



ANEXO B

LIBRO DE INVESTIGACIÓN:
“ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN
MASA EN EL MUNICIPIO DE HERVEO, TOLIMA A
ESCALA 1:25.000 APLICADO A LA GUÍA METODOLÓGICA
DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO DEL 2017.”
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla de contenido

Introducción.....	10
1. Localización.....	11
2. Metodología.....	13
2.1 Fase 1: Seminario de investigación.....	13
2.2 Fase 2: Pre-Campo	14
2.3 Fase 3. Trabajo de campo	15
2.4 Fase 4. Procesamiento de la información	16
2.5 Fase 5. Análisis de resultados.	17
2.6 Fase 6. Elaboración y entrega del documento final	18
3. Estado del arte.....	18
4. Contexto geológico	23
5. Unidades geológicas superficiales (ugs)	25
5.1. Descripción de las unidades geológicas superficiales (UGS).....	27
5.1.1. Roca de muy buena calidad andesitas (Rmba).....	27
5.1.2. Roca de muy buena calidad flujos andesíticos (Rmbfa).....	28
5.1.3. Roca de muy buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca (Rmbsvfc).	29
5.1.4. Roca de buena calidad anfibolitas del intrusivo de Padua (Rbainp).	29
5.1.5. Roca de buena calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rbecc).....	30

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000

5.1.6. Roca de buena calidad Andesitas (Rba).	30
5.1.7. Roca de buena calidad flujos andesíticos (Rbfla).	31
5.1.8. Rocas de buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca (Rbsvfc).	32
5.1.9. Roca de moderada calidad cuarcitas del complejo Cajamarca (Rmocucc).	32
5.1.11. Roca de moderada calidad tonalitas del intrusivo neisico de Padua (Rmotinp).	34
5.1.12. Roca de moderada calidad tonalitas del stock de Maizales (RmotsM).	34
5.1.13. Roca de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rmoecc).	35
5.1.14. Roca de moderada calidad andesitas (Rmoa).	36
5.1.15. Roca de moderada calidad flujos andesíticos (Rmofa).	37
5.1.16. Roca de moderada calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca (Rmosvfc).	37
5.1.17. Roca de mala calidad cuarcitas del complejo Cajamarca (Rmcucc).	38
5.1.18. Roca de mala calidad anfibolitas del intrusivo de Padua (Rmainp).	39
5.1.19. Roca de mala calidad tonalitas del intrusivo neisico de Padua (Rmtinp).	39
5.1.20. Roca de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rmecc).	40
5.1.21. Roca de mala calidad filitas del complejo Cajamarca (Rmfcc).	41
5.1.22. Roca de muy mala calidad anfibolita del intrusivo de Padua (Rmmainp).	42
5.1.23. Roca de muy mala calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rmmecc).	43
5.1.24. Suelo residual limo-arcilloso de los esquistos del complejo Cajamarca (Srlacecc).	44
5.1.25. Suelo residual arcilloso de las filitas del complejo Cajamarca (Srafcc).	45
5.1.26. Suelo residual anfibolitas del intrusivo de Padua (Sraip).	45

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000

5.1.27. Suelo residual de lavas andesíticas (Srla).	45
5.1.28. Suelo residual limo-arcilloso del intrusivo neisico de Padua (Srlainp).	46
5.1.29. Suelo residual tonalitas del intrusivo neisico de Padua (Srtinp).	46
5.1.30. Suelo transportado aluvial (Sta)	47
5.1.31. Suelo transportado coluvial (Stc).	47
5.1.32. Suelo transportado depósitos volcanoclasticos primario flujo piroclástico (Stdvpfp).	48
5.1.33. Suelo transportado deposito volcaniclastico secundario, flujo laharico aterrazado (Stdvsfla).	49
6. Geología estructural	50
7. Subunidades geomorfológicas	56
7.1. Descripciones geomorfológicas	60
7.1.1. Ambiente denudacional	60
7.1.2. Ambiente fluvial.....	71
7.1.3. Ambiente estructural	73
7.1.4. Ambiente volcánico.....	78
8. Morfometria	85
8.1 Pendiente.....	85
8.2 Curvatura	86
9. Morfodinamica.....	87
9.1 Movimientos en masa y su relación con las unidades geológicas superficiales	90
10. Coberturas.....	93

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000

10.1. Tejido urbano continuo.....	95
10.2. Pastos limpios	95
10.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales.....	96
10.4. Bosques de galería y ripario.....	96
10.5. Ríos.....	97
11. Cambio de coberturas.	98
12. Uso de suelos	100
12.1. Elaboración del mapa de usos del suelo actual	100
12.2. Uso de suelo actual.....	100
13. Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento.....	102
13.1. Método de Pesos de Evidencia (WofE).....	103
13.2. Cálculo de la función de susceptibilidad	104
13.3. Curva de éxito y validación del modelo.	105
13.4. Categorías de susceptibilidad por deslizamientos y flujos.	106
13.4.1. Susceptibilidad Alta.....	108
13.4.2. Susceptibilidad media.....	108
13.4.3. Susceptibilidad baja.....	109
14. Análisis de la zonificación de amenaza por movimientos en masa	110
14.1 Factor climático.....	110
14.2. Factor sismo	111
14.3. Amenaza relativa.....	112

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000

<i>14.3.1. Amenaza muy alta.</i>	113
<i>14.3.2. Amenaza alta.</i>	114
<i>14.3.3. Amenaza media</i>	114
<i>14.3.4. Amenaza baja.</i>	114
15. Conclusiones	115
16. Recomendaciones	119
Referencias bibliográficas	120

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio	12
Figura 2. Esquema explicativo de la metodología	13
Figura 3. Línea de tiempo	22
Figura 4. Mapa geológico de la zona de estudio	24
Figura 5. Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) a escala 1:25.000 Herveo-Tolima	27
Figura 6. Rocas de moderada calidad Cuarcitas del Complejo Cajamarca	33
Figura 7. Roca de moderada calidad Esquistos del Complejo Cajamarca.....	36
Figura 8. Roca de mala calidad esquistos del Complejo Cajamarca	41
Figura 9. Roca de mala calidad filitas del Complejo Cajamarca	42
Figura 10. Roca de muy mala calidad esquistos del complejo Cajamarca.....	44
Figura 11. Suelo transportado coluvial.....	48
Figura 12. Suelo transportado deposito volcanoclastico secundario flujo laharico aterrazado.	49
Figura 13. Mapa estructural y sus zonas críticas a escala 1:25000 Herveo-Tolima ...	54
Figura 14. Mapa de geomorfología de la zona de estudio	59
Figura 15. Porcentaje de las geoformas denudacionales del área de estudio.....	60
Figura 16. Cima (Dc).....	61
Figura 17. Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi)	63
Figura 18. Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional (Ddtr).....	64
Figura 19. Escarpe (De).....	65
Figura 20. Escarpe de erosión menor (Deeme).....	66
Figura 21. Ladera erosiva (Del)	67

Figura 22. Ladera ondulada (Dlo)	68
Figura 23. Lomeríos poco disectados (Dlpd).....	69
Figura 24. Loma denudada (Dld)	70
Figura 25. Lomo denudado (Dlde).....	71
Figura 26. Porcentaje de las geoformas fluviales de área de estudio	72
Figura 27. Escarpe de terraza de erosión (Ftee), Plano o llanura de inundación (Fpi) y Terraza de erosión (Ftee).....	73
Figura 28. Porcentaje de las geoformas estructurales de la zona de estudio	74
Figura 29. Espolón facetado (Sefc).	75
Figura 30. Gancho de flexión (Sgf).....	76
Figura 31. Ladera contrapendiente (Slcp) y Ladera estructural (Sle)	78
Figura 32. Porcentajes de geoformas volcánicas de la zona de estudio	79
Figura 33. Cráter volcánico (Vc).....	80
Figura 34. Domo volcánico (Vd)	81
Figura 35. Escarpe de flujo lahárico aterrazado (Vflae).....	82
Figura 36. Ladera volcánica (Vlg)	83
Figura 37. Lóbulo de flujo lahárico (Vlfl)	84
Figura 38. Mapa de pendientes de la zona de estudio	86
Figura 39. Mapa de curvatura	87
Figura 40. Porcentaje de los tipos de movimientos en masa presentes en la zona de estudio.	88
Figura 41. Flujos de tierra.....	89
Figura 42. Deslizamiento	89
Figura 43. Caída de roca	90

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000

Figura 44. Mapa de coberturas de la zona de estudio.....	94
Figura 45. Pastos limpios.....	95
Figura 46. Mosaico de cultivos y espacios naturales.....	96
Figura 47. Bosques de galería y ripario.	97
Figura 48. Ríos	98
Figura 49. Mapa de cambio de coberturas de los años 1990-2017 de la zona de estudio	99
Figura 50. Mapa de uso de suelo	102
Figura 51. Mapa de rangos LSI.....	105
Figura 52. Curva de rangos LSI	106
Figura 53. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos a escala 1:25000 de la zona de Herveo -Tolima.....	107
Figura 54. Cuadro de clasificación de amenaza.....	112
Figura 55. Mapa de zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:25000 -Herveo, Tolima	113

Lista de tablas

Tabla 1 Unidades geológicas superficiales (UGS).....	25
Tabla 2 Subunidades geomorfológicas	58
Tabla 3 Registro total de movimientos en masa.....	88
Tabla 4 Cantidad de movimientos en masa según la Unidad Geológica Superficial.	92
Tabla 5 Coberturas y sus usos del suelo actual	100
Tabla 6 Pixel de suelos	104
Tabla 7 Susceptibilidad por deslizamientos de área de estudio	107
Tabla 8 Estaciones pluviométricas	111

INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa son desplazamientos de un volumen de material conformado de roca, suelo, tierras y detritos ([Varnes, 1978](#)). Su movimiento se da en favor de la pendiente por la acción de la fuerza de gravedad que es dominado por factores naturales y antrópicos como la cobertura del suelo, la pendiente del terreno, las características intrínsecas de los materiales, la lluvia y la actividad tectónica y el uso inadecuado del territorio ([Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007](#)).

En Colombia, se han presentado en los últimos 100 años alrededor de 7.590 víctimas mortales, la afectación de 239.790 familias, todos vinculados a 11.800 movimientos en masa registrados ([Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres \(UNGRD\), 2020](#)). Debido a esto, “la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa es una herramienta primordial en la organización de los territorios” ([Rojas & Díez, 2012, págs. 233-243](#)).

En su territorio, Colombia cuenta con 1.103 municipios organizados, donde se encuentra el municipio de Herveo, al norte del Departamento de Tolima (región de investigación). La mayor parte del territorio de este municipio es montañoso, con un relieve característico de la Cordillera Central de los Andes colombianos. “De acuerdo con el plan municipal de gestión de riesgo de desastres, el principal fenómeno que genera problemática directa a la población, los bienes y el ambiente son los movimientos en masa que están asociados a fenómenos naturales y antrópicos” ([Cortolima, 2021](#)).

Este trabajo de investigación se enmarca principalmente en la estructura de un seminario de investigación, donde se desarrollarán estrategias enfocadas en el método científico mediante el estudio, planeación e intercambio de ideas. Además, busca impartir

conocimiento a través del análisis de la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Herveo, mediante la creación de un mapa a escala 1:25.000 tomando como base la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano ([SGC, 2017](#)).

1. LOCALIZACIÓN

El municipio de Herveo se localiza al norte del Departamento del Tolima, con una altura sobre el nivel del mar de 2,250 metros. Su temperatura promedio es de 23°C y La mayor parte del territorio de este municipio es montañoso, con un relieve característico de la Cordillera Central de los Andes colombianos. Sus principales accidentes geográficos son: La Pérdida, Morrón, Cerro Bravo, Contrabando, Cruz Gorda, Farallones y el Grito ([Cortolima, 2021](#)). La región presenta pendientes que varían de 8° a 55° (moderadamente abruptas a extremadamente).

Esta área se encuentra atravesada por ríos como Aguacatal, Cajones, Guali y quebradas como: El Frutillo, Honda, Los Eucaliptos, El Oso, Los Micos, La Viuda, Los Cerros, Los Santos, El Doce, Calera y La Cristalina. El área de estudio se encuentra en las planchas geológicas 206, 207 y 225 del Servicio Geológico Colombiano ([SGC, 2011](#)). Como se puede observar en la Figura 1.

2. METODOLOGÍA

Este proyecto de investigación se realizó llevando a cabo las fases que se mostrarán en el siguiente esquema Figura 2:

Figura 2

Esquema explicativo de la metodología.



2.1 Fase 1: Seminario de investigación.

En esta fase del proyecto, se abordaron diversas temáticas relacionadas con el campo de las Geoamenazas. El seminario se estructuró en 5 grupos, cada uno de los cuales fue responsable de presentar 8 exposiciones diferentes, organizadas en dos núcleos temáticos.

El primer núcleo consto de 12 exposiciones que abordaron las generalidades sobre los conceptos relacionados con las Geoamenazas.

El segundo núcleo se subdividió en siete subtemas específicos, abarcando amenazas derivadas de: actividad sísmica, actividad volcánica, movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, tsunamis, incendios forestales, y otras amenazas climáticas, tanto a nivel global como en el contexto de Colombia. La finalidad de este núcleo era comprender las problemáticas generadas por cada geoamenaza tanto para los asistentes del seminario como para los expositores, y recopilar información útil para tener en cuenta las Geoamenazas presentes en la zona de estudio.

Además, cada expositor del seminario debía completar un formato por exposición. Este formato incluía notas importantes tomadas durante la presentación, preguntas formuladas durante la socialización y, finalmente, una breve opinión sobre la charla. Toda esta información se compiló en un libro del seminario para el proyecto de investigación.

2.2 Fase 2: Pre-Campo

En esta segunda fase, se llevó a cabo la búsqueda de información bibliográfica para la generación de las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), la geomorfología, la susceptibilidad y su relación con los movimientos en masa. Esta búsqueda se realizó a través del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres (SIMMA). Además, se utilizó la memoria explicativa de la plancha 206 de INGEOMINAS y la Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 realizada por el Servicio Geológico Colombiano.

Con la información recopilada, se obtuvo el mapa de geología a escala 1:100.000 y se generaron los mapas de sombras, pendientes, morfodinámica y geomorfología. Estos mapas

fueron fundamentales para la fase de trabajo de campo, donde se corroboró y corrigió la información recolectada previamente para la zona de estudio.

2.3 Fase 3. Trabajo de campo

Para esta fase, se utilizaron los mapas de geología a escala 1:100.000, geomorfología, morfodinámica, sombras y pendientes. Estos mapas se utilizaron para realizar el trazo de fallas en la zona, la ubicación de movimientos en masa, la ubicación de UGS y la identificación de geoformas en el área. Además, se realizó la distribución de la zona a través de un mapa de rutas previamente investigadas para cubrir una mayor área.

En cada una de estas rutas, se registraron puntos georreferenciados mediante el uso de la aplicación Avenza Maps. En estos puntos, se recopilaron datos sobre las unidades geológicas superficiales identificadas. En determinadas ocasiones, se efectuaron paradas para verificar y, de ser necesario, corregir la información relacionada con la geomorfología del municipio.

En cada estación, se diligencio un formato para registrar la información relevante de las UGS y geomorfología para la escala de trabajo. Para la identificación de las UGS, se utilizaron formatos de caracterización de suelos, donde se registró la información sobre textura, color, humedad natural, características de los clastos y matriz, entre otros. También se utilizó el formato de caracterización de macizo rocoso, donde se recolectaron las principales características mineralógicas, de deformaciones y de la calidad de roca.

Para las estaciones geomorfológicas, se utilizó el formato de Caracterización Morfométrica de Subunidades Geomorfológicas (SGMF), que permitió registrar información relevante sobre las geoformas observadas y su ambiente.

2.4 Fase 4. Procesamiento de la información

Tras la fase de trabajo de campo, los puntos registrados en la aplicación fueron importados a ArcGIS para la creación del mapa de estaciones. A continuación, se utilizó la información recopilada en los formatos de UGS y geomorfología para elaborar los correspondientes mapas temáticos.

Se empleó el método estadístico bivariado WoE para elaborar el mapa de susceptibilidad. Para ello, se calcularon los pesos de evidencia finales (Wf) de las variables: UGS, pendientes, curvatura, cobertura del suelo, geomorfología y el catálogo de movimientos en masa. Estos pesos se sumaron en ArcGIS, generando los rangos del Índice de Susceptibilidad de Deslizamientos (LSI), que luego se reclasificaron y ordenaron en 100 percentiles. Esto permitió el cálculo y creación de la curva de éxito, a partir de la cual se calculó el área bajo la curva (ABC), obteniendo un porcentaje de ajuste del 88%, considerado aceptable. Basándose en esta curva de éxito, la susceptibilidad se categorizó siguiendo los rangos establecidos en la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano ([SGC, 2017](#)), clasificándose en tres categorías: alta, media y baja. Adicionalmente, se incorporaron otros insumos, como drenajes, necesarios para la correcta elaboración del mapa.

Para el cálculo de la amenaza fue necesario realizar el cálculo del detonante lluvia, para el cual se utilizaron 9 estaciones meteorológicas con las cuales se calcularon los valores de precipitaciones máximas diarias para varios periodos de retorno calculándose con una distribución de Gumbel tipo 1 ([Gonzalez Y & Padilla G, 2023](#)) donde para en este cálculo en específico se tomaron los valores de precipitaciones máximas de un periodo de retorno de 25 años según el servicio geológico Colombiano ([SGC, 2013](#)), donde estos valores se interpolaron

por el método IDW y los resultados se reclasificaron en 5 rangos dando así el factor detonante lluvia necesario para realizar la amenaza.

Para el detonante sismo se tomaron los valores de Peak Ground Acceleration (PGA) descritos en el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para un período de retorno de 475 años (SGC (2010) citado por Gonzalez & Padilla, 2023), donde para esta zona de estudio se ha asignado un rango de valores de 150-200 cm/s² a los cuales se les da una calificación 3 dándonos así el detonante sísmico de la zona de estudio.

Para realizar el mapa de amenaza se tomó el detonante lluvia y la susceptibilidad por movimientos en masa y se sumaron en ArcGIS al igual que la susceptibilidad con el detonante sismo, estos resultados se procesan en ArcGIS y se reclasifican en 5 categorías: Baja, media, alta y muy alta (SGC, 2013).

2.5 Fase 5. Análisis de resultados.

En esta fase, se integraron los datos obtenidos durante el trabajo de campo y los datos importados en ArcGIS para su respectivo análisis. Además de los mapas de UGS, pendientes, geomorfología y susceptibilidad, elaborados según el Método estadístico bivariado descrito en la guía metodológica del servicio geológico colombiano (SGC, 2017).

Se llevaron a cabo análisis del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa y del mapa de amenazas, con el objetivo de proporcionar conocimiento sobre la zonificación de áreas propensas a estos fenómenos en la zona de estudio. Este análisis permitió identificar las áreas con mayor amenaza a movimientos en masa y contribuirá significativamente a la planificación y mitigación de desastres en la región.

2.6 Fase 6. Elaboración y entrega del documento final

En la fase final de este proyecto de investigación, desarrollado en modalidad de seminario, se generó este libro específico que reúne toda la información obtenida durante el estudio. En él se encuentran los datos recolectados durante la fase de trabajo de campo, el análisis de los productos generados y las conclusiones sobre la susceptibilidad y la zonificación de amenazas en el Municipio de Herveo, Tolima. Además, el libro del seminario incluye anexos como los formatos utilizados, las presentaciones realizadas y el documento de amenazas.

3. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen aspectos espaciales y temporales relacionados con la investigación, proporcionando un contexto que abarque tanto la ubicación geográfica como la evolución temporal de los fenómenos analizados. Este enfoque permitirá una comprensión detallada de la dinámica geológica y geomorfológica del Municipio de Herveo, Tolima, y su implicación en la zonificación de amenazas por movimientos en masa.

En estos seminarios de investigación, se explora diversos temas dentro del campo de la geología, una disciplina que abarca múltiples ramas de estudio. Una de estas ramas es la geomorfología, que se define como: “El estudio del paisaje y su proceso de formación en función de diferentes características presentes en las rocas sobre las que se encuentra los procesos exógenos a que han sido sometidas” (Mulett & Ortiz, 2014).

La geología también estudia las unidades geológicas superficiales que se definen como: “El resultado de procesos morfodinámicos por acción de agentes exógenos y endógenos que modelan la superficie terrestre.” (Instituto Colombiano de Geología y Minería, 2012). Para un mejor entendimiento las UGS son un conjunto de materiales geológicos que afloran en la superficie, que provienen del mismo origen y conservan las mismas características físicas y

geomecánicas que presentan hasta en unas decenas de metros por debajo de la superficie (SGC, 2017). Se clasifican en roca según su dureza donde propone cuatro tipos de roca: Roca muy blanda, moderadamente blanda, moderadamente dura, rocas duras a muy duras, y clasifica los suelos en: residual, volcánico, de ladera, antrópico y transportados que son tres (Aluvial, Eólico y Glacial) (Padilla et al, 2004).

La susceptibilidad por movimientos en masa es una medida cualitativa o cuantitativa de la magnitud y distribución espacial de movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden ocurrir en un área (SGC, 2017), se toman varios factores en cuenta, las unidades geológicas superficiales, el inventario de procesos morfodinámicos, el uso del suelo y la morfometría que se combinan por métodos estadísticos dándole valores a los eventos que hallan ocurrido antes y su detonante (Acevedo Espitia, 2022), el SGC toma los atributos como la Morfometría, Morfodinámica y Morfogénesis, definiéndolos y utilizándolos para generar mapas de susceptibilidad a escala 1:100.000 (SGC, 2013). Existen varios métodos para analizar la susceptibilidad entre esos el método estadístico bivariado (SGC, 2017) y el método estocástico este último implementa varios algoritmos como lo son: lógica difusa, algoritmos difusos, redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos, programación geotécnica, colonia de hormigas y algoritmos evolucionados (Pistocchi et al 2002 citado por Valencia & Martinez, 2018). En Capitanejo (Colombia) la generación de deslizamientos se condiciona a factores litológicos, estructurales y morfométricos relacionados a la actividad climática, en esta zona se utilizó una red neuronal para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos con un algoritmo de retro propagación, esta simulación genera diferentes niveles de susceptibilidad desde muy bajo hasta muy alto (Valencia & Martinez, 2018).

En el análisis de amenaza por movimientos en masa, se requiere en el mejor de los casos una aproximación multiamenaza que integren los tipos de procesos que pueden ocurrir

en la zona de estudio, como sus características particulares, la relación con los factores condicionantes, detonantes y las probabilidades espacio temporales y de magnitud, (Corominas et al.,(2013) citado por Servicio Geológico Colombiano, 2017) de esta manera se deberían plantear los escenarios de amenaza que se basan en las características de los procesos y la incidencia de los escenario de riesgo que se puedan presentar. Sin embargo, la guía metodológica constituye una primera aproximación para el análisis de amenaza a esta escala con información limitada por lo cual propone agrupar los movimientos en masa de la siguiente manera: deslizamientos, caídas, flujos y reptación. La amenaza por deslizamientos será analizada según los resultados generados por el método estadístico bivariado, los movimientos tipo flujo y caídas serán analizados geomorfológicamente y la reptación será representada en el resultado final del estudio. Finalmente, la zonificación de la amenaza contiene además de las categorías de amenaza alta, media y baja tendrá todas las evidencias de inestabilidad identificadas en el inventario de procesos morfodinámicos (SGC, 2017).

En estudios relacionados con amenaza por movimientos en masa se generó una fase diagnóstico de la cuenca hidrográfica de Río Sucio Alto, para incluir la gestión del riesgo en el plan de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA), donde su objetivo era elaborar un mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) escala 1:25.000 para definir materiales superficiales (Rocas y Suelos depositados) mediante estimaciones de índices, comparación de parámetros y toma de muestras de campo. Este mapa se hizo con el fin de evaluar la amenaza por movimientos en masa donde las áreas que se evaluaron son las que presentaron susceptibilidad alta y susceptibilidad media (Corporacion para el Desarrollo Sostenible del Uraba., 2019).

