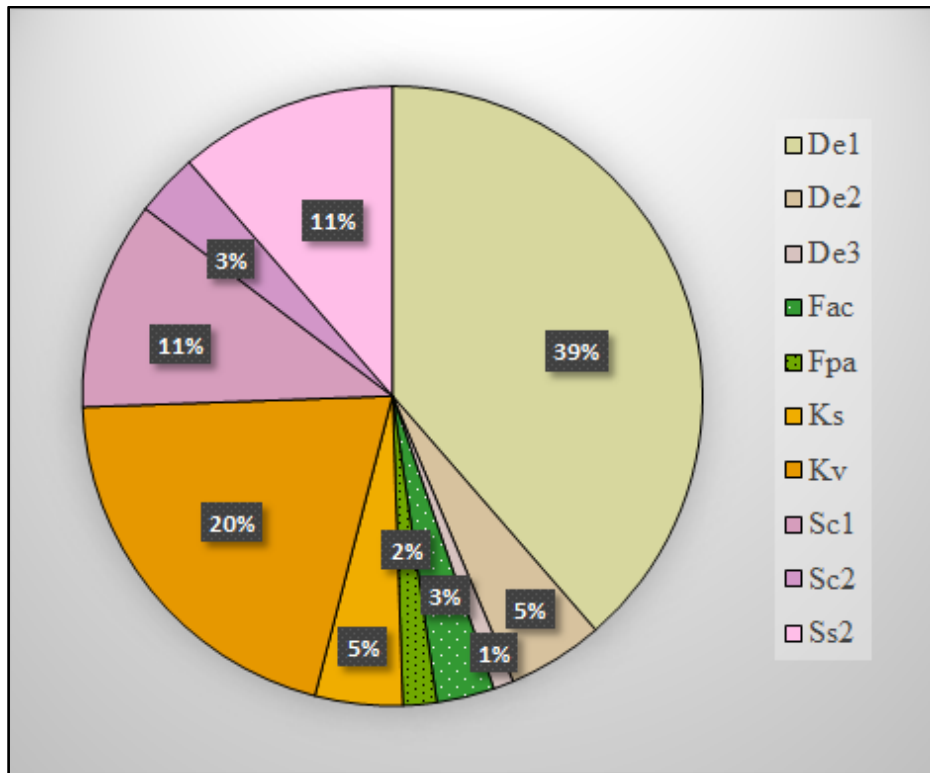


Figura 40. Distribución de las geoformas en la zona de estudio, por autor, 2019.

Observando el gráfico y la tabla anterior, se evidencia que en la zona de estudio las geoformas pertenecientes al ambiente denudacional son las que predominan en el área, con un porcentaje de aproximadamente el 45%, le sigue en ambiente estructural y cárstico, cada uno con un 25% y finalmente con un 5% se encuentra el ambiente fluvial; respecto a las geoformas que tiene mayor presencia en el lugar de estudio se encuentra dominando la ladera denudacional estable con un 39%, le siguen con un 20% las superficies con valles cársticos y en tercer lugar, con un empate, se encuentran los escarpes poco activos y las laderas estructurales con un 11%.

Análisis de susceptibilidad y amenaza

De las guías propuestas en el marco metodológico surge el siguiente análisis de amenaza, este consiste en asignar un peso de 1 a 5 (1 es una susceptibilidad muy baja y 5 es una susceptibilidad muy alta) a las diferentes variables que se presentan en los distintos mapas realizados en los

procesamientos anteriores (mapa geológico, mapa de pendientes y mapa geomorfológico), esto quiere decir que a criterio del autor se decidió cual variable tiene mayor o menor predisposición a deslizarse, una vez se asigna este peso se generan tres mapas nuevos conocidos como de susceptibilidad; cuando ya se tienen los respectivos mapas de susceptibilidad, se desarrolla un análisis de precipitación para obtener un mapa de un factor detonante, en este caso la lluvia, luego se ejecuta un procesamiento llamado algebra de mapas, que radica en operar matemáticamente estos mapas para generar uno nuevo, éste será el mapa de amenaza relativa.

Es importante aclarar que en el siguiente análisis de susceptibilidad y amenaza la zona de estudio pasa de ser el área rectangular estudiada en los ítems anteriores, a ser el sector de la cuenca hidrográfica, esto debido en un principio a la información recolectada en campo, y en segunda medida al tipo de análisis que se está realizando y con los datos que se están trabajando.

Mapas de susceptibilidad.

Susceptibilidad por pendiente.

La susceptibilidad por pendiente trata de atribuir un valor cualitativo a los distintos rangos de pendiente, se usó la clasificación que propone Carvajal (2012) en la propuesta para estandarizar cartografía geomorfológica. En la siguiente tabla se muestran los diferentes valores de susceptibilidad según la inclinación del terreno, también el peso asignado a criterio del autor.

Tabla 8

Distribución de la susceptibilidad en la cuenca, y Clasificación de nivel de amenaza por el criterio pendiente.

Clasificación	Área (m ²)	Distribución %	Susceptibilidad
< 5°	1580197,77	22,51	Muy baja
6 - 10°	437035,07	6,22	Baja
11 - 15°	2012092,80	28,66	Media
16 - 20°	1564949,28	22,29	Alta
> 20°	1426506,91	20,32	Muy Alta

Nota: Clasificación del criterio pendiente según la susceptibilidad a deslizarse, y asignación de peso para medir el nivel de amenaza, por auto, 2019.

La variable que se analizó para elegir el peso fue la pendiente, entre mayor inclinación tiene el área se considera más susceptible a deslizamientos. A continuación, se presenta un gráfico que muestra la distribución porcentual de esta susceptibilidad a deslizamientos.