Referente al objeto en estudio del seminario de investigación, la Alcaldía de Herveo (Tolima) hizo un Esquema de Ordenamiento Territorial donde estudió la geología,

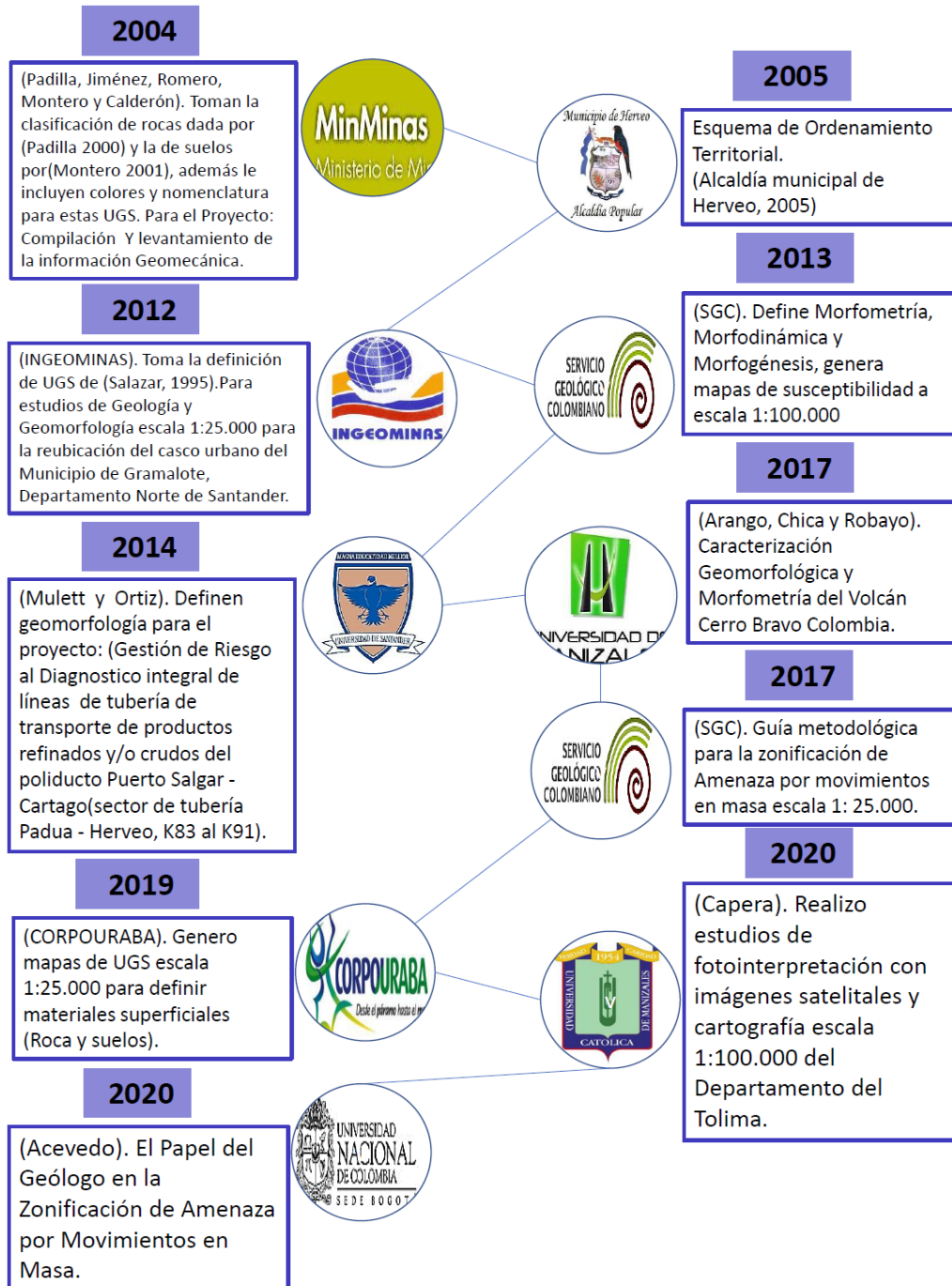
geomorfología y amenazas naturales con el fin de mirar áreas favorables y desfavorables para la población dividiendo el estudio en cuatro etapas, etapa de revisión bibliográfica, fotointerpretación, etapa de campo y etapa de oficina. Con la cual se pudo observar la geomorfología y material volcánico generado por Cerro Bravo, las geoformas de erosión fluvial, procesos denudacionales y movimientos en masa como deslizamientos y reptación (Alcaldía Municipal de Herveo, 2005). Se realizó una cartelización geomorfológica y morfométrica del volcán Cerro Bravo, por medio de fotointerpretación, creación de mapas geomorfológicos, descripción de unidades geomorfológicas y análisis tanto geomorfológicos como morfométricos donde se concluyó que el edificio volcánico presenta cuatro cráteres y dos domos que evidencian el último episodio eruptivo, se observan otras geoformas como flujos de escombros, flujos de lavas, lagunas entre otras (Arango Palacio, Robayo Jara , & Chica Martinez, 2017). También se realizó un estudio por medio de fotointerpretación de imágenes satelitales y cartografía escala 1:100.000 para así conocer las geoformas del departamento del Tolima (Capera Quintana, 2020).

En el siguiente esquema (ver Figura 3) podemos observar una línea de tiempo con los documentos anteriormente nombrados, su título y autor.

Figura 3

Línea de tiempo

LINEA DE TIEMPO



4. CONTEXTO GEOLÓGICO

En el área de estudio predominan afloramientos de rocas ígneas y metamórficas, que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cenozoico. Esta región se encuentra situada en la Cordillera Central de los Andes colombianos, destacándose por ser la más elevada y rica en metales en comparación con las Cordilleras Oriental y Occidental. Además, es la región geológicamente más inestable, presentando los niveles más elevados de sismicidad y actividad volcánica del continente ([INGEOMINAS, 2001](#)).

Para la era Paleozoica se encuentran dos formaciones geológicas: el Complejo Cajamarca y los Intrusivos Néisicos. El Complejo Cajamarca presenta una secuencia polimetamórfica que incluye esquistos actinolítico-cloríticos, metasedimentitas de Marulanda, esquistos cuarzo-sericíticos y cuarcitas. Estas rocas son afectadas localmente por diaftoresis y metamorfismo dinámico. Por otro lado, los Intrusivos Néisicos de Padua exhiben una composición tonalítica a granodiorítica, con textura hipidioblástica inequigranular de grano fino a medio, y presentan una foliación definida por la orientación de micas ([INGEOMINAS, 2001](#)).

En la era Mesozoica, hace 170 millones de años en el Jurásico medio, se desarrolló el Batolito de Sonsón, compuesto principalmente por tonalita y granodiorita, con algunas variaciones locales que incluyen gabro y diorita. En el período Cretácico, aparece el Stock de Manizales, caracterizado por su composición de tonalita biotítica leucocrática equigranular de grano grueso, según datos del Instituto Colombiano de Geología y Minería ([INGEOMINAS, 2001](#)).

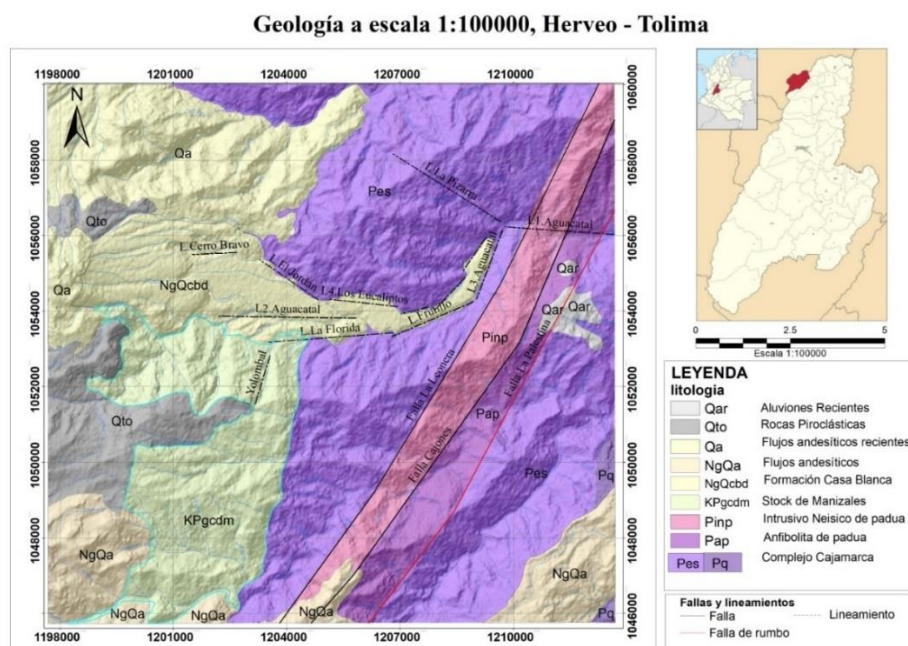
En el Neógeno se encuentra la Formación Casabianca (NgQcb) que se caracteriza por la presencia de sedimentitas volcanogénicas, que incluyen flujos de ceniza y depósitos de

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000

bloques. En este mismo periodo se encuentran Andesitas (NgQa) conformadas de flujos andesíticos porfiríticos y basálticos que constituyen la mayor parte de las rocas aflorantes. Por último, en el periodo Cuaternario se encuentran rocas piroclásticas (Qto) de depósitos no consolidados compuestos de cenizas, lapilli y cantos de pumita producidas en los volcanes del Complejo Ruiz-Tolima y Aluviones Recientes (Qar) no diferenciados, se encuentran no consolidados compuestos de material aluvial y coluvial cubriendo las rocas más antiguas, la mayoría de los depósitos son del Holoceno (INGEOMINAS, 2001).

Figura 4

Mapa geológico de la zona de estudio.



Nota. Modificado del mapa geológico a escala 1:100.000 del servicio geológico colombiano (SGC, 2011)

5. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES (UGS)

Las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) desempeñan un papel fundamental en la evaluación de la susceptibilidad y la zonificación de amenazas a una escala de 1:25,000. Estas unidades nos permiten identificar y caracterizar las condiciones del suelo y roca con precisión, lo que resulta crucial para llevar a cabo cálculos precisos de amenazas y susceptibilidades. La creación del mapa de UGS implicó integrar datos geológicos y geomorfológicos, considerando el entorno del terreno y la presencia de fallas como Palestina. Se realizó un proceso de fotointerpretación y trabajo de campo para verificar la calidad de las rocas y suelos, conforme a la Guía Metodológica del Servicio Geológico Colombiano de 2017.

A continuación, se presenta la tabla 1 y la figura 5 que detallan los tipos de roca y suelo encontrados en la zona.

Tabla 1

Unidades geológicas superficiales (UGS)

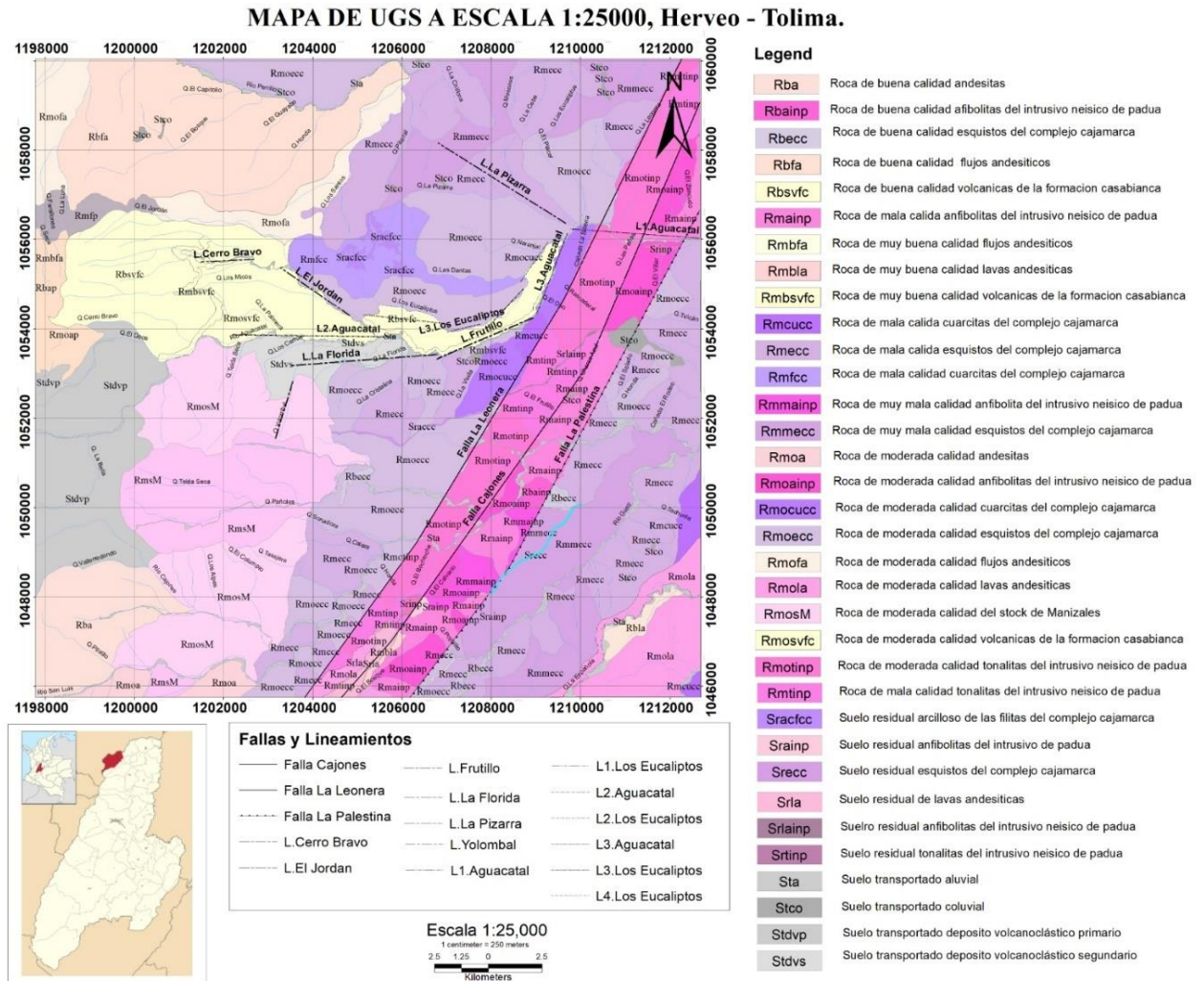
Unidades de roca	Código	Área(km ²)	%Área
Roca de muy buena calidad andesitas	Rmba	0,183	0,08%
Roca de muy buena calidad flujos andesíticos	Rmbfa	0,069	0,03%
Roca de muy buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca	Rmbsvfc	1,392	0,64%
Roca de buena calidad anfibolitas del intrusivo de Padua	Rbainp	0,336	0,16%
Roca de buena calidad esquistos del complejo Cajamarca	Rbecc	0,514	0,24%
Roca de buena calidad Andesitas	Rba	7,470	3,45%
Roca de buena calidad flujos andesíticos	Rbfla	17,190	7,93%
Rocas de buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca	Rbsvfc	11,242	5,19%
Roca de moderada calidad cuarcitas del complejo Cajamarca	Rmocucc	2,485	1,15%
Roca de moderada calidad anfibolitas del intrusivo de Padua	Rmoainp	4,324	2,00%
Roca de moderada calidad tonalitas del intrusivo neisico de Padua	Rmotinp	9,611	4,44%

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000

Roca de moderada calidad Tonalitas del stock de Maizales	RmotsM	25,967	11,98 %
Roca de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca	Rmoecc	29,696	13,70 %
Roca de moderada calidad andesitas	Rmoa	10,193	4,70%
Roca de moderada calidad flujos andesíticos	Rmofa	6,594	3,04%
Unidades de roca	Código	Area(km²)	%Area
Roca de moderada calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca	Rmosvfc	4,559	2,10%
Roca de mala calidad cuarcitas del complejo Cajamarca	Rmcucc	1,283	0,59%
Roca de mala calidad anfibolitas del intrusivo de Padua	Rmainp	5,730	2,64%
Roca de mala calidad tonalitas del intrusivo neisico de Padua	Rmtinp	4,284	1,98%
Roca de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca	Rmecc	30,059	13,87 %
Roca de mala calidad filitas del complejo Cajamarca	Rmfcc	3,833	1,77%
Roca de muy mala calidad anfibolita del intrusivo de Padua	Rmmainp	1,842	0,85%
Roca de muy mala calidad esquistos del complejo Cajamarca	Rmmecc	15,401	7,11%
Unidades de suelo			
Suelo residual limo-arcillosa de los esquistos del complejo Cajamarca	Srlacecc	0,405	0,19%
Suelo residual arcilloso de las filitas del complejo Cajamarca	Srafcc	0,360	0,17%
Suelo residual anfibolitas del intrusivo de Padua	Sraip	0,111	0,05%
Suelo residual de lavas andesíticas	Srla	0,674	0,31%
Suelo residual limo-arcilloso del intrusivo neisico de Padua	Srlainp	0,076	0,04%
Suelo residual tonalitas del intrusivo neisico de Padua	Srtinp	0,227	0,10%
Suelo transportado aluvial	Sta	3,213	1,48%
Suelo transportado coluvial	Stc	0,862	0,40%
Suelo transportado depósitos volcanoiclasticos primario flujo piroclástico	Stdvpfp	13,776	6,36%
Suelo transportado deposito volcanoclastico secundario flujo laharico aterrazado	Stdvsfla	2,726	1,26%

Figura 5

Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) a escala 1:25.000 Herveo-Tolima.



5.1. Descripción de las unidades geológicas superficiales (UGS).

En este capítulo, se detallan las diferentes cualidades de rocas y suelos halladas en la zona de estudio, junto con sus características específicas según lo establecido por el Servicio Geológico Colombiano, 2017 (SGC, 2017).

5.1.1. Roca de muy buena calidad andesitas (Rmba).

Esta unidad presenta andesitas con un índice de resistencia GSI= 80– 100 por lo cual se clasifica como macizo de muy buena calidad (Tipo I). Esta unidad no pudo ser observada en

campo debido al difícil acceso, por lo que se interpretó a partir de imágenes satelitales, infiriendo un macizo rocoso en el cual se observan escarpes con pendiente altas, y donde se logra ver cobertura vegetal como bosques de galería y ripario . Además, al consultar la memoria explicativa de la plancha 206 de Manizales, se determinó que esta unidad está compuesta principalmente por flujos andesíticos, porfíricos y basálticos con bajo grado de meteorización que constituyen la mayor parte de la roca aflorante (INGEOMINAS , 1998). Esta unidad está compuesta principalmente por plagioclasa, anfíboles y biotita con un grado de meteorización fresca. Su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 100 – 250 Mpa, que corresponde a una roca muy dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974), tiene un grado de meteorización tipo I, lo cual permite clasificarla como roca no meteorizada (fresca). Se encuentra ubicado en el norte de la zona de estudio al este de la vereda El Chagualo con un área de 16.89 ha.

5.1.2. Roca de muy buena calidad flujos andesíticos (Rmbfa).

Esta unidad presenta flujos andesíticos con un índice de resistencia GSI= 80– 100 por lo cual se clasifica como macizo de calidad muy buena (Tipo I). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales. Mediante el proceso de fotointerpretación se asume la existencia de un macizo rocoso donde se logra ver pendientes abruptas y cobertura vegetal como bosques de galería y ripario. Esta unidad está compuesta principalmente por flujos andesíticos recientes asociados a los cuellos volcánicos del cerro bravo con bajo grado de meteorización (INGEOMINAS , 1998). Su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 100 – 250 Mpa, que corresponde a una roca muy dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo I, lo cual permite clasificarla como roca no

meteorizada (fresca). Se encuentra ubicado en el oeste de la zona de estudio al Sur de la vereda San Fernando cerca al volcán Cerro Bravo con un área de 6.85 ha.

5.1.3. Roca de muy buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca (Rmbsvfc).

Esta unidad presenta sedimentos volcánicos con un índice de resistencia GSI= 80– 100 por lo cual se clasifica como macizo de calidad muy buena (Tipo I). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales. Donde se asume la existencia de un macizo rocoso con presencia de escarpes con pendientes altas donde se logra ver cobertura vegetal como bosques de galería y ripario y algunos pastos limpios, además, esta unidad está compuesta principalmente por sedimentitas vulcanogenicas, tobas y sedimentos volcánicos re TRABAJADOS con un grado de meteorización fresca (INGEOMINAS , 1998). Esta unidad está compuesta principalmente por ignimbrita, brechas volcánicas y rocas sedimentarias vulcanogenicas donde su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 100 – 250 Mpa, correspondiente a una roca muy dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo I, lo cual permite clasificarla como roca no meteorizada (fresca). Se encuentra ubicado en centro de la zona de estudio, al sur de la vereda El frutillo y al oeste de La Esmeralda con un área de 68.16 ha.

5.1.4. Roca de buena calidad anfibolitas del intrusivo de Padua (Rbainp).

Esta unidad presenta anfibolitas con un índice de resistencia GSI= 60– 80 por lo cual se clasifica como macizo de calidad buena (Tipo II y III). Estas anfibolitas están compuestas por plagioclasa, hornblenda y cuarzo, con un tamaño de grano de medio a fino y un grado de meteorización bajo a descolorido, su resistencia a la compresión simple se encuentra en el

rango entre 50 –100 Mpa, que corresponde a una roca dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización de II, lo cual permite clasificarla como roca débilmente meteorizada. Presenta diaclasas con azimut y buzamiento de 215/15° y 171/60° con una persistencia media de 3 a 10 m y ancho de abertura estrecho de 2-6 mm con una forma de superficie ondulada y rugosa, contiene discontinuidades secas si evidencias de flujos de agua. Se encuentra ubicada al noreste del área de estudio, al suroeste de la vereda Arenillo con un área de 33,62 ha.

5.1.5. Roca de buena calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rbecc).

En esta unidad presenta esquistos con un índice de resistencia GSI= 60– 80 por lo cual se clasifica como macizo de calidad buena (Tipo II y III). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales. Se asume la existencia de un macizo rocoso poco meteorizado, con una cobertura vegetal de tipo mosaico de cultivos y pastos limpios, con pendientes moderadamente abruptas a abruptas y (INGEOMINAS , 1998). Esta roca está compuesta por esquistos cuarzo-sericiticos, micáceos y cuarzosos. Su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 50 –100 Mpa, que corresponde a una roca dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización de II. Se encuentra ubicada al centro del área de estudio, al sur de la vereda El Arenillo con un área de 26.37 ha.

5.1.6. Roca de buena calidad Andesitas (Rba).

Esta unidad presenta andesitas con un índice de resistencia GSI= 60– 80 por lo cual se clasifica como macizo de calidad buena (Tipo II y III). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales. Donde se asume la existencia de un macizo rocoso con cobertura vegetal de tipo bosques de galería y

ripario, pastos limpios y mosaicos de cultivos. Esta unidad está compuesta principalmente por flujos andesíticos porfiríticos y basálticos constituyendo la mayor parte de la roca aflorante con un grado de meteorización descolorida (INGEOMINAS , 1998). Su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 50 –100 Mpa, que corresponde a una roca dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización de II, lo cual permite clasificarla como roca débilmente meteorizada. Se encuentra ubicada al noroeste del área de estudio, oeste de la vereda La Elena y Ventaderos con un área de 671.47 ha.

5.1.7. Roca de buena calidad flujos andesíticos (Rbfla).

Esta unidad presenta flujos andesíticos con un índice de resistencia GSI= 60– 80 por lo cual se clasifica como macizo de calidad muy buena (Tipo II y III). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales.

Donde se asume la existencia de un macizo rocoso con pendientes altas donde se logra ver gran cantidad de cobertura vegetal como bosques de galería y ripario, pastos limpios y mosaicos de cultivos. Litológicamente está compuesta por flujos andesíticos recientes, asociados a los cuellos volcánicos del cerro bravo con un grado de meteorización descolorida y baja erosión fluvial (INGEOMINAS , 1998). La compresión simple se encuentra en el rango entre 50 – 100 Mpa, que corresponde a una roca dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización de II, lo cual permite clasificarla como roca débilmente meteorizada. Se encuentra ubicado en el oeste de la zona de estudio conteniendo las veredas El Alto, La Bella y Guayabo cerca al volcán Cerro Bravo con un área de 1718.95 ha.

5.1.8. Rocas de buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca (Rbsvfc).

Esta unidad presenta sedimentos volcánicos con un índice de resistencia GSI= 60– 80 por lo cual se clasifica como macizo de calidad muy buena (Tipo II y III). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales. Donde se asume la existencia de un macizo rocoso con altas pendientes y una vegetación de tipo bosques de galería, ripario y pastos limpios. Litológicamente está compuesta por sedimentitas vulcanogenicas, tobas y sedimentos volcánicos re TRABAJADOS con un grado de meteorización descolorida presentando poca erosión fluvial (INGEOMINAS , 1998). Su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 50 – 100 Mpa, que corresponde a una roca dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo II, lo cual permite clasificarla como roca débilmente meteorizada. Se encuentra ubicada en al oeste de la zona de estudio al oeste de las veredas La Esmeralda y La pradera con un área de 915.51 ha.

5.1.9. Roca de moderada calidad cuarcitas del complejo Cajamarca (Rmocucc).

Esta unidad presenta cuarcitas con un índice de resistencia GSI= 40 – 60 por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo IV y V). Compuesta por cuarcitas y cuarcitas micáceas con cuarzo, feldespato y moscovita, con un tamaño de grano entre medio - fino y un grado de meteorización descolorida. Su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponde a una roca moderadamente dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente meteorizada que no es tan fácil de fracturar con el martillo. Se miden diaclasas con azimuth de rumbo 114/55°, 224/60° y 195/60°, una persistencia muy baja <1 metro, con un ancho de abertura moderada de 6-20 mm, un tipo de

relleno de superficie teñida, con una forma de superficie ondulada y rugosa, también presenta discontinuidades con flujos continuos de agua y se encuentra ubicada en la zona noreste del área de estudio hacia el sur de las veredas Frutillo y Capiro con un área de 144,91 ha.

Figura 6

Rocas de moderada calidad Cuarcitas del Complejo Cajamarca. Tomada en campo en las coordenadas E: 1207578, N: 1053311, Altitud: 1910 ms.n.m.



5.1.10. Roca de moderada calidad anfibolitas del intrusivo de Padua (Rmoainp).

Esta unidad presenta anfibolitas con un índice de resistencia GSI= 40 – 60 por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo IV y V). Estas anfibolitas están compuestas por plagioclasa, hornblenda y cuarzo, con un tamaño de grano de medio a fino y un grado de meteorización descolorida. Su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponde a una roca moderadamente dura. De acuerdo con el perfil de

meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente meteorizada. Presenta diaclasas con azimut de rumbo 327/12°, 292/65° y 230/74°, una persistencia de media a alta de 3-10m estrecha de 2-6mm con un tipo de relleno limpio con forma de superficie ondulada y rugosa. Se encuentra ubicada al noreste del área de estudio, al suroeste de la vereda arenillo con un área de 42,41 ha.

5.1.11. Roca de moderada calidad tonalitas del intrusivo neisico de Padua (Rmotinp).

Esta unidad presenta tonalitas con un índice de resistencia GSI= 40 – 60 por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo IV y V). Las tonalitas están compuestas por cuarzo, plagioclasa, feldespato y micas con un tamaño de grano medio y un grado de meteorización descolorido. Su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponde a una roca moderadamente dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente meteorizada. Se encuentra ubicada en la zona noreste del área de estudio, al oeste de la vereda arenillo con un área de 156,35 ha.

5.1.12. Roca de moderada calidad tonalitas del stock de Maizales (RmotsM).

Esta unidad presenta tonalitas con un índice de resistencia GSI= 40– 60 por lo cual se clasifica como macizo de calidad mala (Tipo IV y V). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales. Donde se asume la existencia de un macizo rocoso presentando pendientes moderadas a altas, una cobertura vegetal de tipo bosques de galería y cultivos de mosaico. Litológicamente está compuesta por material volcánico, cenizas, fragmentos de roca y piedra pómez, un grado de meteorización descolorida (INGEOMINAS , 1998). La resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponde a una roca moderadamente dura. De

acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización de III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente meteorizada. Se encuentra ubicada al oeste de la zona de estudio y al oeste de la vereda El Descenso con un área de 411.09 ha.

5.1.13. Roca de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rmoecc).

En esta unidad presenta esquistos grafitosos con un índice geológico de resistencia $GSI = 40-60$, por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo IV y V). Su composición contiene esquistos grafitosos con intercalaciones de esquistos silíceos compuestos por cuarzo, feldespato y micas, el tamaño de grano es medio con grado de meteorización descolorida, dificultando fractura al golpe del martillo. La resistencia a la compresión se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponde a una roca moderadamente dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) tiene un grado de meteorización tipo III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente meteorizada. Presenta foliación visible con azimuth de rumbo $0/73$, una persistencia media de 3 a 10 metros y ancho de abertura apretada. Otra familia de diaclasas presenta un azimuth de rumbo $224^{\circ}/52^{\circ}$ con un ancho de abertura apretada en el afloramiento con un tipo de relleno de superficie teñida rugosa y de forma ondulada y contiene discontinuidad seca con manchas de óxido y se encuentra ubicada en la zona noreste del área de estudio al sureste de la vereda Delgaditas y Suroeste de la vereda Capiro con un área de 293,91 ha.

Figura 7

Roca de moderada calidad Esquistos del Complejo Cajamarca. Tomada en campo en las coordenadas E: 1207578, N: 1053311, Altitud: 1910 ms.n.m.



5.1.14. Roca de moderada calidad andesitas (Rmoa).

Esta unidad presenta andesitas con un índice de resistencia GSI= 40– 60 por lo cual se clasifica como macizo de calidad mala (Tipo IV y V). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales. Mediante la fotointerpretación se asume la existencia de un macizo rocoso con pendientes moderadas donde se logra ver una cobertura vegetal de tipo bosques de galería y ripario. Litológicamente está compuesta por flujos andesíticos, porfíricos y basálticos constituyendo la mayor parte de la roca aflorante con un grado de meteorización descolorida (INGEOMINAS , 1998). La compresión simple se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponde a una roca

moderadamente dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización de III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente meteorizada. Se encuentra ubicada al suroeste de la zona de estudio y al este y oeste de la vereda San Marcos con un área de 87.84 ha.

5.1.15. Roca de moderada calidad flujos andesíticos (*Rmofa*).

Esta unidad se presenta flujos andesíticos con un índice de resistencia GSI= 40 – 60 por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo IV y V). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales. Donde se asume la existencia de un macizo rocoso con pendientes moderadas donde se logra ver bastante cobertura vegetal como bosques de galería y ripario y pastos limpios. Litológicamente está compuesta por flujos andesíticos recientes, asociados a los cuellos volcánicos del cerro bravo con un grado de meteorización descolorida (INGEOMINAS , 1998). La resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponde a una roca moderadamente dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente meteorizada. Se encuentra ubicado en oeste de la zona de estudio al noroeste de la vereda Delgaditas con un área de 350.72 ha.

5.1.16. Roca de moderada calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca (*Rmosvfc*).

Esta unidad presenta sedimentos volcánicos con un índice de resistencia GSI= 40 – 60 por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo IV y V). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales y fotografías aéreas. Donde se asume la existencia de un macizo rocoso con pendientes

moderadas donde se logra ver cobertura vegetal como bosques de galería y ripario y pastos limpios con poca erosión. Litológicamente está compuesta por sedimentitas vulcanogenicas, tobas y sedimentos volcánicos retrabajados un grado de meteorización descolorida (INGEOMINAS , 1998). La resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 25 – 50 Mpa, que corresponde a una roca moderadamente dura. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente meteorizada. Se encuentra ubicado en centro de la zona de estudio se encuentra en las veredas La Pradera y La Esmeralda con un área de 455.93 ha.

5.1.17. Roca de mala calidad cuarcitas del complejo Cajamarca (Rmcucc).

En esta unidad se presenta cuarcitas con un índice geológico de resistencia GSI= 20-40, por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo VI y VII). Esta unidad no se pudo observar en campo por el difícil acceso por lo cual se interpretó a partir de imágenes satelitales. Donde se asume la existencia de un macizo rocoso con pendientes moderadas donde se logra ver una cobertura vegetal de tipo pastos limpios y mosaico de cultivos. Litológicamente está compuesta principalmente por cuarcitas y cuarcitas-micáceas (INGEOMINAS , 1998). La resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 5 – 25 Mpa, que corresponde a una roca blanda. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo III, lo cual permite clasificarla como roca moderadamente meteorizada. Se encuentra ubicada en la zona noreste del área de estudio al este de la vereda Frutillo y oeste de la vereda El salado con un área de 39,13 ha.

5.1.18. Roca de mala calidad anfibolitas del intrusivo de Padua (*Rmainp*).

En esta unidad se presenta anfibolitas donde se estimó un índice geológico de resistencia GSI= 20-40, por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo VI y VII). Estas anfibolitas están compuestas por hornblenda, plagioclasa y cuarzo, con un tamaño de grano de medio a fino y un grado de meteorización descolorida. La resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 5 – 25 Mpa, que corresponde a una roca blanda. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) tiene un grado de meteorización de IV, lo cual permite clasificarla como roca altamente meteorizada. Presenta una familia de diaclasas con azimuth de rumbo 045/46° con una persistencia baja de 1-2 m, un ancho de apertura estrecha de 0-2 mm con un tipo de relleno de superficie teñida, una forma de superficie ondulada y rugosa también presenta discontinuidades secas sin presencia de flujos de agua y se encuentra ubicada al noreste del área de estudio, al norte de la vereda arenillo y al oeste de la vereda el salado con un área de 65,41 ha.

5.1.19. Roca de mala calidad tonalitas del intrusivo neisico de Padua (*Rmtinp*).

Para esta unidad se presentan tonalitas donde se estimó un índice geológico de resistencia GSI= 20-40, por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo VI y VII). Son rocas compuestas por cuarzo, feldespato y micas con un tamaño de grano de medio a fino y un grado de meteorización descolorida. La resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 5 – 25 Mpa, correspondiente a una roca blanda. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) tiene un grado de meteorización tipo IV, lo cual permite clasificarla como roca altamente meteorizada. Se observaron familias de diaclasas con azimuth de rumbo 225/52°, 15/64° y 64/89°, mostrando una persistencia media de 1-10 m, presentando un ancho de abertura estrecha de 2-6 mm, un tipo de relleno de superficie teñida,

una forma de superficie ondulada y suave, también presenta discontinuidades secas sin presencia de flujos de agua y se encuentra ubicada al noreste del área de estudio hacia el oeste de la vereda El salado con un área de 73,62 ha.

5.1.20. Roca de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rmecc).

En esta unidad se presenta esquistos grafitosos donde se estimó un índice geológico de resistencia GSI= 20-40, por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo VI y VII). Litológicamente se encuentran esquistos grafitosos, compuestos por grafito, cuarzo y moscovita y biotita, con un tamaño de grano medio y un grado de meteorización descolorida desmoronándose fácilmente al golpe del martillo. La resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 5 – 25 Mpa, que corresponde a una roca blanda. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) tiene un grado de meteorización tipo III. Presenta foliación cuyo azimut de rumbo es $15/45^{\circ}$, una persistencia media de 3 a 10 metros, un ancho de abertura apretada con un tipo de relleno de superficie teñida su forma de la superficie es rugosa y ondulada también presenta discontinuidad seca con manchas de óxido y se encuentra ubicada en la zona noreste del área de estudio y al Suroeste de la vereda Frutillo con un área de 82,15 ha.

Figura 8

Roca de mala calidad esquistos del Complejo Cajamarca. Tomada en campo en las coordenadas E: 1205643, N: 105509 y Altitud: 2413 ms.n.m.



5.1.21. Roca de mala calidad filitas del complejo Cajamarca (Rmfcc).

En esta unidad se presenta filitas donde se estimó un índice geológico de resistencia $GSI = 20 - 40$, por lo cual se clasifica como macizo de calidad mala (Tipo VI y VII). A nivel composicional presenta cuarzo, plagioclasa y moscovita, su tamaño de grano es muy fino con un grado de meteorización entre descolorida y descompuesta, desmoronándose con un golpe suave del martillo. La resistencia a la compresión presenta rangos entre $5 - 25$ Mpa, que corresponde a una roca blanda. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) puede tener un grado de meteorización tipo IV, Presenta foliación presenta un azimuth de rumbo $184/36^\circ$ y diaclasas un azimuth de rumbo $102/75^\circ$ con una persistencia media de 3 a 10 metros,

su ancho de abertura apretada de 0 mm presenta un tipo de relleno limpio, la superficie rugosa y ondulada, con una discontinuidad seca sin evidencias de flujos de agua y se encuentra ubicada en la zona noreste del área de estudio al sureste de la vereda delgaditas con un área de 383,29 ha.

Figura 9

Roca de mala calidad filitas del Complejo Cajamarca. Tomada en campo en las coordenadas E: 1204903, N: 1055140 y Altitud: 2497 ms.n.m.



5.1.22. Roca de muy mala calidad anfibolita del intrusivo de Padua (Rmmainp).

En esta unidad se presenta anfibolitas donde se estimó un índice geológico de resistencia GSI= 0-20, por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo VIII y IX). Está compuesta por cuarzo, plagioclasa y hornblenda con un tamaño de grano fino y un

grado de meteorización descompuesta, su resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 1 – 5 Mpa, que corresponde a una roca muy blanda. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974) tiene un grado de meteorización tipo V, lo cual permite clasificarla como roca completamente meteorizada. Presenta diaclasas con una persistencia media con una forma de superficie ondulada y rugosa, contiene discontinuidades secas si evidencias de flujos de agua y se encuentra ubicada al noreste del área de estudio, al oeste de Curubita y norte de Damas con un área de 42,40 ha.

5.1.23. Roca de muy mala calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rmmecc).

Esta unidad presenta esquistos grafitosos, en los cuales se estimó un índice geológico de resistencia GSI= 0-20, por lo cual se clasifica como macizo de calidad regular (Tipo VIII y IX). Su composición contiene esquistos grafitosos compuestos por grafito, cuarzo, feldespato y moscovita, con un tamaño de grano fino y un grado de meteorización descompuesta, desmoronándose fácilmente. La resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango entre 1 – 5 Mpa, correspondiente a una roca muy blanda. De acuerdo con el perfil de meteorización de Dearman (1974). La foliación tiene un azimut de rumbo 285/29 con una persistencia media de 3 a 10 metros y un ancho de abertura apretada puede tener un grado de meteorización tipo IV, lo cual permite clasificarla como roca altamente meteorizada y se encuentra ubicada en la zona noreste del área de estudio al sureste de la vereda Arenillo con un área de 557,68 ha.

Figura 10

Roca de muy mala calidad esquistos del complejo Cajamarca. Tomada en campo en las coordenadas E: 1209800, N: 1050699 y Altitud: 1949 ms.n.m.



5.1.24. Suelo residual limo-arcilloso de los esquistos del complejo Cajamarca (Srlacecc).

Es un suelo originado por la desintegración física de las rocas y la meteorización química de los minerales que reaccionan con agua, oxígeno y otros agentes. Estos suelos se caracterizan por ser plásticos con consistencia muy blanda. Su estructura es matriz soportada (90% matriz y 10% clastos). la matriz es arcillosa, con humedad natural, permeabilidad baja, la forma de los clastos es esférica y su redondez subangular con un tamaño arcilla ($<0,002\text{mm}$), su color es 10 YR 5/4 (según la tabla de Munsell). Esta unidad se encuentra localizada al noreste en la vereda El Frutillo y al este de la vereda El Salado.

5.1.25. Suelo residual arcilloso de las filitas del complejo Cajamarca (Srafcc).

Es un suelo originado por la meteorización física como la fragmentación y la meteorización química como la hidrólisis que es la interacción entre el agua y los minerales. Estos suelos se caracterizan por ser plásticos con consistencia muy blanda. Su estructura es matriz soportada (80% matriz y 20% clastos). la matriz es arcillosa, con humedad natural, permeabilidad media, la forma de los clastos es esférica y su redondez subangular con un tamaño arcilla ($<0,002\text{mm}$) en su parte superior y media y en la parte baja presenta tamaño arena ($0.075\text{-}0.425\text{mm}$), su color es 10 YR 6/6 (según la tabla de Munsell). Esta unidad se encuentra localizada en el occidente del área de estudio al norte de la vereda El Plan y al este de la vereda Delgaditas con un área de 28.31 ha.

5.1.26. Suelo residual anfibolitas del intrusivo de Padua (Sraip).

Es un suelo originado por la meteorización física como la fragmentación y la meteorización química como la hidrólisis que es la interacción entre el agua y los minerales. Esta unidad no se pudo observar en campo debido al difícil acceso. Por medio de la fotointerpretación se observa que presenta humedad natural, la forma de los clastos es esférica y su redondez subangular, con un tamaño de arena ($0.075 - 0.425 \text{ mm}$), su color es 7.5 YR 5/4 (según la tabla de Munsell). Esta unidad se encuentra localizada hacia el sur de la vereda La Palma, con un área de 2.26 hectárea.

5.1.27. Suelo residual de lavas andesíticas (Srla).

Es un suelo originado por la meteorización física como la fragmentación y la meteorización química como la hidrólisis que es la interacción entre el agua y los minerales. Esta unidad no se pudo observar en campo debido al difícil acceso. Por medio de la

fotointerpretación se observan pendientes muy bajas y procesos erosivos, así como una gran cantidad de vegetación, la forma de los clastos es esférica y su redondez subangular, con un tamaño de arena (0.075 - 0.425 mm), su color es 5 YR 3/2 (según la tabla de Munsell). Esta unidad está localizada en la parte sur de la zona de estudio y al este de la vereda El Chagualo, con un área de 67.3 hectáreas.

5.1.28. Suelo residual limo-arcilloso del intrusivo neisico de Padua (Srlainp).

Es un suelo originado por la meteorización física como la fragmentación y la meteorización química como la hidrólisis y oxidación de minerales. Estos suelos se caracterizan por ser plásticos con consistencia muy blanda. Su estructura es matriz soportada (90% matriz y 10% clastos). la matriz es arcillosa, con humedad natural, permeabilidad media, la forma de los clastos es esférica y su redondez subangular con un tamaño arcilla (<0,002mm y limo 0.075mm), su color es 10 YR 5/4 (según la tabla de Munsell). Esta unidad se encuentra localizada al este de la vereda El Frutillo con un área de 7.6 ha.

5.1.29. Suelo residual tonalitas del intrusivo neisico de Padua (Srtinp).

Es un suelo originado por la meteorización física como la desintegración mecánica y la meteorización química como la hidrólisis y oxidación de minerales. Esta unidad no se pudo observar en campo debido al difícil acceso. Por medio de la fotointerpretación se observan pendientes muy bajas y procesos erosivos, así como una gran cantidad de vegetación, la forma de los clastos es esférica y su redondez subangular, con un tamaño de arena (0.075 - 0.425 mm), su color es 2.5 YR 3/4 (según la tabla de Munsell). Esta unidad está localizada en la parte sur de la zona de estudio y al este de la vereda El Chagualo, con un área de 13.23 hectáreas.

5.1.30. Suelo transportado aluvial (Sta)

Corresponde a depósitos aluviales de los ríos Aguacatal, Azufrado, Cajones, Gualí, Perrillo y San Luis. Estos depósitos se encuentran localizados en las zonas bajas en las llanuras y planicies de inundación, presentando gravas, cantos y bloques subredondeados y redondeados con diferentes composiciones como rocas ígneas, volcánicas, metamórficas y sedimentarias. La matriz de estos depósitos es de color gris y está compuesta principalmente por arena gruesa, medianamente compacta y suelta, Presenta un área total de 321.33 ha.

5.1.31. Suelo transportado coluvial (Stc).

Son suelos que se generan por los movimientos en masa, depositándose en las laderas o en cambios de pendiente de la zona de estudio.

Los suelos coluviales presentes son clasto soportados (10% matriz y 90% clastos) y matriz-soportados (90 % matriz y 10% clastos) de tipo arenosos y limo-arcillosos. La composición de los cantos contiene fragmentos de roca de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas con colores como 5y 8/4 y 10R 6/6 según la tabla de colores de Munsell. Estos suelos presentan una humedad y permeabilidad moderada, con clastos esféricos subredondeados a redondeados y grado de meteorización descolorida. Su tamaño de grano varia de arcilla (<0.002mm) hasta cantos (75-300mm), con una plasticidad baja a moderada. Estos depósitos se encuentran ubicados al este de las veredas Damas, La palma, Curubita, al sur de La joya, el saldo, la La leonera, al este de la palma, Puerto Brasil y al oeste de La bella y Guayabo. Estos depósitos presentan áreas entre 1 ha y 5.2 ha.

Figura 11

Suelo transportado coluvial. Tomada en campo en las coordenadas E: 1205495, N:1055030 y Altitud: 2503 ms.n.m.



5.1.32. Suelo transportado depósitos volcanoclasticos primario flujo piroclástico (Stdvpfp).

Son suelos que se formaron por la acumulación y deposición de materiales expulsados por el volcán Cerro Bravo durante una de sus erupciones. Este material desciende por sus laderas a altas velocidades y está compuesto por bombas, fragmentos de roca, pómez y cenizas, debido a esto, el tamaño de clastos y matriz es variado. La forma de este material es esférica y la redondez de los clastos es redondeada a subangular dependiendo de la cantidad de erosión física a la que fue sometido, con colores 7.5Yr 2/2, 7.5YR 3/4 O 7.5YR 2/6 según la tabla de colores de Munsell y su plasticidad varia de baja a moderadamente alta. Este suelo se encuentra ubicado a los alrededores del volcán Cerro Bravo cerca de las veredas San Fernando, El Descenso, El Doce y Puerto Brasil con un área total aproximada de 600 ha.

5.1.33. Suelo transportado deposito volcanoclastico secundario, flujo laharico aterrazado (Stdvsfla).

Son suelos formados por la expulsión de material del volcán Cerro Bravo y los movimientos en masa que allí ocurren, los cuales bloquean los ríos, generando grandes acumulaciones de agua y material volcánico. Estas masas, compuestas por lodo, ceniza, pómez y otros fragmentos de roca volcánica, arrastran este material a grandes distancias. Estos suelos se caracterizan por ser plásticos con consistencia muy blanda. La forma de los clastos es esférica y su redondez subangular con un tamaño arcilla ($<0,002\text{mm}$) hasta arena gruesa ($2\text{mm}-4.75\text{mm}$), su color es 7.5 YR 5/2 y 7.5 YR 6/6 (según la tabla de Munsell). Esta unidad se encuentra localizada cerca al volcán Cerro Bravo y se extiende hasta la mitad de la zona de estudio ubicado cerca de las veredas La Esmeralda, El plan y La Pradera con un área aproximada de 25 ha

Figura 12

Suelo transportado deposito volcanoclastico secundario flujo laharico aterrazado.

Tomada en campo en las coordenadas E: 1207109, N: 1053387 y Altitud: 1863 ms.n..



6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La zona de Herveo-Tolima, está influenciada por un extenso sistema de fallas conocido como el Sistema de Fallas Palestina, así como por varios lineamientos adicionales que son visibles en la región.

Sistema de Fallas Palestina: Este sistema se considera como un producto de la subducción oblicua de la placa de Nazca bajo la suramericana, donde su característica estructural está relacionada con mecanismos de desplazamiento lateral (Barrero & Cediell et al., 2012). Dentro de este sistema se reconoce las fallas Palestina, Cajonera y Leonera las cuales se describen a continuación.

La falla Palestina se caracteriza por la presencia de geoformas como espolones, lomeríos estructurales y algunas laderas onduladas y erosivas. Afecta rocas de muy mala y mala calidad de las anfíbolitas del Intrusivo Neisico de Padua y los esquistos del Complejo Cajamarca. Esta falla presenta un rumbo N15°-30°E y una longitud de 12.7 km en el área de estudio.

La falla Cajones se caracteriza por la presencia de geoformas como espolones, laderas estructurales, laderas contrapendiente y algunas laderas onduladas y erosivas. Afecta rocas de muy mala, mala y moderada calidad de los neises y tonalitas del Intrusivo Neisico de Padua. Esta falla tiene rumbo N20°-30°E y una longitud de 15.6 km.

Por otro lado, la falla La Leonera se caracteriza por la presencia de geoformas como espolones, laderas estructurales, laderas contrapendiente y algunas laderas onduladas y erosivas. Afecta rocas de muy mala, mala y moderada calidad de las tonalitas del Intrusivo neisico de Padua y los esquistos del Complejo Cajamarca. Esta falla tiene un rumbo N15°-20°E y una longitud de 16.8 km.

Lineamientos

En la zona de estudio se identifican varios lineamientos, visibles tanto en el campo como mediante técnicas de fotointerpretación. En el campo, estos lineamientos se destacan por características geomorfológicas notables, como facetas triangulares y escarpes. A través de la fotointerpretación, se observan cambios en el color del suelo, variaciones en la vegetación y el trazado de drenajes, detalles que no pudieron ser observados directamente en el campo debido al difícil acceso a estas áreas.

El lineamiento Frutillo (L.Frutillo), con rumbo NE-SW se encuentra ubicado paralelo a geoformas como escarpe y llanura de inundación donde el lineamiento se encuentra sobre el trazo del drenaje en roca de muy buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca, suelo transportado aluvial y roca moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca con una longitud de 2.3 km.

El lineamiento La Florida (L.La Florida) con un rumbo E-W se encuentra paralelo a geoformas de flujo laharico aterrazado, llanuras de inundación y perpendicular a espolones en rocas de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca, suelo transportado aluvial y suelo transportado deposito volcaniclástico secundario presentando una de longitud de 3.3 km.

El lineamiento Los Eucaliptos 1 (L1. Los Eucaliptos) con rumbo NE-SW se encuentra paralelo a geoformas como lóbulo de flujo laharico y perpendicular a laderas contrapendiente ubicado en rocas de buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca y rocas de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca con una longitud de 1.1 km.

El lineamiento Los Eucaliptos 2 (L2. Los Eucaliptos) con rumbo NE-SW se encuentra paralelo a geoformas como lóbulo de flujo laharico y sub-paralelo a laderas contrapendiente ubicado en rocas de buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca y rocas de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca con una longitud de 1.17 km.

El lineamiento Los Eucaliptos 3 (L3. Los Eucaliptos) con rumbo NE-SW se encuentra paralelo a geoformas como lóbulo de flujo laharico y a laderas contrapendiente ubicado en rocas de buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca y rocas de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca con una longitud de 0.7 km.

El lineamiento Los Eucaliptos 4 (L4. Los Eucaliptos) con rumbo E-W se encuentra paralelo a geoformas como lóbulo de flujo laharico ubicado en rocas de buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca con una longitud de 1.8 km.

El lineamiento El Jordán (L. El Jordán) con un rumbo NW-SE se encuentra paralelo a geoformas como lóbulo de flujo laharico, llanura de inundación y perpendicular a lomos denudados ubicado en rocas de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca y rocas de moderada calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca con una longitud de 1.9 km.

El lineamiento Aguacatal 1 (L1. Aguacatal) con un rumbo W-E se encuentra paralelo a geoformas como llanuras de inundación por el trazo del drenaje Aguacatal y perpendicular a espolones faceteados entre rocas de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca y rocas de moderada calidad tonalitas y anfibolitas del intrusivo neisico de Padua con una longitud de 2.9 km.

El lineamiento Aguacatal (L2. Aguacatal) con un rumbo W-E se encuentra paralelo con geoformas como lóbulo de flujo laharico, llanura de inundación y flujo laharico aterrazado ubicado en rocas de moderada calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca con una longitud de 3.6 km.

El lineamiento Aguacatal 3 (L3. Aguacatal) con un rumbo N-S se encuentra paralelo a geoformas como llanuras de inundación, lóbulo de flujo laharico y perpendicular a espolones entre rocas de moderada calidad cuarcitas del complejo Cajamarca y rocas de buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca con una longitud de 1.9 km.

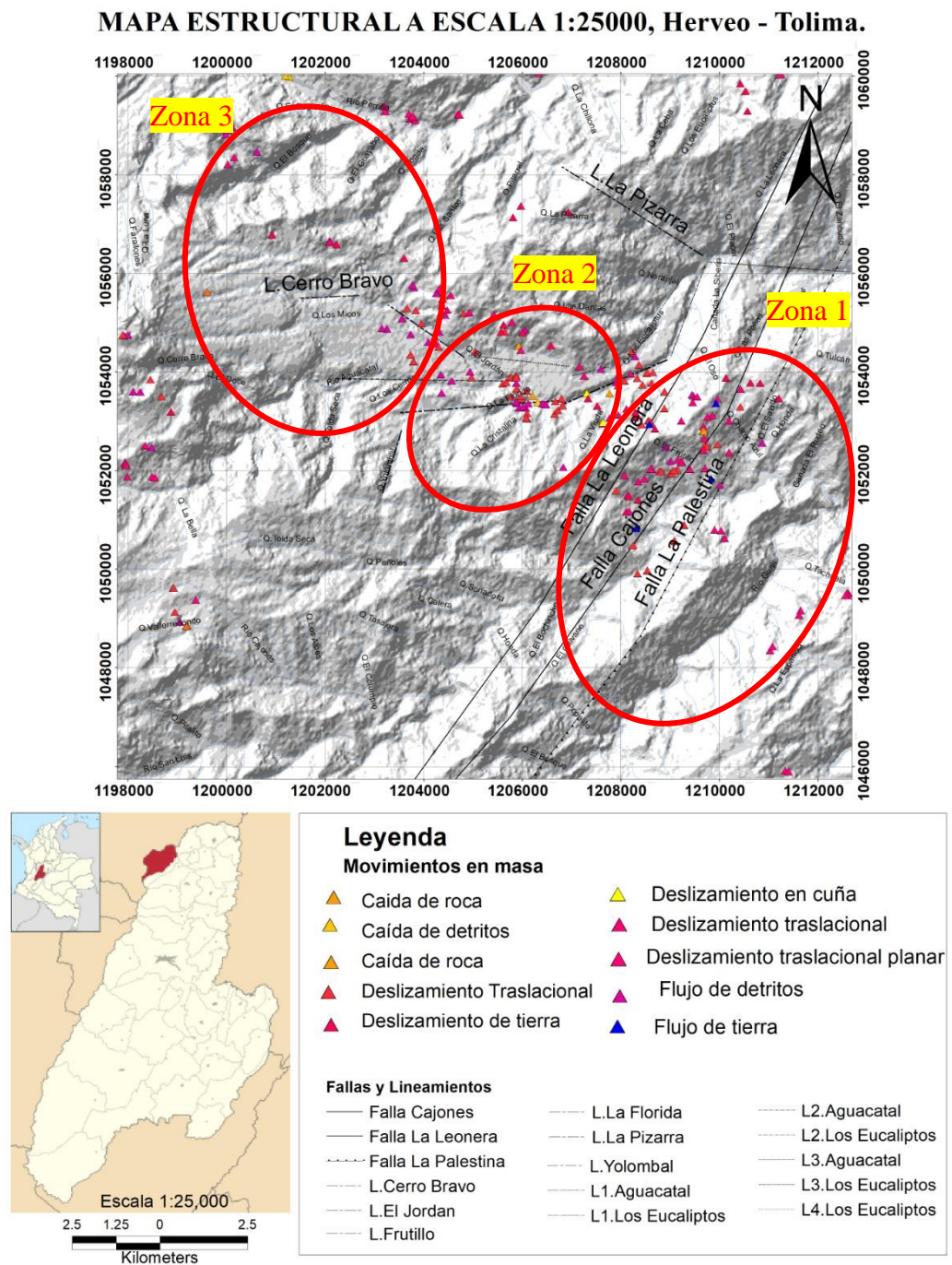
El lineamiento La Pizarra (L. La Pizarra) con un rumbo NW-SE se encuentra paralelo a geoformas como laderas erosivas y estructurales por el trazo del drenaje La Pizarra, entre rocas de mala y moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca con una longitud de 3.38 km.