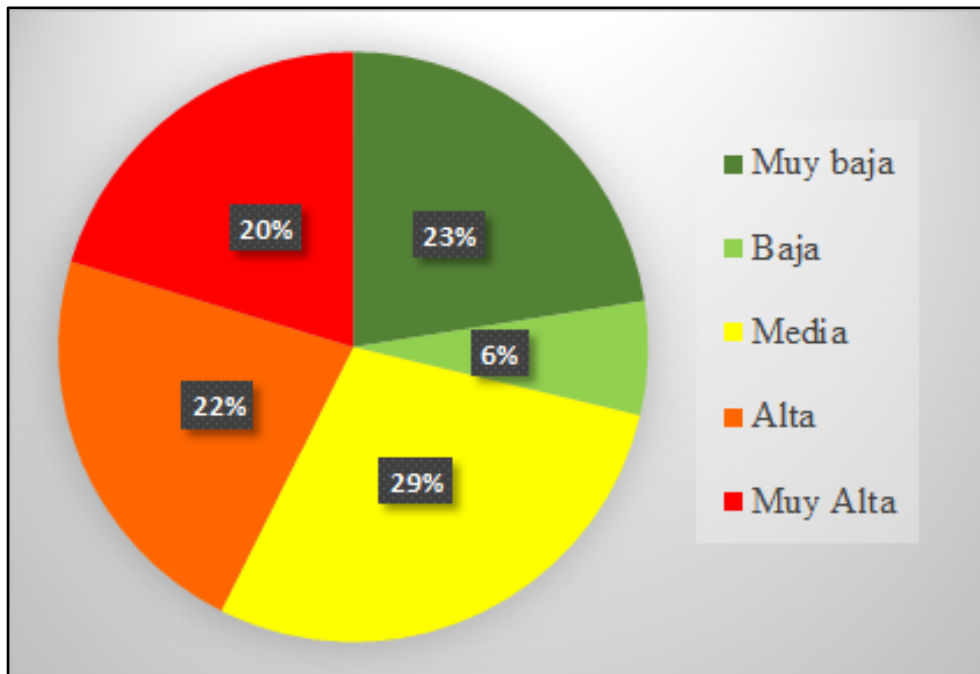


Figura 41. Distribución de susceptibilidad por pendiente en la cuenca, por autor, 2019.

Como se observa, aproximadamente un 42% del área total de la cuenca tiene una alta a muy alta susceptibilidad a deslizarse debido a la inclinación, un 29% tiene una susceptibilidad media, y el 29% restante está constituido por pendientes bajas a muy bajas, lugares en donde la ocurrencia de un deslizamiento es poco probable si se asocia al criterio de inclinación. En la figura 40 se ven las zonas en donde se encuentran estas altas, medias y bajas pendientes.

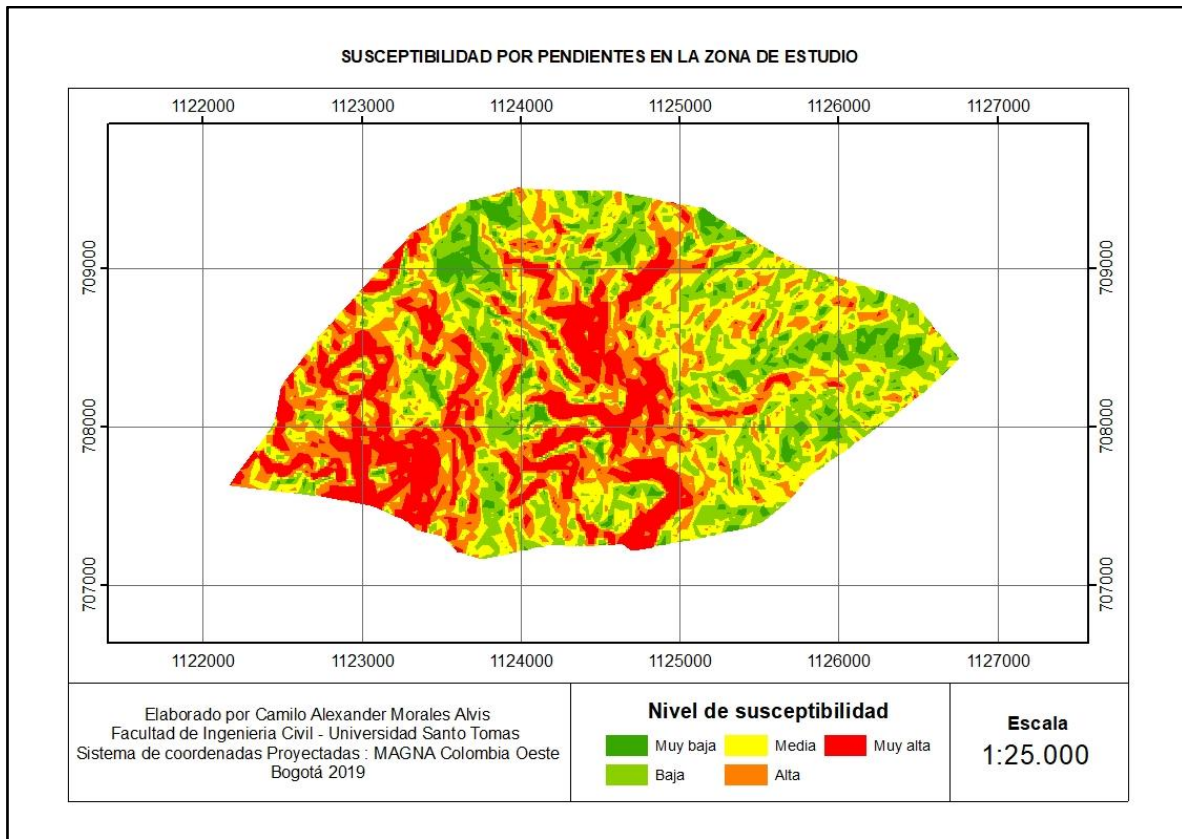


Figura 42. Mapa de susceptibilidad por pendiente, por autor, 2019.

El mapa muestra que las zonas de mayor pendiente se encuentran al occidente de la zona de estudio, justo en la zona donde se encuentran las geoformas asociadas a ambientes cársticos y estructurales, mientras que las pendientes medias y bajas se encuentran con mayor frecuencia al costado oriental de la zona de estudio, zona asociada a ambientes denudacionales y fluviales.

Susceptibilidad por Litología.

Las variables que se tuvieron en cuenta para la asignación del peso debido al parámetro de litología son la antigüedad y el grado de consolidación de la unidad geológica, en la tabla 9 se presenta el peso correspondiente para cada formación litológica.

Tabla 9

Distribución de la susceptibilidad en la cuenca, y Clasificación de nivel de amenaza por el criterio litología

Nombre	Área (m ²)	Distribución %	Peso	Susceptibilidad
Q2c	404627,78	5,75	5	Muy alta
K2hdlg	2560572,83	57,71	4	Alta
K2olta	1498426,08		4	Alta
K2E1sc	1945537,73	27,66	3	Media
K1K2cb	411032,69	5,84	2	Baja
TJsal	213241,64	3,03	1	Muy baja

Nota: Clasificación del criterio litología según la susceptibilidad a deslizarse, y asignación de peso para medir el nivel de amenaza, por auto, 2019.

Del siguiente gráfico circular se puede extraer que más del 60% de la cuenca tiene una muy alta a alta susceptibilidad a deslizarse debido a la litología, esto a causa de los depósitos cuaternarios menos resistentes, formados arena, gravas y arcillas, y a las formaciones constituidas en gran parte por calizas fosilíferas.