El lineamiento Yolombal (L. Yolombal) con un rumbo N-S se encuentra paralelo a geoformas como lomos denudados por el trazo del drenaje Yolombal, entre rocas de moderada calidad del Stock de Manizales con una longitud de 1.37 km.

El lineamiento Cerro Bravo (L. Cerro Bravo) con un rumbo W-E se encuentra paralelo a geoformas como lóbulo de flujo laharico por el trazo del drenaje, entre rocas de moderada calidad del Stock de Manizales con una longitud de 1.37 km.

Figura 13

Mapa estructural y sus zonas críticas a escala 1:25000 Herveo-Tolima



Zonas críticas

En la figura 13 se señalan 3 zonas críticas que concentran la mayor cantidad de movimientos en masa. El objetivo es analizar la relación actual entre dichos movimientos en masa, las fallas y lineamientos presentes en esas áreas.

Zona 1: La zona se caracteriza por estar asociada a las fallas La Palestina, Cajones y La Leonera. En esta área, se han identificado 140 movimientos en masa, que incluyen deslizamientos traslacionales, flujos de detritos y flujos de tierra. Estos eventos se desarrollan en diversas geoformas, como laderas estructurales, laderas contrapendientes, espolones y algunas laderas erosivas, onduladas y lomos denudados. Los movimientos en masa se generan en rocas de moderada y mala calidad de tonalitas del intrusivo neisico de Padua, como también en rocas de mala calidad anfíbolitas del intrusivo neisico de Padua y rocas de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca. Como consecuencia de estos movimientos en masa, se han desarrollado afectaciones en las vías de comunicación y en menor medida en los cultivos de la zona.

Zona 2: La zona está asociada a los lineamientos La Florida, Los Eucaliptos 3 y Frutillo. Se han identificado 65 movimientos en masa, que incluyen deslizamientos traslacionales y flujos de detritos. Estos eventos se desarrollan en diversas geoformas, como laderas estructurales, laderas contrapendientes, espolones y escarpes. Los movimientos en masa se generan en rocas de moderada calidad cuarcitas del complejo Cajamarca como también en rocas de moderada y mala calidad esquistos del complejo Cajamarca. Donde los movimientos en masa han ocasionado principalmente daños en las vías de comunicación y obstrucciones en los ríos de la zona.

Zona 3: Esta zona se caracteriza por estar asociada a los lineamientos El Jordán y Aguacatal 2. Se han identificado 40 movimientos en masa, que incluyen deslizamientos traslacionales y flujos de detritos. Estos fenómenos se desarrollan en diversas geoformas, como lóbulos de flujo laharico, lomos denudados y escarpes. Los movimientos en masa se generan en rocas de moderada calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca y Esquistos del complejo Cajamarca como también en rocas de mala calidad filitas del complejo Cajamarca. Como consecuencia de estos movimientos en masa, se han generado principalmente afectaciones en las vías de comunicación, cultivos y obstrucciones en los ríos de la zona.

7. SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

La geomorfología de la zona de estudio se caracteriza por la presencia de montañas con pendientes prolongadas, predominando las rocas metamórficas altamente erosionadas. Esta configuración topográfica favorece la ocurrencia de procesos geomorfológicos como reptaciones, desplomes, derrumbes y solifluxiones (INGEOMINAS, 2001). Se presentan 4 tipos de ambientes: fluvial, denudacional, estructural y volcánico (Figura 14).

En el ambiente fluvial, predominan extensas **llanuras de inundación (Fpi)** que cubren aproximadamente el 88.3% de este entorno, extendiéndose de este a oeste y atravesando gran parte de la región. Además, se observan algunas **terrazas de erosión (Fte)** con sus respectivos **escarpes (Ftee)**, que representan un 8.4% del área total del ambiente y se encuentran a los lados de las **llanuras de inundación (Fpi)**.

En el ambiente denudacional, se pueden distinguir diversas geoformas. **Los lomos denudados (Dlde)** cubren el 66.1% del área de este entorno, mientras que **los cerros remanentes (Dcrem)** representan el 10.9% y **las lomas denudadas (Dld)** abarcan un 6.5%.

Además, se encuentran otras subunidades como **Laderas erosivas (Dle)**, **Laderas onduladas (Dlo)**, **Cimas (Dc)**, **Conos y lóbulos coluviales y de solifluxión (Dco)**, **Colinas remanentes (Dcr)**, **Conos o lóbulos de deslizamientos indiferenciados (Ddi)**, **Conos o lóbulos de deslizamientos traslacionales (Ddtr)**, **Escarpes (De)**, **Escarpes de erosión menor (Deeme)**, **Lomeríos muy disectados (Dlmd)**, **Lomeríos poco disectados (Dlpd)**, y **Conos o lóbulos de flujo de detritos (Dtfd)**.

En el ambiente estructural, el sistema de fallas de Palestina atraviesa gran parte de la zona de estudio, moldeando el paisaje y dando lugar a diversas geoformas. Entre ellas se destacan los **espolones (Ses)**, que cubren el 43.5% del ambiente, **las laderas contrapendientes (Slcp)**, con un 21.4%, y **las laderas estructurales (Sle)**, con un 12.4%. Otras geoformas presentes incluyen **lomeríos estructurales (Sloe)**, **ganchos de flexión (Sfg)** y **lomos de fallas (Sfl)**.

El ambiente volcánico está asociado a las grandes erupciones del volcán Cerro Bravo y ha sido modelado por la erosión fluvial y eólica, creando un paisaje notable con diversas geoformas. Entre estas, destacan **los flujos de lava en bloque (Vflaa)**, que cubren el 25.3% del ambiente, **los lóbulos de flujos laharicos (Vlfl)** con un 22.5%, y **los flujos de lava (Vfl)** con un 16.4%. Otras geoformas presentes incluyen el **cráter volcánico (Vc)**, el **domo volcánico (Vd)**, **lóbulos de flujos piroclásticos (Vflp)**, **flujos piroclásticos (Vfp)**, **flujos laharicos aterrazados (Vfla)**, el **escarpe de cráter (Vce)**, el **escarpe de flujo laharico aterrazado (Vflae)**, y **la ladera volcánica (VI)**.

Estas geoformas son de gran extensión cubriendo así casi la mitad de la zona de estudio como se muestra en la siguiente tabla 2 y figura 14.

Tabla 2*Tabla de subunidades geomorfológicas.*

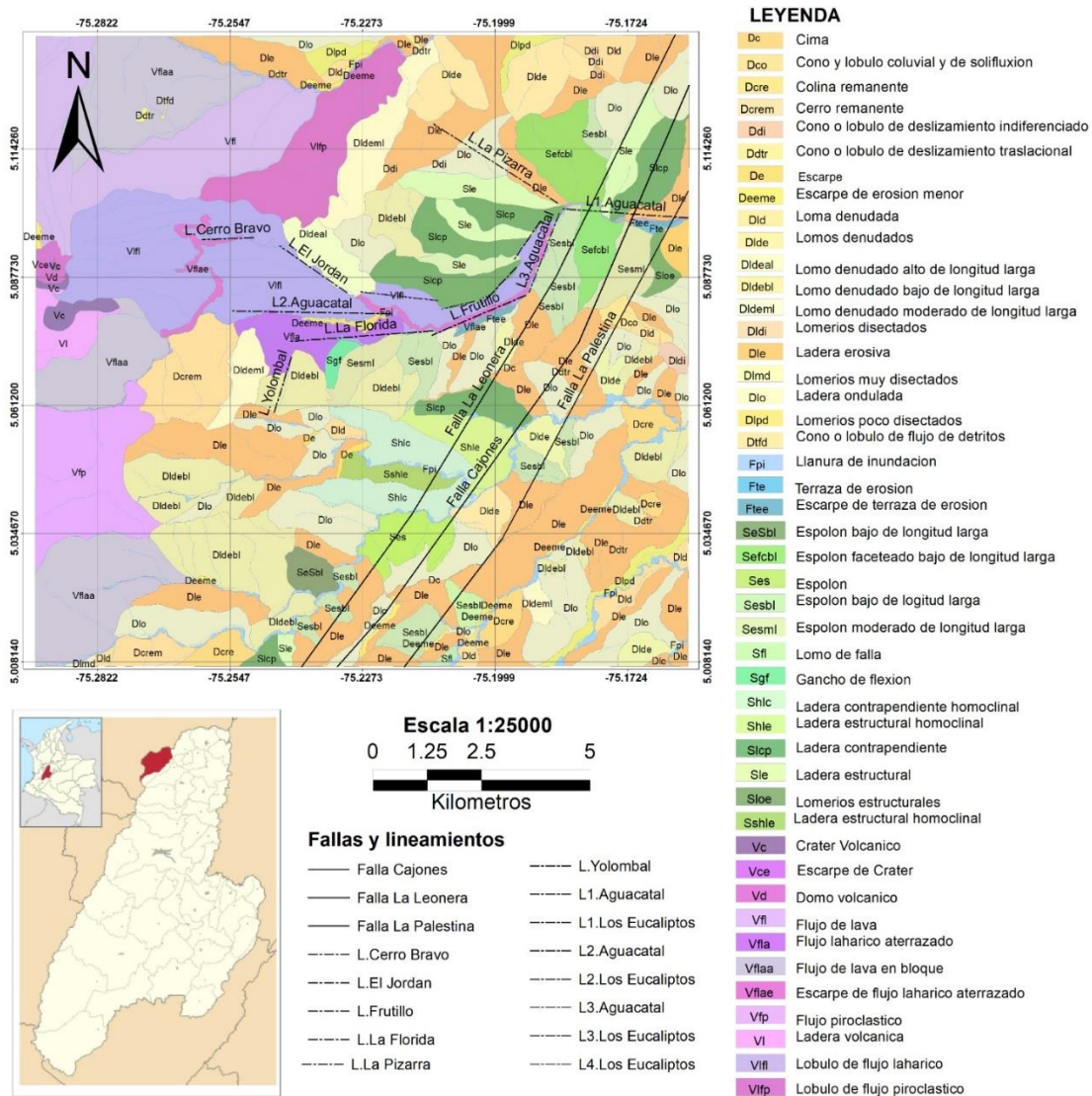
Subunidad geomorfológica	Código	Área(km)	Área%
Ambiente Fluvial			
Plano o llanura de inundación	Fpi	3,21463	1,49%
Terraza de erosion	Fte	0,120108	0,06%
Escarpe de terraza de erosion	Ftee	0,305736	0,14%
Ambiente Denudacional			
Lomos denudados	Dlde	7,72616	3,58%
Lomo denudado bajo de longitud larga	Dldebl	17,40343	8,06%
Lomo denudado moderado de longitud larga	Dldeml	5,144516	2,38%
Cerro remanente	Dcrem	4,968076	2,30%
Loma denudada	Dld	2,99072	1,38%
Ladera erosiva	Dle	36,554847	16,93%
Ladera ondulada	Dlo	23,22234	10,75%
Cima	Dc	0,34597	0,16%
Cono y lobulo coluvial y de solifluxión	Dco	0,532976	0,25%
Colina remanente	Dcre	2,733105	1,27%
Cono o lobulo de deslizamiento indiferenciado	Ddi	0,091607	0,04%
Cono o lobulo de deslizamiento traslacional	Ddtr	0,15553	0,07%
Escarpe	De	0,193458	0,09%
Escarpe de erosion menor	Deeme	1,011883	0,47%
Lomerios muy disectados	Dlmd	0,081841	0,04%
Lomerios poco disectados	Dlpd	2,025186	0,94%
Cono o lobulo de flujo de detritos	Dtfd	0,019502	0,01%
Ambiente estructural			
Espolon	Ses	2,113352	0,98%
Espolon faceteado bajo de longitud larga	Sefcbl	4,74316	2,20%
Espolon bajo de longitud larga	Sesbl	7,943234	3,68%
Espolon moderado de longitud larga	Sesml	2,824032	1,31%
Ladera contrapendiente	Slcp	8,661256	4,01%
Ladera contrapendiente homoclinal	Shlc	4,56137	2,11%
Ladera estructural	Sle	4,996023	2,31%
Ladera estructural homoclinal	Shle	2,349208	1,09%
Lomerios estructurales	Sloe	0,570101	0,26%
Gancho de flexión	Sgf	0,391882	0,18%
Lomo de falla	Sfl	0,173547	0,08%
Ambiente volcanico			
Flujo de lava en bloque	Vflaa	18,643164	8,63%
Lobulo de flujo laharico	Vlfl	16,591543	7,68%
Flujo de lava	Vfl	12,067611	5,59%
Crater Volcanico	Vc	0,812667	0,38%

Domo volcanico	Vd	0,513703	0,24%
Lobulo de flujo piroclástico	Vlfp	6,330713	2,93%
Flujo piroclástico	Vfp	7,390706	3,42%
Flujo lahario aterrazado	Vfla	2,479865	1,15%
Escarpe de Crater	Vce	0,019857	0,01%
Escarpe de flujo lahario aterrazado	Vflae	1,39675	0,65%
Ladera volcánica	VI	1,547966	0,72%

Figura 14

Mapa de geomorfología de la zona de estudio

MAPA DE GEOMORFOLOGÍA ESCALA 1:25000, HERVEO-TOLIMA



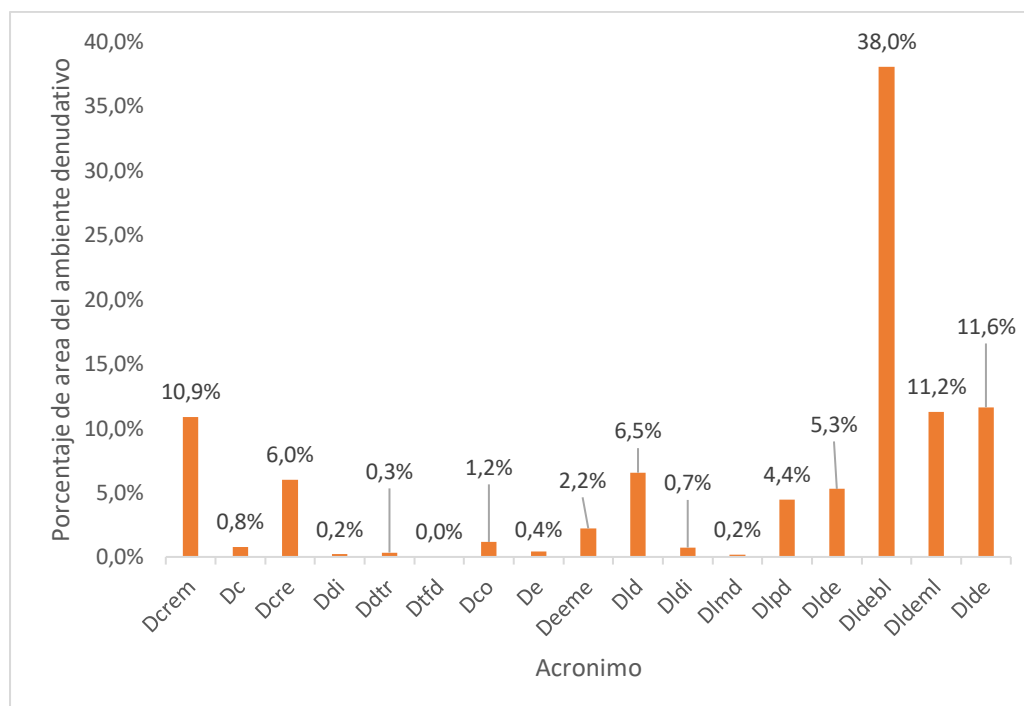
7.1. Descripciones geomorfológicas

7.1.1. Ambiente denudacional

En el ambiente denudacional, se observa una diversidad de geoformas que resultan de procesos erosivos tanto físicos como químicos, influenciados por la litología, la topografía y el clima. La actividad humana también desempeña un papel significativo, ya que la intervención antrópica puede acelerar el desgaste del suelo, contribuyendo así a la formación de estas geoformas. El ambiente denudacional representa el 23.4% del área de trabajo, donde las geoformas predominantes para este ambiente son los lomos denudados (Dlde, Dldebl, Dldeml). En la figura 15 se muestra la proporción de las geoformas denudacionales según su porcentaje en área.

Figura 15

Porcentaje de las geoformas denudacionales del área de estudio.

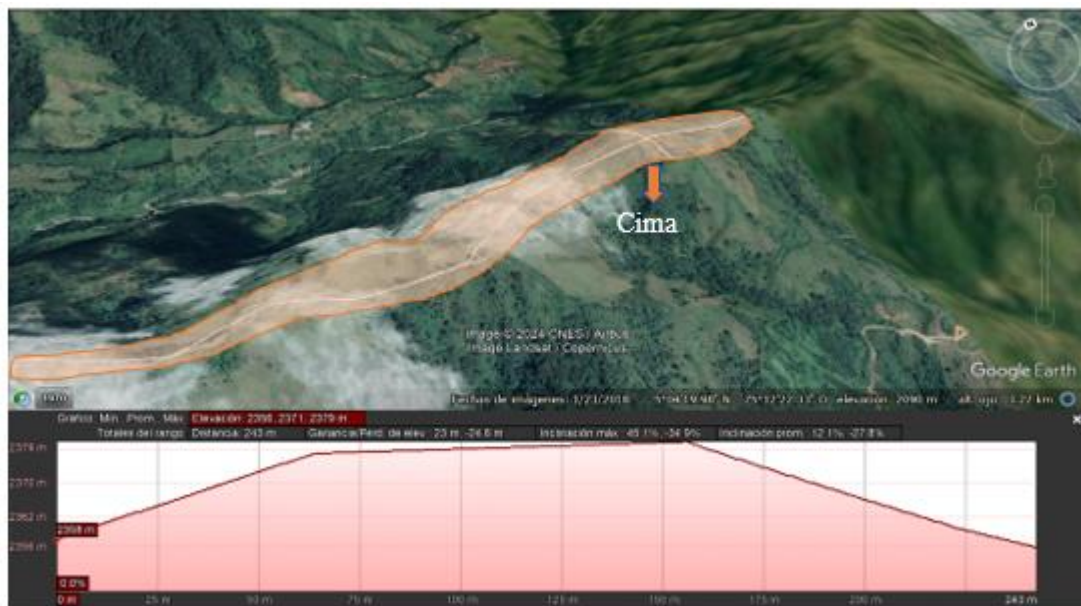


7.1.1.1. Cima (Dc). Esta subunidad se genera por procesos de meteorización en algunos casos acelerado o influenciado por actividad antrópica. Esta caracteriza por presentar

superficies planas a ligeramente convexas limitadas por laderas con pendientes predominantemente abruptas a muy abruptas. El ancho de las cimas varía entre 50 a 85m, litológicamente están compuestos por suelos residuales del Intrusivo Neisico de Padua y rocas del Complejo Cajamarca. Algunas evidencias de cimas se pueden observar cerca al municipio de Herveo y veredas como El Frutillo y El Arenillo.

Figura 16

Cima (Dc)



Nota: Tomada de Google Earth, 2024

7.1.1.2. Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco). Esta sub unidad presenta morfología alomada, se originó por procesos de transporte y depósito de material generado por una alta meteorización en pendientes suavemente inclinadas a abruptas, se encuentra sobre el complejo Cajamarca en un suelo transportado coluvial y con vegetación conformada por mosaico de cultivos y pastos. Las cimas se encuentran al oriente de la zona de estudio localizado hacia la parte oriental del municipio de Herveo con un área de 53.29 ha.

7.1.1.3. Cerro remanente (Dcrem). Geoforma de morfología alomada presentan cimas redondeadas a sub redondeadas con laderas medianamente largas y pendientes abruptas a muy abruptas, generadas por procesos de erosión. Estos cerros están delimitados por drenajes y se encuentran en rocas de moderada calidad del stock de Manizales hacia la parte sur-occidental de la zona de estudio, cerca al volcán Cerro Bravo con un área total de 496.8 ha.

7.1.1.4. Colina remanente (Dcre). Geoforma convexa de poca altura entre 250 y 350 metros, con cimas sub redondeadas limitadas por laderas cortas y bajas, se genera por procesos intensos de erosión, limitada por los ríos Guali y Cajones, con pendientes moderadamente abruptas a abruptas localizado en roca de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca al suroriente de la zona de estudio y al sur de la vereda El Salado. Las colinas remanentes tienen un área total de 273.31 ha.

7.1.1.5. Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi). Sub unidad en forma de cono, cóncava con pendientes abruptas las cuales pueden variar según la actividad del movimiento en masa presente. Estas geoformas se generan por procesos denudativos como la erosión hídrica entre otros generando transporte de material, agrietamiento en la roca y relieve irregular. Los conos de deslizamiento se pueden observar en el norte de la zona de estudio, asociados con rocas de malas calidad esquistos del complejo Cajamarca y al nororiente de la vereda Delgaditas. Esta geoforma tiene un área en total de 9.16ha.

Figura 17

Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 479809, N: 558290,50 y Altitud: 2018 ms.n.m.



7.1.1.6. Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional (Ddtr). Sub unidad en forma de cono, con pendientes abruptas a escarpadas a causa de la actividad del movimiento en masa, se generan por altos procesos denudativos como la erosión fluvial y eólica. Se encuentran en rocas de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca y rocas de moderada calidad anfibolitas del intrusivo de Padua cerca de las vías y a veredas como: Yolombo, Delgaditas, La Palma, Capiro, El plan y Frutillo con un área total de 15.5 ha.

Figura 18

Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional (Ddtr). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 479379,20, N: 560176,20 y Altitud: 2223 ms.n.m.



7.1.1.7. Escarpe (De). Geoforma recta o irregular con pendientes muy abrupta a escarpadas de longitudes cortas a medias de 10 a 100 metros, se generan por la alta erosión ya sea por drenajes de la zona o procesos tectónicos, está formado por rocas de buena calidad esquistos del complejo Cajamarca. Se encuentran ubicados al sur de la zona de estudio en la vereda El Plan con un área de 19.3 ha.

Figura 19

Escarpe (De). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 475476,50, N: 561492,80 y Altitud: 2197 ms.n.m.



7.1.1.8. Escarpe de erosión menor (Deeme). Geoforma con pendientes abrupta a escarpada con longitudes largas y cortas, originándose por los procesos denudativos como lo son la erosión eólica y fluvial de la zona de estudio. Se encuentran en la parte baja de las laderas y lomos, cerca de las llanuras de inundación. Estas geoformas se encuentran ubicadas al norte de la vereda Elena, al sur del Salado y Curubita delimitadas por ríos y quebradas como el río Gualí y la quebrada Popalito con áreas entre 3.4 ha hasta 24.5 ha.

Figura 20

Escarpe de erosión menor (Deeme). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 475476,50, N: 561699,20 y Altitud: 2193 ms.n.m.



7.1.1.9. Ladera erosiva (Del). Geoformas muy erosionadas por meteorización física y química con pendientes moderadamente abruptas a muy abruptas de formas cóncavas y convexas con longitudes cortas y largas presentando surcos y delimitadas por drenajes, Presentan movimiento en masa como deslizamientos y algunos flujos. Son rocas de mala calidad repartidas por gran parte de la zona, se encuentran en el complejo Cajamarca, el stock de Manizales y el intrusivo de Padua más que todo en la parte sur-oriental de la zona de estudio más precisamente cerca de la vereda El Salado, Capiro y El Placer con un área total de 3655 ha.

Figura 21

Ladera erosiva (Del). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 477400,00, N: 559199,80 y Altitud: 2441 ms.n.m.



7.1.1.10. Ladera ondulada (Dlo). Geoformas del terreno con pendientes moderadamente abruptas a abruptas, algunas divididas por los drenajes, erosión fluvial, movimiento en masa como deslizamientos y algunos flujos. Algunas de estas presentan medianamente meteorizadas y se encuentran repartidas en gran parte de la zona de estudio, en el stock de Manizales, el complejo Cajamarca y algunas en el intrusivo de Padua más específicamente al occidente de las veredas El Salado, El Frutillo, Capiro y al norte de la vereda La Palma con un área total de 2322.23 ha.

Figura 22

Ladera ondulada (Dlo). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 477625,80, N: 559633,20 y Altitud: 2436 ms.n.m.



7.1.1.11. Lomeríos disectados (Dldi). Geoformas con laderas cortas, de forma cóncava con pendientes moderadamente abruptas a muy abruptas con alto grado de meteorización, roca de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca pueden que presente reptación, se encuentra ubicada en el oriente de la zona de estudio al norte de la vereda La Esperanza con un área de 33.25 ha.

7.1.1.12. Lomeríos muy disectados (Dlmd). Geoformas con laderas cortas, pendientes moderadamente abruptas a abruptas algunas veces limitados por drenajes como el rio San Luis,

generadas por alto grado de meteorización ubicadas en rocas de mala calidad de andesita hacia el sur de la zona de estudio al oriente de la vereda La Romelia, con un área de 8.18 ha.

7.1.1.13. Lomeríos poco disectados (Dlpd). Geoformas con laderas muy cortas, con pendientes inclinadas a moderadamente abruptas algunas veces limitados por drenajes, generadas por alto grado de meteorización presentando cobertura vegetal como pastos limpios ubicadas en rocas de mala calidad andesitas ubicado hacia el sur-oriente de la zona de estudio al oriente de la vereda El salado, con un área de 202.5 ha.

Figura 23

Lomeríos poco disectados (Dlpd). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 468529,40, N: 557363,80 y Altitud: 3587 ms.n.m.



7.1.1.14. Loma denudada (Dld). Geoformas con alturas menores a los 200 metros, pendientes moderadamente abruptas a extremadamente abruptas, con laderas cortas, convexas,

se generan por alta erosión, presentando deslizamientos y flujos delimitada en su gran mayoría por drenajes se encuentran ubicadas en roca de mala y moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca y las podemos encontrar en la parte sur, norte, oriente y occidente de la zona de estudio más específicamente al sur de las veredas La Palma, Damas, al norte del Salado y al oriente del municipio de Herveo, con un área total de 299.07 ha.

Figura 24

Loma denudada (Dld). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 465306,50, N: 557320,20 y Altitud: 3865 ms.n.m.

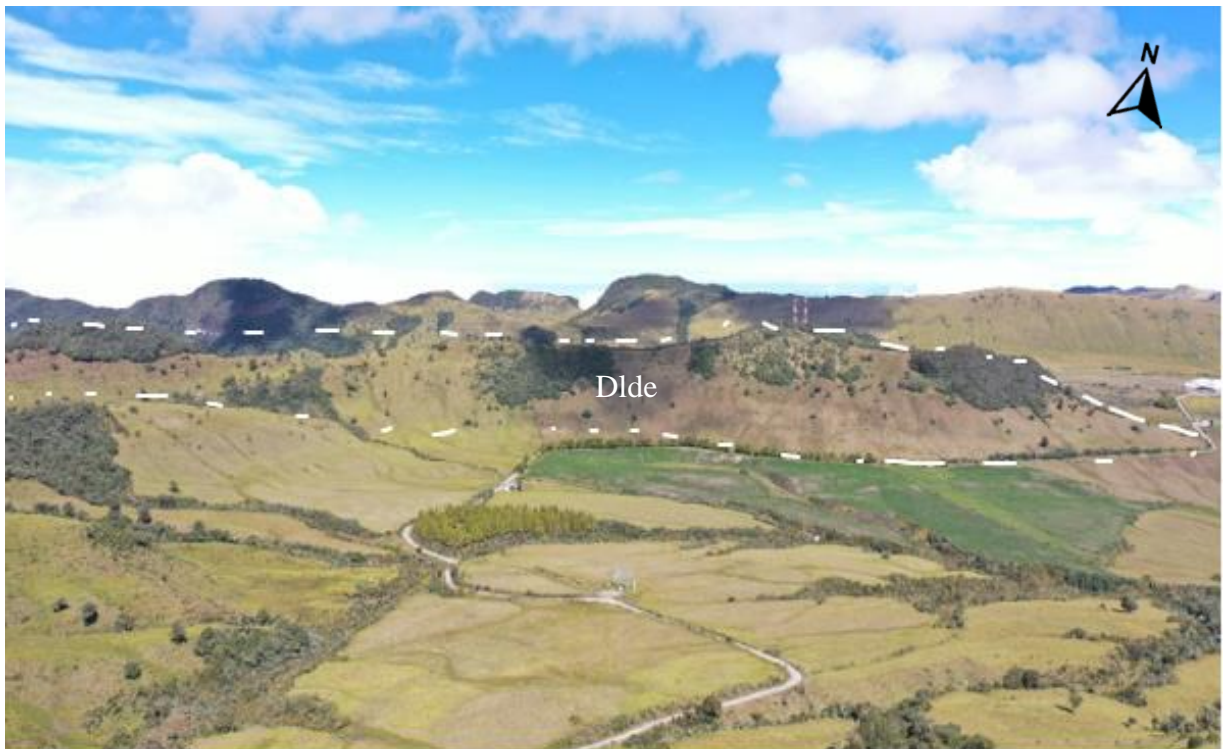


7.1.1.15. Lomo denudado (Dlde). Geoforma alargada en dirección perpendicular al drenaje con pendientes muy inclinadas, con cima en forma de cresta pueden tener diferentes tamaños bajo, medio, alto y diferentes longitudes largos, medios y cortos, se originan por procesos denudativos como la erosión eólica, fluvial y los movimientos en masa que se dan en

gran parte de esta zona estas geoformas se encuentran distribuidas en casi toda el área de estudio hacia la parte norte y sur de la vereda El plan, el sur de delgaditas, El frutillo y el sur de El saldo y Curubita, presentan áreas desde 16.63 ha hasta 475.96 ha.

Figura 25

Lomo denudado (Dlde). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 465306,20, N: 557320,20 y Altitud: 3866 ms.n.m.

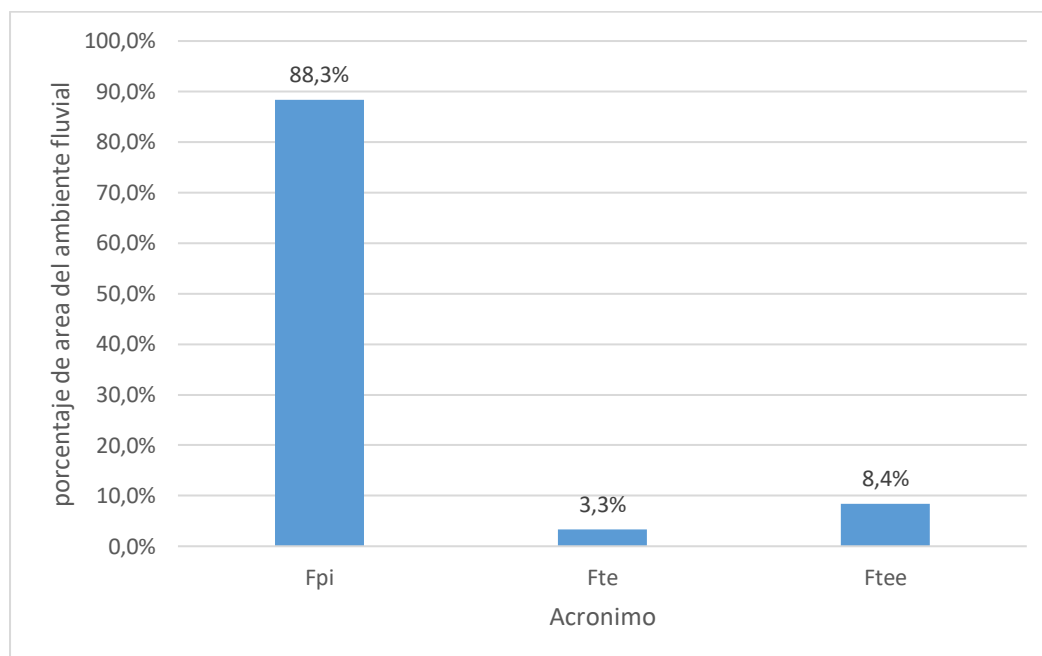


7.1.2. Ambiente fluvial

El ambiente fluvial representa el 0.4% del área de trabajo, donde las geoformas predominantes para este ambiente son las llanuras de inundación (Fpi). En la figura 26 se muestra la proporción de las geoformas fluviales según su porcentaje en área.

Figura 26

Porcentaje de las geoformas fluviales de área de estudio.



7.1.2.1. Escarpe de terraza de erosión (Ftee). Geoforma que bordea las terrazas aluviales de erosión y se genera por la interacción con el cauce del río Aguacatal y la quebrada La Cristalina, generando pendientes abruptas a muy abruptas y su tamaño es variable de unos pocos metros a decenas de metros se encuentra en el suelo residual del intrusivo de Padua localizado en el oriente de la zona de estudio, más específicamente al oriente de la vereda El Placer con un área de 30.10 ha.

7.1.2.2. Plano o llanura de inundación (Fpi). Geoforma ondulada, en algunas ocasiones inundable compuesta por diferentes materiales transportados por el cauce de los ríos Aguacatal, Cajones y Gualí o quebradas como La Cristalina, La Viuda, Yolombo, Los santos El Oso entre otras, con aporte de materiales provenientes de deslizamientos que se generan en las laderas, con unos tamaños de granulometría que van desde arcillas hasta bloques con formas

redondeadas a sub redondeadas en los fragmentos rocosos más grandes, estas geoformas se encuentran por toda el área de estudio representando un área de 310 ha.

7.1.2.3. Terraza de erosión (Fte). Geoformas alargadas, limitada por escarpes generados por los drenajes de la zona estudio, estas geoformas se generan por la erosión fluvial y levantamiento tectónico, presentan diferentes tipos de material tanto transportado por el cauce del rio como el que obtiene de las laderas. Estas geoformas se encuentran ubicadas al oriente de la zona de estudio en el suelo residual del intrusivo de Padua al oriente de la vereda El placer con un área de 12 ha.

Figura 27

Escarpe de terraza de erosión (Ftee), Plano o llanura de inundación (Fpi) y Terraza de erosión (Fte). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 475476,50, N: 561699,20 y Altitud: 2193 ms.n.m, en la quebrada La Cristalina.



7.1.3. Ambiente estructural

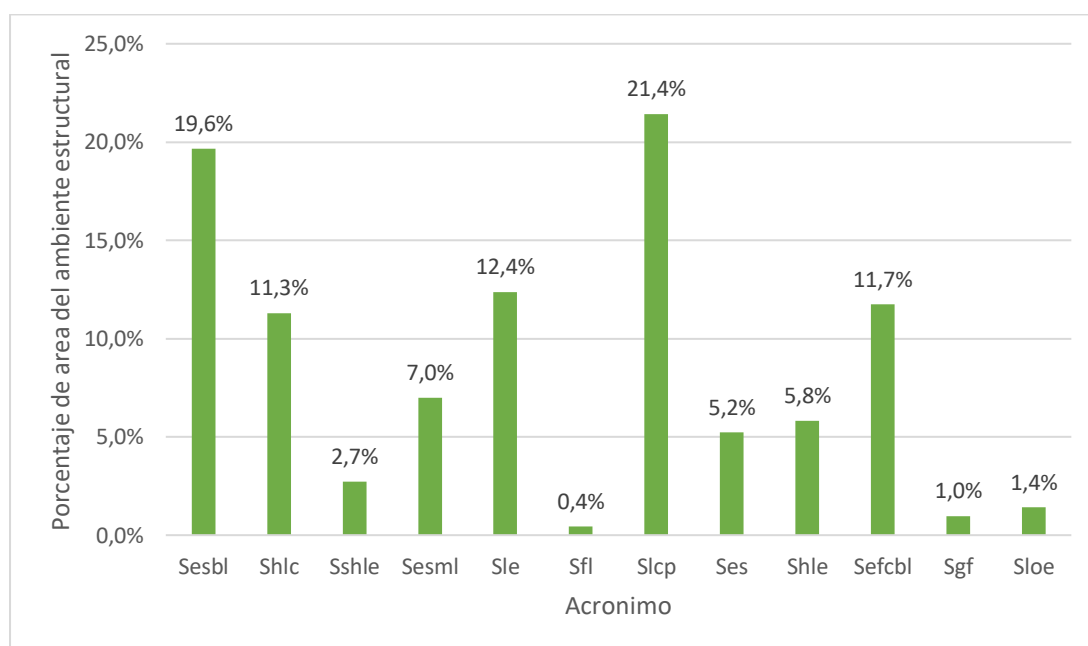
En el ambiente estructural, el control predominante lo ejerce el Sistema de Fallas Palestina con rumbo dextro lateral. La traza principal está cortada por fracturas regionales con

rumbo N70° W – N 50° W, la zona de falla tiene de 0.5 - 30 Km de ancho (INGEOMINAS, 2001).

El ambiente estructural representa el 8% del área de trabajo, donde las geoformas predominantes para este ambiente son espolones, laderas contrapendiente y estructurales (Sesbl, Slcp y Sle). En la figura 28 se muestra la proporción de las geoformas estructurales según su porcentaje en área.

Figura 28

Porcentaje de las geoformas estructurales de la zona de estudio.



7.1.3.1 Espolón (Ses). Geoforma perpendiculares a las fallas Palestina, Cajones y La Leonera o lineamientos como La Florida, Aguacatal 3 y Aguacatal 1 de diferentes tamaños altos, medios, bajos y diferentes longitudes largas, medias o cortas con pendientes moderadamente abruptas a muy abruptas, limitados por drenajes como la quebradas Los Alpes, La Calera, El Frutillo, La Cristalina, El Popalito y El Bocachico, desarrollados sobre rocas de moderada calidad tonalitas del intrusivo neisico de Padua y esquistos del complejo Cajamarca

se encuentran al sur del Frutillo y occidente de la vereda El Salado con un área total de 1100 ha.

7.1.3.2. Espolón facetado (Sefc). Geoformas perpendiculares a las fallas Palestina, Cajones y La Leonera y lineamientos como Aguacatal 3, limitada por drenajes paralelos a sub paralelos como la quebrada El Oso, Las Peñas y El Placer con pendientes moderadas a abruptas se pueden presentar de varios tamaños altos, bajo, medios y de longitudes largas, medias o cortas y en la parte frontal presentan facetas triangulares estas geoformas se encuentran ubicadas en la parte oriental de la zona de estudio entre las veredas El Placer y La Leonera con un área total de 474.31 ha.

Figura 29

Espolón facetado (Sefc). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 480023,00, N: 561371,70 y Altitud: 2411 ms.n.m.

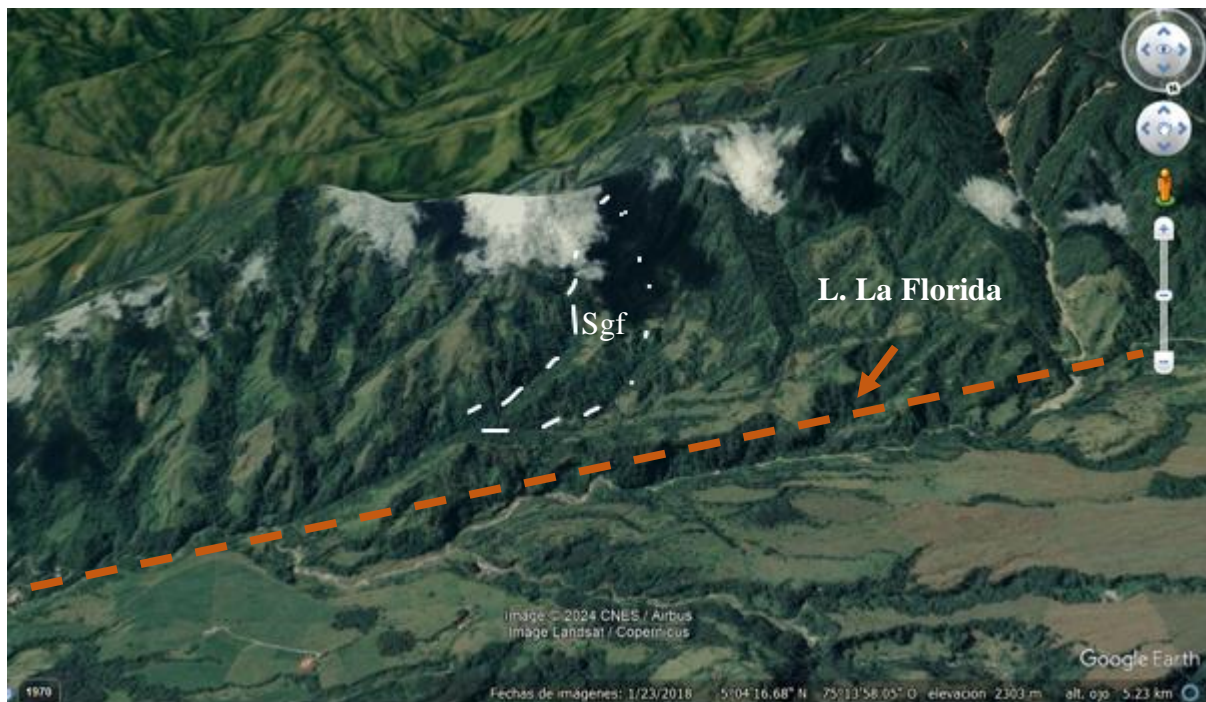


7.1.3.3. Gancho de flexión (Sgf). Sub unidad con forma alomado que se dobla en forma de gancho con pendientes abruptas a muy abruptas limitado por drenajes como la quebrada

Yolombal y La Cristalina sobre rocas de moderada calidad del complejo Cajamarca y se genera por el desplazamiento lateral del lineamiento La Florida y la alta erosión de la zona ubicado en el centro de la zona de estudio al sur de la vereda El Plan y al noroestes de la vereda Juan Sierra presentando un área de 39.18 ha.

Figura 30

Gancho de flexión (Sgf)



7.1.3.4. Ladera estructural (Sle). Geoforma inclinada presentando sus estratos a favor de la pendiente, con longitudes largas a cortas y con pendientes abruptas a extremadamente abruptas, estas superficies están asociadas a las fallas La palestina, Cajones y La Leonera y algunos lineamientos como Los Eucaliptos 1,2,3 y Aguacatal 1, limitadas por algunos drenajes como quebrada Las Dantas y Naranjal, presentan movimientos en masa como deslizamientos y flujos y se encuentran en el complejo Cajamarca y el intrusivo de Padua cerca de las veredas Capiro y El placer con un área total de 499.6 ha.

7.1.3.5. Ladera estructural homoclinal (Shle). Geoforma inclinada presentando sus estratos a favor de la pendiente, con longitudes largas a cortas y con pendientes abruptas a extremadamente abruptas, estas superficies están asociadas a las fallas Palestina, Cajones y La Leonera, inclinando las capas o estratos que esta presenta, limitadas por algunos drenajes como la quebrada Peñoles, relacionada a una estructura homoclinal por la disposición de sus estratos y la orientación del terreno, presentan movimientos en masa como deslizamientos y flujos y se encuentran en el complejo Cajamarca y el intrusivo de Padua cerca de las veredas Capiro y El placer con un área total de 234 ha.

7.1.3.6. Ladera contrapendiente (Slcp). Geoforma definida por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, que se relaciona con la ladera estructural por tal motivo también se desarrolla en el complejo Cajamarca y el intrusivo de Padua con pendientes abruptas a extremadamente abruptas delimitada por drenajes como quebrada Los Eucaliptos, Las Dantas y Naranjal, estas superficies están asociadas a las fallas La palestina, Cajones y La Leonera y algunos lineamientos como Los Eucaliptos 1,2,3 y Aguacatal 1, también presentan movimientos en masas como los son deslizamientos y flujos, se encuentran ubicadas cerca de las veredas Capiro y El placer con un área total de 866.2 ha.

7.1.3.7. Ladera contrapendiente homoclinal (Shlc). Geoforma definida por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, que se relaciona con la ladera estructural por tal motivo también se desarrolla en el complejo Cajamarca y el intrusivo de Padua con pendientes abruptas a extremadamente abruptas, relacionada con una estructura homoclinal por la disposición de los estratos y la orientación del terreno delimitada por drenajes como la quebrada Peñoles, estas superficies están asociada a las fallas Palestina, Cajones y La Leonera, también presentan movimientos en masas como los son deslizamientos y flujos, se encuentran ubicadas cerca de las veredas Capiro y El placer con un área total de 456 ha.

Figura 31

Ladera contrapendiente (Slcp) y Ladera estructural (Sle). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 480022,70, N: 561371,70 y Altitud: 2410 ms.n.m.



7.1.3.8. Lomo de falla (Sfl). Geoforma con laderas muy cortas de pendientes moderadamente abruptas, de cima redondeada, esta prominencia se genera por el movimiento de la falla palestina en el sur de la zona de estudio sobre el complejo Cajamarca, en una roca de calidad moderada bordeado por drenajes como el rio Gualí y la quebrada El Bosque, presenta buena cobertura vegetal como bosques de galería y ripario y se encuentra ubicada en la zona Sur-Oeste de la vereda La Palma con un área de 17.3 ha.

7.1.4. Ambiente volcánico

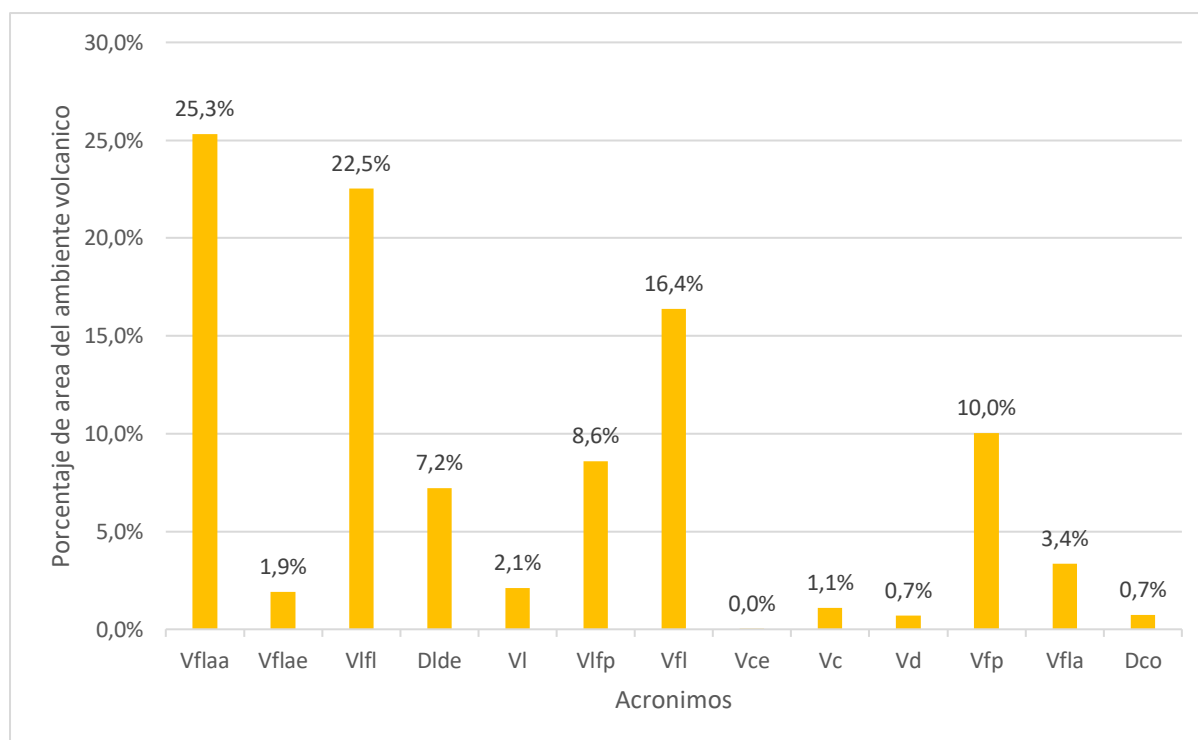
Este ambiente volcánico es generado por el gran volcán Cerro Bravo (VCB), un estratovolcán pequeño, joven y muy explosivo caracterizado por flujos de lava de alto aspecto

y depósitos producto de flujos de piedra pómez, bloques y cenizas encontrados próximamente al volcán (Lescinsky, 1990).

El ambiente volcánico representa el 68.3% del área de trabajo, donde las geoformas predominantes para este ambiente son los flujos de lava, flujos de lava en bloque y lóbulos de flujo lahario (Vfl, Vflaa y Vlfl). En la figura 32 se muestra la proporción de las geoformas estructurales según su porcentaje en área.

Figura 32

Porcentajes de geoformas volcánicas de la zona de estudio



7.1.4.1. Cráter volcánico (Vc). Sub unidad de forma circular limitados por escarpes con pendientes moderadamente abruptas a abruptas con el fondo suavemente inclinado, generados por el colapso de los edificios volcánicos antiguos, presenta vegetación como bosques de galería y ripario, con presencia de algunos deslizamientos y flujos se encuentran ubicados al occidente de la vereda Puerto Brasil con un área total de 81ha.

Figura 33

Cráter volcánico (Vc). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 467796,00, N: 560852,00 y Altitud: 3965 ms.n.m.



7.1.4.2. Domo volcánico (Vd). Sub unidad en forma de cúpula redondeada con superficie irregular con pendientes moderadamente abruptas a abruptas se localiza dentro del cráter principal del volcán Cerro Bravo compuesto por fragmentos de roca, cenizas y lava solidificada, con un tamaño aproximado de 100 metros, presenta poca vegetación con bosques de galería y ripario y un área de 51,37 ha.

Figura 34

Domo volcánico (Vd). En las coordenadas E: 467425,30, N: 562213,60 y Altitud: 3863 ms.n.m.



7.1.4.3. Escarpe de cráter (Vce). Sub unidad de forma cóncava de longitud corta, con pendiente extremadamente abrupta limitando el cráter principal del volcán Cerro Bravo presenta poca vegetación con bosques de galería y ripario con un área de 1,98 ha.

7.1.4.4. Escarpe de flujo lahárico aterrazado (Vflae). Sub unidad con pendiente muy abrupta a extremadamente abrupta de longitud larga, con una altura de aproximadamente 100 metros, presenta erosión aluvial delimitada por drenajes como el río Aguacatal y algunos movimientos en masa como deslizamientos, presentan poca vegetación con bosques de ripario, mosaicos de cultivos y pastos limpios localizada al occidente de la vereda El Plan con un área total de 139,67 ha.

Figura 35

Escarpe de flujo lahárico aterrazado (Vflae). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 474815,40, N: 562456,90 y Altitud: 2572 ms.n.m.



7.1.4.5. Flujo de lava (Vfl). Geoforma alargada de material expulsado por el volcán Cerro Bravo limitada por drenajes como las quebradas El Jordán y La Luna con pendientes abruptas a moderadamente abruptas con poca vegetación como bosques de galería y ripario está compuesto por rocas de buena calidad andesitas, localizado en la vereda Puerto Brasil, con un área de 1206 ha.

7.1.4.6. Flujo de lava en bloque (Vflaa). Geoforma muy irregular con pendientes abruptas a extremadamente abruptas delimitada por drenajes como la quebrada El Jordán y La Honda, presenta poca vegetación con bosques de galería y ripario, pastos limpios y mosaicos de cultivos, compuesta por rocas de buena calidad andesitas localizado en la parte norte del volcán Cerro Bravo con un área de 1864 ha.