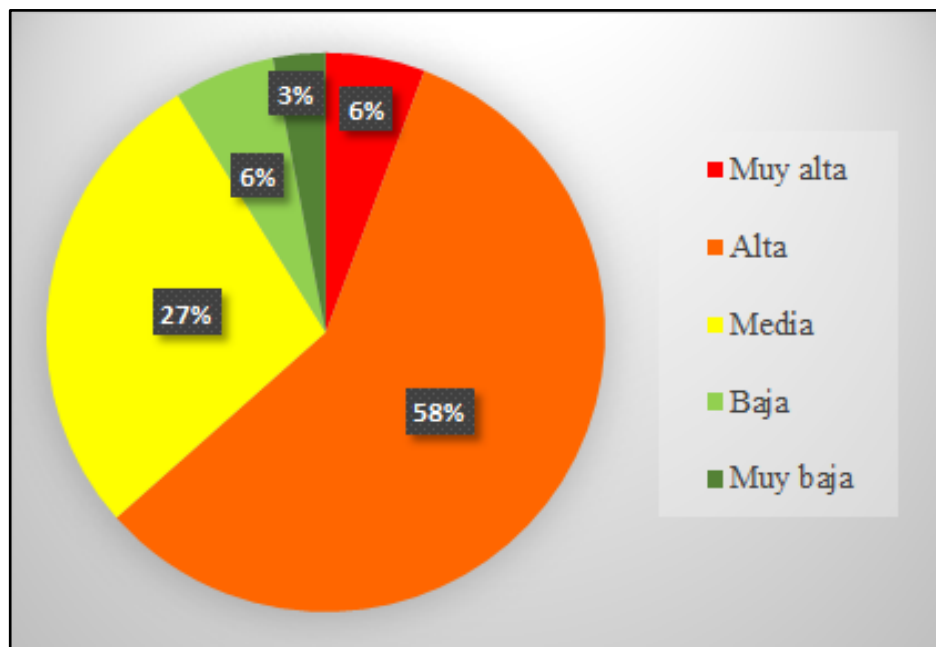


Figura 43. Distribución de susceptibilidad por litología en la cuenca, por autor, 2019.

Se escogieron las variables mencionados anteriormente por que son parámetros que definen la resistencia a la erosión de la roca, se sabe que una formación geológica es más resistente cuando

su grado de consolidación es más alto, y generalmente ese grado de consolidación es mayor o aumenta con la edad de la roca, sin embargo no aplica para las formaciones Hondita-Lomagorda y La Tabla, ya que estas están constituidas por rocas que pueden erosionarse muy rápido por acción del agua, en la figura 44 se presenta el mapa de susceptibilidad obtenido para el mapa de litología.

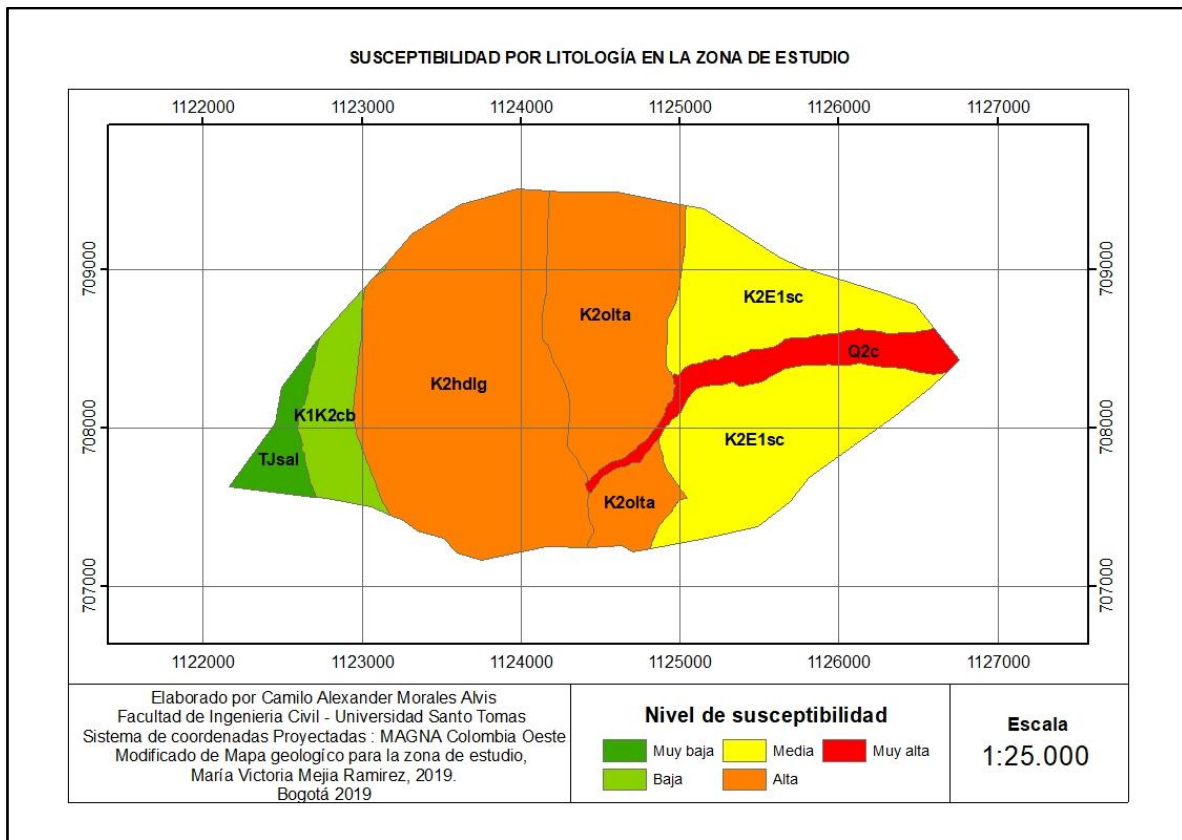


Figura 44. Mapa de susceptibilidad por litología, por autor, 2019.

Se observa que las formaciones que se considera más susceptibles a deslizamiento están al lado centroccidental de la zona de estudio, estas son las formaciones Hondita-Lomagorda, y en el centro los abanicos cuaternarios antiguos, las formaciones con susceptibilidad media se ubican al oriente de la cuenca, sobre la formación Seca, por último con una susceptibilidad baja a muy baja

al extremo occidental del mapa se encuentran las formaciones más antiguas Caballos y Saldaña pertenecientes a los periodos Cretácico y Triásico respectivamente .

Susceptibilidad por geomorfología.

Para elegir el peso asociado a el parámetro de geomorfología, se escogió como criterio principal las características físicas y el estado actual de las geoformas, también se tuvo en cuenta el ambiente y la vegetacion, ya que estos parámetros definen la forma de la unidad, en la tabla 10 se expone el peso asignado a cada geoforma a criterio del autor y su distribución en la cuenca analizada.