7.1.4.7. Flujo laharico aterrazado (Vfla). Geoforma con pendientes inclinadas a moderadamente abruptas delimitado y paralelo al rio Aguacatal, está compuesto por productos volcánicos que se depositaron durante la erupción que fueron mezclados y transportados por corrientes de agua dándole a si también el aporte de otro tipo de materiales no volcánicos, presenta poca vegetación como pastos limpios y bosques de galería y ripario localizado al sur de la vereda El Plan con un área de 247,98 ha.

7.1.4.8. Ladera volcánica (Vlg). Geoforma con longitudes moderadamente largas de forma cóncava, conformando un edificio volcánico con pendientes moderadamente abruptas a abruptas con poca vegetación como pastos limpios y bosques de galería y ripario localizada cerca al cráter principal del volcán Cerro Bravo con un área de 154 ha.

Figura 36

Ladera volcánica (Vlg). En las coordenadas E: 468210,40, N: 560674,30 y Altitud: 3530 ms.n.m.



7.1.4.9. Lóbulo de flujo piroclástico (Vlfp). Geoforma delimitada por drenajes como las quebradas Honda y Los Santos con pendientes moderadamente abruptas a extremadamente

abruptas compuesto por material piroclástico como lapilli, bloques y bombas afectado por procesos denudativos, presenta laderas largas con poca vegetación como pastos limpios mosaicos de cultivos y bosques de galería y ripario, se encuentra ubicado al norte de la vereda El Plan y Delgaditas con un área de 633

7.1.4.10. Lóbulo de flujo laharico (Vlfl). Geoforma con escarpes altos y bajos con laderas cortas a largas limitados por drenajes como el rio Aguacatal y quebradas como Los eucaliptos y los Micos con poca vegetación como boques de galería y ripario, pastos limpios y cultivos de mosaico afectado por la erosión aluvial y procesos denudativos los cuales van moldeando el paisaje se encuentran ubicados al sur de la vereda Puerto Brasil y al occidente de la vereda Delgaditas y el Plan con un área total de 1659 ha.

Figura 37

Lóbulo de flujo laharico (Vlfl). Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 474665,50, N: 568690,50 y Altitud: 2584 ms.n.m.



8. MORFOMETRIA

La morfometría es un conjunto de herramientas de medición cuantitativa de la superficie, cuyo fin se basa en explicar a partir de datos numéricos los cambios del relieve, su origen y ambiente de formación (Ramírez Calderón & Tejada Vanegas, 2023). En este capítulo se pueden observar dos factores morfométricos como la pendiente y la curvatura.

8.1 Pendiente.

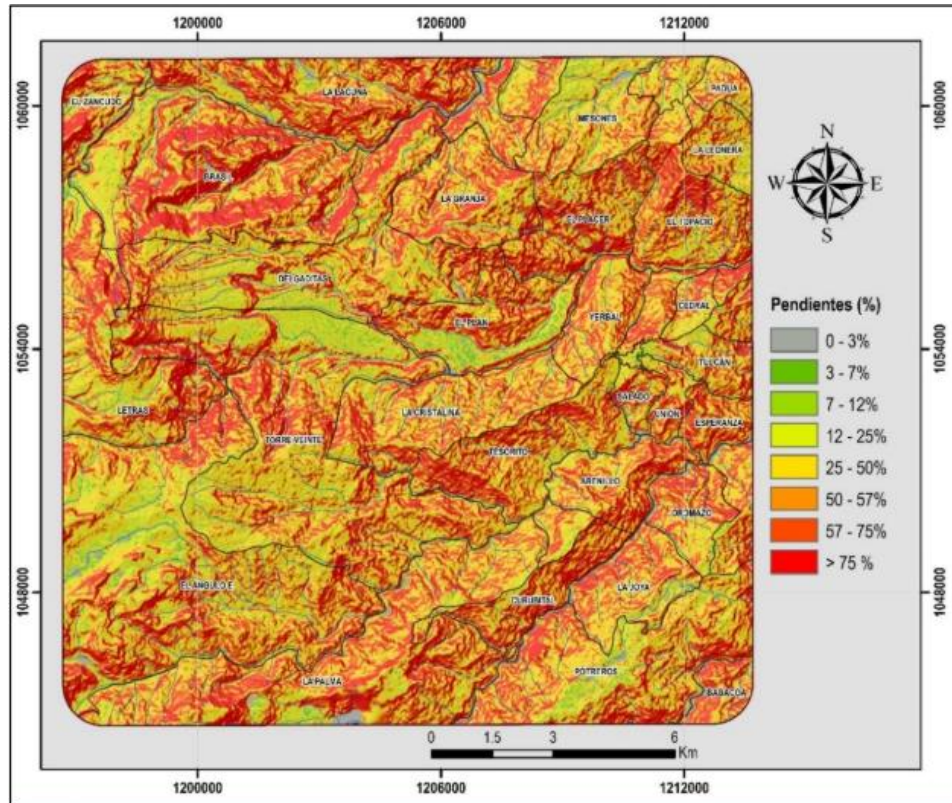
En la zona de estudio las áreas que se encuentran dentro del rango de pendientes de abrupta a muy escarpada (25% a >75%), suelen estar relacionadas con la ocurrencia de deslizamientos y flujos. Debido a la alta intensidad de la gravedad, en estas zonas se puede superar la estabilidad de los materiales del suelo y la roca desencadenando así estos movimientos en masa (Castillo V & Quintero P, 2023).

El área de estudio presenta una gran variedad de pendientes, las cuales están en constante cambio debido a la generación de movimientos en masa. Estos movimientos son inducidos por diversos factores, incluyendo la erosión eólica, la calidad y composición de las rocas, el material acumulado en la parte superior de las laderas, la fuerza gravitacional y la erosión fluvial. La combinación de estos factores, junto con la inclinación de las laderas, contribuye a la susceptibilidad de estas zonas a deslizamientos y flujos.

Otro factor de gran aporte a la generación de movimientos en masa en estas pendientes pronunciadas también pueden ser las lluvias intensas, las cuales aumentan la saturación del suelo, lo que puede ocasionar flujos de lodo y avalanchas de detritos (Castillo V & Quintero P, 2023). Con los datos obtenidos se puede observar que en esta zona predominan las pendientes abruptas a escarpadas (19° a >40°) (Castillo V & Quintero P, 2023). Como se muestra en la siguiente figura.

Figura 38

Mapa de pendientes de la zona de estudio.



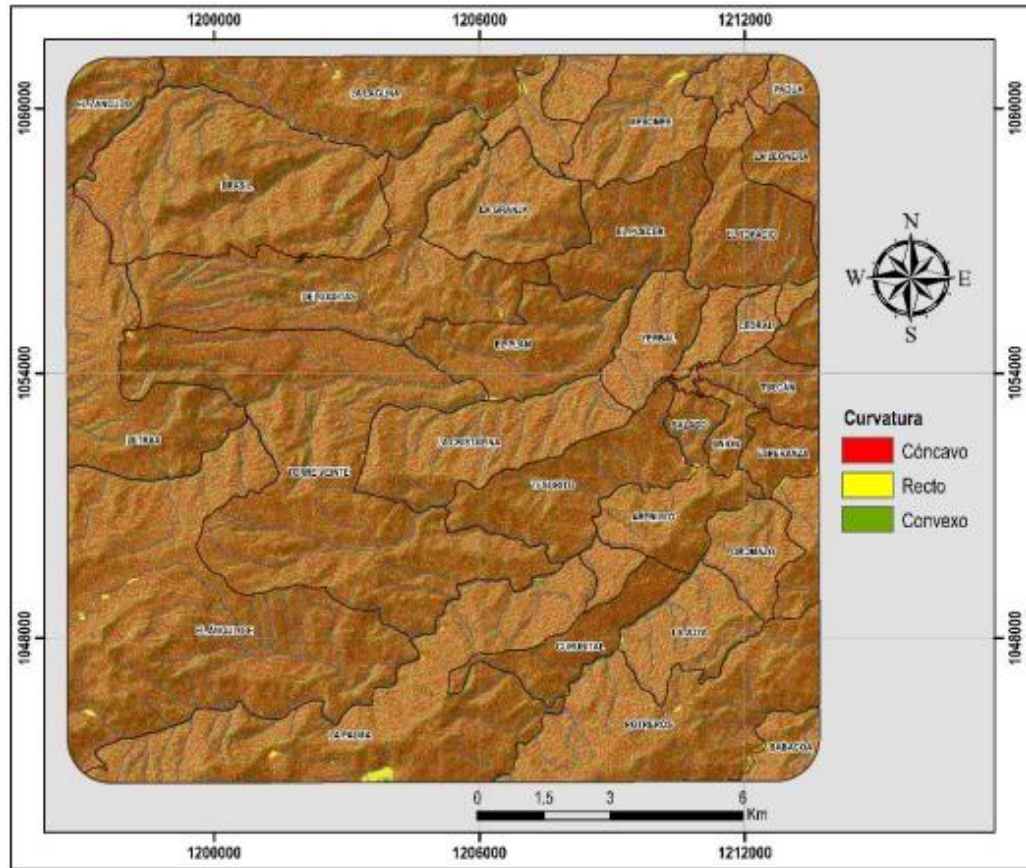
Nota. Mapa de pendientes de la zona de estudio tomado de (Castillo V & Quintero P, 2023).

8.2 Curvatura

La curvatura muestra la forma de las laderas identificando si es cóncava o convexa (SGC, 2017). Las formas cóncavas retienen líquidos en la menor área posible y las convexas lo dispersan, por lo tanto, la curvatura en la susceptibilidad por movimientos en masa se basa en la capacidad de concentración y retención de precipitaciones pluviales, siendo un condicionante morfológico característico en la generación de movimientos en masa. Según los resultados del estudio realizado en la zona se observan laderas convexas predominando en un 53% del área total, laderas cóncavas en un 44% y laderas rectas equivalentes 3% (Castillo V & Quintero P, 2023).

Figura 39

Mapa de curvatura



Nota. Mapa de curvatura de la zona de estudio tomado de (Castillo V & Quintero P, 2023).

9. MORFODINAMICA

La morfodinámica estudia los procesos superficiales que afectan la geomorfología y que han ocurrido a lo largo del tiempo. Se refiere a la actividad de agentes como el agua, el viento, el hielo y la gravedad terrestre, que modifican las geoformas existentes. Esta disciplina permite explicar y clasificar los diversos movimientos en masa que ocurren o han ocurrido en una zona bajo condiciones específicas (SGC, 2017).

Se realizó un inventario de procesos morfodinámicos que abarcó un total de 291 eventos (ver tabla 2), los culés corresponden a 195 deslizamientos, 74 a flujos y 22 a caídas, con un porcentaje de eventos activos del 84.54% (Castillo V & Quintero P, 2023).

Tabla 3

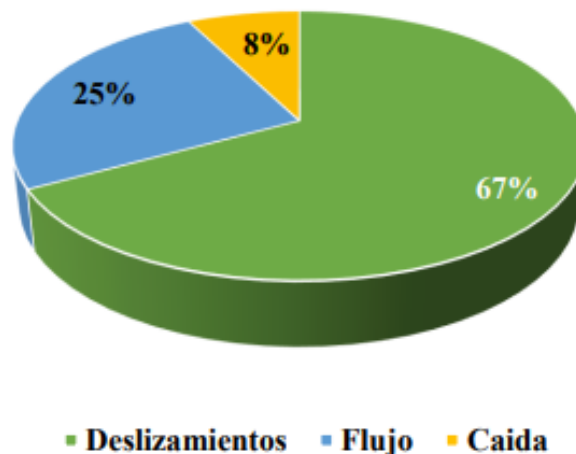
Registro total de movimientos en masa

TIPO DE MOVIMIENTOS EN MASA	CANTIDAD DE MOVIMIENTOS	ACTIVIDAD	
		ACTIVOS	INACTIVOS
Deslizamientos	195	154	41
Flujos	74	71	3
Caídas	22	21	1
TOTAL DE EVENTOS		291	

Nota. Tabla de registro de movimientos en masa tomado de (Castillo V & Quintero P, 2023).

Figura 40

Porcentaje de los tipos de movimientos en masa presentes en la zona de estudio.



Nota. Porcentaje de movimientos en masa de la zona de estudio tomado de (Castillo V & Quintero P, 2023).

En las siguientes figuras se puede observar algunos ejemplos del tipo de movimiento en masa encontrado en la zona de Herveo – Tolima.

Figura 41

Flujos de tierra. Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 475874,20, N: 567921,50.



Nota. Imagen de dron de un movimiento en masa tipo flujo tomado de (Castillo V & Quintero P, 2023).

Figura 42

Deslizamiento tomado en campo. Ubicado en las coordenadas E: 476446,50, N: 562186,80 y Altitud: 2246.1 ms.n.m



Nota. Movimiento en masa en campo de tipo deslizamiento tomado de (Castillo V & Quintero P, 2023).

Figura 43

Caída de roca. Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 1207833.40, N:1053757.62, Altitud: 2159 ms.n.m



Nota. Movimiento en masa en dron tipo caída tomado de ([Castillo V & Quintero P, 2023](#)).

9.1 Movimientos en masa y su relación con las unidades geológicas superficiales

En la tabla 3 se muestra la distribución de movimientos en masa según las distintas unidades geológicas superficiales. La unidad "Roca de moderada calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca (Rmosvfc)" registra un total de 35 movimientos en masa. Esto se debe a la composición de la roca, conformada por sedimentos volcánicos los cuales no están muy bien consolidados, al ser de moderada calidad indica que el material es más propenso a moverse por el alto grado de meteorización presente en esta unidad tanto eólico como fluvial por la presencia de drenajes como el Rio Aguacatal, la quebrada Los Micos y la

quebrada El Jordán; también es una zona de pendientes entre abruptas a extremadamente abruptas lo que conlleva al aumento de movimientos en masa en la zona.

Por otro lado, la unidad "Roca de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rmoecc)" registra un total de 28 movimientos en masa. Esto se debe a que esta unidad presenta una composición de esquistos grafitosos y al ser de moderada calidad los materiales son más propensos al movimiento. Esta unidad presenta un alto grado de meteorización tanto eólica como fluvial por su interacción con drenajes como el río Aguacatal, Cajones y Gualí y quebradas como La Viuda, Bocachico, La Cristalina, Sonora y El Frutillo, además presenta pendientes abruptas a extremadamente abruptas y escarpes. Todos estos factores juntos conllevan a que esta unidad sea bastante propensa a la generación de movimientos en masa.

Mientras tanto, la "Roca de mala calidad cuarcitas del complejo Cajamarca (Rmcucc)" registra 27 movimientos en masa. Esta unidad está compuesta principalmente por cuarcitas y cuarcitas-micáceas (INGEOMINAS, 1998). Debido a que es una unidad de mala calidad los materiales presentes en ella están notablemente sueltos o con alguna pequeña alteración climática pueden desmoronarse, esto junto a la erosión eólica o fluvial generada por los ríos Aguacatal y quebradas como La Española, Naranjos, El Salado, Los Eucaliptos y las pendientes abruptas a extremadamente abruptas convierten esta unidad en una zona altamente propensa para la generación de movimientos en masa.

Finalmente, las rocas de buena calidad anfíbolitas del intrusivo neisico de Padua (Rbainp) presentan una menor presencia de movimientos en masa (Castillo V & Quintero P, 2023). Esto se atribuye a la resistencia y estabilidad de estas rocas de buena calidad, las cuales no tienden a experimentar movimientos de material con facilidad.

Estas relaciones entre movimientos en masa y unidades geológicas superficiales varían dependiendo de la composición de la unidad, la calidad de la roca, la inclinación de las laderas y el grado de meteorización al que se encuentren expuesta la zona.

Tabla 4

Cantidad de movimientos en masa según la Unidad Geológica Superficial.

Unidades de roca	Código	Cantidad
Roca de muy buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca	Rmbsvfc	7
Roca de buena calidad anfibolitas del intrusivo neisico de Padua	Rbainp	2
Roca de buena calidad flujos andesíticos	Rbfla	6
Rocas de buena calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca	Rbsvfc	6
Roca de moderada calidad andesitas	Rmoa	7
Roca de moderada calidad cuarcitas del complejo Cajamarca	Rmocucc	20
Roca de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca	Rmoecc	28
Roca de moderada calidad flujos andesíticos	Rmofa	5
Roca de moderada calidad tonalitas del intrusivo neisico de Padua	Rmotinp	12
Roca de moderada calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca	Rmosvfc	35
Roca de mala calidad anfibolitas del intrusivo neisico de Padua	Rmainp	7
Roca de mala calidad cuarcitas del complejo Cajamarca	Rmcucc	27
Roca de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca	Rmecc	8
Roca de mala calidad filitas del complejo Cajamarca	Rmfcc	16
Roca de mala calidad tonalitas del intrusivo neisico de Padua	Rmtinp	12
Roca de muy mala calidad anfibolita del intrusivo neisico de Padua	Rmmainp	4
Roca de muy mala calidad esquistos del complejo Cajamarca	Rmmecc	8

Suelo residual arcilloso de las filitas del complejo Cajamarca	Srafcc	15
Suelo residual de lavas andesíticas	Srla	3
Suelo transportado depósitos volcanoclasticos primario flujo piroclástico	Stdvpfp	26
Suelo transportado deposito volcanoclastico secundario flujo laharico aterrazado	Stdvsfla	10
Suelo transportado coluvial	Stc	15
Suelo transportado aluvial	Sta	12
Total de movimientos en masa		291

Nota. Movimientos en masa en cada UGS modificado de ([Castillo V & Quintero P, 2023](#))

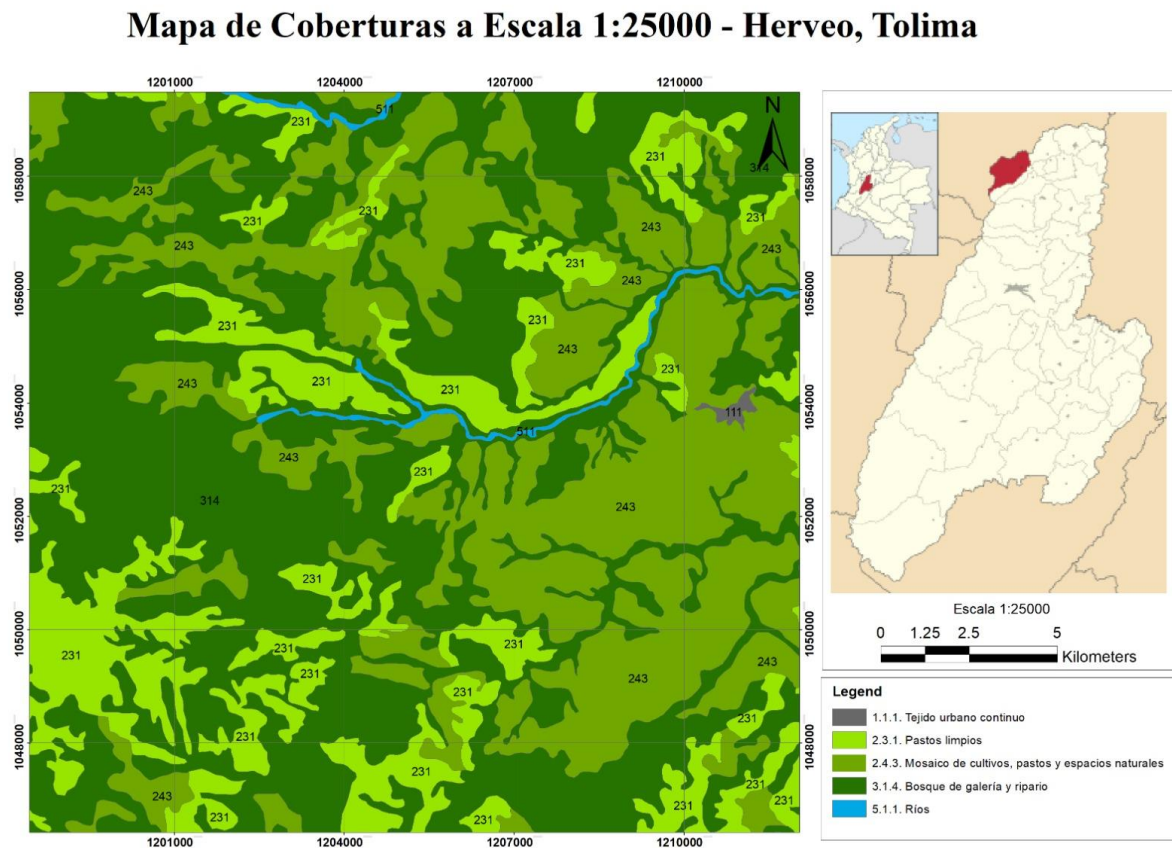
10.COBERTURAS.

El análisis de las coberturas de la tierra y su relación con los movimientos en masa se centra en entender su papel en la dinámica natural de la superficie terrestre. Estas coberturas regulan procesos erosivos, mantienen el equilibrio de la humedad del suelo y del ambiente, y contribuyen al balance hídrico al reducir la escorrentía superficial y favorecer el drenaje subterráneo. Los cambios en la cobertura pueden provocar diversos efectos, como alteraciones en la evolución de especies, deterioro de ecosistemas, modificaciones en los ciclos hidrológicos y transformaciones en las formas del relieve, generando movimientos en masa, flujos, avalanchas, erosión, y otros impactos ([SGC, 2017](#)).

Para adquirir y tratar las coberturas de la tierra del portal del IDEAM y el análisis temporal del cambio de la cobertura entre el año 1990 y 2017, se emplean las capas de cambio bosque – no bosque evaluadas del año 1990 al 2017 suministradas por el IDEAM con la participación de diferentes instituciones, donde se adoptó y adapto la metodología CORINE Land Cover ([IDEAM, 2012](#)). En la creación de capas y cálculos se utilizó el programa ArcGIS.

Figura 44

Mapa de coberturas de la zona de estudio.



La variable de cobertura del suelo para el año 2017 fue tomada por el IDEAM, la cual se utilizó como variable directa para el cálculo de la susceptibilidad. En donde los Bosques de galería y ripario presentan la mayor extensión afectada por movimientos en masa (43,23 ha, 46,65%), seguida de Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con una extensión de 29 ha (31,29%) y de pastos limpios con 14,79 ha (15.95%).

A continuación, se describen las coberturas interpretadas para la zona de estudio de acuerdo con la metodología propuesta por el IDEAM.

10.1. Tejido urbano continuo

Esta unidad está conformada por zonas urbanas compuestas por edificaciones densamente desarrolladas. Esto se observa en el casco urbano de Herveo, cubriendo un área de 24.93 ha, representando el 0.12% de toda el área de estudio.

10.2. Pastos limpios

Esta unidad son espacios que no presentan maleza o arbustos los cuales cuidan y utilizan para la cría de ganado o para conservación del suelo, a estos espacios también se les puede llamar praderas. Estos pastos abarcan un área de 4110 ha, representando el 18.97% del total del área de estudio.

Figura 45

Pastos limpios. Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 468529,40, N: 557363,50.



10.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales

Son áreas combinadas que como su mismo nombre lo dice utilizan para cultivar y a su vez en el mismo espacio contienen pastos y espacios no alterados (naturales). Esta cobertura abarca un área de 6378 ha, representando el 29.4% del total del área de estudio.

Figura 46

Mosaico de cultivos y espacios naturales. Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 477576,60, N: 561666,60.



10.4. Bosques de galería y ripario

Son zonas que se ubican en las cercanías a los cuerpos de agua como ríos y quebradas por lo tanto son importantes para la preservación de estos. Estos bosques cubren un área de 10962 ha, representando el 50.58% del total del área de estudio.

Figura 47

Bosques de galería y ripario. Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 478237,00, N: 561486,10.



10.5. Ríos

Corrientes de agua natural presentes en el área de estudio algunas veces con un gran caudal como los ríos Aguacatal, Cajones, Gualí y algunas quebradas como La Cristalina, Jordán, El Oso y la española. Los ríos abarcan un área de 195 ha, representando el 0.90% del total del área de estudio.

Figura 48

Ríos. Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 477421,10, N: 561459,00.



11. CAMBIO DE COBERTURAS.

El cambio generado entre los años 1990 y 2017 (27 años) es incorporado por la variable temporal, en donde, la capa de bosque representa las áreas en que prevalece la cobertura arbórea con una densidad de dosel mínima del 30%, una altura de dosel mínima in situ de 5 m y un área mínima de 0.01 km². Las áreas con cobertura distinta a la de bosque natural se denominan áreas no forestales (capa no forestal) (Valencia, Martinez, & Mejia, 2023).

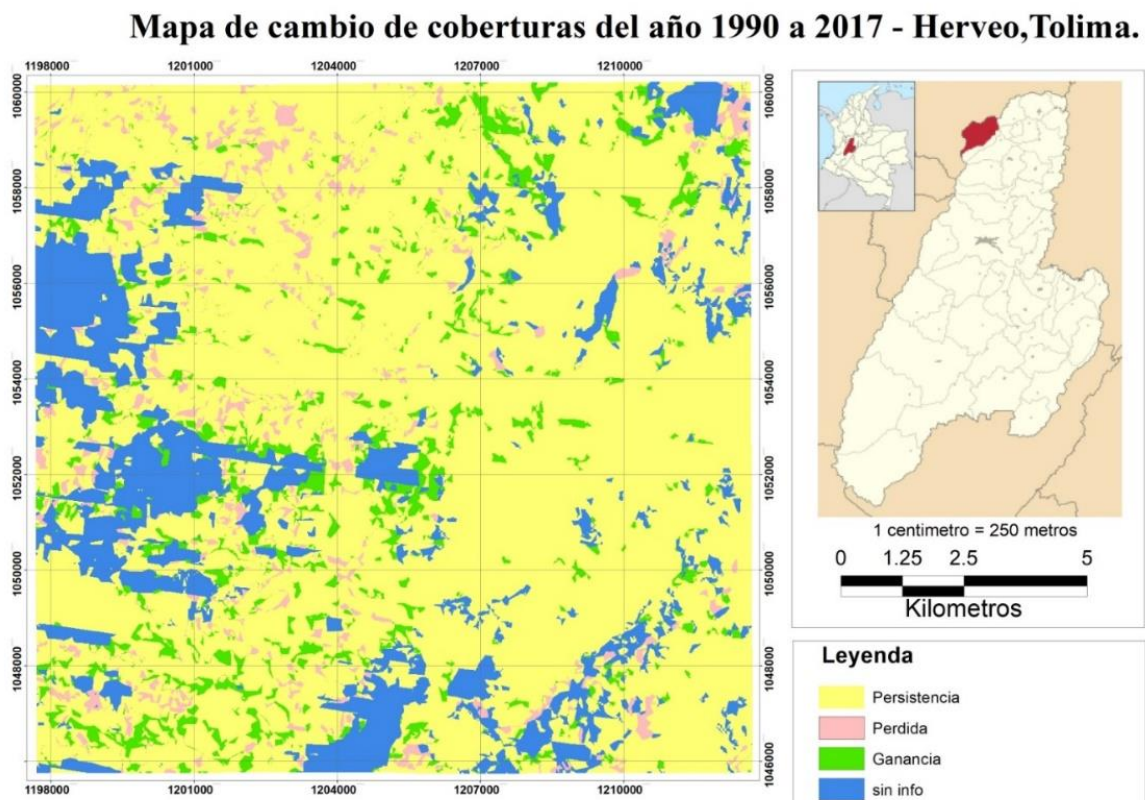
Con las capas bosque-no bosque del 1990 -2017 se elaboró un cruce entre ellas y a través de una relación en una matriz de combinación se disponen las clases de persistencia, ganancia y pérdida de la cobertura. Esta relación nos posibilita reconocer cómo la variable

tiempo afecta los desplazamientos de masa durante un lapso de 27 años (Valencia, Martinez, & Mejia, 2023).

De esta relación se observa que la mayor cantidad de movimientos en masa se encuentran en áreas que presentan persistencia de cobertura (bosque – bosque) con una superficie de 64,07 ha equivalente al 86,2% del área de estudio, seguida por áreas con ganancia de cobertura (no bosque - bosque) con una superficie de 3,86 ha equivalente al 5,2% y, finalmente, áreas que presentan una pérdida de cobertura (bosque – no bosque) con una superficie de 0,93 ha equivalente al 1,2% del área de estudio.

Figura 49

Mapa de cambio de coberturas de los años 1990-2017 de la zona de estudio.



12. USO DE SUELOS

La palabra "uso" se emplea para describir la explotación continua que hace el ser humano de diversos tipos de coberturas, con el fin de satisfacer sus necesidades materiales o espirituales. Desde una perspectiva técnica, el uso de la tierra se equipará a la producción de bienes y servicios destinados a la población en general, y su dinámica refleja la manera en que estos recursos son gestionados y aprovechados. (IGAC & UPRA,(2015) citado por Servicio Geológico Colombiano, 2017)

12.1. Elaboración del mapa de usos del suelo actual

Este mapa se elabora teniendo en cuenta el mapa de coberturas de la tierra del IDEAM 2018 y se complementa con información secundaria como imágenes satelitales, fotografías aéreas y una verificación que se hizo en campo. Esto con el fin de definir el uso actual real del territorio debido a que, por ejemplo, las unidades de pastos no siempre van a estar relacionadas con el uso de ganadería, a continuación, se muestra un esquema de la metodología utilizada para el mapa uso del suelo actual.

12.2. Uso de suelo actual

Basados en SGC, 2017 se definieron los siguientes usos del suelo y sus respectivas coberturas. Como lo muestra la tabla 4.

Tabla 5

Coberturas y sus usos del suelo actual

Cobertura de suelo	Uso actual de suelo	Área(ha)	%Área
Territorios artificializados	Residencial	24,93	0,1%
Territorios agrícolas	Producción	9903,95	45,7%
Bosques y áreas seminaturales	Protección	7436,62	34,3%
Superficies de agua	Aguas continentales	195,12	0,9%

Territorios agrícolas	sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería	4110,49	19%
	Total, área	21671,11	

12.3 Descripción de los usos del suelo actual.

Residencial: Zona urbana o rural con gran cantidad de construcciones como viviendas, parques, escuelas, tiendas y espacios recreativos entre otros (CORTOLIMA, 2014). Este uso de suelo se implementó en el municipio de Herveo -Tolima siendo así una zona adecuada para la comodidad y el vivir de las personas.

Producción: Espacio adecuado para siembra, criadero de animales y extracción de recursos naturales basado en normas ambientales para minimizar impactos (CORTOLIMA, 2014). Este uso del suelo se implementó en las veredas cercanas al municipio de Herveo -Tolima facilitando así el transporte y venta de estos recursos.

Protección: Zonas adecuadas para conservar y preservar recursos naturales, como lo son parques naturales, áreas de recarga hídrica y hábitat delicados (Secretaría Distrital de Ambiente, 2008). Este uso de suelo se implementó en zonas lejanas al casco urbano de Herveo-Tolima cerca de cuerpos de agua donde se restringe la expansión urbana para evitar impactos en estas zonas.

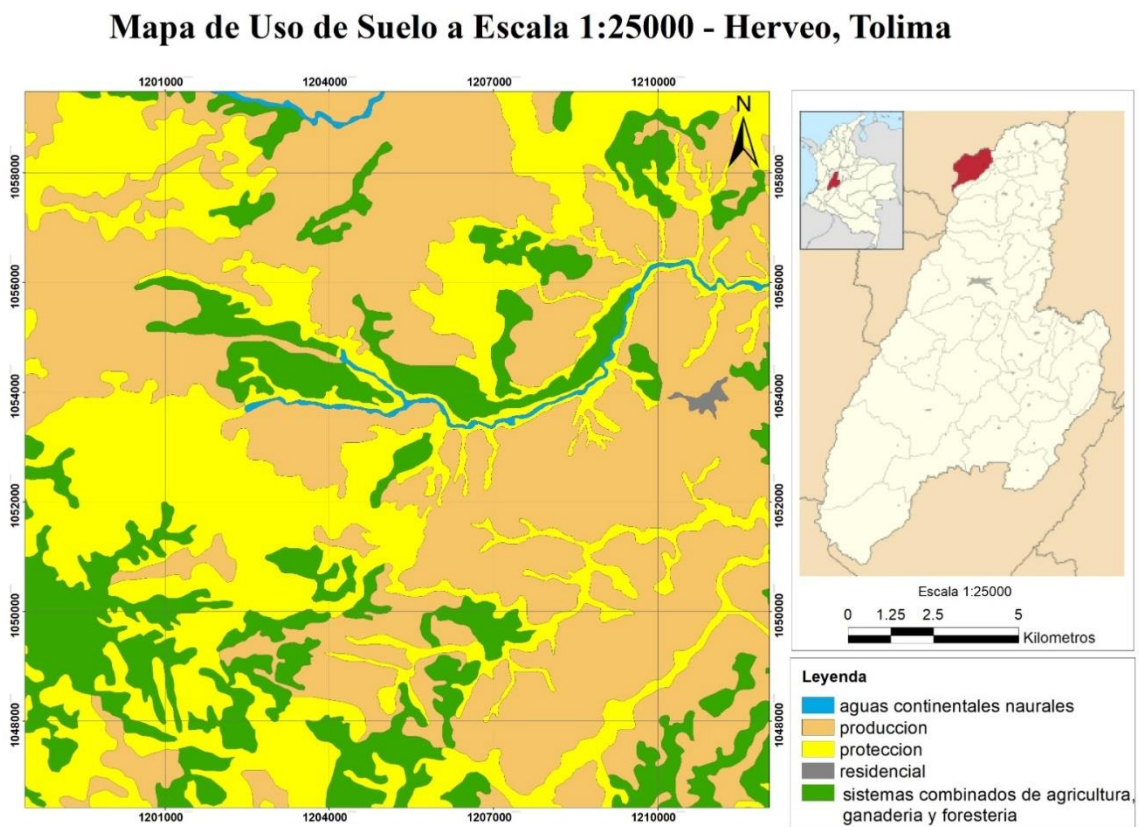
Agua continentales: Áreas donde se presentan cuerpos de agua como ríos, quebradas y sus alrededores, donde estas zonas son protegidas y reguladas para su adecuada distribución, para abastecimiento de agua potable y riego entre otros (CORTOLIMA, 2014). Este uso de suelo se da en casi toda la zona de estudio donde se encuentran los Ríos Aguacatal, Gualí y cajones junto con otros cuerpos de agua como las quebradas El Frutillo, Honda, Los Eucaliptos, El Oso, Los Micos, La Viuda, Los Cerros, Los Santos, El Doce, Calera y La Cristalina.

Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería: Zonas adecuadas para siembra, cría de animales y gestión de bosques, combinando estas actividades se pueden

obtener beneficios como la protección del suelo y utilización de nutrientes mejorando e impulsando estas actividades en la región (CORTOLIMA, 2014). Este uso de suelo también se da en los alrededores del municipio de Herveo-Tolima y en las veredas cercanas próximas a cuerpos de agua para facilitar la comercialización y la manutención de estas zonas.

Figura 50

Mapa de uso de suelo a escala 1:25000 -Herveo, Tolima



13. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO DESLIZAMIENTO.

Para realizar el análisis de susceptibilidad, se incorpora información sobre variables inherentes tales como la geomorfología, las unidades geológicas superficiales (UGS), las pendientes y la curvatura. Adicionalmente, se consideran variables dependientes, como las

coberturas vegetales, los suelos y el catálogo de movimientos en masa. Existen diversos métodos para llevar a cabo este tipo de análisis; en el presente documento se ha empleado el método estadístico bivariado, utilizando el cálculo de pesos de evidencia (WofE). La unidad de análisis considerada es el píxel, con una dimensión de 12.5 metros.

13.1. Método de Pesos de Evidencia (WofE)

Este metodo evalua patrones entre los factores condicionantes y las areas inestables mediante pesos. El peso de cada factor se calcula aplicando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa (Bonham, (1994) citado por Servicio Geologico Colombiano, 2017)

Para empezar se dividieron las variables en distintas clases y se examinó la unidad de análisis a nivel de píxel para cada una de estas clases, observando la cantidad de píxeles presentes en cada una de ellas. También se tomó el inventario de movimientos en masa y se relacionó con las otras variables, dando como resultado la cantidad de píxeles de movimientos en masa que se encuentran por cada clase en cada variable, luego se realizaron los cálculos de píxeles en excel como lo plantea la guía del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), generando un peso de evidencia positivo (w_i^+) y un peso de evidencia negativo (w_i^-). Luego estos dos pesos se restaron dando un peso final con el cual en el programa Arcgis se calculó la función de susceptibilidad LSI (landslide susceptibility index). Estos cálculos se realizaron para cada una de las variables que se utilizaron en el análisis de susceptibilidad.

En las siguiente tabla se muestra un ejemplo del proceso realizado en excel.

Tabla 6

Pixel de suelos

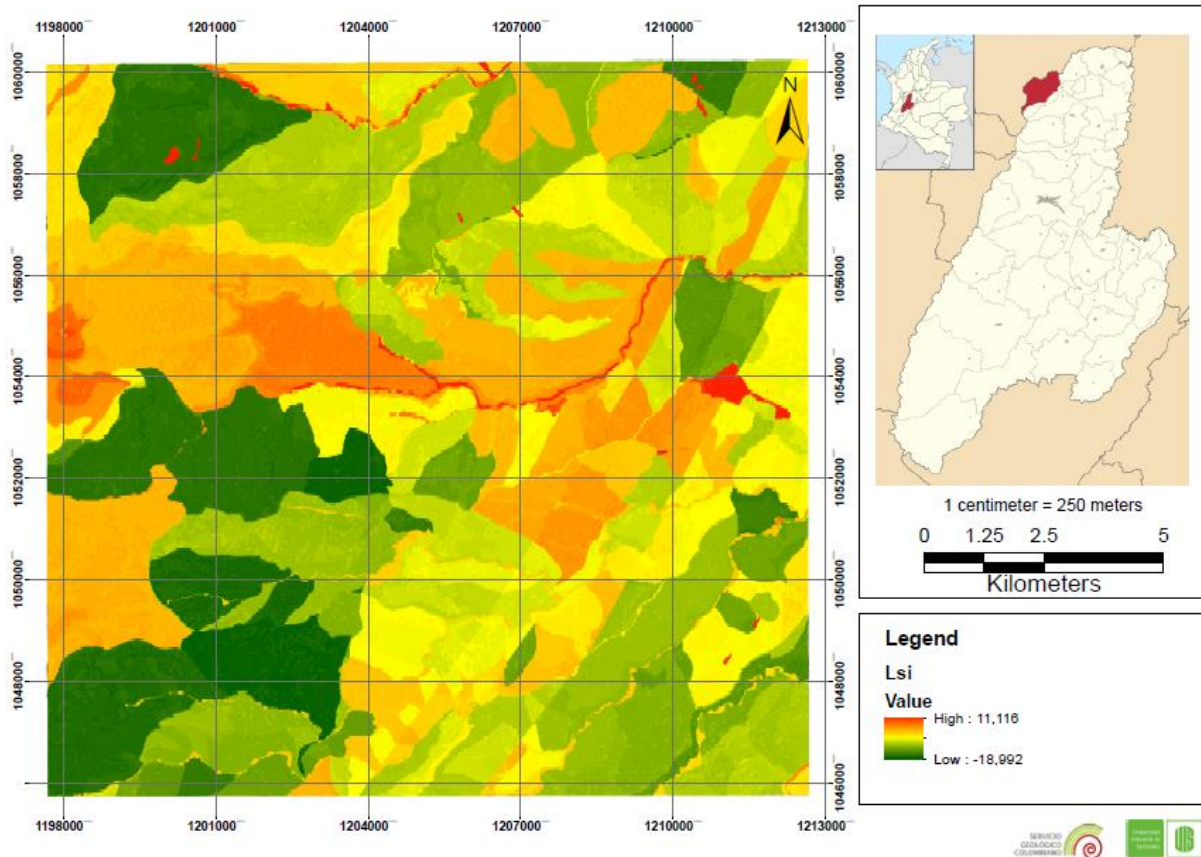
Clasificación de suelo	Pixel (Clases)	Pixel (MM)	Wi+	Wi-	Wf
residencial y comercial	1601	66	2,2873054 6	- 0,00989526 7	2,2972007 2
sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería Producción	263126 408296	969 1889	- 0,1664978 5 0,0626288 4	0,03530877 2 - 0,02732314 2	- 0,2018066 3 0,0899519 8
Protección	466865	1846	- 0,0951207 6	0,04503822 5	- 0,1401589 8
aguas continentales náucales	12501	301	-0,0944123	0,01736533 1	- 0,1117776 3

13.2. Cálculo de la función de susceptibilidad

Este calculo se realizo apartir de los pesos de evidencia obtenidos por el metodo bivariado y que se sumaron a partir de la siguinete ecuacion:

$LSI = Wf(UGS) + Wf(Cobertura) + Wf(Pendiente) + Wf(Curvatura) + Wf(Suelo) + Wf(Geo$
 morfologia) + Wf(Cambio de coberturas).

Los resultados obtenidos con el calculo de la funcion de suseptibilidad se muestran en la siguiente figura:

Figura 51*Mapa de rangos LSI*

13.3. Curva de éxito y validación del modelo.

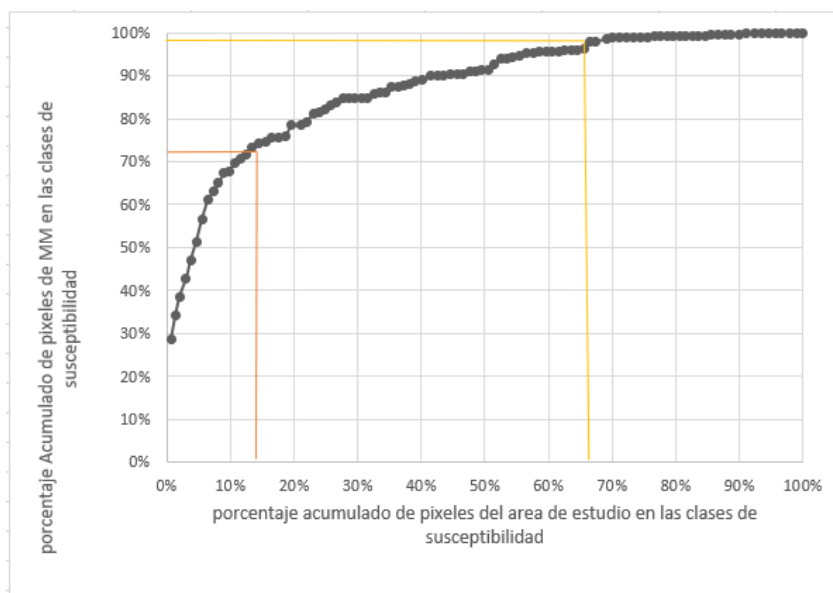
Para ajustar la función de susceptibilidad, se realizó una reclasificación en ArcGIS de los rangos de susceptibilidad generados en 100 percentiles. Estos percentiles se relacionaron con el inventario de movimientos en masa y se calculó el área acumulada en cada rango. Los resultados obtenidos representan la susceptibilidad a movimientos en masa en los rangos evaluados. Con estos datos, se generó una gráfica que muestra la curva de éxito para la zona de estudio. Esta gráfica permitió calcular el área bajo la curva, lo cual indica la calidad del

ajuste de los datos. Un porcentaje de área bajo la curva superior al 70% se considera aceptable (SGC, 2017).

En este caso el area bajo la curva (ABC) de la zona de estudio fue 88% evidenciando un buen ajuste de los datos para el modelo.

Figura 52

Curva de rangos LSI



13.4. Categorías de susceptibilidad por deslizamientos y flujos.

Para categorizar la susceptibilidad según la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), se establece lo siguiente: se considera susceptibilidad alta en las zonas donde se registra más del 75% de movimientos en masa en relación con el total de eventos observados; susceptibilidad media para aquellas zonas donde se registran movimientos en masa hasta un 25% respecto al total de eventos observados; y susceptibilidad baja para las áreas donde se registran movimientos en masa hasta un 2% respecto al total de eventos observados en toda la zona de estudio.

Tomado estos rangos se generan los siguientes resultados para nuestro modelo:

Tabla 7

Susceptibilidad por deslizamientos de área de estudio.

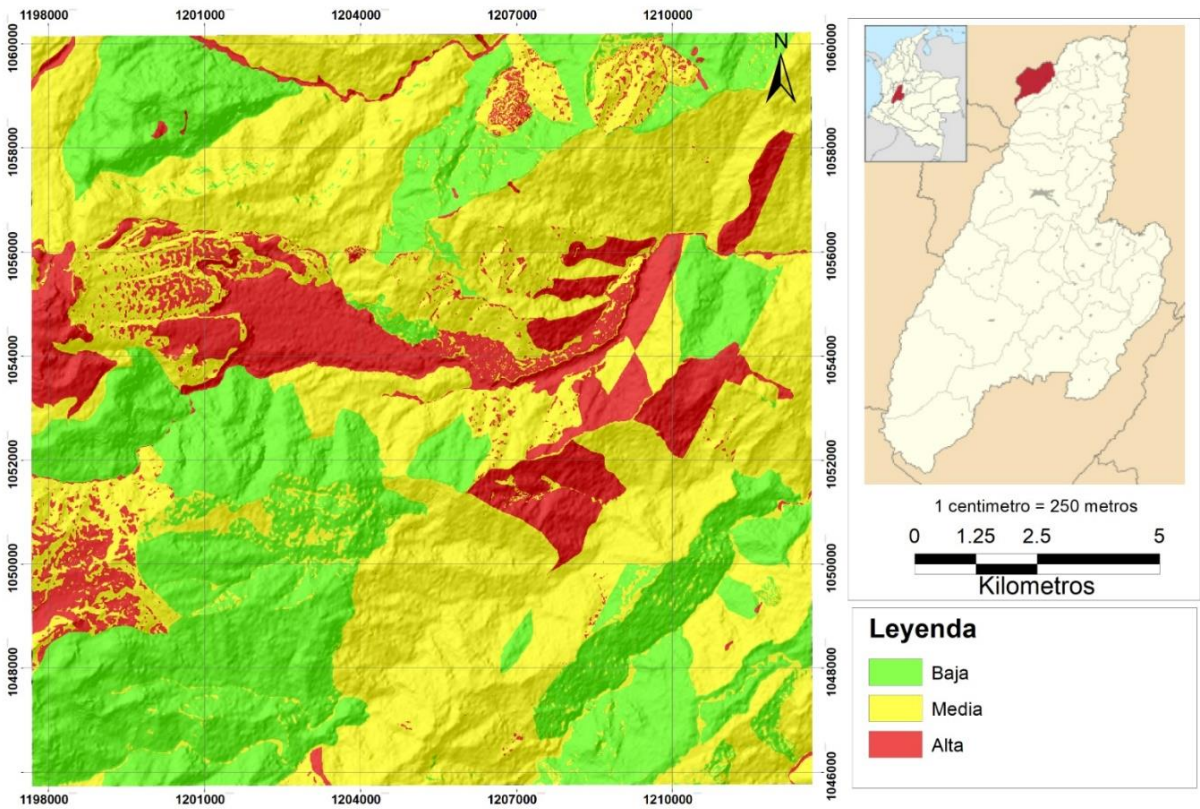
Susceptibilidad por deslizamiento			
Grado	Pixel	Área (Ha)	
Baja	478594	7486,49443	
Media	704602	11007,871	
Alta	202172	3152,09209	
Total	1385368	21646,4575	

Figura 53

Mapa de susceptibilidad por deslizamientos a escala 1:25000 de la zona de Herveo -

Tolima

Mapa de Susceptibilidad de amenaza a Escala 1:25000 - Herveo, Tolima



13.4.1. Susceptibilidad Alta.

Esta categoría abarca un área de 3.152 hectáreas, distribuida tanto en la región occidental, próxima al volcán Cerro Bravo, como en la región oriental, cercana al casco urbano del municipio de Herveo y las veredas El Frutillo y Capiro. Se sitúa sobre rocas de moderada calidad sedimentos volcánicos de la formación Casabianca, así como rocas de baja y moderada calidad del intrusivo neisico de Padua y el complejo Cajamarca.

En términos geomorfológicos, esta categoría se superpone a ambientes tales como el volcánico con lóbulos de flujo laháricos (**Vlfl**), el estructural con espolones faceteados (**Sefc**), y las laderas estructurales y contrapendientes (**Sle, Slep**) asociadas a la falla La Leonera. También incluye el ambiente denudativo con lomos denudados, laderas erosivas y onduladas (**Dlde, Del, Dlo**).

Se caracteriza por presentar pendientes muy abruptas a extremadamente abruptas, superiores a los 45 grados, lo que la convierte en una zona altamente susceptible a una variedad de movimientos en masa, tales como deslizamientos traslacionales, indiferenciados, caída de detritos y flujo de detritos. Estos eventos causan daños significativos a viviendas, infraestructuras viales y cultivos.

En cuanto a la cobertura del suelo, se observan bosques de galería y ripario, áreas de pastos limpios y mosaicos de cultivos. Los principales usos del suelo son el pastoreo y las tierras en descanso, así como para la producción y la protección.

13.4.2. Susceptibilidad media.

Esta categoría abarca un área de 11,007 hectáreas distribuidas en varias regiones: noroeste, sur-oeste, sur-este y noreste. En la región noroeste, se localiza en las veredas Guayabo, El Alto y La Bella; en la región sur-oeste, en Ventaderos, El Chagualo y La Palma; en la región sur-este, en Curubita y La Joya; y en la región noreste, en La Leonera, El Placer y

Ventadero. Se encuentra sobre una variedad de rocas, incluyendo andesitas de buena y moderada calidad, esquistos de muy mala, mala y moderada calidad del complejo Cajamarca, y anfibolitas y tonalitas de mala y moderada calidad del intrusivo neisico de Padua.

Esta categoría, la más extensa en el mapa, está asociada con diversas geoformas, como flujos de lava, flujos de lava en bloque y lóbulos de flujo lahárico (**Vfl, Vflaa y Vflf**), geoformas estructurales como laderas estructurales homoclinales, laderas contrapendiente y espolones (**Sshle, Slcp y Ses**) asociados a la falla La Leonera, Cajones y Palestina, y geoformas denudacionales como laderas erosivas, onduladas y lomos denudados (**Del, Dlo y Dlde**). Las pendientes en esta zona varían de moderadamente abruptas a muy abruptas desde los 16° hasta los 45°.

Los movimientos en masa predominantes en esta categoría son los deslizamientos traslacionales e indiferenciados.

En cuanto a la cobertura del suelo, se observan bosques de galería y ripario, áreas de pastos limpios y mosaicos de cultivos. Los principales usos del suelo son el pastoreo y las tierras en descanso, así como para la producción y protección.

13.4.3. Susceptibilidad baja.

Esta categoría se localiza en las regiones Norte y Noroeste de la zona de estudio, cerca de las veredas La Bella y El Alto; en la región Sur-Oeste, próximo a las veredas Ventaderos y La Enea; en la región Sur-Este, cercana a las veredas Curubita y La Joya; y en la región Noreste, al norte del casco urbano de Herveo. Está situada sobre rocas de muy mala, mala y moderada calidad de esquistos del complejo Cajamarca, así como sobre suelos residuales arcillosos del complejo Cajamarca, y rocas de mala y moderada calidad del stock de Manizales.

Las geoformas presentes incluyen flujos de lava en bloque (**Vflaa**) y formas denudacionales como colinas remanentes, cerros remanentes, laderas erosivas, laderas

onduladas y lomos desnudos (**Dcre, Dcrem, Dle, Dlo y Dlde**). También se asocia con formas aluviales como las llanuras de inundación (**Fpi**).

Las pendientes identificadas en esta categoría van desde inclinadas hasta moderadamente abruptas, con ángulos que varían entre 2° y 16°. Aunque en algunas áreas la pendiente puede aumentar, la susceptibilidad sigue siendo baja debido a la calidad de la roca presente en la zona.

Los movimientos en masa predominantes en esta área son los deslizamientos traslacionales y el flujo de detritos.

En cuanto a la cobertura del suelo, se observan bosques de galería y ripario, áreas de pastos limpios y mosaicos de cultivos. Los principales usos del suelo son para la producción y la protección.

14. ANÁLISIS DE LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

En esta fase se realizó el mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa donde se tomó el detonante clima (lluvia máxima diaria) y detonante sismo junto con la susceptibilidad por deslizamientos para realizar los cálculos respectivos. Los cuales están descritos por la guía metodológica del servicio geológico colombiano ([SGC, 2013](#)).