Tabla 10
Distribución de la susceptibilidad en la cuenca, y Clasificación de nivel de amenaza por el criterio geomorfología

Ambiente	Código	Área (m ²)	Distribución %	Peso	Susceptibilidad
Cárstico	Ks	450645,83	6,42	4	Alta
Cárstico	Kv	2505503,84	35,68	4	Alta
Estructural	Sc2	131159,87	2,01	4	Alta
Denudacional	De1	1292918,87	18,41	2	Baja
Denudacional	De2	814517,72	11,60	3	Media
Estructural	Ss2	391961,32	5,58	3	Media
Denudacional	De3	174222,13	2,48	5	Muy alta
Estructural	Sc1	840995,59	11,97	5	Muy alta
Fluvial	Fac	411123,64	5,85	1	Muy baja

Nota: Clasificación del criterio geomorfología según la susceptibilidad a deslizarse, y asignación de peso para medir el nivel de amenaza, por autor, 2019.

Como muestra la tabla algunas unidades especiales como los escarpe poco activos pertenecientes al ambiente estructural, las laderas denudacionales poco activas y la planicie aluvial del ambiente fluvial tienen valores de medios a muy bajos, esto debido a que sus características litológicas que las hacen considerar menos susceptibles a deslizarse, en el caso de las laderas denudacionales y los escarpes estructurales su poca actividad erosiva y la inclinación,

y por parte de la planicie aluvial su forma horizontal, las otras geoformas tienen susceptibilidad alta a muy alta y su distribución en la cuenca se ve más claro en el siguiente gráfico.

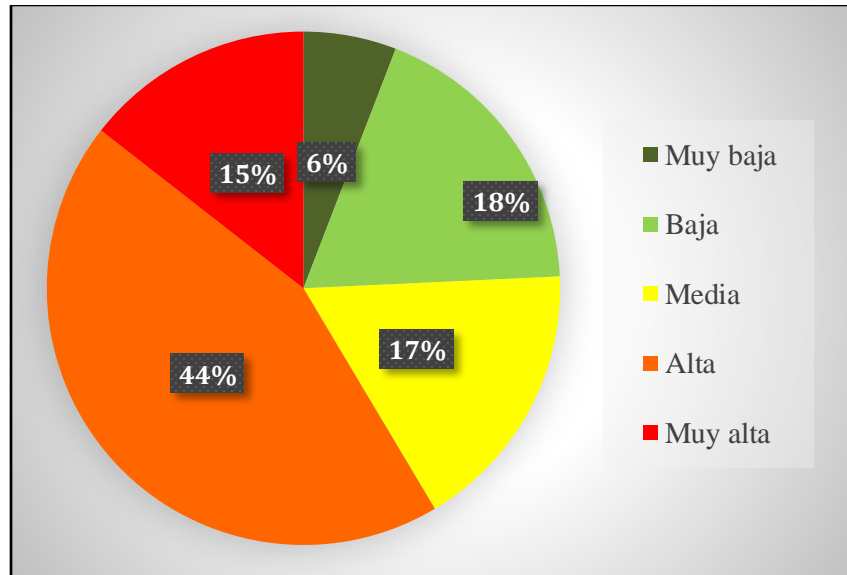


Figura 45. Distribución de susceptibilidad por geomorfología en la cuenca, por autor, 2019.

Como se ve en el diagrama circular, debido al parámetro geomorfología más del 50% del área de la cuenca es susceptible a deslizamientos, y un 17% tiene susceptibilidad media, las geoformas más susceptibles a deslizarse son las asociadas a los ambientes cársticos, sin embargo, otras geoformas pertenecientes a los ambientes denudacional y estructural también califican como susceptiblemente altas a muy altas.

En la figura 46 se puede apreciar que el nivel de susceptibilidad alto a muy alto está en la parte centro-occidental de la zona de estudio, sobre las geoformas asociadas a ambientes cársticos y estructurales, mientras que las geoformas con menor nivel de susceptibilidad se encuentran al costado oriental del mapa donde predominan las zonas bajas y planas del ambiente denudacional y fluvial.

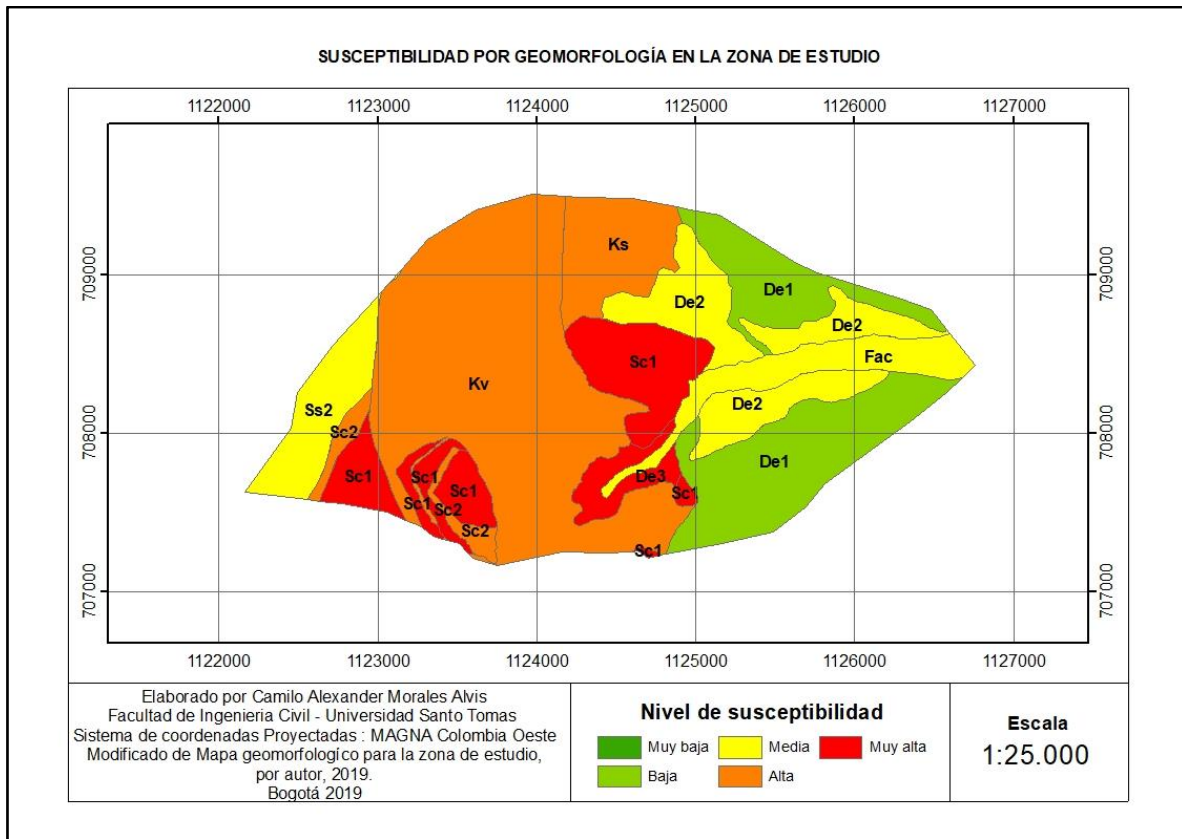


Figura 46. Mapa de susceptibilidad por geomorfología, por autor, 2019.

Factores externos.

Precipitación.

El mapa de precipitación en la cuenca resulta de una aplicación del método IDW de ArcMap, luego de subir las estaciones hidrológicas como shepfiles, con sus respectivos vales de precipitación, se aplicó esta función que lo que hace es interpolar valores de celda mediante distancia inversa ponderada, obteniendo de esta forma una imagen raster de la cuenca en la que la herramienta IDW asigno un valor de precipitación para cada una de las celdas, finalmente, en la figura 47 se presenta el mapa de precipitación acompañado de unas isoclinas que cumplen la función de mostrar gráficamente los valores de lluvia a través del área de la cuenca.

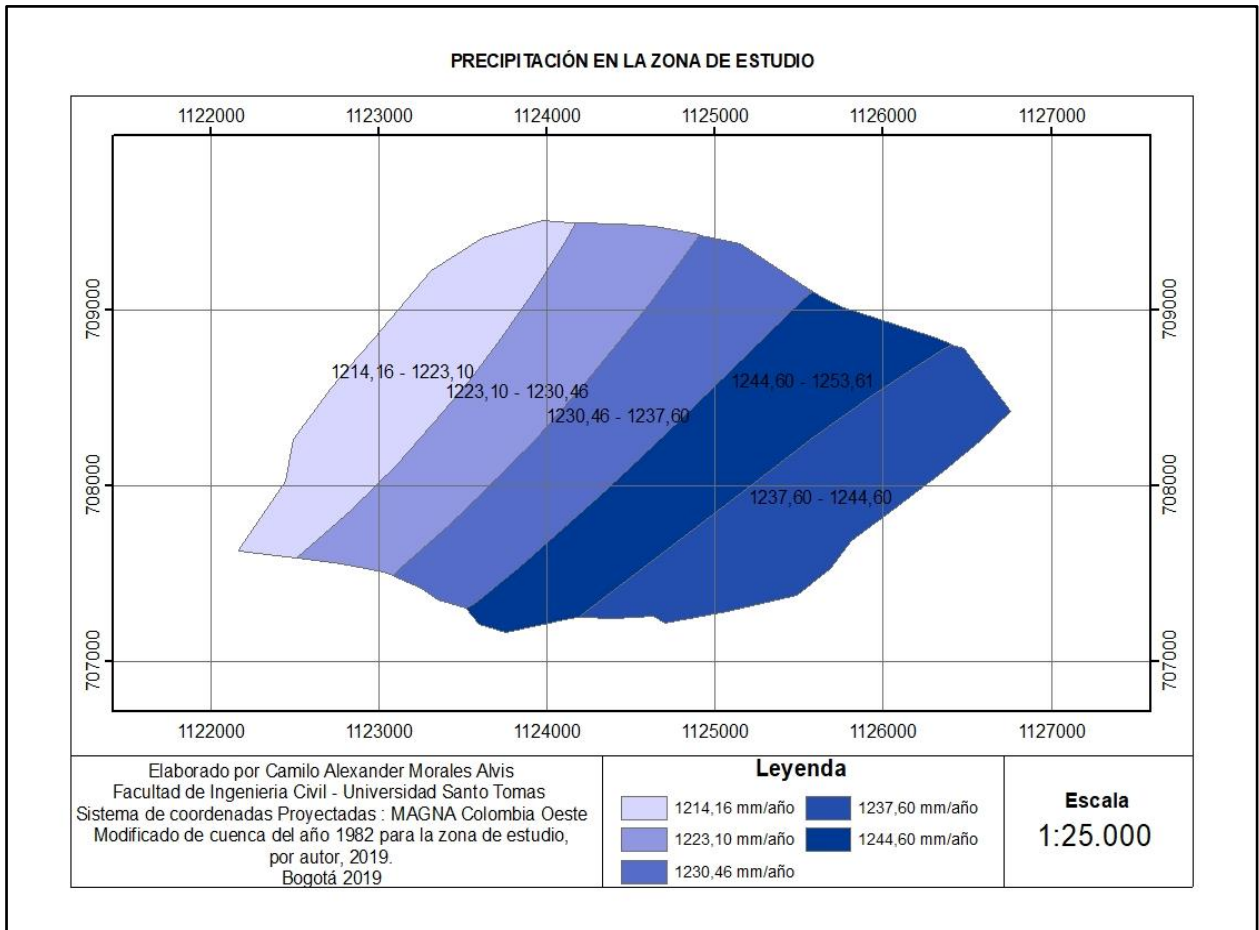


Figura 47. Precipitación media anual en la cuenca, por autor, 2019.

En la siguiente tabla se muestran los valores medios de precipitación encontrados para cada una de las estaciones que se usó para el análisis.

Tabla 11

Precipitación media anual de las estaciones

Estación	Precipitación media anual (mm)
PTE SALADOBLANCO R	1165,45
VISO EL	1226,05
ACEVEDO	1601,90
INSFOPAL	1082,75

Nota: Precipitación media anual para las estaciones, por auto, 2019.

Amenaza relativa.

Para llegar al mapa de amenaza final como primer paso se aplica la función algebra de mapas al mapa de susceptibilidad por pendiente y al de precipitación, esto debido a que a criterio del autor la característica que tiene mayor relevancia frente a este tipo de precipitación es la pendiente, puesto que en las zonas en donde la pendiente es alta el agua fluye con rapidez, no se acumula, mientras que en zonas de pendiente baja el agua si puede llegar a ocasionar problemas de estabilidad, luego de sumar el mapa de pendientes con la precipitación se reclasifica, teniendo así, el mapa que se presenta en la figura 48.

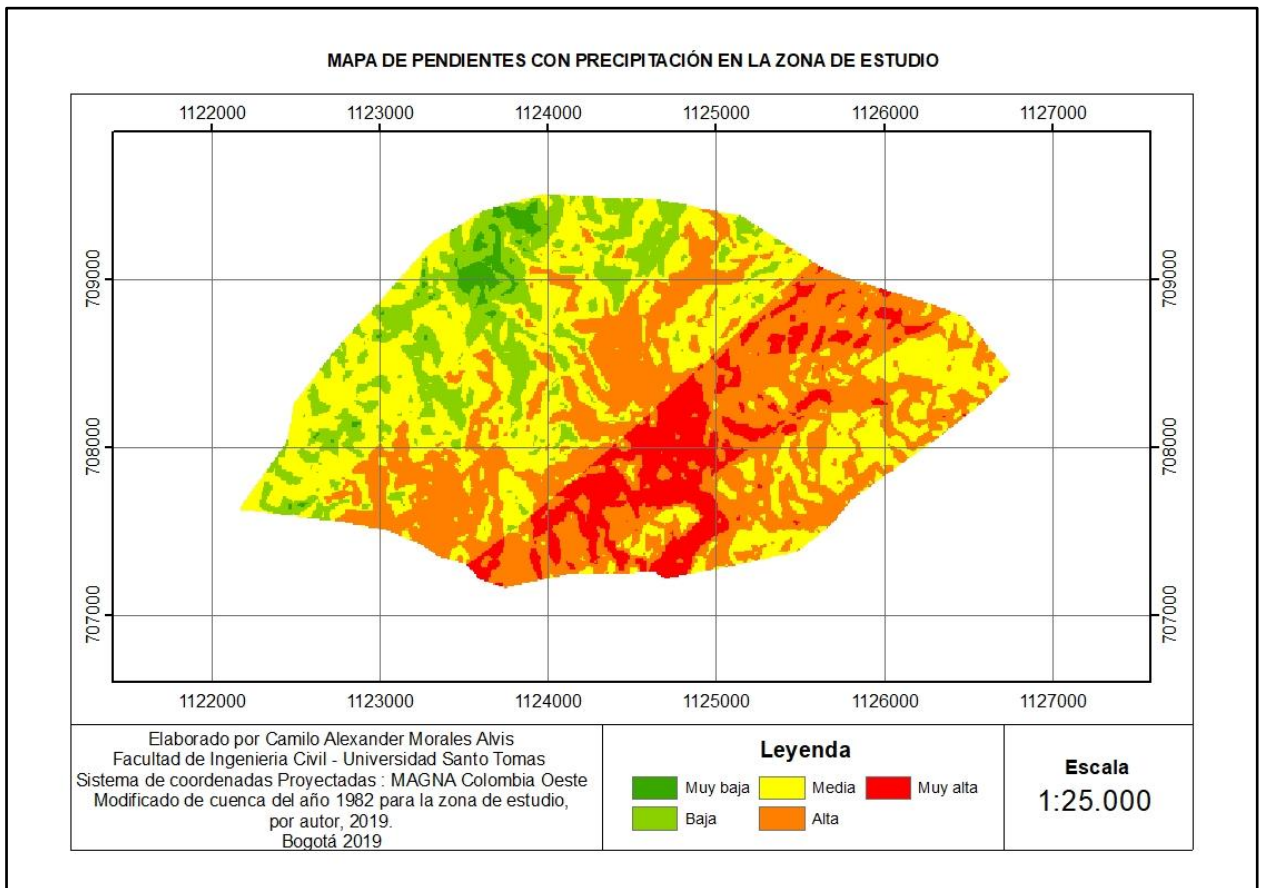


Figura 48. Mapa de pendientes sumado con mapa de precipitación, por autor, 2019.

Paso seguido se suman los mapas de susceptibilidad restantes con el creado anteriormente, a este nuevo mapa se le tendrá que hacer una nueva reclasificación en donde el nivel máximo de amenaza posible será 15, este caso se presentaría si se llegaran a cruzar las zonas en donde el peso asignado a las celdas de los mapas sea de 5, como son tres los mapas que se suman, el valor máximo de celda posible sería 15, y el menor 3, en la tabla 12 se muestra esa nueva reclasificación.

Tabla 12
Rangos de reclasificación

Nivel de Amenaza	Rangos de reclasificación de peso
Muy baja	[1 - 3]
Baja	(3 - 6]
Media	(6 - 9]
Alta	(9 - 12]
Muy alta	(12 - 15]

Nota: Nuevos rangos de reclasificación para el mapa de amenaza final, por autor, 2019.

Luego de aplicar la reclasificación al mapa de amenaza relativa secundario se genera el mapa de amenaza relativa final junto con una distribución porcentual del nivel de amenaza sobre el área de la cuenca, esto se presenta en la figura 49, 50 y en la tabla 13.

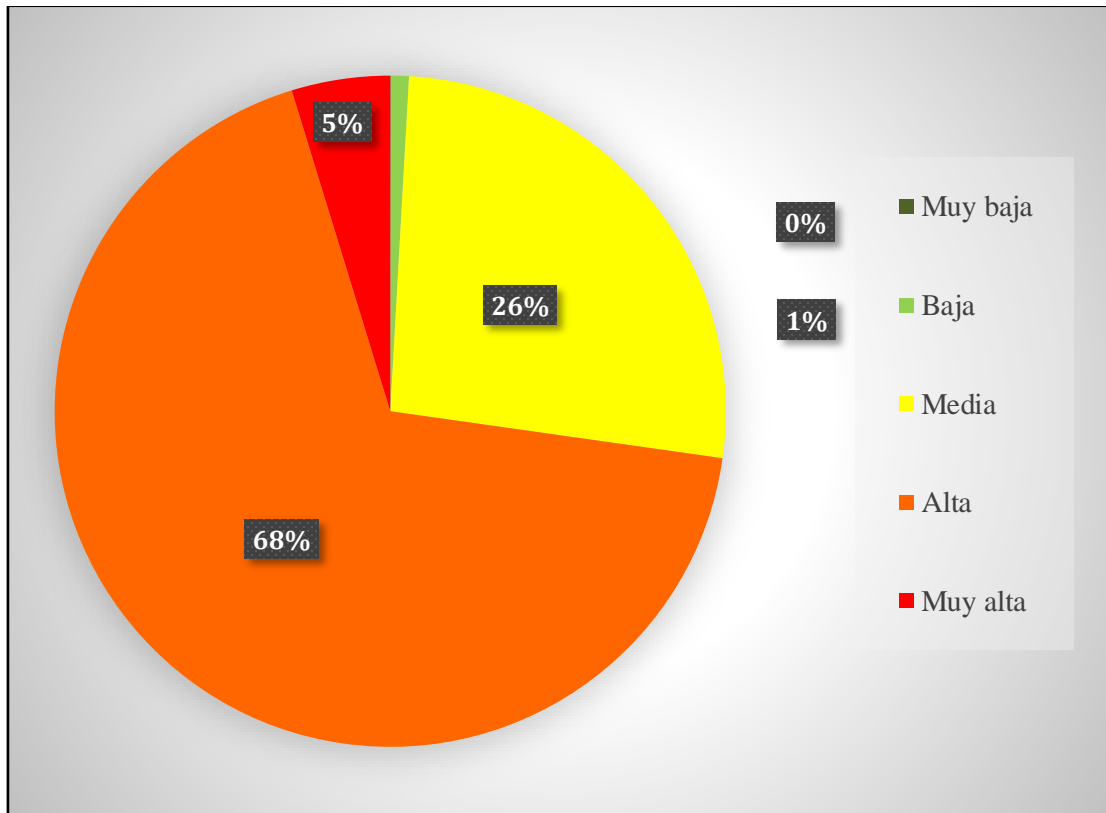


Figura 49. Distribución porcentual de la amenaza en la cuenca, por autor, 2019.

Tabla 13
Distribución porcentual de la amenaza

Nivel de amenaza	Área (m ²)	Distribución %
Muy baja	1659,97	0,02
Baja	60772,95	0,87
Media	1842756,28	26,34
Alta	4757738,16	68,02
Muy alta	331943,15	4,75

Nota: distribución porcentual de la amenaza en el área de la cuenca.

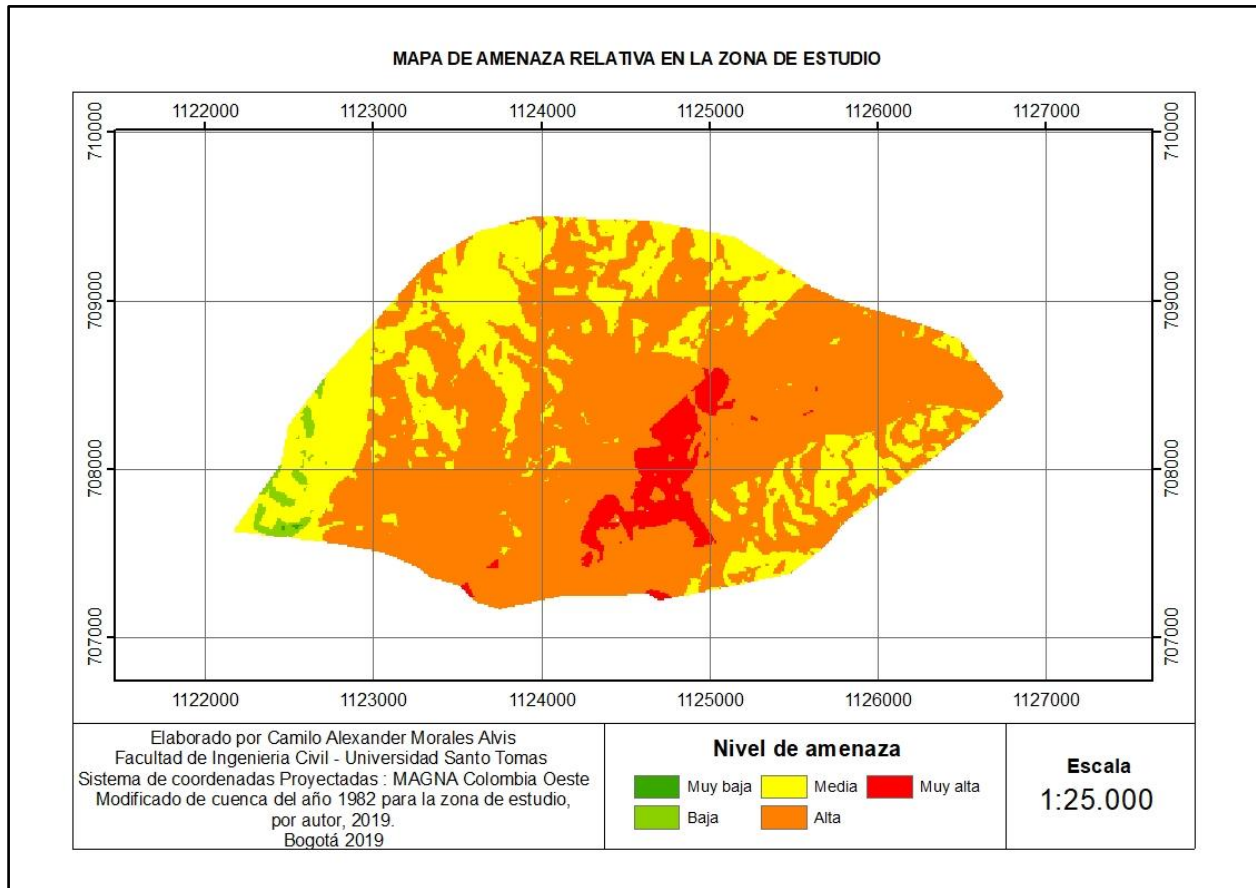


Figura 50. Amenaza relativa en la cuenca, por autor, 2019.

Observando el mapa, el gráfico y la tabla se entiende que la cuenca tiene un potencial muy alto a sufrir deslizamientos, más del 70% de la cuenca tiene una amenaza alta a muy alta, la zona en donde la amenaza es mayor es en la parte central de la cuenca, justo en la corona del deslizamiento, las zonas en donde la amenaza es media se ubican en el costado occidental, noroccidental y suroriental de la cuenca, alrededor de la zona del movimiento en masa, por último, la amenaza baja a muy baja está al extremo occidental y en el extremo occidental de la cuenca.

Capítulo 4

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

De la fotointerpretación se pudo extraer información sobre características de las diferentes geoformas y litologías, datos clave para el buen desarrollo del trabajo, como ejemplo de esto están los tipos de drenajes, a través de esto se pudo verificar la existencia de diferentes formaciones, asociando el tipo de drenaje a la litología, además, el trazado de toda la red de drenajes permito definir límites de algunas geoformas y cambios de un tipo de litología a otra. Por otro lado, esta interpretación permite entender y construir un modelo general con la información geográfica de la zona de estudio

Con respecto a la morfodinámica, el área de estudio está prácticamente delimitada por una serie de pliegues y fallas, al norte se limita por la falla de Timaná y el sinclinal de La Esperanza, al occidente se encuentra la falla Mortiñal, al suroriente se encuentra la falla de La Estrella y por último al costado oriental el Anticlinal de Timaná, además de que esta zona está clasificada según el SGC como un sector de alta sismicidad.

Se identificaron diez tipos de geoformas en la zona de estudio, de las cuales tres pertenecen al ambiente Denudacional y ocupan un 30% del área total de la zona de estudio, dos pertenecientes al ambiente Cárstico se distribuyen por el área de trabajo y abarcan más del 40%, del ambiente estructural 3 formas ocupan aproximadamente el 20%, y por último un 6% pertenece a geoformas del ambiente Fluvial.

La geoforma que tiene más presencia en la zona analizada son las superficies con valles kársticos, está tiene una susceptibilidad alta debido a que son generadas por la disolución de calizas, se forman cuando se generan cavernas bajo la superficie debido a la acción del agua,

luego el material se hunde y se forman estos valles cársticos muy escarpados, también pueden formarse superficies con dolinas.

Al analizar la morfometría de la cuenca se encontró que es una subcuenca de forma oval - redonda, el cauce principal de la cuenca tiene una pendiente de 14%, lo cual hace que se considere fuertemente inclinado, otro parámetro analizado arrojó que la cuenca refleja un gran potencial erosivo, lo que quiere decir que es una cuenca en fase de juventud, muy susceptible a presentar movimientos en masa.

Se encontró que en el 44% de la zona pueden ocurrir deslizamientos debido a las altas inclinaciones, mayores a los 16° , y que estas altas pendientes se ubican en las zonas de mayor amenaza, alrededor de la corona del deslizamiento y en las superficies con valles cársticos.

Un 64% del área de la cuenca tiene una susceptibilidad alta a muy alta a deslizarse debido a la litología, pues se considera que las formaciones que contienen Calizas fosilíferas son muy propensas a causar movimientos de tierra, también el depósito cuaternario que se distribuye a través del eje del deslizamiento es considerado muy susceptible, ya que los materiales que lo componen son poco consolidados o inconsolidados.

La cuenca tiene una susceptibilidad alta a deslizarse visto desde el parámetro de geomorfología, se sabe que las geoformas de origen cárstico ocupan más del 40% de área total de la zona de estudio y tienen una susceptibilidad alta.

Se sabe que uno de los tipos de movimiento en masa que presenta el área estudiada es el retrogresivo, se puede interpretar y observar que el deslizamiento avanza y seguirá avanzando en sentido opuesto a su movimiento, con dirección occidente, sobre las formaciones de calizas, esto debido a que las características geológicas, geomorfológicas, y geotécnicas lo indican.

El nivel de amenaza debido a características geomorfológicas es muy alto, pues se presenta un nivel de amenaza a movimientos en masa mayor al 70% del área total de la cuenca.

El método para la obtención del mapa de amenaza es relativo, puede variar dependiendo del análisis hidrológico, y de los pesos que se le den a cada una de las variables.

Recomendaciones

Para perfeccionar el análisis de amenaza por movimientos en masa, visto desde la geomorfología, se recomienda recolectar información de sismicidad del sector y confrontarla con los mapas de susceptibilidad obtenidos en este análisis.

Con el objetivo de pulir el mapa final de amenaza, se recomienda obtener información más detallada de la precipitación y realizar un análisis hidrológico completo de la zona.

A fin de aprovechar el análisis geomorfológico y de amenaza realizado en este proyecto de grado, se recomienda trasladar lo ejecutado a otros deslizamientos presentes en el municipio o a sus alrededores, ya que si se realiza un inventario de deslizamientos en áreas adyacentes, se podrían encontrar movimientos en masa producto de las mismas condiciones.

Se recomienda beneficiarse de los archivos relacionados con SIG, estos se pueden utilizar para comparar los distintos métodos para evaluar el nivel de amenaza, además de aportar otros parámetros para diferentes estudios geotécnicos, como por ejemplo, un análisis multitemporal del volumen de material transportado.

Referencias

- Cardona, O, (1992), Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo, Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo.
- Carvajal, J. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Colección de Guías y Manuales, Servicio Geológico Colombiano.
- Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena [CAM] (2017). Estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de origen geomorfológico y/o hidrológico (fenómenos de remoción en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) en el área urbana de los municipios de Timaná, Campoalegre y en el sector rural centro poblado de San Emilio del municipio de Colombia y veredas Tobo, San Marcos y Mantagua del municipio de Timaná, enmarcados en lo estipulado en el decreto 1807 de 2014.
- Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena [CAM] (S.F.). Timaná en Zona de Inundación. Recuperado de <https://www.cam.gov.co>.
- Cruden, D. M. & Varnes D. J. (1996). Landslide Types and Processes. In Special Report 247Landslides Investigation and Mitigation. Turner, A. K. and Schuster R. L. (eds.) TRBNRC, National Academy Press: Washington. Pág. 36-75.
- Galindo, C. (18 de junio de 2017). 7 desastres naturales que enlutaron a Colombia. Recuperado de <https://www.colombiamegusta.com>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC] (2011), *Geografía de Colombia*, Colombia, Comité editorial del IGAC.
- Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. (S.F.). Gestión del riesgo. Minambiente. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co>.

Montero (2017). Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Publicaciones especiales geológicas, servicio geológico colombiano.

Redacción el tiempo. (17 de abril de 1996). Timaná en Zona de Inundación. El Tiempo. Recuperado de <https://www.eltiempo.com>.

UAECD, (S.F.). SIG. Recuperado de <https://www.catastrobogota.gov.co>.

Vargas, R. (S.F.). *Amenazas geológicas del departamento del Huila*, 04. Recuperado de <http://ingenieria.usco.edu.co/museo/images/Amenazas.pdf>.

Viveros, L, et al, (2018). Factores geológicos e ingenieriles asociados al deslizamiento de tierra en la vereda el tobo. Timaná (Huila-Colombia).

Bibliografía

Barrantes G, et all, (2011), efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de cinchona, Costa Rica.

Libro de fotointerpretación

Alvarado, E.J., Barrera, J.R. (2015). Evaluación geomorfológica, multitemporal, hidrológica y geotécnica para el área comprendida en las coordenadas n: 963019,58 e: 1059435, n: 963234, e: 1059435, n: 962712, e: 1059929, n: 962651, e: 1059651 municipio de Restrepo Meta.

Ariztizábal, E., Shuichiro Y. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de aburra. Revista DYNA, Volumen 73 (149), 05-16.

Arroyo, L. (2012). Esbozo histórico de la geomorfología y su papel como ciencia aplicada en el contexto de los peligros naturales y los planes reguladores. Revista Geográfica de América Central, N° 48, 15-34.

Carvajal, E. (17 de octubre de 2017). La razón por la que Colombia es el país más lluvioso del mundo. Recuperado de <http://www.elcolombiano.com/>.

Davies, E. (20 de septiembre de 2015). ¿Cuál es el lugar más húmedo del planeta? Recuperado de <https://www.bbc.com/>.

Díaz, J, (1998), *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, Bucaramanga, Colombia, Ingeniería de Suelos Ltda.

Engeset, R.V., Weydahl, D.J. (1998). Analysis of glaciers and geomorphology on Svalbard using multitemporal ERS-1 SAR images.

Flórez, A, (2003), *Colombia: evolución de sus relieves y modelados*, Colombia, Universidad Nacional de Colombia UNIBILBOS.

Grandolini, G. (7 de octubre de 2012). Colombia: Innovadora respuesta a los desastres naturales. Recuperado de <http://blogs.worldbank.org/>.

IBAL S.A. (2009). Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Microcuenca de las Quebradas Las Panelas y La Balsa. Recuperado de <http://www.cortolima.gov.co/>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales [IDEAM] (2015), Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D.C, Colombia. Pág. 496.

Marín, R, (1992), *Estadísticas sobre el recuso agua en Colombia*, Colombia, Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras.

Maskrey, A, (1993), *Los desastres no son naturales*, La RED.

Molina, G. Z., Albarran A.J. (2012). Análisis multitemporal y de la estructura horizontal de la cobertura de la tierra: Parque Nacional Yacambú, estado Lara, Venezuela.

Otras ciudades. (24 de enero de 2018). 10 tragedias naturales que enlutaron a Colombia en la última década. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/>.

Redacción Actualidad. (5 de marzo de 2015). Colombia, Brasil y Perú, entre los 10 países que más agua tienen en el mundo. Recuperado de <https://www.elspectador.com/>.