14.1 Factor climático

Para el análisis del factor climático se tomaron 9 estaciones meteorológicas con las cuales se calcularon los valores de precipitaciones máximas diarias para varios periodos de retorno calculándose con una distribución de Gumbel tipo 1 ([Gonzalez Y & Padilla G, 2023](#)). Como se muestra en la siguiente tabla 8.

Tabla 8*Estaciones pluviométricas.*

Estación	Precipitación máxima
La Leonera	99.34
El Eden	157.45
Villahermosa 1	146.85
Murillo	101.60
Villahermosa 2	95.06
Alto del oso	96.03
Manzanares	155.01
Marulanda	107.06
Santa Barbara	98.29

Con estos valores se hizo un análisis de interpolación por el método IDW, siguiendo los pasos descritos en la guía metodológica del servicio geológico colombiano (SGC, 2013).

El resultado de esta interpolación se reclasificó en cinco rangos y se sumó con la susceptibilidad por movimientos en masa de la zona en el programa ArcGIS (SGC, 2013), de esta manera, se generó la amenaza por factor climático.

14.2. Factor sismo

Para el análisis de este factor sismo se evaluaron los valores de aceleración pico del suelo (PGA) descritos en el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para un período de retorno de 475 años (Gonzalez & Padilla, 2023) en la zona de estudio, para el cual se ha asignado un valor 150-200 cm/s² clasificándose en una categoría 3, y por tal motivo esta área representa una amenaza media en factor sísmico (SGC, 2013).

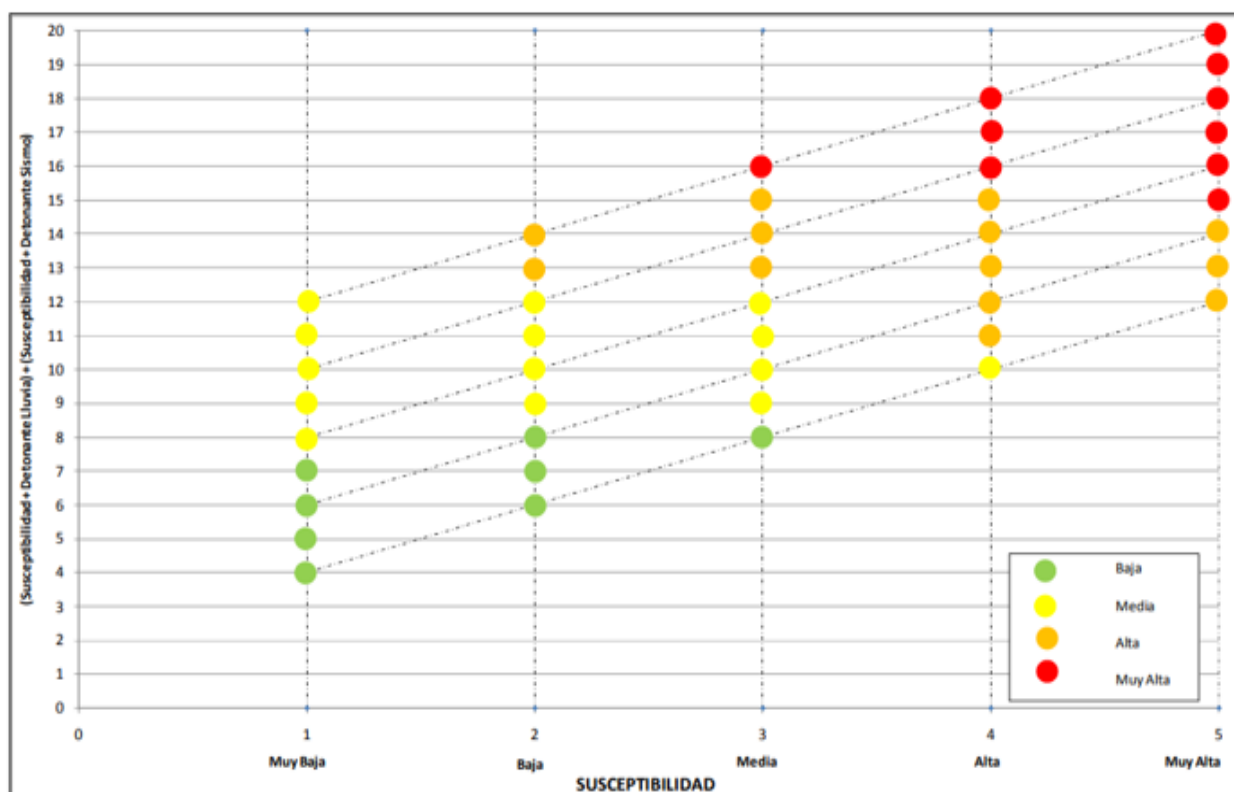
14.3. Amenaza relativa

De acuerdo con la metodología descrita por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013), se obtienen dos escenarios de amenaza: uno por factor sísmico y otro por factor climático. Estos escenarios se suman en el programa ArcGIS para obtener la amenaza total, la cual se clasifica en cuatro niveles: baja, media, alta y muy alta.

Como lo muestra la siguiente figura:

Figura 54

Cuadro de clasificación de amenaza

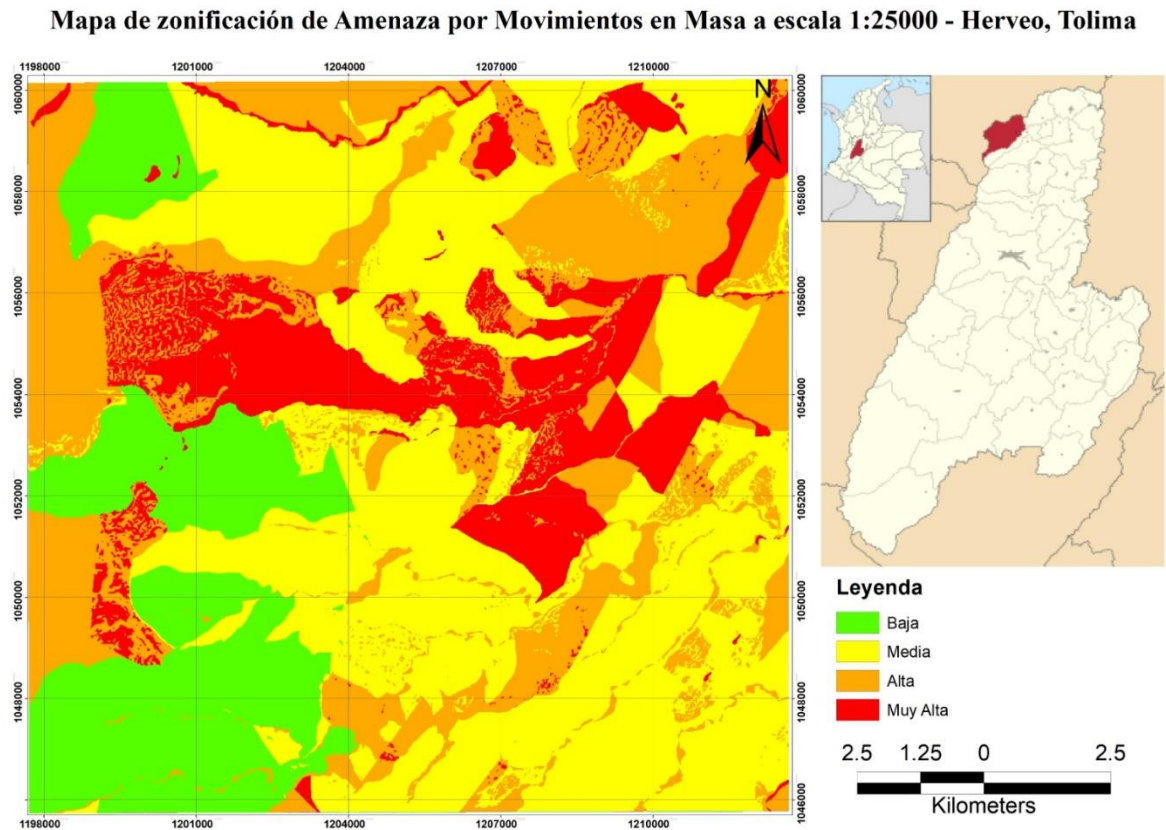


Nota 1 Tomado de la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000 del servicio geológico colombiano (SGC, 2017).

Figura 55

Mapa de zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:25000 -

Herveo, Tolima



14.3.1. Amenaza muy alta.

Esta categoría abarca aproximadamente 3,305.7 hectáreas, lo que equivale al 15.3% del área total de estudio. Se concentra principalmente en las áreas cercanas al volcán Cerro Bravo, extendiéndose mayormente en el centro de la zona de estudio y en las veredas La Pradera, La Esmeralda, El Plan, Frutillo, Capiro y El Ventadero. Según la clasificación del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013), presenta valores de detonante lluvia de categoría 2, 3 y 4 (50-220 mm de precipitaciones máximas), y un valor de detonante sísmico de categoría 3

(150-200 cm/s²). En esta categoría se identificaron 122 movimientos en masa, abarcando 71.76 hectáreas del área de estudio.

14.3.2. Amenaza alta.

Esta categoría abarca una extensión de 6,073.15 hectáreas, lo que equivale al 28.1% del área de estudio. Se encuentra cerca del volcán Cerro Bravo y cubre las veredas La Granja, El Chalaguo, La Joya, El Placer y La Leonera. Según la clasificación del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013), presenta valores de detonante lluvia de categoría 1, 2, 3, 4 y 5 (0 - >220 mm de precipitaciones máximas), y un valor de detonante sísmico de categoría 3 (150-200 cm/s²). En esta categoría se identificaron 80 movimientos en masa, que abarcan 36.53 hectáreas del área de estudio.

14.3.3. Amenaza media.

Esta categoría cubre 8,552.75 hectáreas, lo que equivale al 39.6% del área de estudio. Se encuentra ubicada al sur de las veredas Curubita y La Joya, así como en las veredas El Ángulo y Juan Sierra, y al oeste de las veredas La Palma y Yolombó. Según la clasificación del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013), presenta valores de detonante lluvia de categoría 1, 2, 3, 4 y 5 (50 - >220 mm de precipitaciones máximas), y un valor de detonante sísmico de categoría 3 (150-200 cm/s²). En esta categoría se identificaron 62 movimientos en masa, que abarcan 38.69 hectáreas del área de estudio.

14.3.4. Amenaza baja.

Esta clasificación abarca 3,685.19 hectáreas, lo que representa el 17% del área de estudio. La zona se encuentra ubicada en las proximidades de las veredas El Ángulo, La Enea, Ventaderos, Contrabando y El Alto. Según la clasificación del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013), presenta valores de detonante lluvia de categoría 1 y 2 (0 – 100 mm de precipitaciones

máximas), y un valor de detonante sísmico de categoría 3 (150-200 cm/s²). En esta categoría se identificaron 27 movimientos en masa, que cubren 14.12 hectáreas del área de estudio.

15. CONCLUSIONES

Este estudio recopiló información esencial para generar variables clave como el mapa de unidades geológicas superficiales, unidades geomorfológicas, pendientes, curvatura, coberturas y suelos. Utilizando datos de campo, fotografías aéreas de drones e imágenes satelitales, se creó un inventario de movimientos en masa (Castillo V & Quintero P, 2023) y un mapa de unidades geológicas superficiales. Todo el proceso siguió la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), proporcionando una base sólida para el análisis de amenazas por movimientos en masa en Herveo, Tolima.

El análisis temporal de cambios de cobertura del IDEAM entre 1990 y 2017 reveló que las áreas con cobertura persistente experimentaron más movimientos en masa que las áreas con pérdida de cobertura. Esto indica que la mayor incidencia de movimientos en masa no está siempre vinculada a la pérdida de cobertura. Además del tipo de cobertura, factores como la topografía, la composición rocosa, la erosión fluvial y el control estructural también influyen significativamente en la ocurrencia de estos movimientos en masa.

Se identificaron tres categorías de susceptibilidad a movimientos en masa. La primera es la susceptibilidad alta, que abarca 3.152 hectáreas del área total, distribuidas principalmente en la región occidental, cerca del volcán Cerro Bravo, y en la región oriental, próxima al casco urbano de Herveo y las veredas El Frutillo y Capiro. allí se encuentra la mayor cantidad de deslizamientos traslacionales y flujos de detritos. Esto se debe a que en esta zona el tipo de roca varía de moderada a muy mala calidad, sumado a las altas pendientes ($>45^\circ$), y la presencia de geoformas fluviales, estructurales y volcánicas, como escarpes y laderas muy inclinadas

erosionadas por la actividad eólica y fluvial. Estos factores, junto con la gravedad, hacen que los terrenos sean propensos a movimientos en masa.

La segunda categoría es la susceptibilidad media, que cubre 11.007 hectáreas del área total a lo largo de la zona de estudio. también se observaron movimientos en masa, como deslizamientos indiferenciados, traslacionales y flujos de detritos. Estas áreas están compuestas por rocas de moderada y mala calidad, con pendientes que varían entre 16° y 45° , y geoformas estructurales y denudacionales con alto fallamiento y erosión eólica y fluvial. Estos factores generan terrenos inestables y propensos a movimientos en masa. A pesar de ser la categoría más extensa, presenta menos movimientos en masa porque la zona es lo suficientemente estable para no ser de alta susceptibilidad, pero aún inestable para no clasificarse como de baja susceptibilidad.

Finalmente, la zona de susceptibilidad baja se caracteriza por tipos de roca de buena y moderada calidad, donde las pendientes varían entre 2° y 16° , presentando geoformas denudacionales con baja erosión fluvial. Esto hace que la zona sea bastante estable y tenga baja incidencia de movimientos en masa. Sin embargo, la susceptibilidad de estas zonas puede variar según los cambios ambientales y el manejo antrópico del terreno, generando afectaciones tanto en vías como en viviendas y taponamiento de ríos y quebradas lo que puede llevar a desastres más grandes como avenidas torrenciales.

Se utilizó la distribución de Gumbel para calcular los valores de las lluvias máximas diarias (Gonzalez Y & Padilla G, 2023). y el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para determinar los valores de aceleración pico del suelo. Estos valores fueron utilizados para generar el factor detonante de lluvia y el factor detonante sismo, respectivamente y así sumado a la susceptibilidad encontrar la amenaza por movimientos en masa.

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000

El detonante lluvia se categorizó en cinco rangos, indicando que, a mayor susceptibilidad a movimientos en masa y mayores precipitaciones máximas diarias, mayor será la amenaza por lluvia. Inversamente, a menor susceptibilidad y menores rangos de precipitaciones, menor será la amenaza por lluvia.

El detonante sismo se presenta con una categoría 3, con valores de PGA en un rango de 150-200 cm/s². Este factor, combinado con la susceptibilidad a movimientos en masa de la zona, genera la amenaza por sismo.

Sumando los detonantes junto con la susceptibilidad se obtiene la amenaza total de la zona de estudio, clasificándola en cuatro categorías: muy alta, alta, media y baja. Estas categorías pueden variar debido a efectos climáticos o cambios en la susceptibilidad del terreno.

Se identificaron cuatro categorías de amenaza en el área de estudio. La primera categoría, amenaza muy alta, abarca aproximadamente 3,305.7 hectáreas, lo que equivale al 15.3% del área total de estudio. Esta categoría se concentra principalmente en las áreas cercanas al volcán Cerro Bravo.

La segunda categoría, amenaza alta, cubre una extensión de 6,073.15 hectáreas, representando el 28.1% del área de estudio. Se encuentra cerca del volcán Cerro Bravo y abarca las veredas La Granja, El Chalaguo, La Joya, El Placer y La Leonera.

La tercera categoría, amenaza media, ocupa 8,552.75 hectáreas, lo que corresponde al 39.6% del área de estudio. Esta categoría se localiza al sur de las veredas Curubita y La Joya, así como en las veredas El Ángulo y Juan Sierra, y al oeste de las veredas La Palma y Yolombó.

La cuarta categoría, amenaza baja, comprende 3,685.19 hectáreas, representando el 17% del área de estudio. Se encuentra en las proximidades de las veredas El Ángulo, La Enea, Ventaderos, Contrabando y El Alto.

La investigación realizada en el municipio de Herveo-Tolima revela una notable incidencia de movimientos en masa, esta situación se atribuye a una serie de factores que influyen en la región, como las condiciones climáticas, la actividad sísmica, la geomorfología, las elevadas pendientes, los procesos estructurales presentes en el área, el uso del suelo y la gestión antropogénica de las coberturas vegetales, así como la calidad de las rocas que componen el terreno. Es importante destacar que estas rocas están sujetas a un proceso continuo de meteorización, tanto química como física, lo que contribuye al riesgo constante de movimientos en masa en la zona.

16. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de políticas adicionales que aborden de manera directa los problemas derivados de los movimientos en masa como daños a vías, cultivos y la integridad humana en esta región del país, particularmente en los municipios adyacentes a la cordillera andina.
- Es crucial desarrollar programas educativos adicionales dirigidos a la población civil de la región, enfocados en aumentar la conciencia y la capacidad de gestión ante situaciones de amenaza provocadas por los movimientos en masa. Asimismo, se deben incluir capacitaciones preventivas para mitigar la ocurrencia de estos problemas en el futuro.
- Se aconseja realizar más investigaciones a futuro que profundicen en áreas no cubiertas por este estudio, para lograr obtener una comprensión más completa y mejorar el conocimiento existente sobre la amenaza por movimientos masa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo Espitia, J. C. (2022). *El Papel del Geólogo en la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/359441893_The_Role_of_Geologist_in_the_Hazard_Zoning_due_to_Mass_Movement_-_Articulo_de_Revision
- Alcaldía Municipal de Herveo. (2005). *Esquema de ordenamiento territorial de Herveo-Tolima*. Obtenido de <https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/12196?show=full>.
- Arango Palacio, E., Robayo Jara, C. F., & Chica Martinez, P. A. (2017). *Caracterización Geomorfológica y Morfometría del Volcán Cerro Bravo Colombia*. Obtenido de <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/3457>
- Barrero, 2., & Cediell et al., 2. c. (2012). *Características Cinemáticas y Condiciones de Deformación de un Segmento de la Falla Palestina al NE del Volcán Nevado del Ruíz*. Bogota.
- Bonham, (1994) citado por Servicio Geologico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. Obtenido de [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf).
- Capera Quintana, J. (2020). *Procesamiento digital de imágenes de satélite aplicado a la identificación de unidades geomorfológicas a escala 1:100.000 del departamento del Tolima*. Obtenido de <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/3069>.
- Castillo V, K. L., & Quintero P, A. M. (2023). *Trabajo de investigación para el análisis multitemporal de los movimientos en masa y*. Bucaramanga.
- Consejo municipal de gestion del riesgo de desastres (CMGRD). (2021). *Plan municipal de gestion del riesgo de desastres*. Obtenido de

https://www.cortolima.gov.co/images/Gestion_riesgo_PMGRD/2022/PMGRD_HERVEO.pdf

Corominas et al.,(2013) citado por Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000*. Obtenido de [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf).

Corporación Autónoma Regional del Tolima [CORTOLIMA]. (2021). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres 2021*. Obtenido de https://www.cortolima.gov.co/images/Gestion_riesgo_PMGRD/2022/PMGRD_HERVEO.pdf

Corporacion para el Desarrollo Sostenible del Uraba. (2019). *POMCA Rio Sucio Alto*. Obtenido de http://corpouraba.gov.co/riosucio_alto/.

CORTOLIMA. (2014). *POMCA Rio Recio y Venadillo Cobertura y uso de suelo*. Obtenido de https://cortolima.gov.co/images/POMCA/POMCA%20R%C3%ADo%20Recio%20y%20Rio%20Venadillo%202019/II%20FASE%20DIAGNOSTICO/3.10%20Cobertura_Uso_Suelo.pdf

Cortolima. (2021). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres 2021*. Obtenido de https://www.cortolima.gov.co/images/Gestion_riesgo_PMGRD/2022/PMGRD_HERVEO.pdf

DANE. (2005). *Atlas estadístico*. Obtenido de https://geoportal.dane.gov.co/servicios/atlas-estadistico/src/Tomo_I_Demografico/2.3.1.-poblaci%C3%B3n-en-la-regi%C3%B3n-andina.html

Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2020). *Movimientos terreno*. Obtenido de

<https://www.proteccioncivil.es/coordinacion/gestion%20riesgos/geologicos/movimientos-terreno>

El seminario de investigación como modalidad para el desarrollo de Trabajos de grado en la UIS. (2022). Obtenido de <https://racionalidadltda.wordpress.com/2022/02/17/el-seminario-de-investigacion-como-modalidad-para-el-desarrollo-de-trabajos-de-grado-en-la-uis/>

Fonseca et al., (2014) citado por Gonzalez Y & Padilla G. (2023). *Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la actividad sísmica como detonantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima. B/manga.*

Gonzalez Y, A. G., & Padilla G, A. F. (2023). *Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la. B/manga .*

Gonzalez, A. G., & Padilla, A. F. (2023). *Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la. B/manga.*

IGAC & UPRA,(2015) citado por Servicio Geologico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000.* Obtenido de [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf).

IGAC, (2005b) citado por Servicio Geologico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000.* Obtenido de [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf).

INGEOMINAS . (1998). *Unidad Nacional para la Gestion del Riesgo de Desastres .*

Obtenido de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/36878>

INGEOMINAS. (2001). *Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz.*
Obtenido de

<https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010020081/documento/pdf/0101200811101000.pdf>

INGEOMINAS. (2001). *Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz*. .

Obtenido de

<https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010020081/documento/pdf/0101200811101000.pdf>

INGEOMINAS, 2001 citado por el Servicio geológico colombiano. (2013). *servicio geológico colombiano*. Obtenido de

<https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/search/search?query=amenaza>

Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2012). *Estudios de Geología y Geomorfología escala 1:25.000 para la reubicación del casco urbano del municipio de Gramalote, Departamento norte de Santander*. Obtenido de

https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_76/recursos/octubre/documentos_descarga/sgc/anexo_sgc/22102013/estudio_geologico_geomorfo.pdf

Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) . (2012).

www.ideam.gov.co. Obtenido de

http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM_oficial_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745

Lescinsky, D. T. (1990). *Geology, Volcanology, and Petrology of Cerro Bravo, a Young, Dactic, Stratovolcano in West-Central Colombia*. *LSU Digital Commons*. Obtenido de

https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_disstheses/8232/

lima, L. (2021). *NOCNOK*. Obtenido de <https://www.nocnok.com/blog-inmobiliario/tipos-uso-de->

Taylor & Francis online. Obtenido de

Mejia et al. (2012). *ANÁLISIS ESTRUCTURAL AL NORESTE DEL VOLCÁN NEVADO DEL*

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-

Mulett, & Ortiz. (2014). *Gestión de riesgo al diagnóstico integral de líneas de tubería de*

transporte de productos refinados y/o crudos del poliducto Puerto Salgar- Cartago

(sector tubería Padua-Herveo, K83 al K91). Obtenido de

[https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/12196?show=full.](https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/12196?show=full)

Padilla et al. (2004). *Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía*

Geológica para Ingeniería. Obtenido de

<https://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003002502799/Documento/pdf/2105027991103>

000.pdf.

Pinzon et al. (2018). *Petrogénesis y condiciones de cristalización del domo intracratérico del*

volcán Cerro Bravo, Colombia. Obtenido de

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-

02832018000300067

Pistocchi et al 2002 citado por Valencia & Martinez. (2018). *A neural network model applied*

to landslide susceptibility analysis (Capitanejo, Colombia). Obtenido de

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2018.1513083?scroll=top&needAccess=true>

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007).

Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas.
santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile).

Ramírez Calderón & Tejada Vanegas, 2. c. (2023). *Trabajo de investigación para el análisis multitemporal de los movimientos en masa y descripción morfométrica para un sector del municipio de Herveo, Tolima a escala 1:25.000.* Bucaramanga.

Rojas, & Díez. (2012). Zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en el municipio de Jardín, Antioquia, Colombia. *revista de geologia y sociedad*, 233-243.

Secretaria Distrital de Ambiente. (2008). *Suelo de proteccion*. Obtenido de <https://www.ambientebogota.gov.co/suelo-de-proteccion>

Servicio Geologico Colombiano . (2017). *ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DE LAS SUBCUENCAS DE LAS QUEBRADAS TARUCA, TARUQUITA, SAN ANTONIO, EL CARMEN Y LOS RIOS MULATOS Y SANGOYACO DEL MUNICIPIO DE MOCOA- PUTUMAYO*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Helbert-Garcia-Delgado/publication/324175334_Zonificacion_de_susceptibilidad_y_amenaza_por_movimientos_en_masa_de_las_subcuencas_de_las_quebradas_Taruca_Taruquita_San_Antonio_El_Carmen_y_los_rios_Mulato_y_Sangoyaco_del

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017). *Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25.000*. Obtenido de [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)

- Servicio Geologico Colombiano. (2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*. Obtenido de (pdf) documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa | Juan David Córdoba Ospina - academia.edu
- SGC (2010) citado por Gonzalez, A. G., & Padilla, A. F. (2023). *Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la*. B/manga.
- SGC. (2011). *servicio geologico colombiano*. Obtenido de https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado_Cartografia_Geologica/
- SGC. (2011). *Servicio Geologico Colombiano*. Obtenido de https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado_Cartografia_Geologica/
- SGC. (2013). *Servicio geologico colombiano* . Obtenido de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/search/search?query=amenaza>
- SGC. (2017). *Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25.000*. Obtenido de [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)
- Thouret et al. (1985). *Aspectos volcano-estructurales y dinamismo eruptivo reciente de los volcanes Cerro Bravo y Nevado del Tolima, Cordillera Central de Colombia*. Obtenido de https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=59500&shelfbrowse_itemnumber=58847
- UNGRD. (2020). *Riesgo por movimientos en masa en Colombia*. Obtenido de <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2020). *Riesgo por movimientos en masa en Colombia*. Obtenido de

<https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>

Valencia, & Martinez. (2018). *A neural network model applied to landslide susceptibility analysis (Capitanejo, Colombia)*. . Obtenido de <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1513083>

Valencia, J. A., Martinez, A. M., & Mejia, L. (2023). Evaluation of Susceptibility by Mass Movements through Stochastic and Statistical Methods for a Region of Bucaramanga, Colombia. *remote sensing*.

Varnes. (1978). *Landslides Analysis and Control*. Washinton,D.C.: NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES.