

**ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA.  
COMPARACIÓN DE RESULTADOS A PARTIR DE CARTOGRAFÍA BASE DEL IGAC Y  
CARTOGRAFÍA BASE OBTENIDA MEDIANTE VEHÍCULOS TRIPULADOS REMOTAMENTE (RPAS).  
CASO DE ESTUDIO: CABECERA MUNICIPAL DE CISNEROS, ANTIOQUIA.**

**PROYECTO DE GRADO**  
**Para optar al título de Geólogo**

**Autora**

MELISA OSPINA ESCOBAR

**Asesor**

PEDRO DE GREIFF G.

GEÓLOGO M.Sc.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

UNIVERSIDAD EAFIT

MEDELLÍN

2018

*"Enseñarás a volar,  
pero no volarán tu vuelo.*

*Enseñarás a soñar,  
pero no soñarán tu sueño.*

*Enseñarás a vivir,  
pero no vivirán tu vida.*

*Sin embargo...  
en cada vuelo,  
en cada vida,  
en cada sueño,  
perdurará siempre la huella  
del camino enseñado."*

*(Madre Teresa de Calcuta)*

A Pedro, quien siempre estuvo dispuesto a guiarme en mis ocurrencias y enseñarme, a mis compañeros, amigos y maestros que de algún modo u otro aportaron algo a este proyecto. A mi familia y, en especial a mi papá, para quienes no hay gratitud suficiente por su apoyo, comprensión y amor. A Alfonso, por sus largas noches a mi lado. Y a Miguel Ángel, por recordarme que siempre debo ir por más, por su compañía incondicional y amor.

Amor y gratitud para todos.

## CONTENIDO

<b>HIPÓTESIS</b> .....	10
<b>PREGUNTA DE TRABAJO</b> .....	10
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	10
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	11
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	11
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	11
<b>2 METODOLOGÍA</b> .....	12
<b>3 MARCO CONCEPTUAL</b> .....	14
<b>3.1 SUSCEPTIBILIDAD</b> .....	14
<b>3.2 MOVIMIENTOS EN MASA</b> .....	14
<b>3.3 MÉTODOS DE ZONIFICACIÓN</b> .....	16
<b>3.3.1 MÉTODO HEURÍSTICO</b> .....	16
<b>3.4 VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (RPAS)</b> .....	17
<b>3.4.1 CLASIFICACIÓN DE RPAS</b> .....	17
<b>3.4.2 NORMATIVIDAD PARA VUELOS CON RPAS EN COLOMBIA</b> .....	18
<b>4 DESCRIPCIÓN TÉCNICA RPA EMPLEADO</b> .....	19
<b>5 GENERALIDADES</b> .....	21
<b>5.1 LOCALIZACIÓN</b> .....	21
<b>5.3 GEOLOGÍA LOCAL</b> .....	26
<b>5.3.1 Perfiles de suelo derivados del Batolito Antioqueño</b> .....	26
<b>5.3.2 Depósitos de vertiente</b> .....	27
<b>5.3.3 Depósitos aluviales</b> .....	27
<b>5.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL</b> .....	28
<b>5.5 GEOMORFOLOGÍA LOCAL</b> .....	30
<b>5.5.1 Ambiente denudacional</b> .....	32
<b>5.5.2 Ambiente fluvial</b> .....	34
<b>5.5.2.1 Barra puntual</b> .....	34
<b>5.5.2.2 Barra longitudinal</b> .....	35
<b>5.5.2.3 Cauce aluvial</b> .....	35
<b>5.5.2.4 Terraza aluvial</b> .....	
<b>5.6 COBERTURAS</b> .....	36
<b>5.6.1 Zonas urbanizadas</b> .....	39
<b>5.6.1.1 Tejido urbano discontinuo</b> .....	39
<b>5.6.2 Cultivos permanentes</b> .....	39
<b>5.6.2.1 Caña:</b> .....	39

5.6.3	Pastos.....	40
5.6.3.1	Pastos limpios.....	40
5.6.3.2	Pastos arbolados:.....	41
5.6.3.3	Pastos enmalezados:.....	41
5.6.4	Bosques.....	42
5.6.4.1	Bosque fragmentado:.....	42
5.6.4.2	Tierras desnudas y degradadas:.....	42
5.6.5	Aguas continentales.....	43
5.6.5.1	Ríos:.....	43
6.	PROCESOS MORFODINÁMICOS.....	44
7.	RESULTADOS.....	47
7.1	INSUMOS BÁSICOS.....	47
7.1.1	ORTOFOTOMOSAICO.....	47
7.1.2	MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DTM).....	47
7.1.3	MODELO DIGITAL DEL TERRENO (DTM).....	47
7.1.4	MODELO DE SOMBRAS.....	48
7.2	VARIABLES PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS.....	54
	VARIABLES MORFOMÉTRICAS.....	54
7.2.1	Pendientes.....	54
7.3	Curvatura.....	58
7.4	RELIEVE RELATIVO.....	59
8.	SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS.....	65
8.1	Susceptibilidad a deslizamientos.....	66
8.1.1	Susceptibilidad a deslizamientos según cartografía del IGAC.....	66
8.1.2.1	Susceptibilidad alta.....	67
8.1.2.2	Susceptibilidad media.....	67
8.1.2.3	Susceptibilidad baja.....	68
10.	COMPARACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS Y VARIABLES MORFOMÉTRICAS GENERADAS A PARTIR DE LA CARTOGRAFÍA BASE DEL IGAC Y LA CARTOGRAFÍA BASE DE RPAS.....	71
10.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	71
10.2	COMPARACIÓN DE PROCEDIMIENTOS.....	77
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

## FIGURAS

Figura 1. Esquema de metodología.....	13
Figura 2. Metodología de procesamiento de datos en Pix4D.....	13
Figura 3. DJI Spark. Tomada de DJI. ....	19
Figura 4. Esquema de posicionamiento y desplazamiento del RPA. Tomada de Rusnák et al, 2018.....	19
Figura 5. Esquema de vuelos. Los puntos azules corresponden a las posiciones calculadas por el software. Tomada de reporte de calidad de Pix4D.....	20
Figura 6. Esquema de traslape de imágenes. Tomado de reporte de calidad de pIX4D.....	20
Figura 7. Mapa de localización de la zona de interés.....	22
Figura 8. Localización geológica regional del área de interés. Tomado de Cediel et al. (2018).....	24
Figura 9. Mapa geológico a escala 1:100.000. Plancha 132 Yolombó. ....	25
Figura 10. Esquema del perfil de suelos derivados del Batolito Antioqueño generalizado. ....	26
Figura 11. Esquema generalizado de depósitos de vertiente del área de interés. ....	27
Figura 12. Mapa geológico de la zona de estudio a escala 1:2000. ....	29
Figura 13. Mapa geomorfológico de la zona de estudio a escala 1:2000. ....	31
Figura 14. Ladera moderadamente inclinada, media, baja, convexa y poco incisada. Se señala en la línea amarilla el sentido de la unidad. ....	32
Figura 15. Ladera muy inclinada, alta, media, cóncava y poco incisada. ....	33
Figura 16. Ladera extremadamente inclinada, muy alta, media, cóncava y poco incisada. ....	34
Figura 17. Barra puntual hacia la margen cóncava del cauce aluvial, localizada hacia el suroeste de la zona, en el margen derecho del cauce del río Nus. ....	35
Figura 18. Cauce aluvial del río Nus; hacia el centro del mismo barra central vegetada. ....	36
Figura 19. Mapa de coberturas de la zona de estudio a escala 1:2000. ....	38
Figura 20. Tejido urbano discontinuo.....	39
Figura 21. Cultivo de caña. ....	40
Figura 22. Pastos limpios.....	40
Figura 23. Pastos arbolados. ....	41
Figura 24. Pastos enmalezados. ....	41
Figura 25. Bosque fragmentado. ....	42
Figura 26. Suelos desnudos y degradados. ....	42
Figura 27. Río Nus. ....	43
Figura 28. Modelo digital de superficie, donde se identifica deslizamiento rotacional, hacia el centro de la zona de estudio, sobre la vía Medellín-Cisneros. Proceso inactivo. ....	44
Figura 29. Modelo digital de superficie, donde se identifica deslizamiento rotacional, hacia el centro- oriente de la zona de estudio, sobre la vía Medellín-Cisneros. Proceso inactivo. ....	45
Figura 30. Ortofoto donde se identifica deslizamiento rotacional, hacia el centro- occidente del área de estudio, sobre la vía Medellín-Cisneros. Proceso activo. ....	45
Figura 31. Mapa de localización de deslizamientos realizado con ortofotomosaico y modelo de superficie generados por Pix4D. ....	46
Figura 32. Ortofotomosaico de la zona de estudio generado por Pix4D.....	49
Figura 33. Modelo de Elevación Digital generado con cartografía IGAC.....	50
Figura 34. Modelo Digital del Terreno generado por PIX4D.....	51
Figura 35. Modelo de sombras generado con cartografía del IGAC. ....	52
Figura 36. Modelo de sombras generado con cartografía de RPAS.....	53
Figura 37. Mapa de pendientes generado con cartografía del IGAC. ....	56
Figura 38. Mapa de pendientes generado con cartografía de RPAS.....	57
Figura 39. Mapa de curvatura generado con cartografía del IGAC.....	61
Figura 40. Mapa de curvatura generado con cartografía de RPAS.....	62
Figura 41. Mapa de relieve relativo generado mediante cartografía del IGAC. ....	63
Figura 42. Mapa de relieve relativo generado mediante cartografía de RPAS. ....	64
Figura 43. Diagrama de flujo de metodología de Análisis Jerárquico para obtener la susceptibilidad. ....	65

Figura 44. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos generado mediante cartografía del IGAC. ....	69
Figura 45. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos generado mediante cartografía de RPAS. ....	70
Figura 46. A. Errores topográficos en modelo de sombras generado mediante cartografía IGAC. B. Drenajes, curvas de nivel y modelo de sombras generado mediante cartografía de RPAS. ....	72
Figura 47. Comparativo de mapas de pendiente. A. Modelo de pendientes generado mediante cartografía del IGAC. B. Modelo de pendientes generado mediante cartografía de RPAS. ....	74
Figura 48. Comparativo de modelos de curvatura en cauce del río Nus. A. Modelo de curvatura generado mediante cartografía del IGAC. B. Modelo de curvatura generado mediante RPAS. ....	75
Figura 49. Comparativo de mapas de susceptibilidad a deslizamientos. A. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en área de interés generado mediante cartografía del IGAC. B. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en área de interés generado mediante cartografía de RPAS. ....	76
Figura 50. Comparativo de susceptibilidad en la zona noroeste del área de interés. A. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos, generado mediante cartografía del IGAC. B. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos generado mediante cartografía de RPAS. ....	77
Figura 51. Comparativo de susceptibilidad en la zona noreste del área de interés. A. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos, generado mediante cartografía del IGAC. B. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos generado mediante cartografía de RPAS. ....	77

## TABLAS

Tabla 1. Tipos de movimientos en masa. Tomado de PMA: GCA, 2007. ....	14
Tabla 2. Descripción del atributo pendiente obtenido mediante cartografía del IGAC. ....	54
Tabla 3. Descripción del atributo de pendiente obtenido mediante cartografía de RPAS. ....	55
Tabla 4. Descripción del atributo de curvatura obtenido mediante cartografía del IGAC. ....	58
Tabla 5. Descripción del atributo de curvatura obtenido mediante cartografía de RPAS. ....	58
Tabla 6. Descripción del atributo de relieve relativo generado mediante cartografía del IGAC. ....	59
Tabla 7. Descripción del atributo de relieve relativo mediante cartografía de RPAS. ....	59
Tabla 8. Descripción de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis jerárquico en cartografía del IGAC. ....	66
Tabla 9. Descripción de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis jerárquico en cartografía de RPAS. ....	67
Tabla 10. Comparación de procedimientos de levantamiento de información. ....	78

## INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales tales como movimientos en masa, deslizamientos, avenidas torrenciales, entre otros, constituyen uno de los factores con grandes tasas de mortandad y pérdidas socioeconómicas a nivel mundial. En tal sentido, identificar, entender y analizar dichas amenazas es un punto clave en el desarrollo de las sociedades humanas. En ese sentido, el entendimiento de fenómenos naturales tales como los deslizamientos, constituyen actualmente uno de los temas con mayor auge en la comunidad científica y en las inquietudes de los gobiernos, debido a que representa una importante fuente de información que permite la planeación de metodologías de prevención y/o mitigación de posibles desastres.

De igual manera, la implementación de nuevas tecnologías que permitan la modernización en los mecanismos de monitoreo y, a su vez, la evaluación de procesos naturales, actualmente se encuentra en auge. Generalmente, estas tecnologías son presentadas como opciones de mayor eficacia y, en ocasiones, aparentemente con costos considerablemente inferiores a las metodologías hasta el momento usadas. Una de estas tecnologías, son los Vehículos Aéreos Remotamente Tripulados, los cuales desde aproximadamente hace una década, han venido siendo implementados en el monitoreo de fenómenos y desastres naturales.

Considerando lo anterior, se plantea la necesidad de no solo implementar este tipo de equipos tecnológicos, sino también de establecer una comparación mediante la cual sea posible determinar la utilidad y eficacia de estas nuevas metodologías desarrolladas a partir de una herramienta, y mostrando cómo su desempeño puede, entonces, mejorar o no la calidad de la información, tanto obtenida como entregada, y en sí los procedimientos ejecutados por el analista.

Este trabajo ha sido desarrollado mediante la siguiente secuencia: en la parte inicial, es presentado el contexto bajo el cual se trabajó; de igual manera, son definidos los objetivos y la metodología a seguir y un apartado de contextualización teórica. Posteriormente, son expuestas las generalidades del área de interés, teniendo en cuenta la localización, geología y el marco estructural regional, al igual que las variables de influencia directa a tener en cuenta generadas a partir de la adquisición de datos mediante RPAS, y la descripción de procesos morfodinámicos de interés. Siguiendo este orden, es explicado lo obtenido en el análisis de la susceptibilidad mediante la cartografía base del IGAC y cartografía base generada mediante RPAS.

Como se puede ver, el presente estudio considera la importancia que se la ha venido dando al tipo de información obtenida mediante nuevas tecnologías en el desarrollo de las sociedades actuales, por lo cual es necesario seguir avanzando en el análisis acerca de la efectividad de las alternativas con las cuales sea posible representar de la manera más fiel la realidad del terreno, a la vez que representen metodologías rápidas y sencillas que faciliten la producción de la información.

## ANTECEDENTES

El planeta Tierra es un sistema dinámico y prueba de ello son los diferentes procesos que constantemente se encuentran modificando, interna y externamente, nuestro entorno; a causa de esto, pueden presentarse fenómenos, como los movimientos en masa, que ponen en riesgo bienes, vidas humanas e infraestructura de las zonas afectadas.

Históricamente, los movimientos en masa han sido una de las causas más frecuentes de pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo (Turner & Schuster, 1996; Sidle & Ochiai, 2006), y sus impactos, se encuentran directamente asociados a las condiciones geológicas locales y a la vulnerabilidad socioeconómica directamente afectada<sup>1</sup>, no sólo en el espacio-tiempo inmediato, sino también a largo plazo (Alcántara - Ayala, 2002). En tal sentido, dichos fenómenos representan una amenaza natural, la misma que es necesario conocer, entender y analizar con el objetivo de generar herramientas adecuadas para enfrentarlos adecuadamente favoreciendo, de paso, el desarrollo por y para el ser humano.

Para el análisis y manejo de estos procesos, son requeridos estudios que permitan dar una idea clara de los factores que afectan y detonan este tipo de eventos. En ese orden de ideas, Castellanos (2008), propone que, para el análisis de los riesgos, es necesario obtener cuatro grupos de información, los cuales corresponden a: ocurrencia de deslizamientos o inventario de deslizamientos<sup>2</sup>, parámetros del entorno<sup>3</sup>, elementos detonantes<sup>4</sup> y elementos en riesgo<sup>5</sup>. Posteriormente, son utilizadas metodologías de análisis<sup>6</sup> de información que permiten realizar modelamientos de los datos, anteriormente mencionados, según la precisión y extensión del área, y mediante los cuales son generados mapas que faciliten la interpretación de la información.

Profundizando en la temática específica, se puede decir que es poca la información descriptiva e investigativa que se ha encontrado acerca del análisis de susceptibilidad por deslizamientos mediante el método de Análisis Jerárquico. Sin embargo, Trejos et al. (2012) ya han utilizado esta metodología para realizar el mapa de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, a escala 1:100.000 como ejercicio piloto en los departamentos de Santander y Antioquia. Dicho trabajo puede considerarse la base del desarrollo de la metodología para la realización de mapas de susceptibilidad a esta escala a nivel país, entregando herramientas de apoyo para proyectos de impacto social, estructural y ambiental. Por su parte, Ruff & Czurda (2008) también dan uso a la metodología al realizar el análisis de las diferentes capas de información, y generando el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en los Alpes calcáreos septentrionales apoyándose en el método Estadístico Bivariado. Por su parte, González (2015) realiza la comparación de tres metodologías para la zonificación de amenazas por movimientos en masa en el municipio de Santa Bárbara (Antioquia). En ese mismo orden de ideas, es necesario resaltar, que para la realización de este ejercicio fue tomada información de un trabajo realizado como parte del desarrollo de la materia "Geología ambiental" en el año 2017, realizado en la

---

<sup>1</sup> Es decir, que tan preparada se encuentra una sociedad partiendo de sus condiciones socioeconómicas, inclusive culturales, para afrontar una amenaza.

<sup>2</sup> Estos, son datos obtenidos a partir de reportes de campo, fotointerpretación y mediante modelos digitales del terreno

<sup>3</sup> Geomorfología, pendiente, densidad de drenaje, litología, entre otros.

<sup>4</sup> Sismos y precipitación.

<sup>5</sup> Población, transporte, infraestructura, entre otros.

<sup>6</sup> Inventario, heurístico, estadístico y determinístico (Van Wenster, 1993).

cabecera municipal de Cisneros, Antioquia. Para el desarrollo de la presente investigación se toman ambos trabajos como referentes principales.

En primer lugar, hay que decir que desde la última década del Siglo XX y con mayor fuerza en lo corrido del actual siglo el desarrollo de Nuevas Tecnologías –NT- está permitiendo el avance de metodologías pensadas para el crecimiento exponencial de las diferentes industrias a las cuales puedan ser aplicadas. Uno de esos casos particulares, y tema de interés para este proyecto, son los Vehículos Aéreos Remotamente Tripulados (RPAS), comercialmente conocidos como Drones. Una de las principales ventajas de estos dispositivos reposa en la capacidad de adquirir datos espaciales con precisión centimétrica. Dichas herramientas no sólo generan un sinfín de potenciales nuevos mercados, sino también la posibilidad de entender y analizar, a partir de informaciones en tiempo real, el entorno en el cual nos encontramos.

Hoy en día, el uso de estas NT en la Geología se ha incrementado, ya que mediante el uso de los RPAS se han desarrollado técnicas de monitoreo con sensores remotos que son más efectivas para la detección, mapeo y monitoreo de procesos morfodinámicos y análisis del riesgo (Tofani et al, 2013) e incluso Cartografía Geológica. Por otro lado, el tiempo y la rentabilidad de estas técnicas hace posible realizar de manera repetida y programada el monitoreo de los cambios ocurridos entre cada una de las adquisiciones de datos, permitiendo que sea una realidad tangible la comparación de resultados a través de modelos digitales (Rossi et al, 2016).

De igual manera, y a pesar de que es un tema con fuerza emergente, la realización de este tipo de mapas mediante RPAS al parecer no es muy común. No obstante, han sido adelantados algunos proyectos e investigaciones de mapeo y monitoreo de movimientos en masa, los cuales pueden ser base no sólo para la realización de este proyecto, sino también para el desarrollo de metodologías o posteriores proyectos de análisis de susceptibilidad. En tal dirección, Turner et al (2015), proponen el análisis de series de tiempo en diferentes movimientos en masa, con el fin de cuantificar y caracterizar la dinámica de los procesos analizados.

Otros autores como Tofani et al. (2012), y Rossi et al. (2017), presentan la citada metodología como una herramienta de caracterización y evaluación de procesos morfogénicos activos, que permiten no solo la reconstrucción de estos, sino también la detección de posibles movimientos en masa. Por su parte, Niethammer et al. (2012) proponen el monitoreo y caracterización de un súper deslizamiento, en el cual los cambios en la rugosidad del material y la vegetación, entre otras, permitan modelar el flujo del proceso en un intervalo de tiempo.

En esa misma dirección, Tuner et al. (2015) plantean que la fotogrametría realizada mediante RPAS representa una técnica robusta para el monitoreo y mapeo de deslizamientos, que, además, permite obtener modelos digitales de superficie de alta calidad. Por su parte, Dall’Asta et al. (2017) sostienen que con un costo fijo menor que la fotogrametría aérea (convencional) y densidad de muestreo en tierra alta, la alternativa que presentan los RPAS es no sólo económica, sino también técnicamente adecuada para el mapeo de deslizamientos.

En síntesis, puede decirse que, hasta el momento, no se ha encontrado información primaria o secundaria acerca de la realización de mapas de susceptibilidad por deslizamientos, partiendo de información recolectada a partir de RPAS.

## **HIPÓTESIS**

La adquisición de datos mediante Vehículos Aéreos Tripulados Remotamente permitirá realizar análisis de susceptibilidad (y afines) con mayor eficiencia espacio-temporal, dada la facilidad de toma de datos y el procesamiento de los mismos.

## **PREGUNTA DE TRABAJO**

¿La adquisición de datos mediante Vehículos Aéreos Tripulados Remotamente, permite obtener modelos de susceptibilidad más eficientes?

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En Colombia, los trabajos de zonificación de susceptibilidad (así como los de amenaza y riesgo) son realizados teniendo como base datos cartográficos generados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. Dichos análisis se desarrollan mediante información con vigencias hasta de 10 años de antigüedad que, en algunos de los casos, no cuentan con el nivel de detalle requerido para la magnitud de los estudios y, posiblemente, no registren los cambios naturales y antrópicos a los que se encuentra constantemente expuesto el paisaje. Lo anterior, relativamente podría tener una relevancia significativa a la hora de este tipo de análisis porque se estarían generando análisis de susceptibilidad poco confiables.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Comparar metodologías de adquisición de datos, mediante datos base generados por el IGAC y cartografía generada por RPAS (Vehículos Aéreos Remotamente Tripulados), para la determinación de susceptibilidad a movimientos en masa en el área definida como crítica de la cabecera municipal de Cisneros, Antioquia.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Comparar nivel de detalle de los subproductos obtenidos.
- Comparar el rendimiento de trabajo de las dos metodologías tratadas.
- Comparar la efectividad del procedimiento de mapeo propuesto por el Servicio Geológico Colombiano, con respecto al realizado mediante RPAS, en la realización de mapas de susceptibilidad.

## 2 METODOLOGÍA

Para lograr lo planteado en el Objetivo General, se desarrollan las siguientes actividades:

1. Formulación de objetivos del proyecto.
2. Recopilación de información secundaria acerca de la herramienta y las técnicas a trabajar; de igual manera, de la metodología de evaluación a emplear.
3. Definición del área de trabajo, diseño y generación de líneas de vuelo y definición de sitios de despegue.
4. Realización de las líneas de vuelo para la adquisición de la cartografía base mediante RPAS.
5. Procesar mediante software de fotogrametría digital<sup>7</sup>, la información recolectada, con la cual se generó la cartografía base y el ortofotomosaico de la zona.
6. Generar las variables morfométricas de la zona (relieve relativo, pendientes, rugosidad y curvatura) partiendo de la cartografía y el modelo digital del terreno generado mediante RPAS, y con cartografía base del IGAC.
7. Organizar y/o actualizar (en caso de ser necesario) la información temática (geología, geomorfología y cobertura vegetal).
8. Realizar la integración de la información y aplicación de la metodología de análisis (Análisis Jerárquico) que permita generar el mapa de susceptibilidad a deslizamientos. Ambos procedimientos apoyados en la herramienta ArcGis.
9. Descripción de resultados.
10. Comparación de resultados (variables morfométricas y modelos de susceptibilidad) de cada cartografía trabajada.
11. Generación del trabajo escrito final y conclusiones.
12. Sustentación oral del proyecto.

La metodología, anteriormente mencionada, se resume en la figura 1 siguiente., De igual manera, es presentada la metodología de procesamiento de la información recolectada por RPAS, y realizada mediante el software de fotogrametría Pix4D (Figura 2).

---

<sup>7</sup> Pix4D.

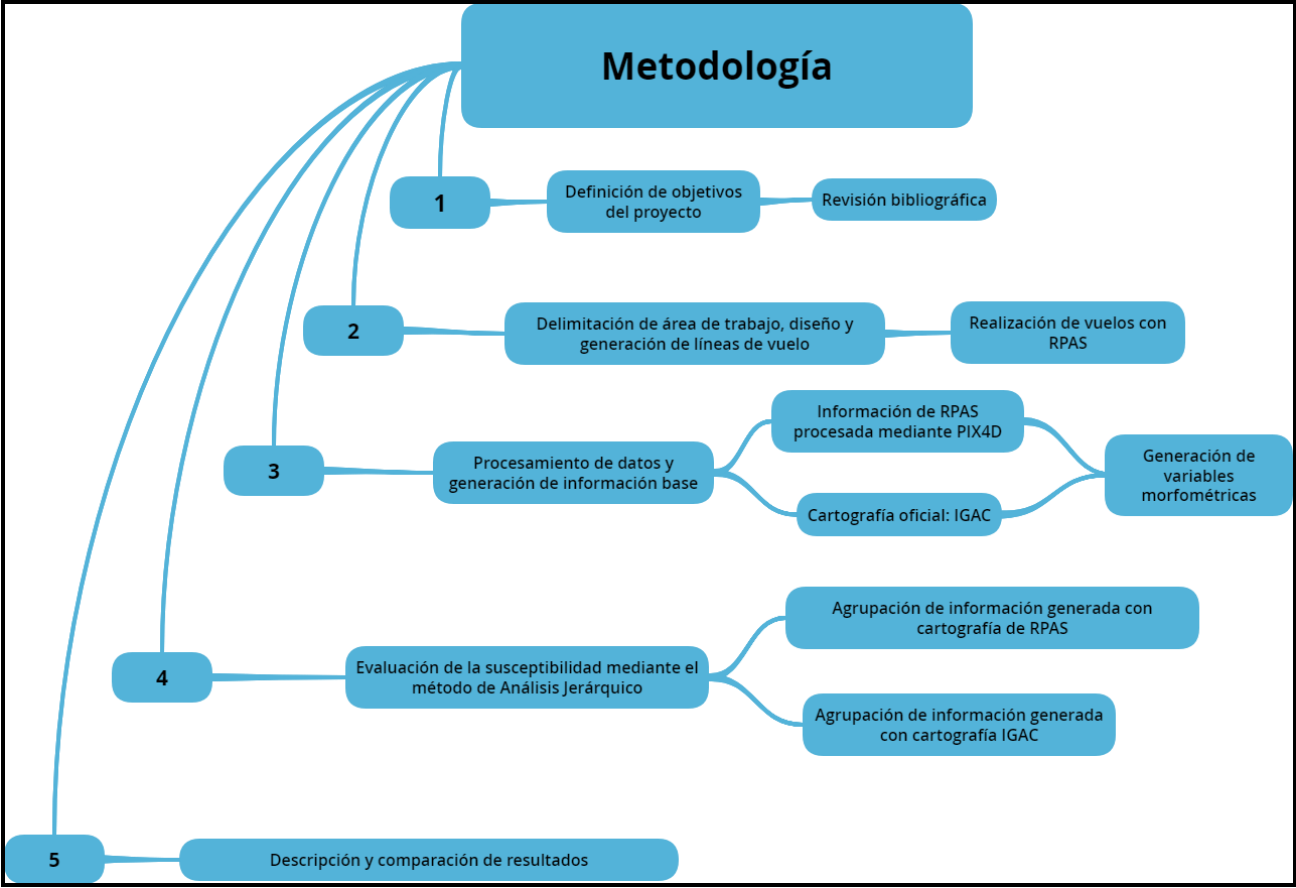


Figura 1. Esquema de metodología.

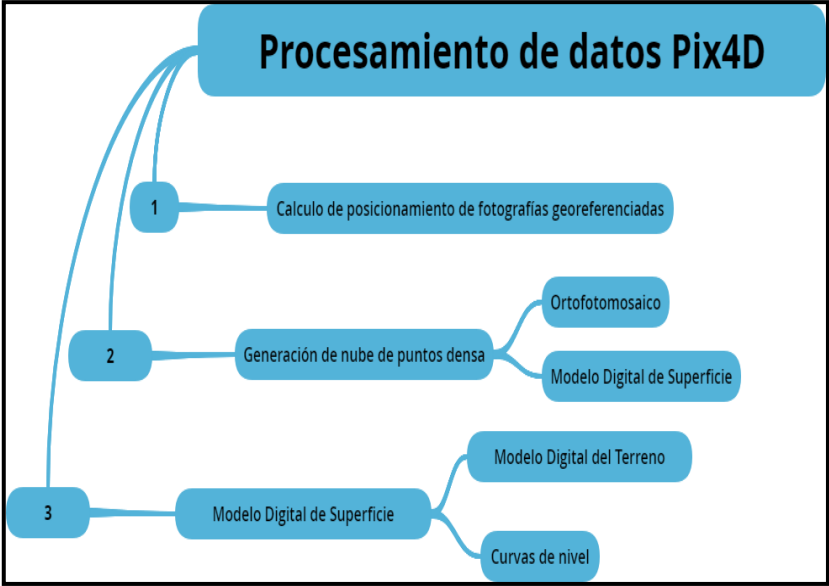


Figura 2. Metodología de procesamiento de datos en Pix4D.

### 3 MARCO CONCEPTUAL

En este punto, son presentados los diferentes conceptos y terminologías a las cuales se hace referencia durante la concepción y realización de este proyecto.

#### 3.1 SUSCEPTIBILIDAD

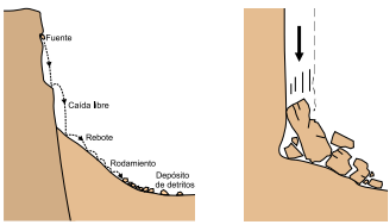
Se entiende como una medida cualitativa, o cuantitativa, de la magnitud y distribución espacial de un fenómeno que sea existente o potencial en un área. La determinación de la susceptibilidad está basada en el análisis de factores intrínsecos, los cuales son responsables de la manera en la cual se materializan dichos fenómenos. En el caso de los movimientos en masa, los factores intrínsecos, corresponden a las condiciones geográficas, geológicas y ambientales, entre otras (SGC, 2013). Entonces, la susceptibilidad expresa la probabilidad de que un deslizamiento de tierra ocurra en un área según las condiciones locales del terreno (Soeters & Van Wenster, 1996).

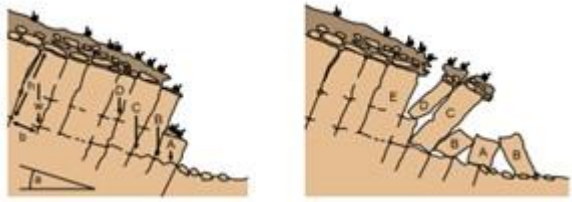
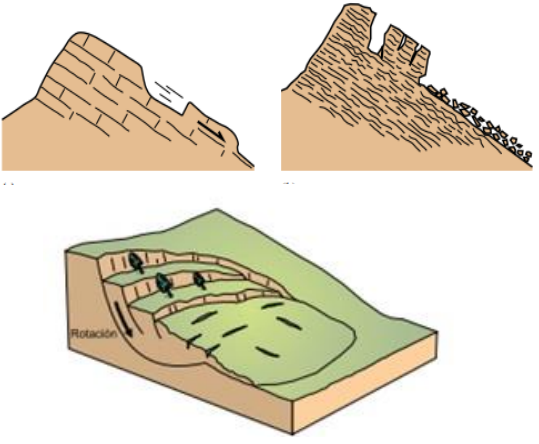
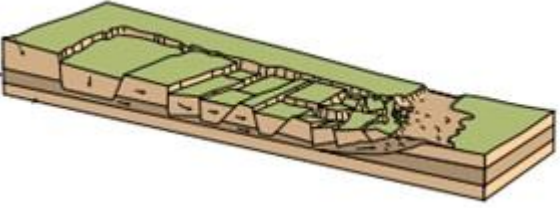
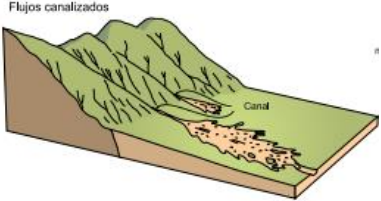
#### 3.2 MOVIMIENTOS EN MASA

Son aquellos movimientos de ladera debajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad. De igual manera, equivale a definiciones tales como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa o fallas de taludes y laderas (SGC, 2013). El origen de estos fenómenos se encuentra ligado a procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que tienen lugar en la corteza terrestre como producto de la interacción entre la hidrósfera, atmósfera y corteza (PMA: GCA, 2007).

Es posible encontrar muchas clasificaciones de movimientos en masa, las cuales se centran en el tipo de materiales, en los mecanismos de movimiento y en el grado de deformación y saturación. Uno de los sistemas de clasificación más ampliamente aceptado es el de Varnes (1978), quien emplea como criterios de clasificación tanto el tipo de movimiento como el tipo de material, dividiendo los movimientos en masa de la siguiente manera:

Tabla 1. Tipos de movimientos en masa. Tomado de PMA: GCA, 2007.

Tipo	Figura	Característica	Velocidad del movimiento
<b>Caída</b>		<p>Desprendimiento de uno o más bloques de roca o suelo de una ladera. El material cae desplazándose principalmente por el aire, pudiendo generar rebotes, volcamientos y rodamientos.</p> <p>Este no es un movimiento de tipo masivo.</p>	<p>Rápido a extremadamente rápido.</p>

<p><b>Volcamiento</b></p>		<p>Rotación de uno o varios bloques de roca o suelo alrededor de un punto en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas.</p>	<p>Lento a gradual</p>
<p><b>Deslizamiento</b></p>		<p>Es un movimiento ladero, abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante. Se clasifican los deslizamientos, según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, rotacional (superficie de falla cóncava o curva) y traslacional (superficie de falla plana u ondulada)</p>	<p>Traslacional: Rápida a extremadamente rápida. Rotacional: de lenta a rápidamente.</p>
<p><b>Propagación lateral</b></p>		<p>Este desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material. Se distinguen dos tipos de propagación, uno en el que el movimiento afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla, típico de masas rocosas, y otro que ocurre en suelos cohesivos que sobreyacen a materiales que han sufrido licuefacción o a materiales en flujo plástico.</p>	<p>Extremadamente lento.</p>
<p><b>Flujos</b></p>		<p>Tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser saturado o seco. En muchos casos, se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída. Se clasifican como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flujo de detritos.</li> <li>- Crecida de detritos.</li> <li>- Flujo de lodo.</li> <li>- Flujo de tierra.</li> <li>- Deslizamiento por flujo.</li> <li>- Avalancha de detritos.</li> </ul>	<p>Rápido o lento.</p>

<b>Deformaciones gravitacionales profundas</b>	<p>(a) Crestas dobles</p> <p>(b) Escarpes</p> <p>(c) Contraescarpes</p> <p>(d) Trincheras naturales</p> <p>(e) Combamiento, pandeo y deslizamientos mayores</p>	<p>Presentan rasgos de deformación, pero sin el desarrollo de una superficie de ruptura definida.</p>	<p>Muy baja magnitud de velocidad y desplazamiento.</p>
--	---	---	---

### 3.3 MÉTODOS DE ZONIFICACIÓN

La zonificación de susceptibilidad se entiende como la división del territorio, áreas o dominios homogéneos (PMA: GCA, 2007). Para este caso particular, un área dada es subdividida en sectores de acuerdo a la susceptibilidad a generar movimientos en masa (SCG, 2017), con lo cual es realizada la zonificación de un área en particular a los movimientos en masa; dicha zonificación se clasifica en tres rangos: alto, medio y bajo.

Existen varias metodologías para la zonificación, ya sea de susceptibilidad, amenaza o riesgo, las cuales se dividen en: método determinísticos, método heurístico y métodos matemáticos como los estadísticos univariados y bivariados. En el caso del presente estudio, la metodología de zonificación a trabajar ha sido la del método heurístico, ya que teniendo en cuenta, que la finalidad recae en la comparación de productos entre dos metodologías de adquisición de datos, es necesario realizar la zonificación de la susceptibilidad, de igual manera al caso de comparación, el cual fue realizado con la metodología anteriormente mencionada, y así se pueda evaluar bajo los mismos parámetros ambos productos.

#### 3.3.1 MÉTODO HEURÍSTICO

El método heurístico categoriza y pondera los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de movimientos en masa (Brabb & Pampeyan, 1972); también es conocido como método indirecto, donde los resultados se pueden extrapolar a zonas sin movimientos en masa con una combinación de factor similar (SGC, 2013). Se utilizan las opiniones de los expertos para evaluar el potencial de deslizamientos a partir de variables independientes del lugar (González, 2015). Por ende, el diseño del modelo demanda un análisis profundo de los factores causales y la relación de estos en el área de estudio (Castellanos et al, 2008). La deficiencia del método Heurístico radica en la ponderación de los valores, ya que los valores pueden estar basados en un conocimiento insuficiente para definir la estabilidad.

### 3.3.1.1 ANÁLISIS JERÁRQUICO

El Análisis Jerárquico consiste en una técnica semicualitativa, que involucra la comparación por pares realizada por los expertos a partir de una matriz de atributos o variables que contribuyen a los movimientos en masa (SGC, 2013). Por ello, se recomienda seguir los pasos propuestos por el SGC (2013).

1. Definir el problema y determinar el tipo de conocimiento requerido.
2. Estructurar la decisión jerárquica desde un nivel superior hacia un nivel más bajo a través de los niveles intermedios.
3. Construir un conjunto de matrices de comparación por pares. Cada elemento de un nivel superior se utiliza para comparar los elementos en el nivel inmediatamente inferior con respecto a él.
4. Utilizar las prioridades obtenidas a partir de las comparaciones para ponderar las del nivel inmediatamente inferior. Acción que se repite para cada elemento. Luego, para cada elemento, en el nivel por debajo, añadir sus valores pesados y obtener su prioridad global o mundial.
5. Para hacer comparaciones necesitamos una escala de números que indique cuántas veces un elemento es más importante, o dominante, sobre otro elemento con respecto al criterio con el que se compara.

### 3.4 VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (RPAS)

Los sistemas aéreos o Vehículos Aéreos No Tripulados, comúnmente nombrados como Drones, son aeronaves, generalmente pequeñas, sin piloto a bordo pero que se encuentran conectados a un operador remoto (Heavens & Sharp, 2015). Actualmente, existe una amplia variedad de RPAS, por ejemplo, parapentes motorizados, dirigibles, cometas y globos. No obstante, no todos son aptos para el trabajo en ciertas zonas terrestres, ya que pueden verse seriamente afectados por el viento. Sin embargo, en 2006 el uso de sistemas de rotores<sup>8</sup> y, por lo tanto, más estables fue habilitado para uso comercial; estos sistemas no sólo ofrecen mayor estabilidad, sino que también son más económicos con respecto a los RPAS convencionales, mencionados anteriormente (Niethammer et al., 2012).

Como se ha venido diciendo estas tecnologías han permitido la adquisición de datos desde el aire, con lo cual es posible capturar imágenes de alta resolución de superficies rocosas y analizar estructuras geológicas a partir de los sets de datos digitales (Vasuki et al., 2014). De igual manera, son herramientas consideradas eventualmente efectivas para la detección de movimientos en masa, mapeo, monitoreo y análisis de riesgo (Tofani et al., 2013).

#### 3.4.1 CLASIFICACIÓN DE RPAS

Los RPAS se dividen en dos grupos principales, RPAS de Ala Fija y RPAS Multirotor o VTOL. Los RPAS de Ala fija, son equipos diseñados para uso cartográfico y pueden abarcar grandes extensiones de terreno por vuelo; actualmente uno de los equipos de mayor reconocimiento en este grupo es el Ebee X, de la marca Sensefly, marca líder en equipos de estas características. Al ser diseñados específicamente para cartografía, estos equipos son menos versátiles y, en ocasiones, complejos en zonas de montaña. Por otro lado, los VTOL son equipos profesionales y de usuario o entretenimiento; dentro del grupo de los RPAS de usuario, existen equipos de gamas bajas a media, los cuales se caracterizan por las

---

<sup>8</sup> Entendido como RPAS de ala fija (Avión), ala rotatoria (Helicoptero y multirotor) y avión ligero.

diferencias en los tiempos de vuelo que oscilan entre los 12 y 25 minutos, sin embargo, estos ofrecen mayor operatividad en zonas cerradas, pequeñas y/o de relieve alto.

### **3.4.2 NORMATIVIDAD PARA VUELOS CON RPAS EN COLOMBIA**

En Colombia, y como consecuencia del crecimiento exponencial de los RPAS para la realización de operaciones diferentes a la recreación y el deporte se presentó la necesidad de regular la operación de estos equipos que pueden generar riesgos sobre aviones tripulados. En ese orden de ideas, la Aeronáutica Civil de Colombia, como autoridad de transporte aéreo del país, ha creado una normativa que regula las operaciones de estos equipos. Dicha normativa está definida en la Circular Reglamentaria N° 2 del 27 de Julio de 2015, y estipula una serie de restricciones y condiciones para la operación comercial de los RPAS en el país, y los requisitos generales de aeronavegabilidad y operaciones para RPAS. A continuación, son listados los principales:

- Aeronaves con un peso máximo de despegue menor o igual a 25 kg.
- No realizar vuelos sobre áreas congestionadas, edificaciones o directamente sobre público o aglomeración de personas.
- No realizar vuelos desde un aeródromo, o en sus proximidades, dentro de un radio de 5 km. a la redonda.
- No volar a una altura superior a 500 pies (152 metros aproximadamente) sobre el terreno o sobre el agua.
- No volar de modo que se aleje más de 750 metros de distancia del operador, o del lugar de lanzamiento o despegue.

Es importante anotar que los vuelos realizados en el presente proyecto fueron realizados de conformidad con la normatividad vigente y estos no son considerados como vuelos comerciales.

#### 4 DESCRIPCIÓN TÉCNICA RPA EMPLEADO

Para la realización de este proyecto, fue usado un RPA quadricoptero (cuatro rotores) micro RPA referencia Spark de la marca DJI (Figura 3). Este equipo, cuenta con una autonomía de vuelo de aproximadamente 14 minutos por batería consumida. Cada vuelo, fue previamente planeado usando una plataforma que permitiera a partir de fotografías satelitales de Google Earth y “waypoints”, establecer los recorridos del RPA por vuelo realizado (Rejilla de vuelo) (Figura 5).



Figura 3. DJI Spark. Tomada de DJI.

El DJI Spark cuenta con sistemas de posicionamiento satelital, GPS/GLONNAS, los cuales permiten generar trazabilidad geográfica a las tomas realizadas. De igual manera, cuenta con estabilizador en la cámara, permitiendo realizar tomas ortogonales durante los vuelos (Figura 4), la cual cuenta con una resolución de 12 Megapíxeles (efectivos).

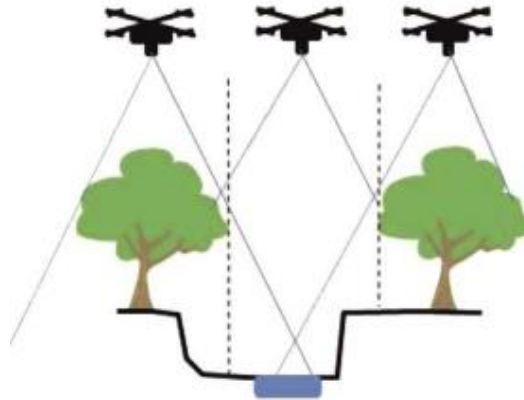


Figura 4. Esquema de posicionamiento y desplazamiento del RPA. Tomada de Rusnák et al, 2018.

Se debe precisar que cada vuelo se realizó a una altura de 100 m. (sobre el nivel del suelo), a una velocidad máxima de 15 m/s y con intervalos de disparo de 2 segundos, con lo que fueron obtenidas 2.339 fotografías, cada una separada por una distancia 7.5 m. o menor. Es necesario aclarar, que en

algunas de las zonas puede existir un distanciamiento menor debido a que los intervalos de disparo eran establecidos mediante temporizador y, en algunas ocasiones, la velocidad del viento no permitía un avance efectivo (a la distancia establecida) del equipo.

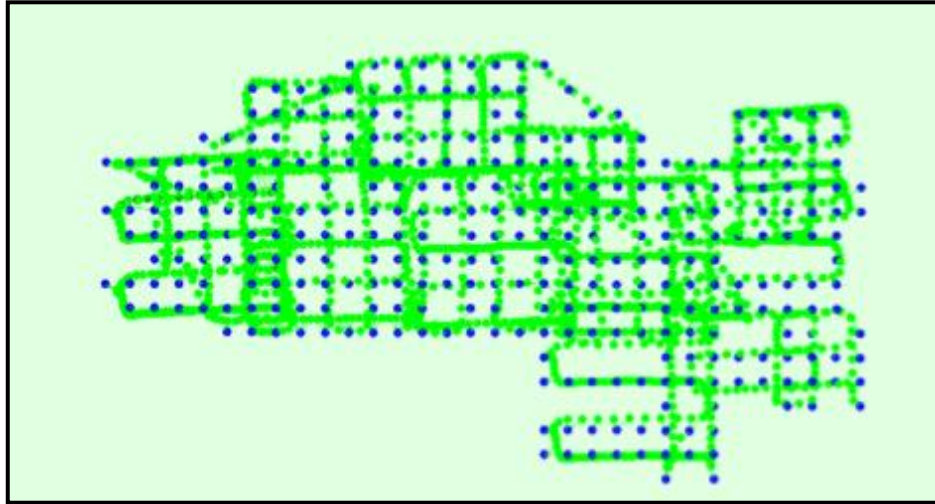


Figura 5. Esquema de vuelos. Los puntos azules corresponden a las posiciones calculadas por el software. Tomada de reporte de calidad de Pix4D.

Debido a la alta densidad de datos obtenidos fueron generados productos con un alto traslape de información, 5 o más fotografías por pixel (Figura 6), con lo cual se obtuvo un ortofotomosaico y modelo digital del terreno tratando de apuntarle a una mayor precisión.

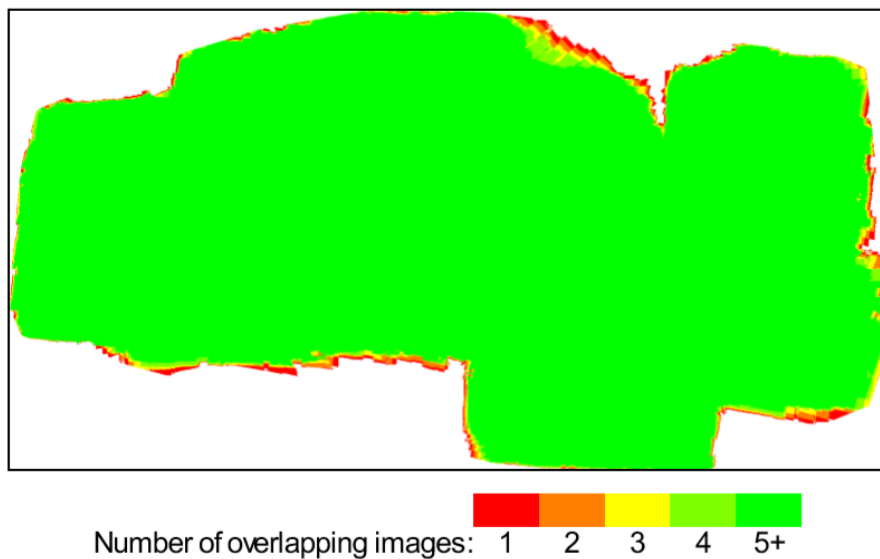


Figura 6. Esquema de traslape de imágenes. Tomado de reporte de calidad de PIX4D.

## **5 GENERALIDADES**

Se presentan, a continuación, las características generales del área de estudio.

### **5.1 LOCALIZACIÓN**

La cabecera de Cisneros, se encuentra ubicada hacia el suroccidente del municipio y ocupa el 4,09% de la extensión total del municipio. Cuenta con una extensión total de 1.921.431,69 metros cuadrados, se sitúa a los 1050 metros sobre el nivel del mar y se encuentra a 84 kilómetros de la ciudad de Medellín. La zona definida como área de interés se localiza hacia el occidente de la cabecera ocupando 320.548,45 metros cuadrados, que corresponden al 16,68% de la extensión total.

Debido al ejercicio realizado con el equipo para la adquisición de datos (RPAS), era necesario definir una zona que no presentara una densidad poblacional muy alta, y que dentro de la misma, fueran encontrados procesos de interés. Uno de los aspectos importantes de esta zona es que reúne la mayor cantidad de procesos de remoción en masa (identificados previamente), y que a pesar de corresponder a una zona urbana, su densidad poblacional es baja, cumpliéndose así entonces las especificaciones reglamentarias de la Aerocivil.

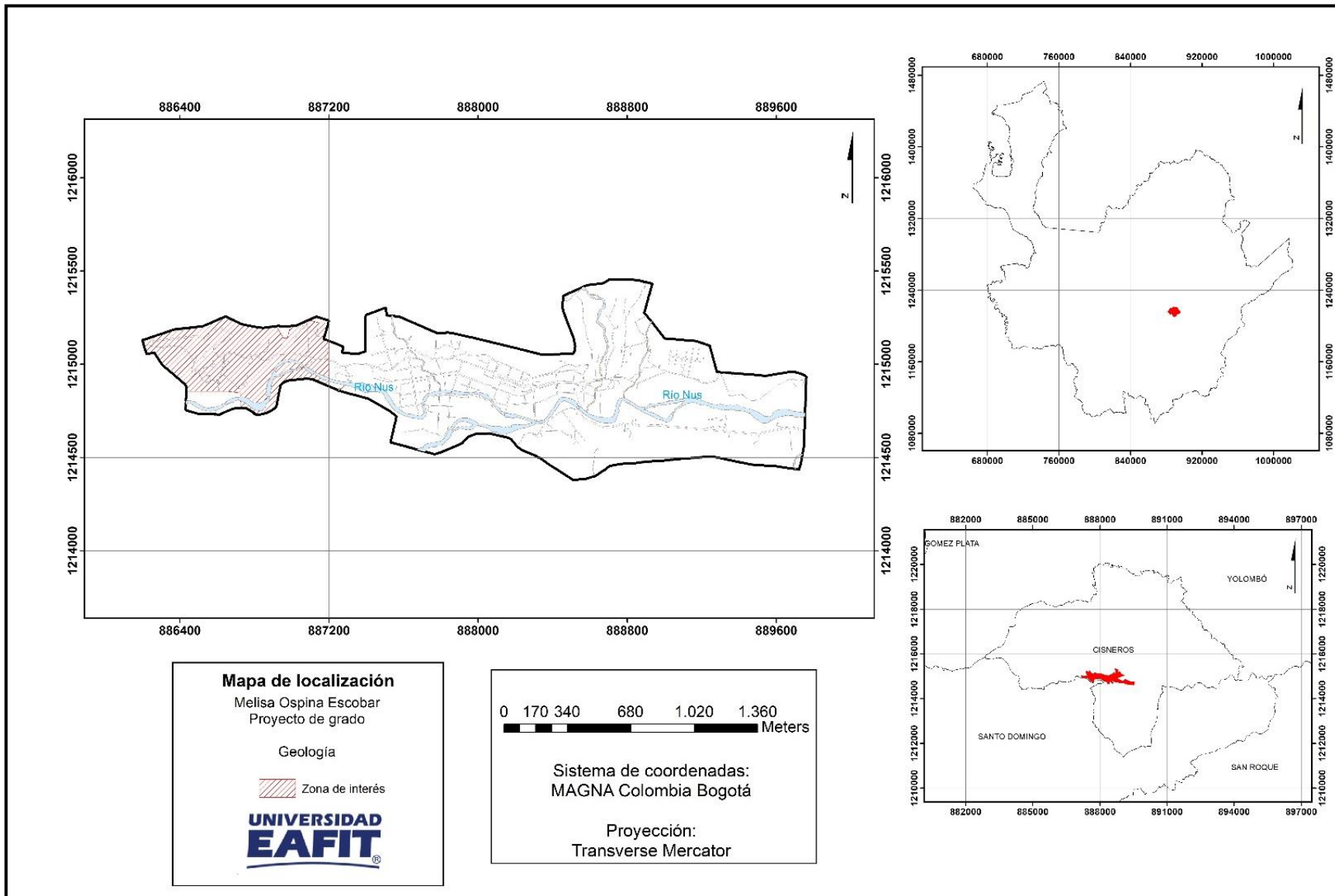


Figura 7. Mapa de localización de la zona de interés.

## 5.2 GEOLOGÍA REGIONAL

El área en cuestión se enmarca entre la falla Otú y el valle del río Magdalena, localizada en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia donde son encontradas rocas con edades desde el Precámbrico hasta el Cuaternario (INGEOMINAS, 1970).

Las rocas de edad precámbrica que se encuentran formando el basamento de la Cordillera Central, corresponden a rocas metamórficas del grupo Cajamarca, entre las cuales se encuentran migmatitas, neises cuarzo feldespáticos, cuarcitas, anfibolitas, esquistos, mármoles fuertemente plegados, entre otras. Algunas de estas rocas presentan variaciones texturales, de grado de metamorfismo e inclusive composicionales, lo cual estaría indicando diferentes episodios de eventos metamórficos que pudieron haberles dado origen, y posiblemente tendrían un origen sedimentario. Según INGEOMINAS (1970), estas rocas son el resultado de tres posibles eventos metamórficos sufridos por la Cordillera Central a lo largo de su historia geológica, los cuales se encuentran registrados en rocas de edades precámbricas y ordovícicas. Dichos eventos metamórficos se marcan por las facies granulita, esquisto verde y anfibolita (respectivamente).

Al este de la falla Otú, son encontrados rocas intrusivas que cortan los neises precámbricos y las rocas metasedimentarias del ordovícico. Estas rocas son descritas por el mismo autor como neises intrusivos, rocas ultramáficas como serpentinita, las cuales son encontradas en forma lenticular, y gabros que se encuentran formando stocks. De igual manera, al este de esta misma falla, son encontradas un conjunto de rocas ígneas descritas principalmente como dioritas a cuarzodioritas, las cuales presentan variaciones texturales y composicionales, pero sus características petrográficas exhiben una posible relación genética entre ellas. Algunas de las rocas descritas para esta zona, corresponden a andesitas, stocks de adamelita (agrupación de rocas de granodiorita a cuarzomonzonita) las cuales son encajadas principalmente en neises.

De la misma manera, uno de los cuerpos litológicos de mayor predominancia, es el del Batolito Antioqueño, de edad cretácica, el cual corresponde a un cuerpo ígneo de gran extensión; en éste son distinguidas tres facies: cuarzo-diorita, cuarzo-diorita félsica y gabro, siendo estos últimos los más escasos. Como es descrito por INGEOMINAS (1970), las características del batolito (extrema uniformidad y ausencia de evidencias que indiquen una intrusión múltiple) y la poca densidad de las estructuras de flujo, sugieren que éste fue emplazado mediante una sola intrusión de magma de baja viscosidad.

El terciario en esta zona, corresponde a sedimentos continentales poco consolidados y cementados. Las rocas predominantes son conglomerados, areniscas y limolitas. Estas rocas yacen horizontales o presentan buzamientos leves hacia el oeste. Dando continuidad temporal, son descritos aluviones del cuaternario los cuales corresponden a una mezcla de materiales coluvial y aluvial no consolidados y se encuentran formando terrenos relativamente planos y de poca elevación.

Por su parte, la geología estructural regional es representada principalmente por fallas, las cuales pueden tener más de 100 kilómetros de longitud y tienen trazabilidad regional, inclusive por fuera del área descrita, de igual manera, por fallas regionales de menor extensión, determinadas por diferentes expresiones topográficas, discontinuidades litológicas, rocas fracturadas o cizalladas, entre otros, debido a la escasez de afloramientos que permitan determinar dichas estructuras.

Según INGEOMINAS (1970), el comportamiento de estas fallas es descrito como normales, de intrusión, rumbo y aquellas relacionadas al enfriamiento del Batolito Antioqueño. En esta zona, el fallamiento normal está representado por la falla Aquitania y otras fallas sin nombre, posiblemente con poco desplazamiento. El fallamiento relacionado al enfriamiento del Batolito Antioqueño, es caracterizado por

estructuras de poca longitud, pero con grandes zonas de cizalla; de igual manera, porque dichas estructuras se encuentran confinadas al batolito. Por otro lado, el fallamiento de intrusión presenta estructuras de grandes longitudes y aparentemente, poseen desplazamientos pronunciados y no se encuentran lejanas al contacto del batolito con sus rocas encajantes. En esta área, las fallas de rumbo representan una de las estructuras con mayor predominancia; entre estas fallas son descritas las de Palestina, Cocorná Sur, Nus y Otú, entre otras, y se considera que estas son genéticamente relacionadas y casi contemporáneas.

Según Cediél et al. (2018), el área descrita anteriormente (señalada en la figura 8), estaría ubicada entre las fallas Otú, Palestina y el valle del río Magdalena, definiéndose ésta zona como la provincia morfotectónica San Lucas.

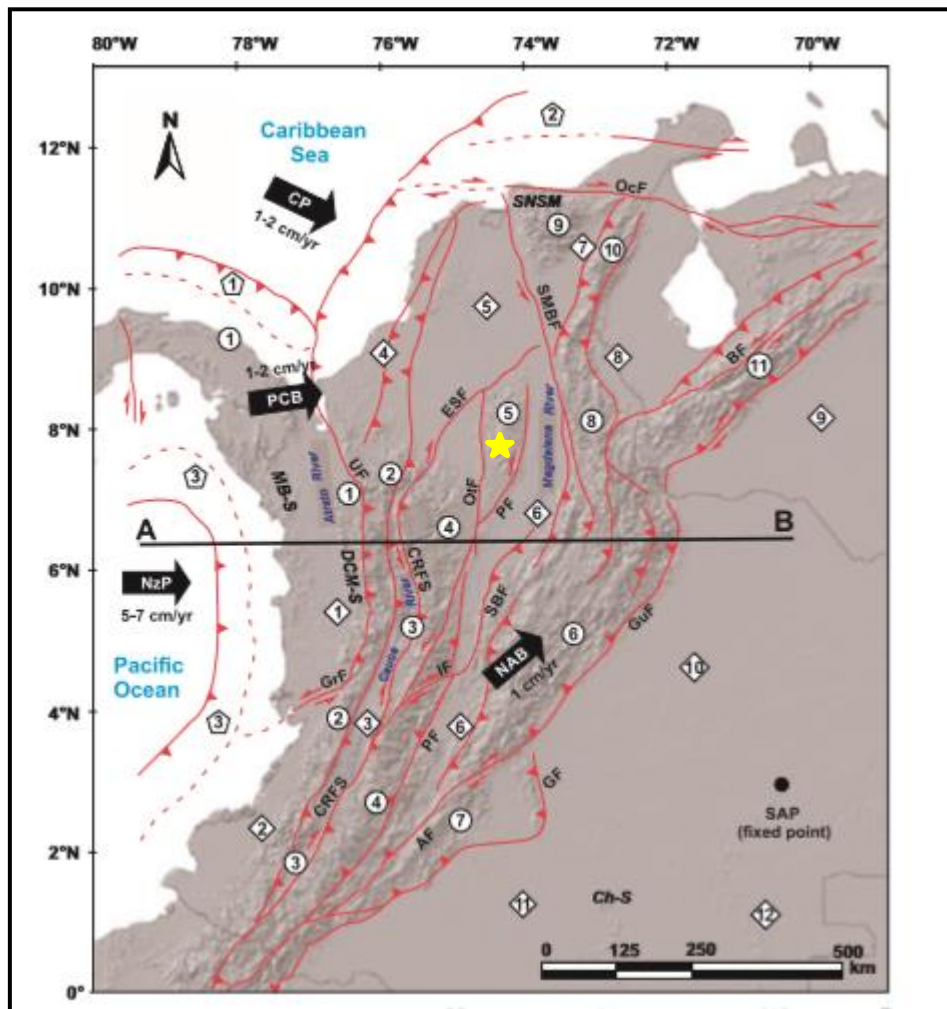


Figura 8. Localización geológica regional del área de interés. Tomado de Cediél et al. (2018)

A continuación, se presenta la plancha 132 (Yolombó) en escala 1:100.000, la cual representa una porción de las unidades geológicas y de las estructuras descritas anteriormente.



### 5.3 GEOLOGÍA LOCAL

En la cabecera municipal de Cisneros, es posible encontrar diferentes unidades geológicas que se encuentran, o han estado, sujetas a diferentes procesos geológicos. En este apartado fue tomada la cartografía geológica de campo realizada durante la elaboración del trabajo final de la asignatura “Geología ambiental”, el cual como se mencionó con anterioridad, fue realizado en la misma área de estudio, y sirve como uno de los elementos base para el proyecto realizado.

#### 5.3.1 Perfiles de suelo derivados del Batolito Antioqueño

Esta unidad es definida debido a la inexistencia de afloramientos de roca fresca en los cuales se pudiera realizar una identificación del cuerpo ígneo a que hace referencia INGEOMINAS (1970). Esta unidad se encuentra hacia la parte norte del área de estudio; debido a que la zona actualmente cuenta una densidad poblacional considerable, y en gran parte vegetación densa y/o cultivos, no fue muy factible encontrar perfiles que presenten la secuencia de horizontes completos. Así mismo, es necesario en este punto, precisar que esta unidad se encuentra considerablemente influenciada por depósitos de vertiente encontrados, los cuales serán descritos en el siguiente ítem. Teniendo en cuenta lo anterior, fueron definidos dos perfiles de suelo generalizados, de los cuales uno corresponde a los suelos derivados del Batolito Antioqueño, y el otro para los depósitos de vertiente los cuales contienen estos suelos, el cual será mencionado en el aparte siguiente. Dicha unidad ocupa 9,06 Ha, y representa el 27,81% del área total.

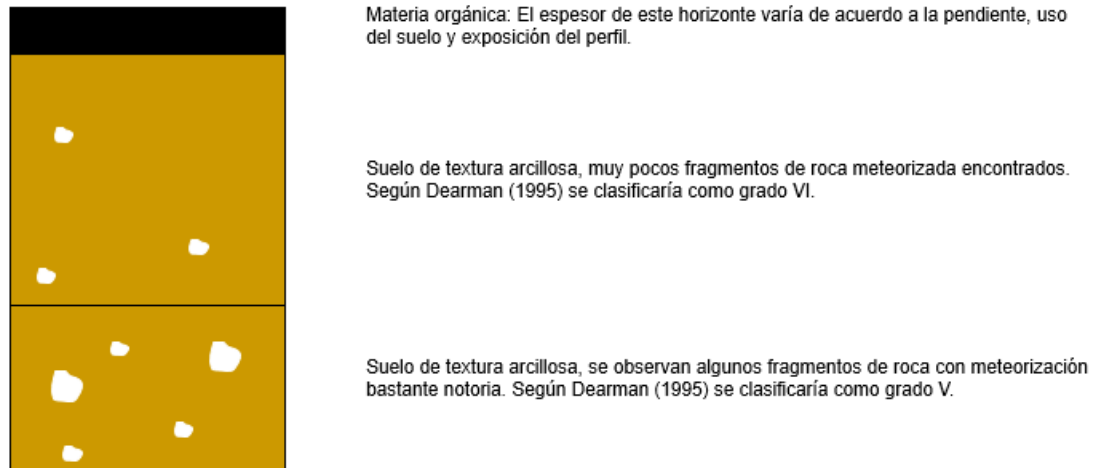


Figura 10. Esquema del perfil de suelos derivados del Batolito Antioqueño generalizado.

### 5.3.2 Depósitos de vertiente

Principalmente encontrados en los costados E y W de la zona de estudio, asociados al pie de las laderas de mayor pendiente, como producto de acumulación por remoción y desplazamiento de materiales provenientes de las laderas. Estos depósitos se constituyen por bloques subangulares a subredondeados de rocas con textura granítica lo que indica que correspondan al Batolito Antioqueño; dichos depósitos son generalmente matriz soportados, esta matriz presenta textura arcillosa-arenosa. Al parecer sobre estos se encuentran algunos flujos de lodos, en estos se encontraban algunos clastos de composición granítica.

La descripción anterior fue realizada gracias a la información obtenida en una “ventana” de material expuesta en un camino de herradura. Esta descripción fue completada con las observaciones geomorfológicas realizadas, ya que debido al grado de intervención antrópica y vegetación, los afloramientos encontrados no suministran la información necesaria para realizar una reconstrucción de estos depósitos, sin embargo se propone una secuencia de estos representada en la Figura 11. Dicha unidad ocupa 14,44 Ha, y representa el 44,30%% del área total.

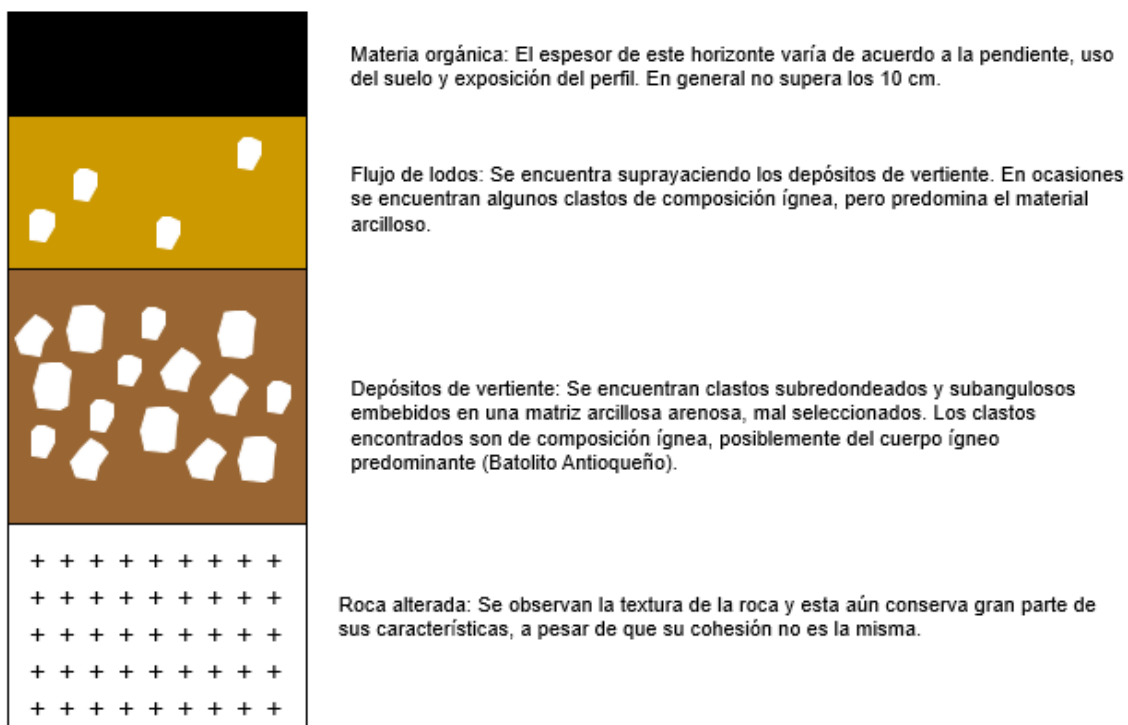


Figura 11. Esquema generalizado de depósitos de vertiente del área de interés.

### 5.3.3 Depósitos aluviales

Se localizan en cercanías al río Nus, principalmente hacia los sectores sur y sureste de la zona de interés. Este tipo de depósitos son formados como producto del cambio de nivel base del cauce que

genera inundaciones y posterior depositación de materiales a lo largo del cauce. Estos depósitos se componen de materiales cuyo tamaño oscila entre 4 mm a 0,25 (aproximadamente), correspondiendo a gravas finas y arenas, moderadamente seleccionados. Dicha unidad ocupa 9,08 Ha, y representa el 27,88% del área total.

#### **5.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL**

El componente estructural encontrado en la zona, corresponde a la falla denominada "Falla Cisneros", la cual se comporta de manera normal. Geomorfológicamente y a grandes rasgos, la expresión de la falla es claramente marcada por los espolones festoneados y, fuera del área de interés, por espolones faceteados. Debido a la naturaleza de los materiales que reposan sobre la traza de la falla, encontrar evidencias de la misma en campo no fue posible, por lo que esta es marcada como una falla inferida. De igual forma, no fueron encontrados otros elementos estructurales locales que indicaran presencia de fallamiento secundario en el área de estudio.

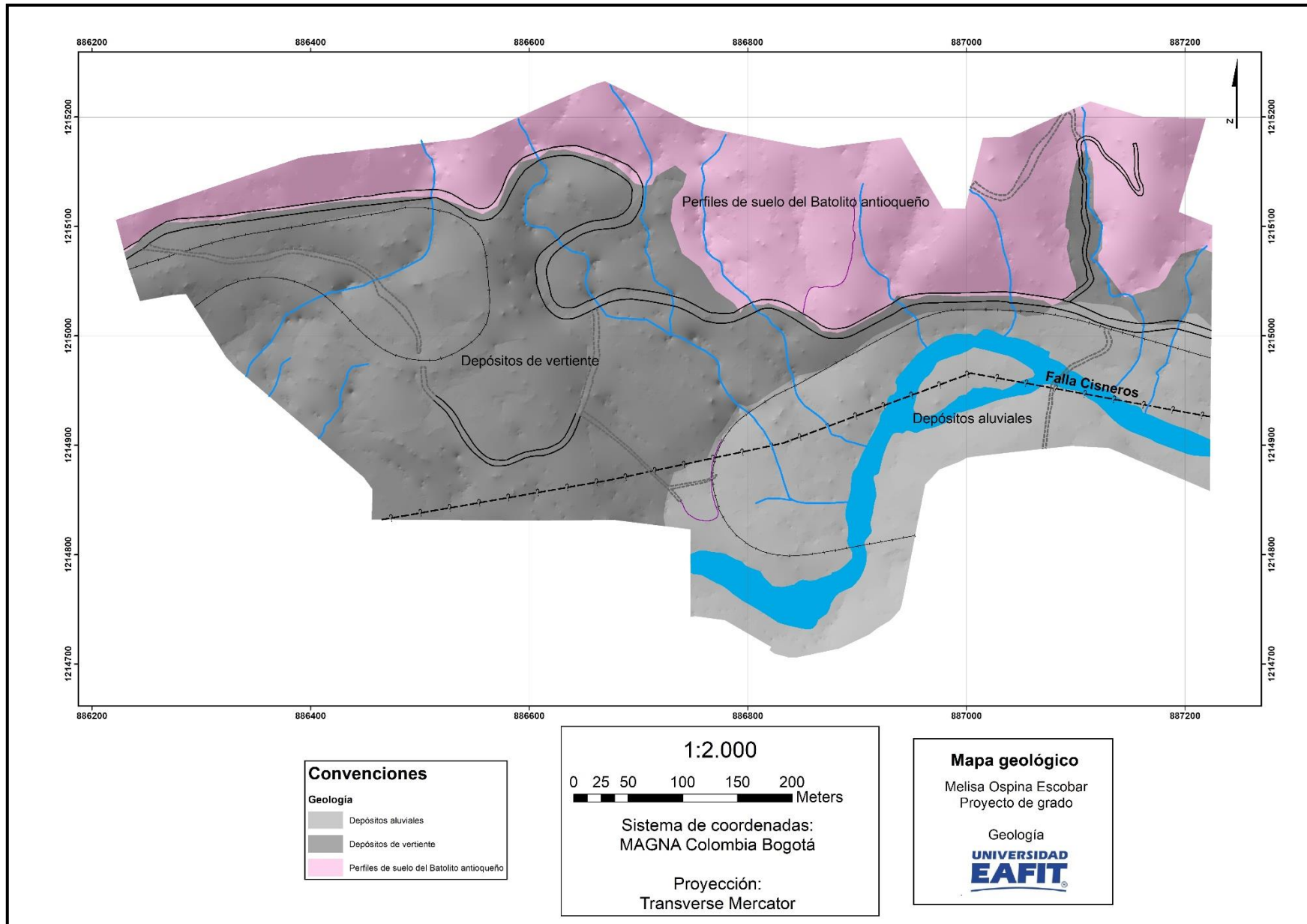


Figura 12. Mapa geológico de la zona de estudio a escala 1:2000.

## 5.5 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

Las distintas geoformas de la superficie terrestre se entienden en términos generales como el resultado de la interacción de los procesos endógenos (internos) formadores de los rasgos principales del relieve y de los procesos exógenos (externos) asociados con el desgaste del relieve primario a través del tiempo geológico y la formación de las llanuras aluviales, eólicas y marinas por los distintos modelados morfodinámicos (IDEAM, 2013).

El mapa geomorfológico de la zona de interés fue realizado mediante el ortofotomosaico, modelos de elevación y superficie generados, al igual que trabajo de campo de reconocimiento realizado. En dicha zona, fueron encontrados dos ambientes geomorfológicos: denudacional, estructural y fluvial, debido a la acción directa del río Nus. En la figura 13, es presentado el mapa de subunidades geomorfológicas. Para la clasificación de estas unidades, fue usado el Glosario de términos geomorfológicos del Servicio Geológico Colombiano (2015).

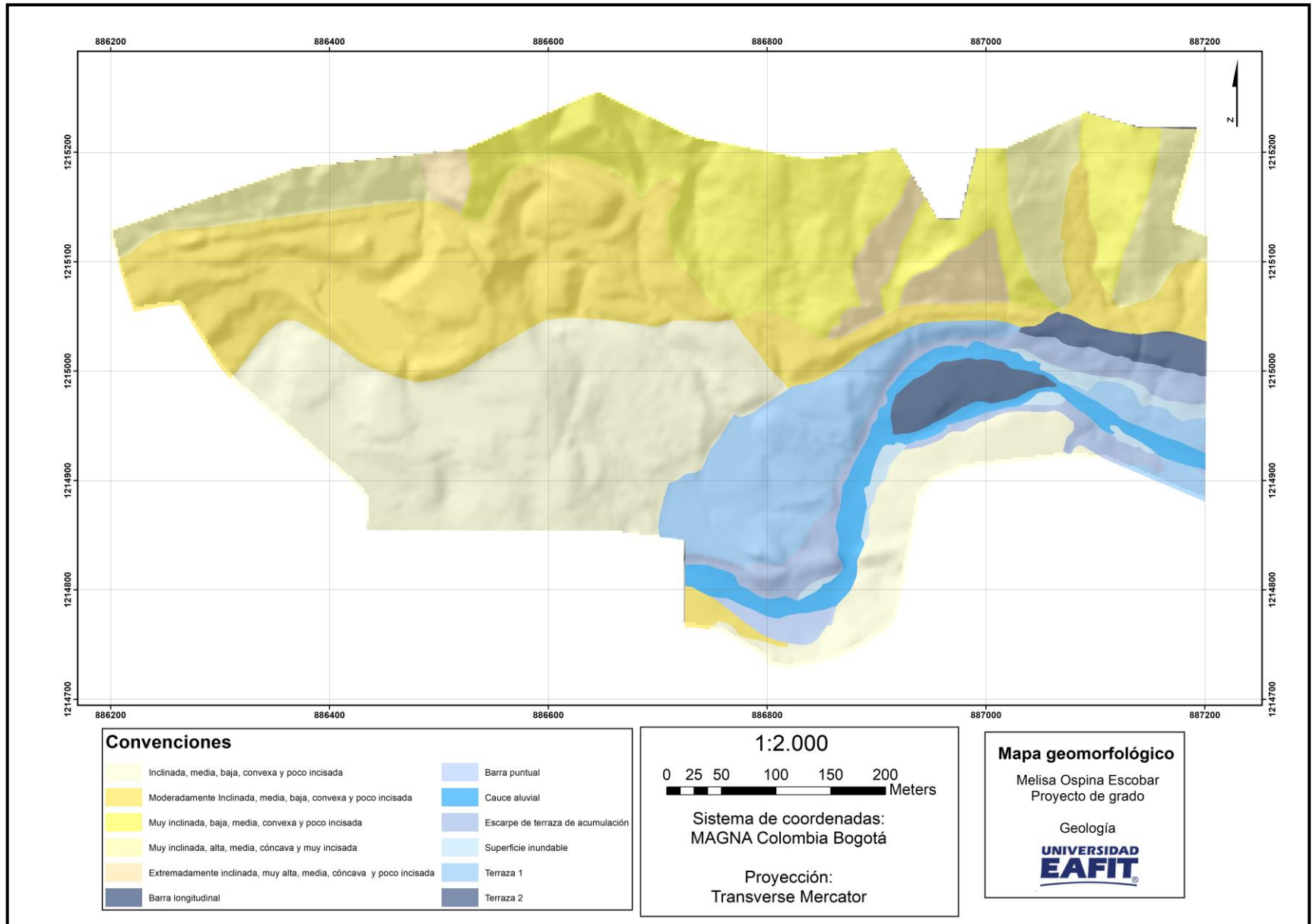


Figura 13. Mapa geomorfológico de la zona de estudio a escala 1:2000.

### 5.5.1 Ambiente denudacional

Siguiendo la información del Sistema Geológico Colombiano “*incluye las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que remodelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes y de igual manera, crean nuevas por la acumulación de sedimentos*” (SGC, 2015). Estas subunidades, están asociadas a los depósitos de vertiente, los cuales se localizan principalmente hacia el oeste del área de estudio.

#### 5.5.1.1 Ladera inclinada, media, baja convexa y poco incisada

Superficie alomada, de pendientes generalmente suaves, las cuales se desarrollaban en suelos coluviales. Su altura es baja y su longitud es considerada media. No se observan canales que estén generando incisión sobre las mismas. Los pocos encontrados no tienden a socavar en gran medida. Esta subunidad ocupa 8,22 Ha, y representa el 25,44% del área total.

#### 5.5.1.2 Ladera moderadamente inclinada, media, baja convexa y poco incisada

Superficie alomada de pendientes generalmente medianamente inclinadas, las cuales se desarrollan en suelos coluviales. Su altura es baja y de longitud media. La ondulación de estas unidades va perpendicular a la pendiente. No se observan canales que generen incisión sobre esta. Esta subunidad ocupa 8,19 Ha, y representa el 25,35% del área total.



Figura 14. Ladera moderadamente inclinada, media, baja, convexa y poco incisada. Se señala en la línea amarilla el sentido de la unidad.

### 5.5.1.3 Muy inclinada baja, media, convexa y poco incisada

Superficie alomada de pendientes muy inclinadas, de baja altura y longitud media. Desarrollada en suelos residuales, presenta ondulaciones perpendiculares a la pendiente y no se observan canales que generen mayor incisión sobre esta. Esta subunidad 5,5 Ha, y representa el 17,04% del área total.

### 5.5.1.4 Muy inclinada, alta, media, cóncava y poco incisada

Superficies de pendientes muy inclinadas, de altura considerable y longitud media a corta, con ondulaciones en el sentido de la pendiente. Esta se desarrolla en suelos residuales. Esta subunidad ocupa 2,5 Ha, y representa el 19,34% del área total.



Figura 15. Ladera muy inclinada, alta, media, cóncava y poco incisada.

### 5.5.1.5 Extremadamente inclinada, muy alta, media, cóncava y muy incisada

Superficies de pendientes extremadamente inclinadas, corresponden a las unidades de mayor altura en la zona, con longitudes cortas a medias; éstas se desarrollan en suelos residuales y la ondulación de las mismas se da en el sentido de la pendiente. Su forma cóncava favorece al desarrollo de canales que incisan considerablemente la unidad. Esta subunidad ocupa 0,80 Ha, y representa el 6,19% del área total.



Figura 16. Ladera extremadamente inclinada, muy alta, media, cóncava y poco incisada.

## 5.5.2 Ambiente fluvial

De acuerdo con la información del SGC *“incluye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca. De esta manera, es posible encontrar unidades aledañas a ríos, quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando éstas pierden su capacidad de arrastre”* (SGC, 2015).

El ambiente fluvial, en este caso, se encuentra directamente asociado al cauce del río Nus, hacia el sur de la zona de estudio y de algunos afluentes del mismo. Las subunidades presentadas en el mapa, se localizan en las zonas de menor pendiente del área de estudio.

### 5.5.2.1 Barra puntual

Subunidad de forma alunada, encontrada en el margen cóncavo del cauce del río Nus. Está constituida principalmente por depósitos de gravas y arenas acumulados en esta zona debido a los procesos de transporte del cauce. En esta también son encontrados bloques de aproximadamente 50 centímetros de diámetro, lo cual podría indicar un evento de mayor energía del cauce. Esta subunidad ocupa 0,20 Ha, y representa el 0,63% del área total.



Figura 17. Barra puntual hacia la margen cóncava del cauce aluvial, localizada hacia el suroeste de la zona, en el margen derecho del cauce del río Nus.

#### 5.5.2.2 Barra longitudinal

Cuerpo elongado de morfología suave y de superficie convexa, que actualmente se encuentra vegetado y es usado como pastizal para ganado. Esta subunidad es constituida por arenas gruesas a finas y gravas finas; sin embargo, son encontrados algunos bloques que oscilan entre 0,5 a 1,5 metros de diámetro, lo que también podría indicar un evento de mayor energía del cauce. Esta subunidad ocupa 0,53 Ha, y representa el 1,66% del área total.

#### 5.5.2.3 Cauce aluvial

Canal de profundidad variable, que presenta un comportamiento sinuoso, lo cual es evidenciado en las geoformas encontradas asociadas a éste. Al interior del cauce se encuentran bloques de mayor tamaño, los cuales indican eventos de mayor energía. Igualmente, en algunos sectores del cauce son observados saltos de aproximadamente 2 metros de altura. El cauce no se encuentra canalizado, ni intervenido. Esta subunidad ocupa 1,18 Ha, y representa el 3,66% del área total.



Figura 18. Cauce aluvial del río Nus; hacia el centro del mismo barra central vegetada.

#### 5.5.2.4 Terraza aluvial

Corresponde a una superficie de topografía plana, la cual se encuentra algunos metros elevada sobre el nivel base del cauce del río Nus, presenta algunas ondulaciones suaves en su superficie y se encuentra vegetada con pastos limpios o arbolados. Se constituyen principalmente de arenas gruesas a finas. En este caso fueron identificados dos niveles de terrazas, en los que se pudo determinar su edad relativa, ya que una de estas subunidades se encontraba un poco más elevada con respecto a la otra, por lo que fueron definidas como terraza 1 y terraza 2, para separar la terraza más joven, de la relativamente más vieja, respectivamente. El nivel de terraza 1, ocupa 2,77 Ha, y representa el 8,59% del área total, mientras que el nivel 2 ocupa 0,41 Ha, y representa el 1,28%

### 5.6 COBERTURAS

De acuerdo con el IDEAM *“la cobertura de la tierra es un resultado de la interacción de la dinámica natural geológica, geomorfológica, los suelos, el clima y sistemas de comunidades bióticas, interrumpida por el hombre para su supervivencia y desarrollo. Dicha interrupción genera o contribuye a la aparición de diferentes procesos como cambios en el patrón de ciclos hidrológicos, cambios en las formas del relieve (en gran número de casos en forma negativa produciendo*

*movimientos en masa, flujos, avalanchas, erosión), afectación en la evolución de las especies, deterioro de ecosistemas, entre otros” (IDEAM, 2010).*

Ya que mediante las ortofotos generadas, la delimitación de las coberturas se presentaba de una manera más clara fue necesario usar una clasificación de las mismas que permitiera caracterizarlas; por lo tanto, fue usada la metodología de CORINE Land Cover descrita por el IDEAM (2010). A continuación se presentan las diferentes coberturas encontradas en el área de interés, con su respectiva área y porcentaje con respecto a la extensión total del área. En la figura 20 se presenta el mapa de coberturas para el área descrita.

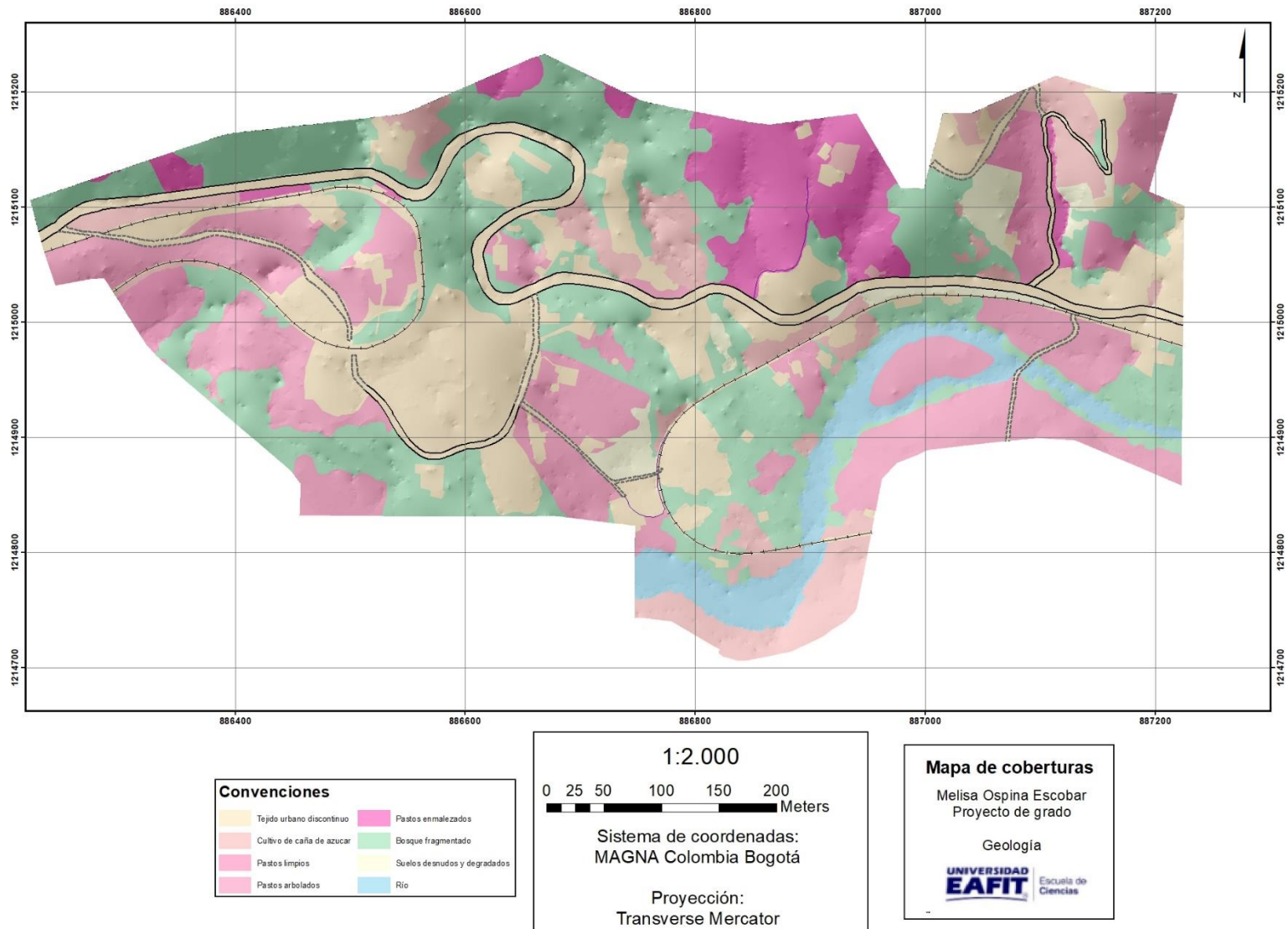


Figura 19. Mapa de coberturas de la zona de estudio a escala 1:2000.

## 5.6.1 Zonas urbanizadas

### 5.6.1.1 Tejido urbano discontinuo

Corresponde a aquellas porciones de suelo ocupadas por edificaciones tanto de vivienda, como de infraestructura y zonas verdes. Debido a que una de las características de la zona es una densidad poblacional relativamente baja, dichas construcciones se encuentran separadas y dispersas entre sí. Allí no se evidencian construcciones con más de dos pisos de altura o grandes obras. Esta cobertura ocupa 8,1 hectáreas, correspondiendo al 25,3% del área total.



Figura 20. Tejido urbano discontinuo.

## 5.6.2 Cultivos permanentes

### 5.6.2.1 Caña

Son encontrados cultivos de caña de azúcar, los cuales se encuentran distribuidos en gran parte de la zona de estudio. El sembrado de estos cultivos no se hace bajo ningún orden, por lo que dichas plantas se encuentran dispersas en el cultivo y, al mismo tiempo, en la zona de estudio. Este tipo de cultivos son los más predominantes en la zona, ocupando 2,91 hectáreas, y representando el 9,08% del área total.



Figura 21. Cultivo de caña.

### 5.6.3 Pastos

#### 5.6.3.1 Pastos limpios

En esta cobertura fueron encontrados pastos que no contenían vegetación arbórea y/o arbustiva, dichos pastos son usados para la ganadería, y en ocasiones como sitios de encuentro recreativos sobre todo los aledaños a la ribera del río Nus. Esta cobertura ocupa 0,92 hectáreas, y representa el 2,88% del área total.



Figura 22. Pastos limpios.

### 5.6.3.2 Pastos arbolados

Corresponde a aquellos pastos que se encuentran acompañados de árboles, los cuales no ocupan el 30% del área total de la unidad de pastos. Al igual que los pastos limpios, estos son usados para la ganadería y recreación. Debido a lo anterior, este tipo de coberturas se encuentran principalmente asociadas a edificaciones de tipo residencial, ocupando 6,17 hectáreas y representando el 19,24% del área total.



Figura 23. Pastos arbolados.

### 5.6.3.3 Pastos enmalezados

Este tipo de cobertura, corresponde a aquella que se constituye por pastos asociados a malezas o vegetación arbustiva de baja altura. Este tipo de coberturas eran encontradas en zonas de poca actividad animal y antrópica. En esta zona se encuentra en una pequeña proporción, ocupando 2,34 hectáreas, y representando el 7,30% del área total.



Figura 24. Pastos enmalezados.

## 5.6.4 Bosques

### 5.6.4.1 Bosque fragmentado

Debido a las actividades realizadas en la zona, la cobertura correspondiente al bosque endémico de la zona actualmente se encuentra fragmentado, es decir, que se encuentra distribuido a lo largo de la zona, más sin embargo al estar sectorizado no existe interconexión entre éste. En estos fragmentos, la cobertura corresponde principalmente a árboles de alturas aproximadamente de 4 a 10 m. Ocupa 10,84 Ha, y representa el 33,8% del área total.



Figura 25. Bosque fragmentado.

### 5.6.4.2 Tierras desnudas y degradadas

Los suelos con estas características son producto principalmente de actividades relacionadas con la adecuación de laderas para la construcción de viviendas. Esta cobertura ocupa 0,73 Ha, y representa el 2,29% del área total.



Figura 26. Suelos desnudos y degradados.

## 5.6.5 Aguas continentales

### 5.6.5.1 Ríos

En el área de interés esta cobertura se encuentra representada por el río Nus, el cual cruza la cabecera del municipio de Cisneros en sentido oeste-este. El cauce presenta un ancho variable (entre 7 a 15 m., aproximadamente), y transporta material grueso. Ocupa 1,6 Ha, y representa el 5% del área total.



Figura 27. Río Nus.

## 6. PROCESOS MORFODINÁMICOS

Para realizar una identificación, caracterización y localización de los movimientos en masa de la zona de estudio, fueron usados insumos como ortofotomosaicos, modelos digitales de superficie y terreno. Así mismo, variables geométricas obtenidas a partir del DEM generado. Estas herramientas permiten, entonces, obtener la distribución espacial de los movimientos en masa.

Debido a la extensión de la zona de estudio y a la resolución alcanzada en el ortofotomosaico, la representación de los movimientos en masa se realiza mediante polígonos. Para esta área en particular, el mapeo de los mismos, fue realizado principalmente a partir del ortofotomosaico generado, teniendo un total de 23 movimientos en masa, los cuales se presentan con mayor densidad hacia el cuadrante oeste-noroeste de la zona (Figura 31); de estos, 8 corresponden a procesos activos, y 15 a procesos inactivos. El tipo de movimiento en masa que predomina es el rotacional y constituye el 100% del área afectada.

Estos procesos se asocian a los diferentes grados de meteorización, los cuales para esta zona específica, se identifican como V y VI según Dearman (1974), pues fueron encontrados suelos residuales (saprolito). Este tipo de eventos morfodinámicos, se asocian a diferentes factores, bien sean naturales, como inestabilidad de laderas a causa de fallamiento y lineamientos, propiedades geotécnicas propias de los materiales descritos anteriormente, y a la saturación de los suelos producto del ciclo climatológico. De la misma manera, factores como la pendiente y geomorfología, son factores que juegan un papel clave en la generación de este tipo de procesos; y antrópicos, como cortes de taludes, deforestación, sobrepastoreo y agricultura extensiva.

En las figuras 28, 29 y 30, se observan algunos de los deslizamientos rotacionales no sólo más significativos, sino representativos de la zona, los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de la zona de estudio.

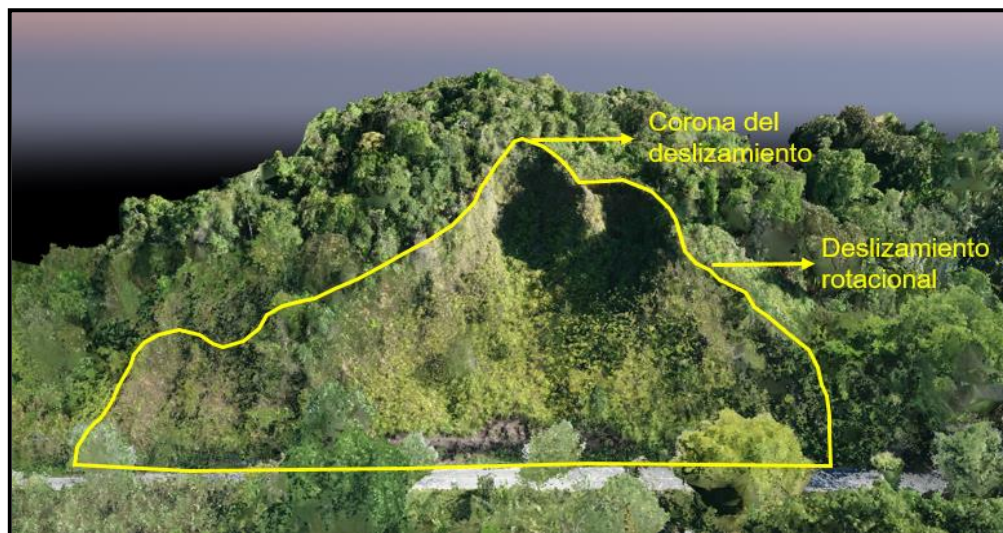


Figura 28. Modelo digital de superficie, donde se identifica deslizamiento rotacional, hacia el centro de la zona de estudio, sobre la vía Medellín-Cisneros. Proceso inactivo.



Figura 29. Modelo digital de superficie, donde se identifica deslizamiento rotacional, hacia el centro-oriente de la zona de estudio, sobre la vía Medellín-Cisneros. Proceso inactivo.



Figura 30. Ortofotografía donde se identifica deslizamiento rotacional, hacia el centro-occidente del área de estudio, sobre la vía Medellín-Cisneros. Proceso activo.

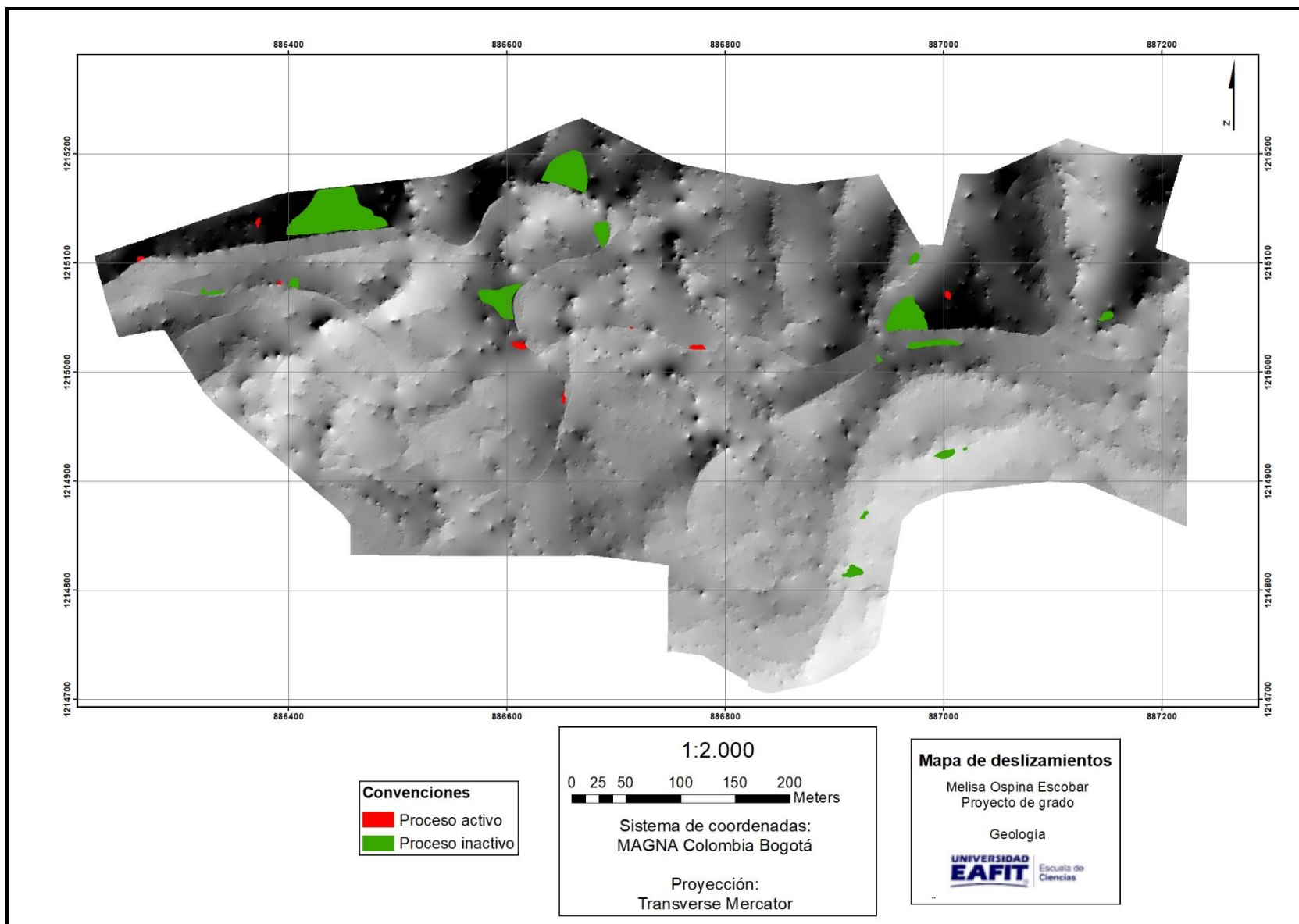


Figura 31. Mapa de localización de deslizamientos realizado con ortofotomosaico y modelo de superficie generados por Pix4D.

## **7. RESULTADOS**

### **7.1 INSUMOS BÁSICOS**

#### **7.1.1 ORTOFOTOMOSAICO**

Generado a partir de las imágenes obtenidas por RPAS y mediante la herramienta Pix4D, este ortofotomosaico abarca toda la zona de estudio (Figura 32). Mediante éste fue posible definir coberturas, unidades geomorfológicas y procesos morfodinámicos, entre otros. Una de las ventajas del procesamiento de las fotografías con el software Pix4D, es la georeferenciación del producto según el sistema de coordenadas necesario. En este caso, no sólo el ortofotomosaico, sino todos los subproductos, fueron generados teniendo en cuenta el sistema de coordenadas Magna-Colombia Bogotá.

#### **7.1.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DTM)**

Al igual que el DTM, un Modelo de Elevación Digital (DEM) representa los cambios de altura de un determinado terreno. A partir de éste pueden ser calculadas variables morfométricas que permiten realizar la caracterización de una zona específica. En el caso del DEM (Figura 33) realizado por el IGAC, se tiene que el tamaño de pixel es de 2 m., presentando una clara diferencia (en cuanto a resolución con el DTM).

#### **7.1.3 MODELO DIGITAL DEL TERRENO (DTM)**

La topografía, corresponde a una de las características importantes de una zona, ya que representa el entorno en el cual son desarrollados los diferentes procesos, siendo clave al momento de analizar cualquier problema ambiental. A partir de un modelo de elevaciones del terreno es posible calcular otras variables determinantes, como pueden ser la pendiente, la curvatura del terreno, las dimensiones de cuencas que drenen hacia un mismo punto, las orientaciones de ladera y hasta la forma como el sol ilumina la superficie (Londoño, 2006).

Para este caso de estudio, el modelo digital del terreno fue generado mediante la herramienta Pix4D, a partir del cálculo de una nube de puntos densa (generada mediante la formación del ortofotomosaico), a partir de la cual es generado un modelo digital de superficie (DSM), modelo que posteriormente depura ruidos y forma un modelo digital del terreno (DTM). Un DTM es una representación de ráster de una superficie continua que, en general, hace referencia a la elevación del terreno. La resolución (o GSD, Ground Sampling Distance) de estos datos se determina principalmente por la medida en pixeles. En este caso, el modelo digital del terreno fue obtenido on una GSD 3.59 cm/pixel (Figura 34).

#### **7.1.4 MODELO DE SOMBRAS**

Este es un modelo desarrollado a partir del DEM y DTM, mediante la herramienta ArcGis (Figura 35 y 36). Mediante este modelo es posible realizar una identificación preliminar de la morfología del área en cuestión, identificando geoformas y lineamientos cuando ello fuera posible.

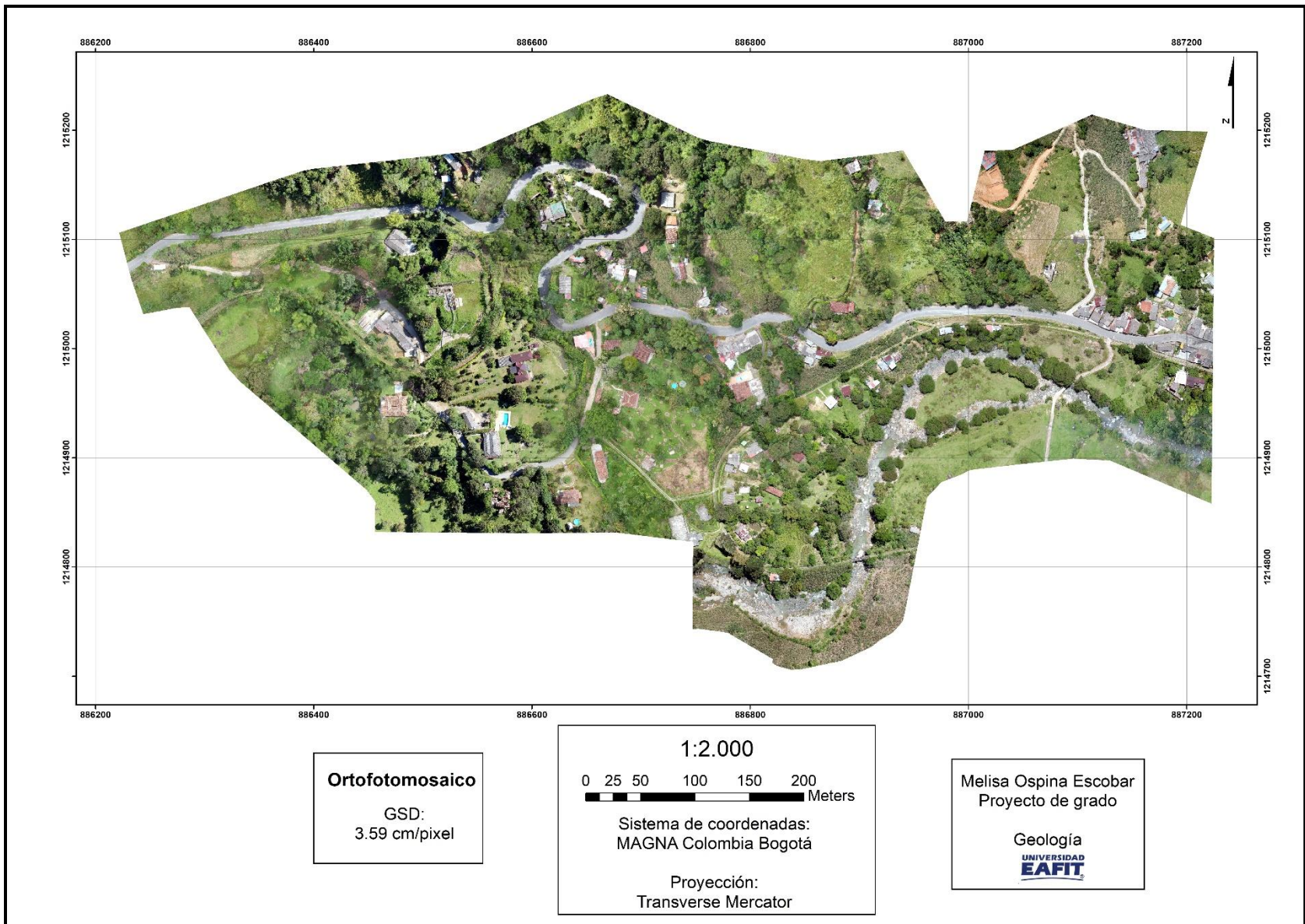


Figura 32. Ortofotomosaico de la zona de estudio generado por Pix4D.

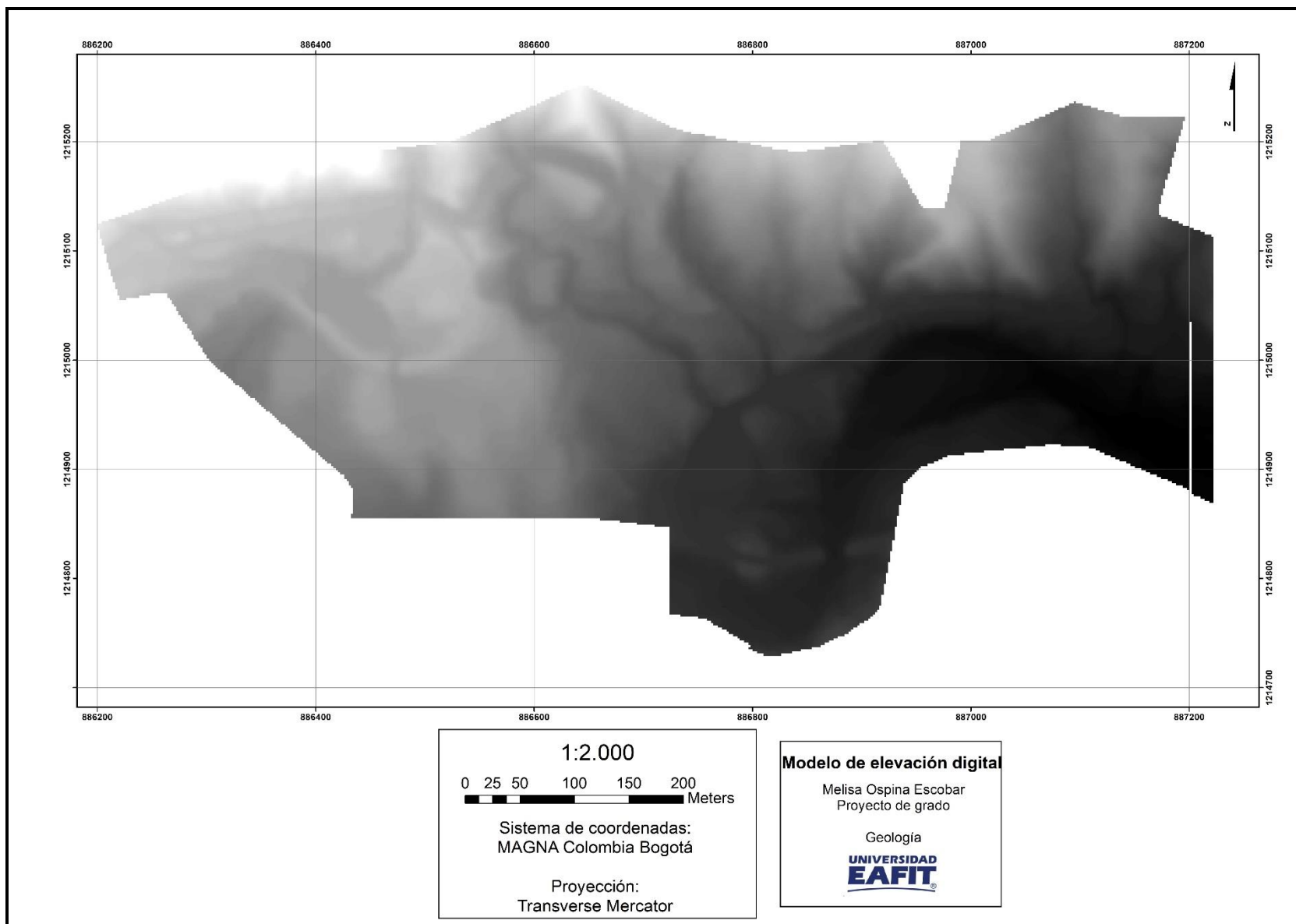


Figura 33. Modelo de Elevación Digital generado con cartografía IGAC.

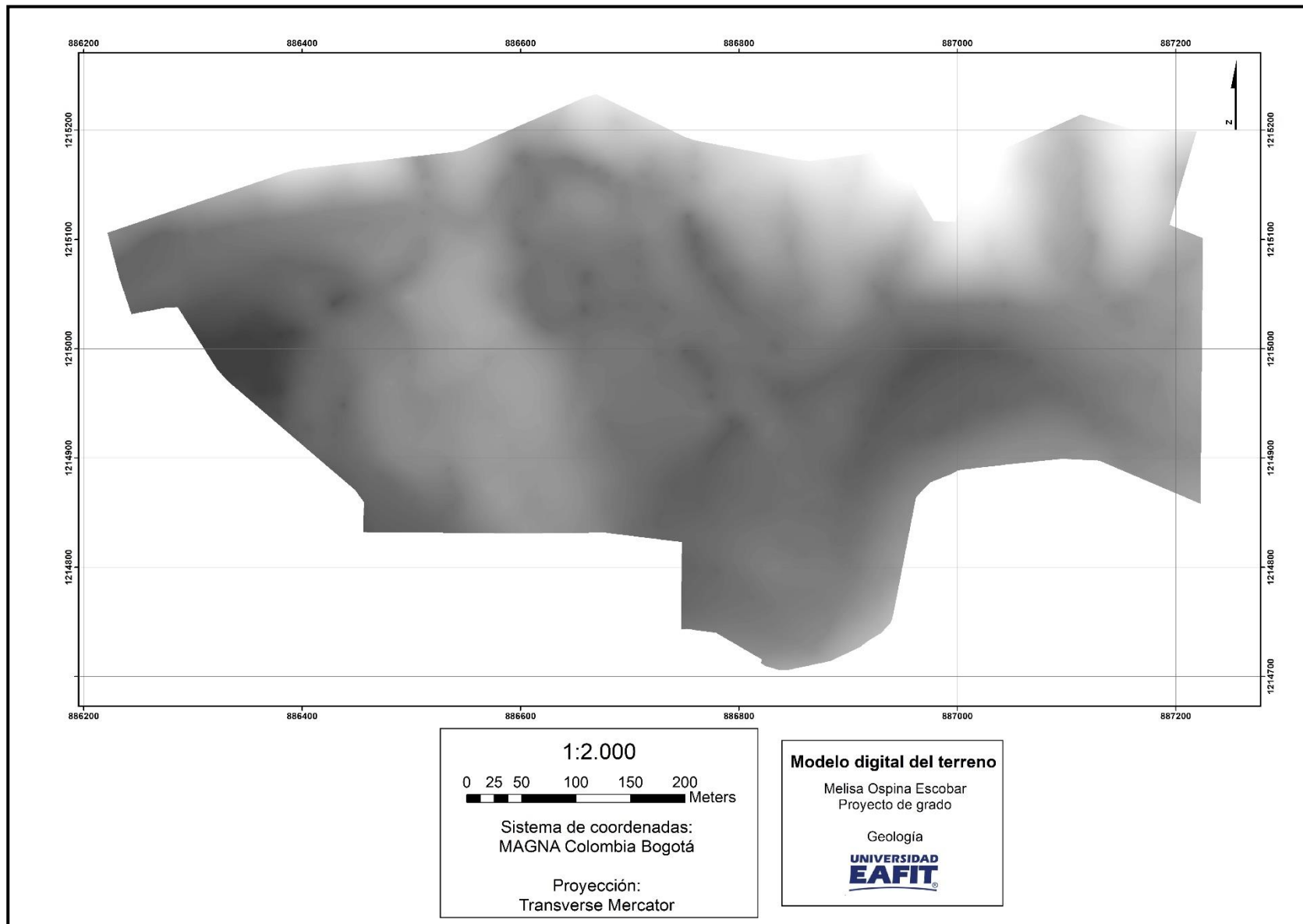


Figura 34. Modelo Digital del Terreno generado por PIX4D.

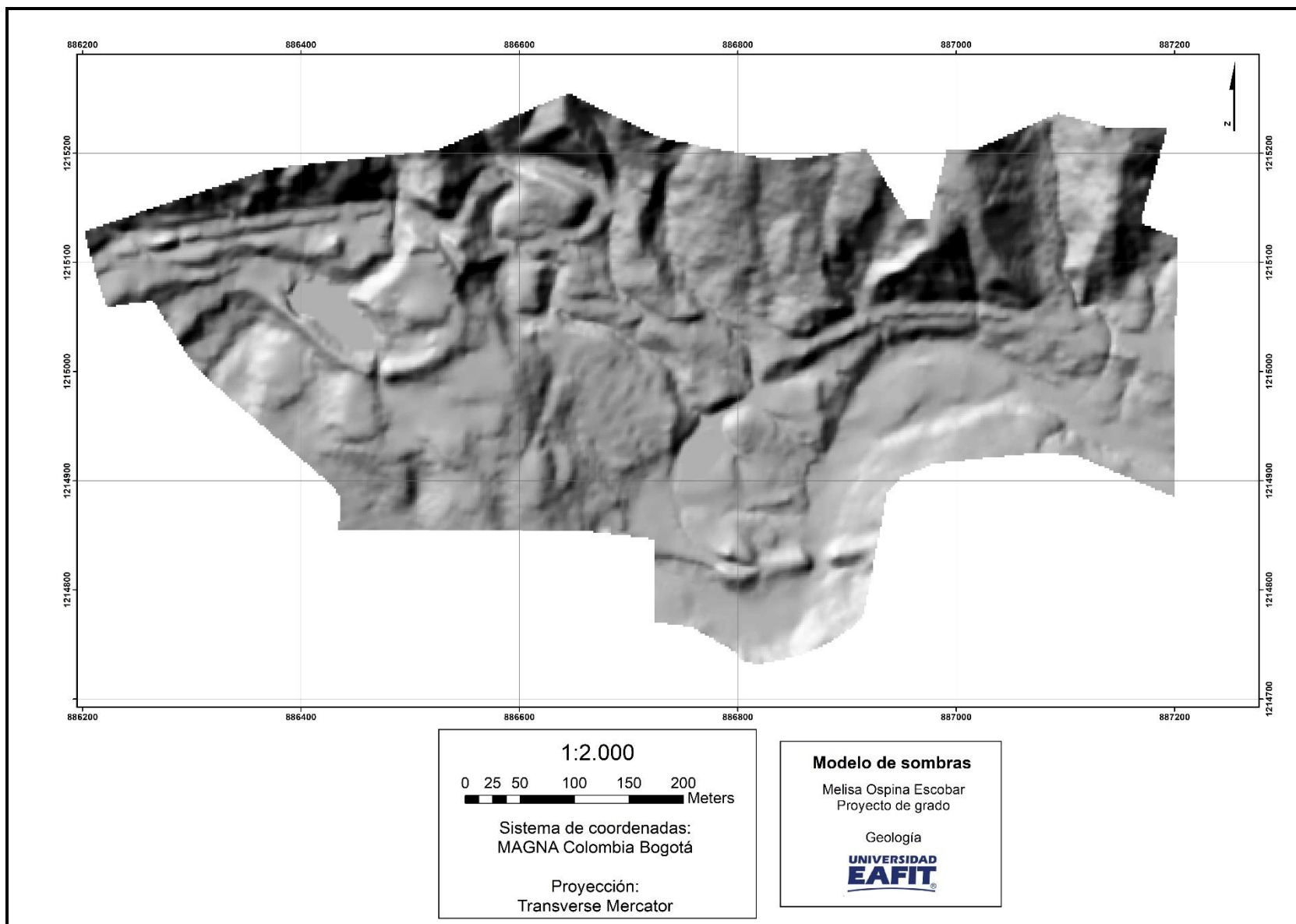


Figura 35. Modelo de sombras generado con cartografía del IGAC.

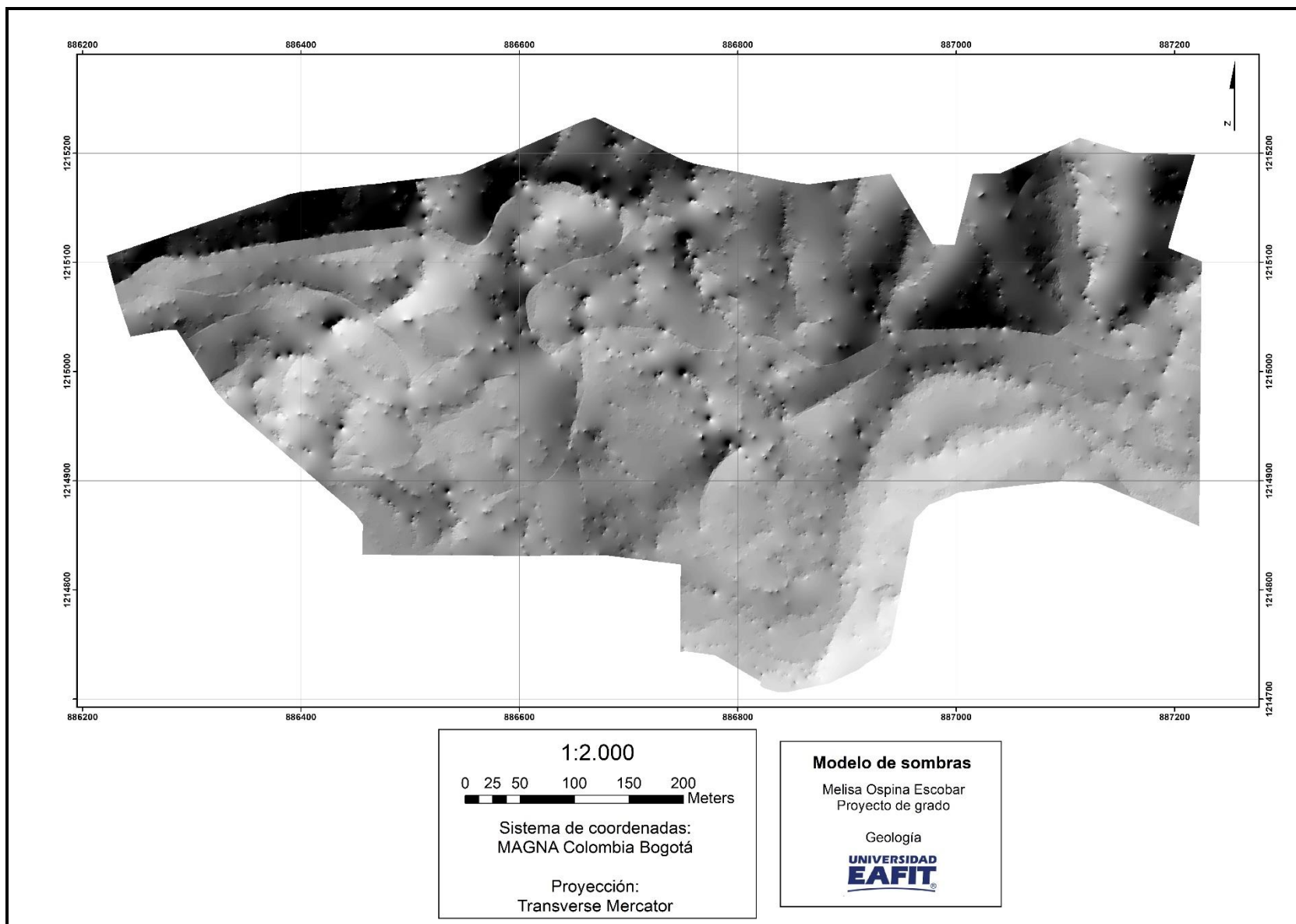


Figura 36. Modelo de sombras generado con cartografía de RPAS.

## 7.2 VARIABLES PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS

### VARIABLES MORFOMÉTRICAS

Estas fueron obtenidas a partir del DEM y el DTM, anteriormente tratados y representan insumos necesarios para el cálculo de la susceptibilidad; son entonces obtenidos dos grupos de información, los cuales son presentados a continuación.

#### 7.2.1 Pendientes

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje y se relaciona con los movimientos en masa de manera que a mayor el grado de pendiente aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa (SGC, 2013). Esta variable se relaciona directamente con la aparición de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad, las tensiones de corte tangencial y normal en la formación superficial e influye, también, en la distribución de agua en las laderas (Londoño, 2006).

Para la generación de este mapa temático (Figura 37 y 38) fueron usados DTM y DEM, a los cuales les fue aplicada la función “slope” en la herramienta ArcMap, obteniendo dichos raster, los cuales son reclasificados en 8 clases, teniendo en cuenta los mismos parámetros de reclasificación para ambos modelos.

Teniendo en cuenta el modelo de pendientes realizado mediante la cartografía del IGAC, se encuentra que los rangos predominantes corresponden a muy inclinado y extremadamente inclinado, los cuales representan un 31,13% y 22,51% del área total. Dichos rangos se localizan principalmente hacia la zona norte, donde se localizan las mayores elevaciones del área de interés; sin embargo, también son encontrados en otros sitios asociados a corte de vías y en cercanía de los márgenes cóncavos del río Nus.

Tabla 2. Descripción del atributo pendiente obtenido mediante cartografía del IGAC.

Rango asignado	Descripción	Área total (Ha)	Porcentaje (%)
0-0.5	Casi nivelado	0,08	0,24
0.5-2	Muy suavemente inclinado	0,41	1,27
2- 5	Suavemente inclinado	0,76	2,37
5- 9	Moderadamente inclinado	3,42	10,66
9 -15	Fuertemente inclinado	4,79	14,91
15-30	Abruptamente inclinado	5,42	16,90
30-60	Muy inclinado	9,99	31,13
>60	Extremadamente inclinado	7,22	22,51

Según el modelo de pendientes realizado mediante la cartografía generada por RPAS, se tiene que, los rangos predominantes en esta variable corresponden a los denominados como abruptamente inclinados y muy inclinados, con un 32,51% y 28,19% respectivamente, del área total. Estos valores se encuentran distribuidos a lo largo del área de interés y, principalmente, hacia la zona Norte. Las zonas con inclinaciones moderadas y suaves, comprenden el 9,80% y 4,37% respectivamente, del área total. La distribución de estos valores es moderada y se encuentra a lo largo de la zona. De igual manera, las zonas con valores de inclinación muy suaves y nivelados, ocupan el 0,80% y 0,05% respectivamente, del área total. Se localizan, generalmente, en cercanías al cauce del río Nus, y sus geoformas asociadas.

Tabla 3. Descripción del atributo de pendiente obtenido mediante cartografía de RPAS.

<b>Rango asignado</b>	<b>Descripción</b>	<b>Área total (Ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
0-0.5	Casi nivelado	0,015	0,05
0.5-2	Muy suavemente inclinado	0,256	0,80
2- 5	Suavemente inclinado	1,402	4,37
5- 9	Moderadamente inclinado	3,140	9,80
9 -15	Fuertemente inclinado	5,754	17,95
15-30	Abruptamente inclinado	10,422	32,51
30-60	Muy inclinado	9,035	28,19
>60	Extremadamente inclinado	2,031	6,34

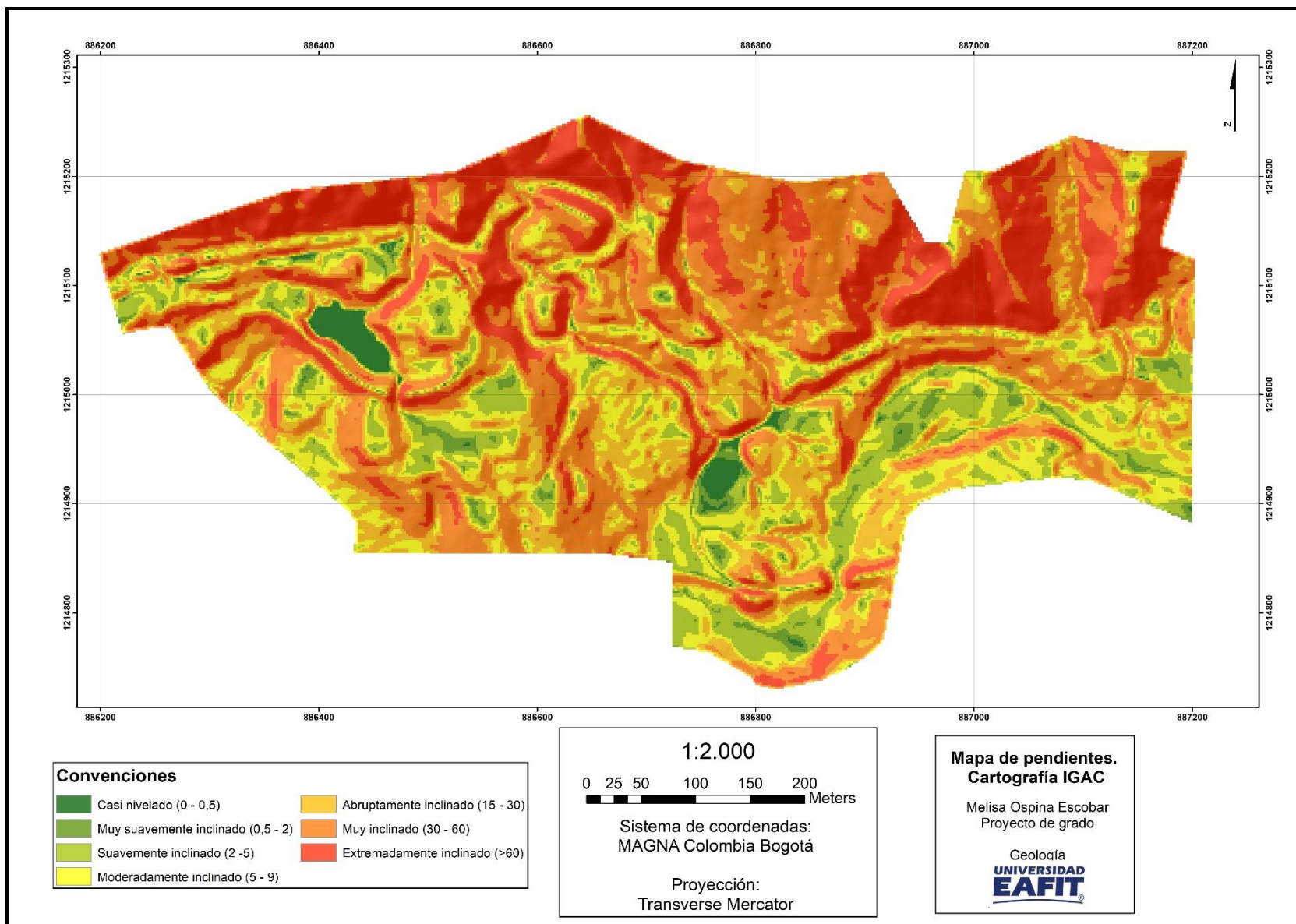


Figura 37. Mapa de pendientes generado con cartografía del IGAC.

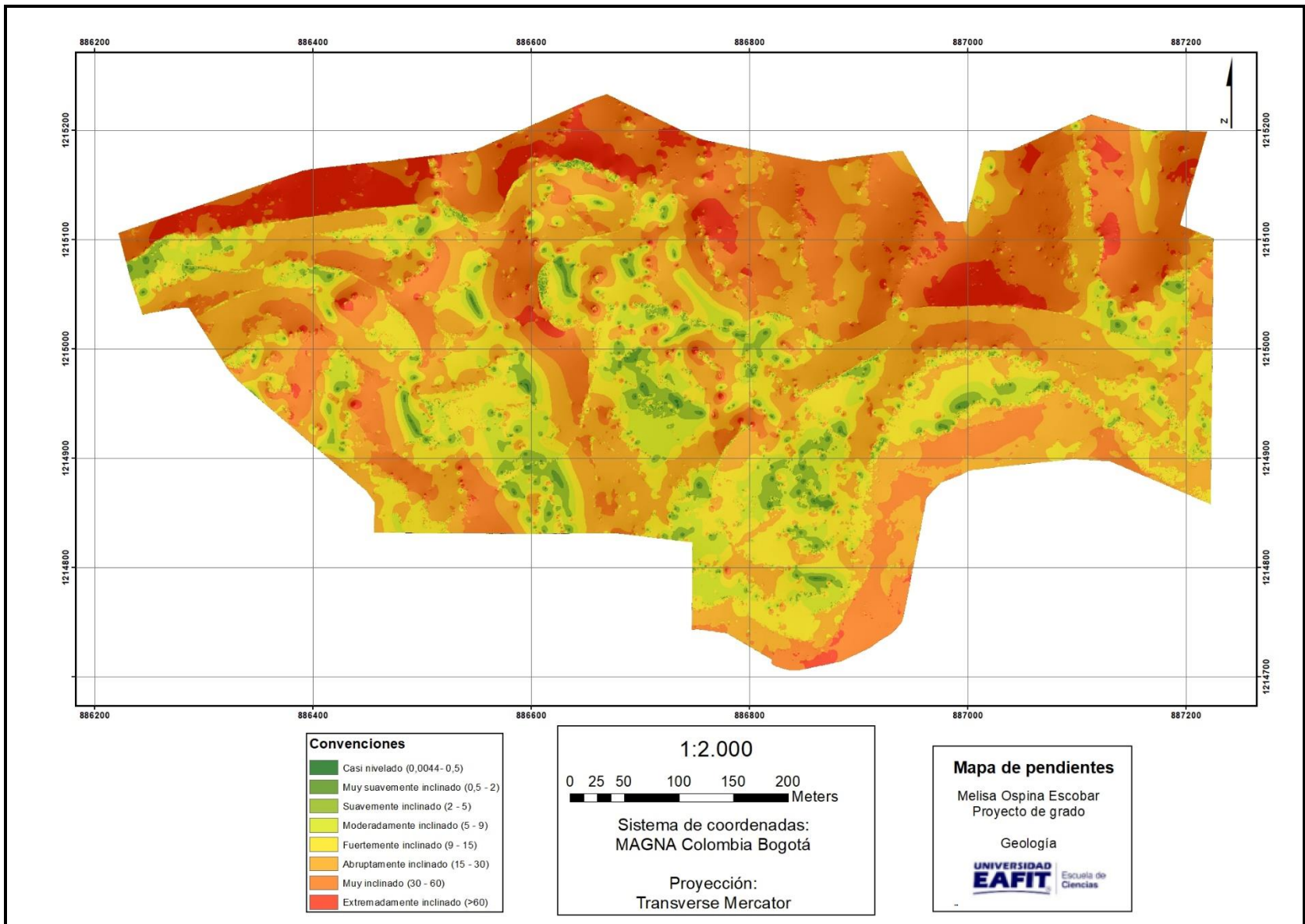


Figura 38. Mapa de pendientes generado con cartografía de RPAS.

### 7.3 Curvatura

La curvatura puede definirse como la tasa de cambio en la convexidad o concavidad de la superficie y depende de los cambios de pendiente en el entorno del punto (Felicísimo, 1994). Esta variable se relaciona con los movimientos en masa, en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial (Londoño, 2006).

Para obtener esta variable fue necesario aplicar sobre el DEM y DTM, la función "Curvature" en la herramienta ArcMap; posteriormente, fueron reclasificados en 5 rangos. La curvatura en el mapa representa el relieve según la pendiente; esta variable afecta la dirección, la escorrentía y la velocidad del flujo, y por ende, esto influye directamente en la erosión y en la deposición del terreno.

Según el modelo de curvatura obtenido a partir de la cartografía del IGAC (Figura 39), se encuentra que las formas predominantes del relieve corresponden a los rangos plano y cóncavo, los cuales ocupan el 22,8% y 24,21% respectivamente, del total del área.

Tabla 4. Descripción del atributo de curvatura obtenido mediante cartografía del IGAC.

Rango asignado	Descripción	Área total (Ha)	Porcentaje (%)
>-5	Muy convexo	4,46	13,92
-4,999	Convexo	6,11	19,10
-0,001 – 0,001	Plano	7,30	22,80
0,001 – 5	Cóncavo	7,75	24,21
>5	Muy cóncavo	6,39	19,97

Teniendo en cuenta la información suministrada por el mapa de curvatura realizado mediante la cartografía de RPAS, se deduce que en el área de interés, predominan los relieves convexos y cóncavos, representando un 57,26% y 32,35% respectivamente, del total de la zona.

A continuación, se presenta la tabla con la descripción para la clasificación usada en el mapa de curvatura (Figura 40).

Tabla 5. Descripción del atributo de curvatura obtenido mediante cartografía de RPAS.

Rango asignado	Descripción	Área total (Ha)	Porcentaje (%)
>-5	Muy convexo	1,928	6,01
-4,999	Convexo	18,356	57,26
-0,001 – 0,001	Plano	0,026	0,08
0,001 – 5	Cóncavo	10,371	32,35
>5	Muy cóncavo	1,373	4,30

Es necesario resaltar que, al observar detalladamente el modelo obtenido mediante cartografía de RPAS, en los puntos previamente identificados en el modelo de sombras, son de igual manera generadas curvaturas muy convexas, las cuales podrían, en efecto, estar mostrando que estos

puntos no sólo corresponden a depresiones, sino que estas estarían muy marcadas, caso que no fue encontrado en campo.

#### 7.4 RELIEVE RELATIVO

El relieve relativo representa la máxima altura entre la divisoria de aguas arriba de los taludes y el valle abajo del mismo (Suárez, 2009). A su vez, el índice de relieve relativo se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por metros (SGC, 2013). Esta variable está relacionada con la resistencia de los materiales a nivel superficial en los cambios de altura, por lo que la susceptibilidad aumenta gradualmente con la altitud (Suárez, 2009). Para obtener el relieve relativo de la zona de interés, fue usado el modelo digital del terreo generado, en el que se aplicó la función “Focal statistics” en la herramienta ArcMap y, posteriormente, fue reclasificado en 6 rangos.

Lo obtenido mediante la cartografía del IGAC (Figura 41), indica que los rangos predominantes son muy bajos y bajos, y ocupan el 60,61% y 29,29% del área total. Este tipo de relieves se encuentran asociados, generalmente, a los depósitos de vertiente y depósitos aluviales, descritos en la geología local.

Tabla 6. Descripción del atributo de relieve relativo generado mediante cartografía del IGAC.

Rango asignado	Descripción	Área total (Ha)	Porcentaje (%)
0 - 1	Muy bajo	19,45	60,61
1 - 2	Bajo	9,40	29,29
2 - 3	Medianamente moderado	2,86	8,91
3 - 4	Moderado	0,33	1,02
4 - 5	Alto	0,04	0,12
>5	Muy alto	0,02	0,05

Los rangos predominantes de esta variable para el modelo generado a partir de la cartografía de RPAS, corresponden a bajo y muy bajo, con valores de 33,06% y 33,15% respectivamente, del área total. Estos valores se encuentran dispersos a lo largo de la zona de estudio, excepto hacia gran parte de la zona norte, donde predominan rangos moderado, alto y muy alto, los cuales corresponden al 10,04%, 4,18% y 0,817% respectivamente. A continuación, se presenta la descripción para la clasificación usada en el mapa de relieve relativo (Figura 43).

Tabla 7. Descripción del atributo de relieve relativo mediante cartografía de RPAS.

Rango asignado	Descripción	Área total (Ha)	Porcentaje (%)
0 - 1	Muy bajo	10,600	33,07
1 - 2	Bajo	10,627	33,15
2 - 3	Medianamente moderado	6,006	18,74
3 - 4	Moderado	3,220	10,05
4 - 5	Alto	1,340	4,18
>5	Muy alto	0,262	0,82

Es necesario, para esta variable considerar la resolución del DTM, debido a que al conformarse por pixeles de tamaño reducido, la reclasificación empleada, no alcanza a percibir los cambios en el relieve en una escala un poco mayor, por lo que podría estar entonces describiéndose otro tipo de características del relieve con esta reclasificación; sin embargo, para la realización de este ejercicio se realizó bajo los mismos parámetros.

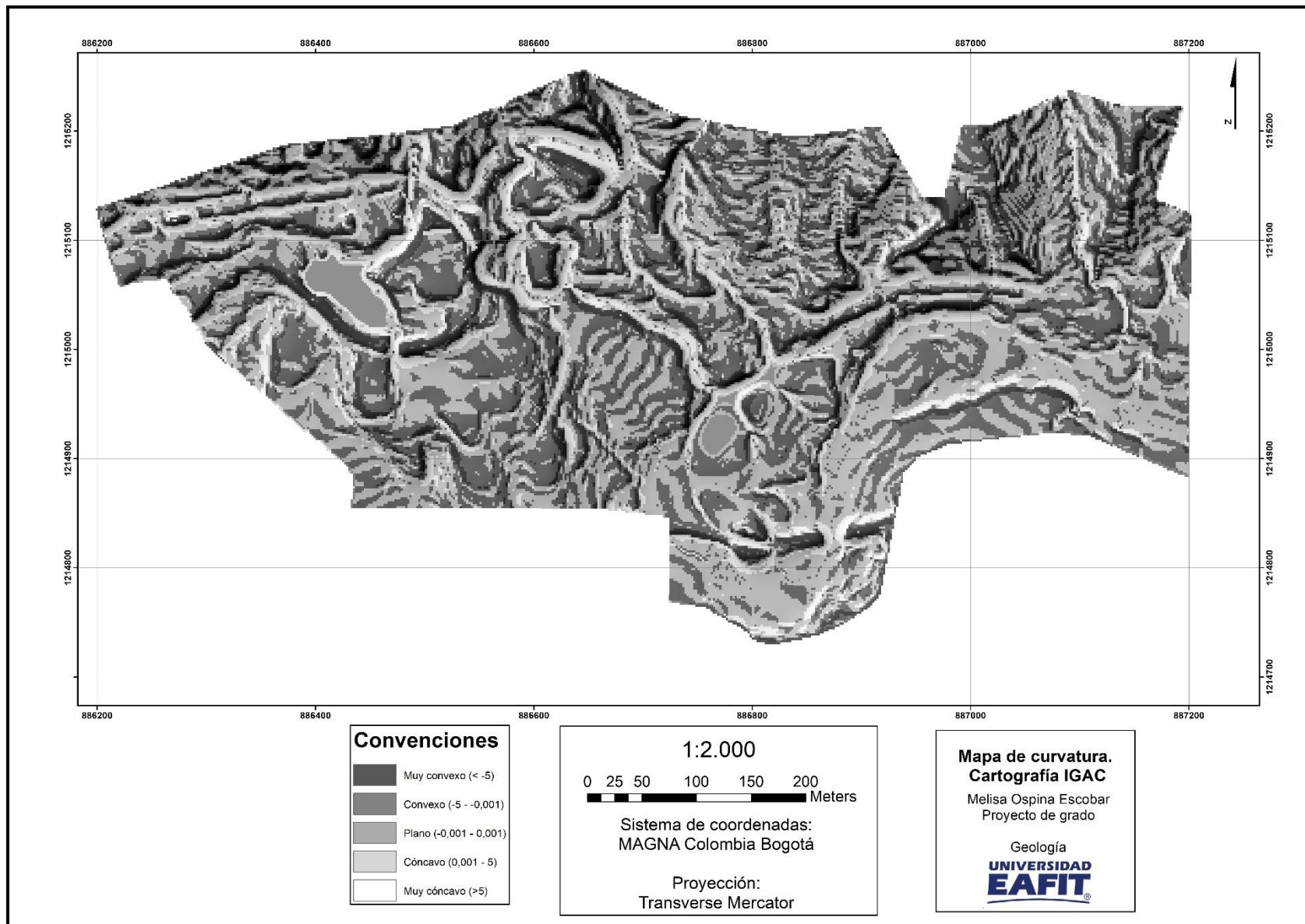


Figura 39. Mapa de curvatura generado con cartografía del IGAC.

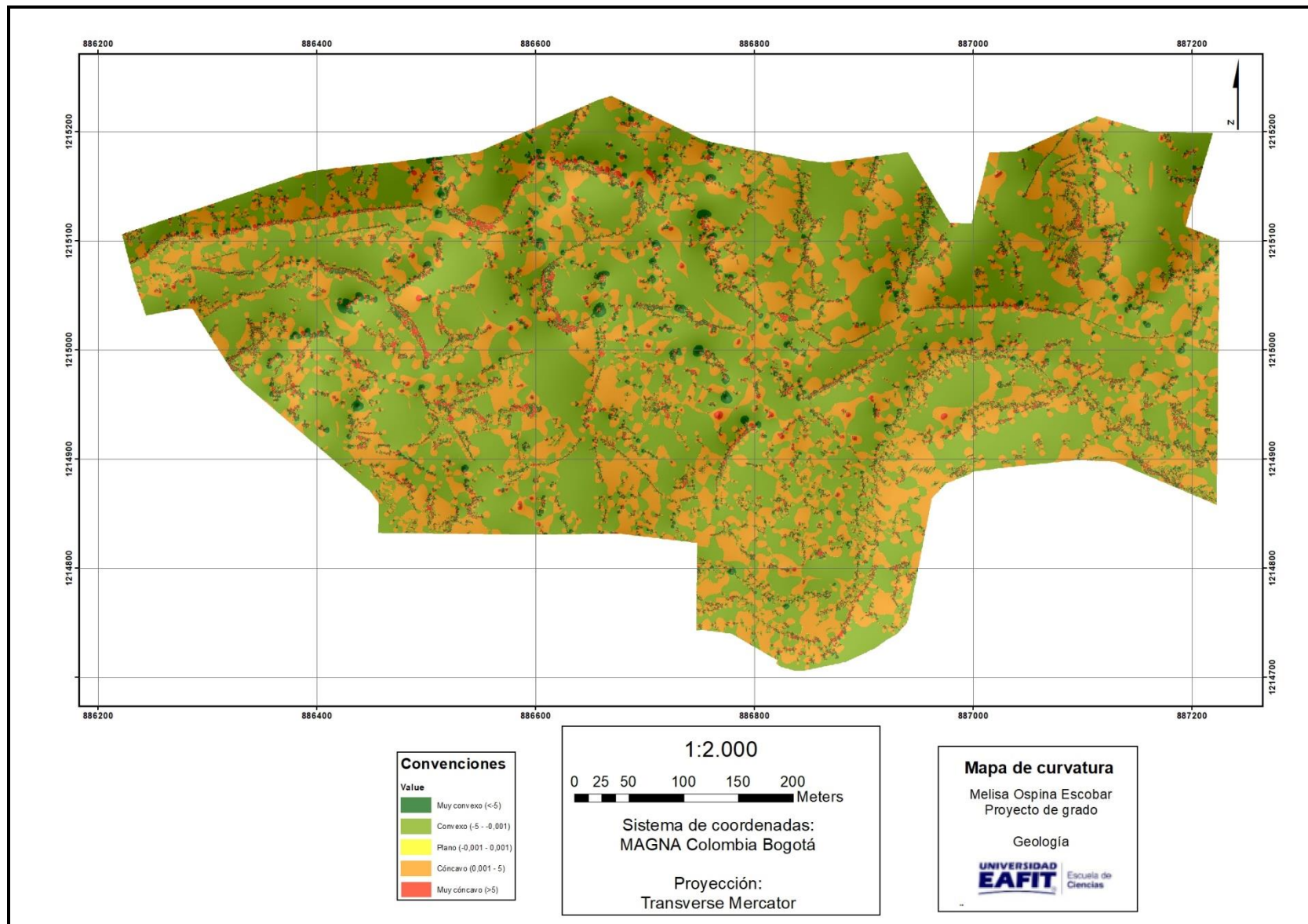


Figura 40. Mapa de curvatura generado con cartografía de RPAS.

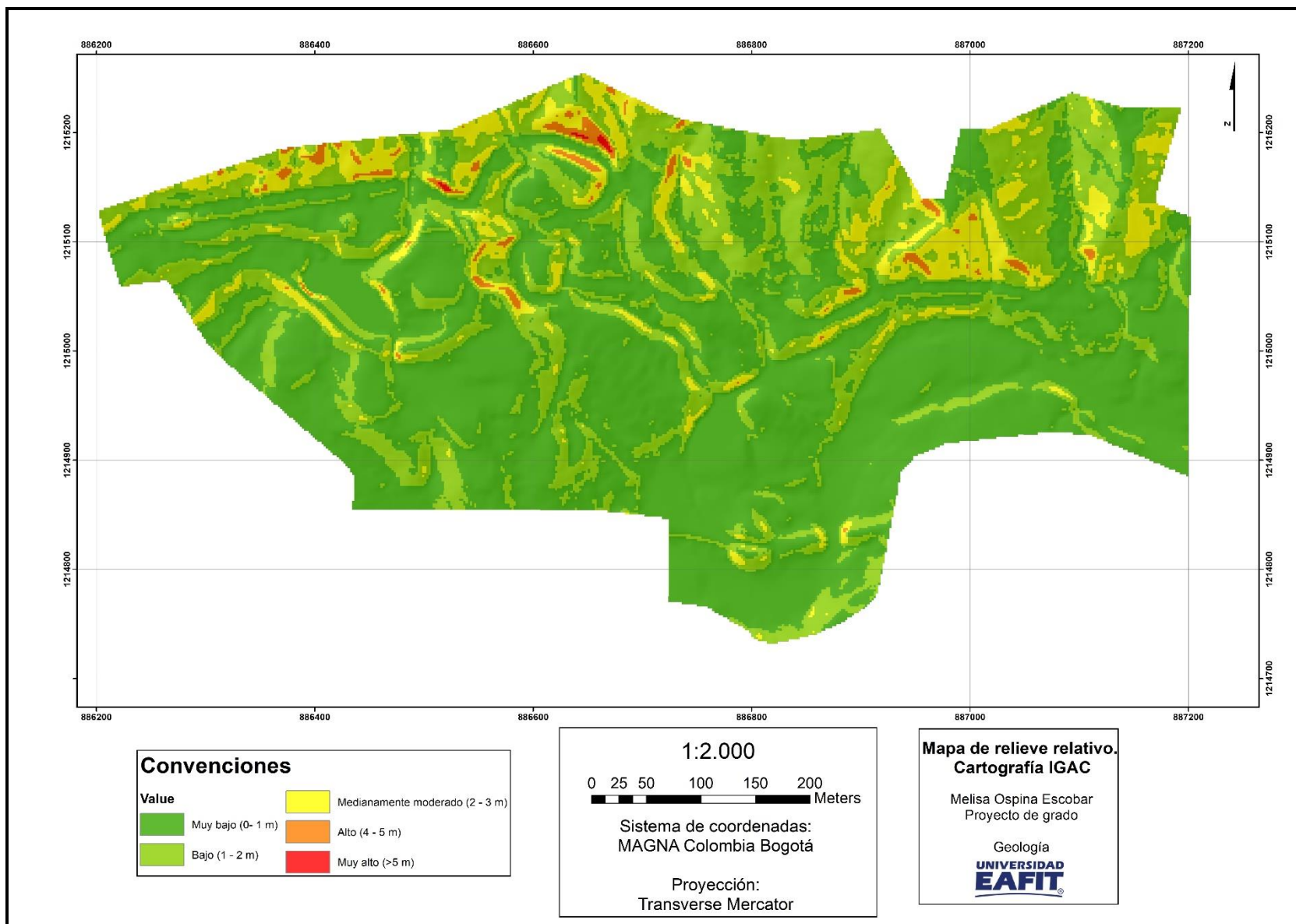


Figura 41. Mapa de relieve relativo generado mediante cartografía del IGAC.

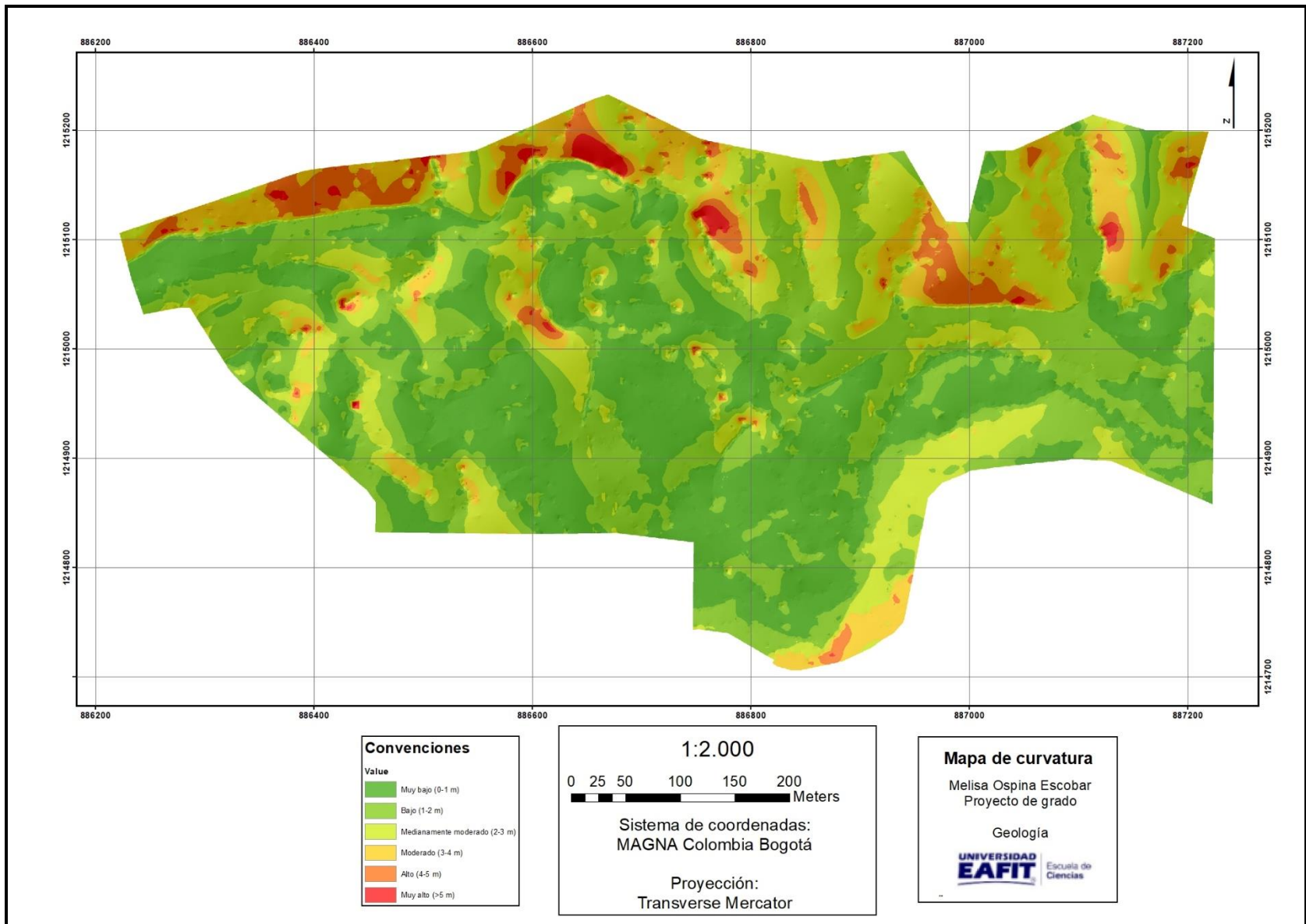


Figura 42. Mapa de relieve relativo generado mediante cartografía de RPAS.

## 8. SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

Según el método heurístico, la susceptibilidad por movimientos en masa de la zona de estudio, fue generada a partir de variables como geología, geomorfología y coberturas. En el mismo sentido, las variables morfométricas obtenidas como pendiente, relieve relativo y curvatura, también hicieron parte de los elementos para conformar el modelo mediante el cual se llevará a cabo la evaluación.

Al obtener cada uno de los componentes de las variables, se realizó una evaluación cualitativa a la susceptibilidad clasificando con valores numéricos (1 a 9, en intervalos impares) según el grado de susceptibilidad de cada unidad presente en la variable, entre mayor sea el valor del número equivalentemente, la susceptibilidad es mayor. Paralelamente a esto, fueron promediados el valor del peso relativo otorgado a cada variable según el experto y posteriormente, este valor fue multiplicado con la evaluación cualitativa mencionada anteriormente, obteniéndose así el potencial de cada factor a la ocurrencia de deslizamientos.

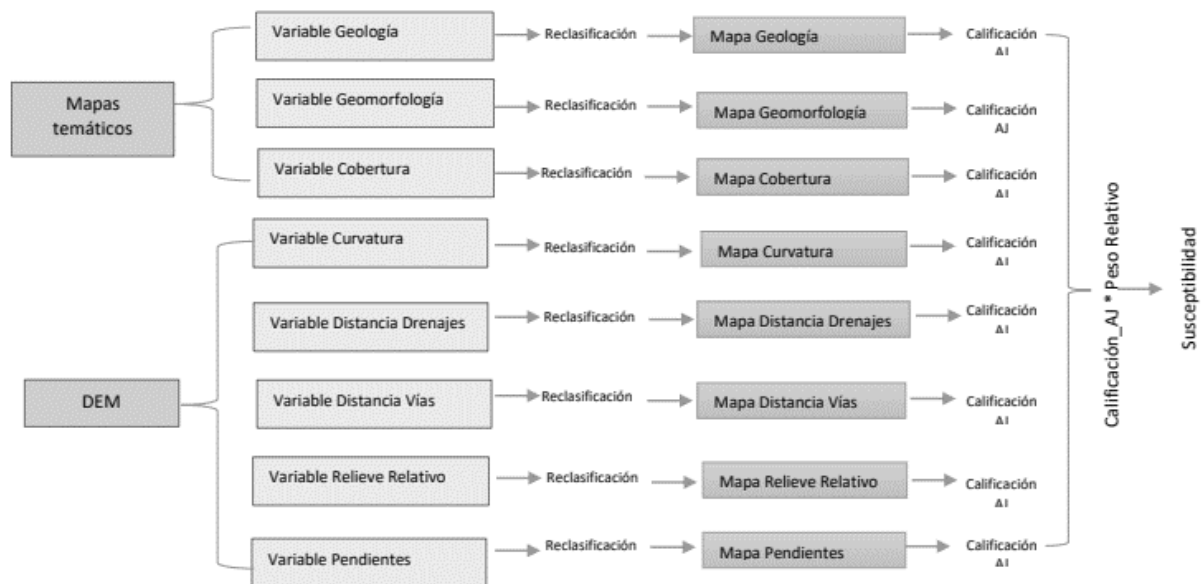


Figura 43. Diagrama de flujo de metodología de Análisis Jerárquico para obtener la susceptibilidad.

Para asignar los valores de susceptibilidad en alta, media y baja, se realizó un gráfico en el cual se comparó el área acumulada (en porcentaje) de los rangos de susceptibilidad obtenidos mediante la reclasificación (50 rangos en total), organizados en orden descendente, y el área acumulada afectada por movimientos en masa (en porcentaje).

## 8.1 Susceptibilidad a deslizamientos

Mediante el cálculo y graficación de áreas acumuladas, fue establecido como el valor de susceptibilidad alta aquella clase en la cual se encontró el 70% de los deslizamientos; dicha clase representaba entonces un 11,70% del área acumulada, y como valor de susceptibilidad media aquella que representaba el 85% de los deslizamientos, con un 51,18%. En consecuencia, el 20% restante de los deslizamientos, se categorizaron entonces como susceptibilidad baja.

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el área de interés, según la metodología de análisis jerárquico, refleja los niveles de susceptibilidad a deslizamientos en el área de interés, los cuales son categorizados en 3 clases: Alta, Media y Baja.

### 8.1.1 Susceptibilidad a deslizamientos según cartografía del IGAC

Partiendo de las variables morfométricas generadas a partir del DTM y capas temáticas (Geología, Geomorfología y coberturas) estandarizadas, el modelo de susceptibilidad a deslizamientos (Figura 44), presenta las siguientes características:

Tabla 8. Descripción de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis jerárquico en cartografía del IGAC.

Nivel susceptibilidad	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Alto	2,543	7,93%
Medio	21,131	65,92%
Bajo	8,379	26,14%

#### 8.1.1.1 Susceptibilidad alta

La susceptibilidad alta a deslizamientos, ocupa un área de 2,543 Ha, las cuales corresponden al 7,93% del área total. Las zonas en cuestión, se encuentran distribuidas hacia gran parte de la zona norte (tanto hacia el oeste, como al este), correspondiendo a las zonas de pendientes con mayor grado de inclinación. De igual manera, esta clase de susceptibilidad se encuentra ligada a aspectos geomorfológicos de ambientes denudacionales, los cuales se enmarcan en el rango de relieve relativo medianamente moderado a muy alto; se asocia litológicamente a los perfiles de suelo derivados del Batolito Antioqueño, generalmente. Sin embargo, en algunas zonas (menos representativas) se asocia a depósitos de vertiente. Las zonas de susceptibilidad alta, se asocian a coberturas terrestres como bosque fragmentado, cultivos de caña, pastos enmalezados, pastos limpios y tejido urbano discontinuo.

#### 8.1.1.2 Susceptibilidad media

La susceptibilidad media a deslizamientos, ocupa un área de 21,13 Ha, que corresponden al 65,92% del área total. En este caso, las zonas de susceptibilidad media se distribuyen a lo largo del área de interés, exceptuando algunas zonas específicas hacia el sur y suroeste. Las zonas de susceptibilidad media se encuentran asociadas a aspectos geomorfológicos de ambientes denudacionales los cuales se caracterizan por rangos pendientes que oscilan entre casi nivelado hasta muy inclinado, con relieves relativos generalmente muy bajo y bajo, que se localizan sobre depósitos de vertiente y aluviales. Las coberturas asociadas a este nivel de susceptibilidad corresponden a tejido urbano discontinuo, pastos limpios, pastos arbolados, cultivo de caña y bosque fragmentado.

### 8.1.1.3 Susceptibilidad baja

Las zonas de susceptibilidad baja a deslizamientos, ocupan 8,37 Ha, las cuales corresponden al 26,14% del área total. Estas zonas se encuentran localizadas principalmente hacia los cuadrantes sur y sureste del área de estudio. Se asocian, principalmente, a aspectos geomorfológicos de pendientes que varían en rangos desde casi nivelado hasta muy inclinado, con relieves relativos generalmente muy bajos; dichas zonas se localizan sobre los depósitos aluviales del río Nus y el cauce del mismo. Para estas zonas, las coberturas terrestres asociadas corresponden a tejido urbano discontinuo, bosque fragmentado, pastos limpios y cultivo de caña.

### 8.1.2 Susceptibilidad a deslizamientos según cartografía de RPAS

Teniendo en cuenta las variables morfométricas generadas a partir del DTM, el modelo de susceptibilidad a deslizamientos (Figura 45), presenta las siguientes características:

Tabla 9. Descripción de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis jerárquico en cartografía de RPAS.

Nivel susceptibilidad	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Alto	3,73	11,70
Medio	16,33	51,18
Bajo	11,84	37,12

#### 8.1.2.1 Susceptibilidad alta

Para el área de interés, la susceptibilidad alta a deslizamientos, ocupa una extensión de 3,73 Ha, las cuales corresponden al 11,70% del área total. Las zonas en cuestión, se encuentran distribuidas hacia gran parte de la zona norte (tanto hacia el oeste, como al este) del polígono. Esta clase de susceptibilidad se asocia a características geomorfológicas de pendientes que van desde abruptamente inclinadas a extremadamente inclinadas, con relieves relativos alto a muy alto. De la misma forma, se asocia litológicamente a los perfiles de suelo derivados del Batolito Antioqueño. Las zonas de susceptibilidad alta, se asocian a coberturas terrestres como bosque fragmentado, cultivos de caña, pastos enmalezados y tejido urbano discontinuo.

#### 8.1.2.2 Susceptibilidad media

La susceptibilidad media a deslizamientos, ocupa una extensión de 16,33 Ha que corresponden al 51,18% del área total. En este caso, las zonas de susceptibilidad media se distribuyen, principalmente, hacia el noreste y este de la zona.

Estas zonas de susceptibilidad media, son asociadas a características geomorfológicas longitudes largas, con rangos de pendientes que van desde muy suavemente inclinado a muy inclinado, con

relieves muy bajos y bajos. Las coberturas terrestres asociadas a esta susceptibilidad son tejido urbano discontinuo, pastos limpios, pastos arbolados y bosque fragmentado.

### **8.1.2.3 Susceptibilidad baja**

En el área de estudio, las zonas de susceptibilidad baja a deslizamientos, ocupan 11,84 Ha, las cuales corresponden al 37,11% del área total. Estas zonas se encuentran localizadas principalmente hacia el centro y sureste del área de estudio. Se asocian sobre todo a unidades geomorfológicas y depósitos de ambiente fluvial. Para estas zonas, las coberturas terrestres asociadas corresponden a tejido urbano discontinuo, bosque fragmentado, pastos limpios y pastos arbolados.

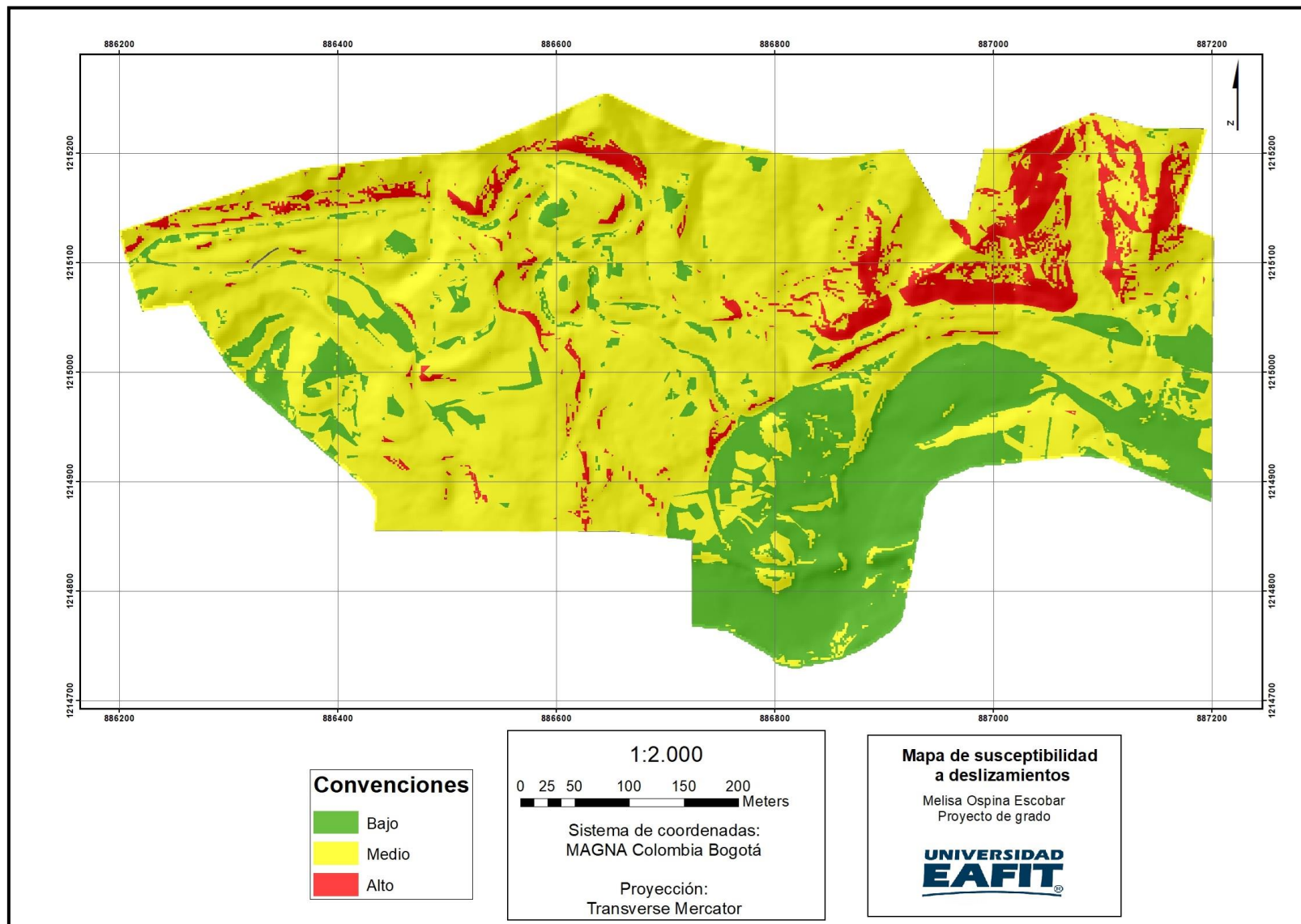


Figura 44. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos generado mediante cartografía del IGAC.

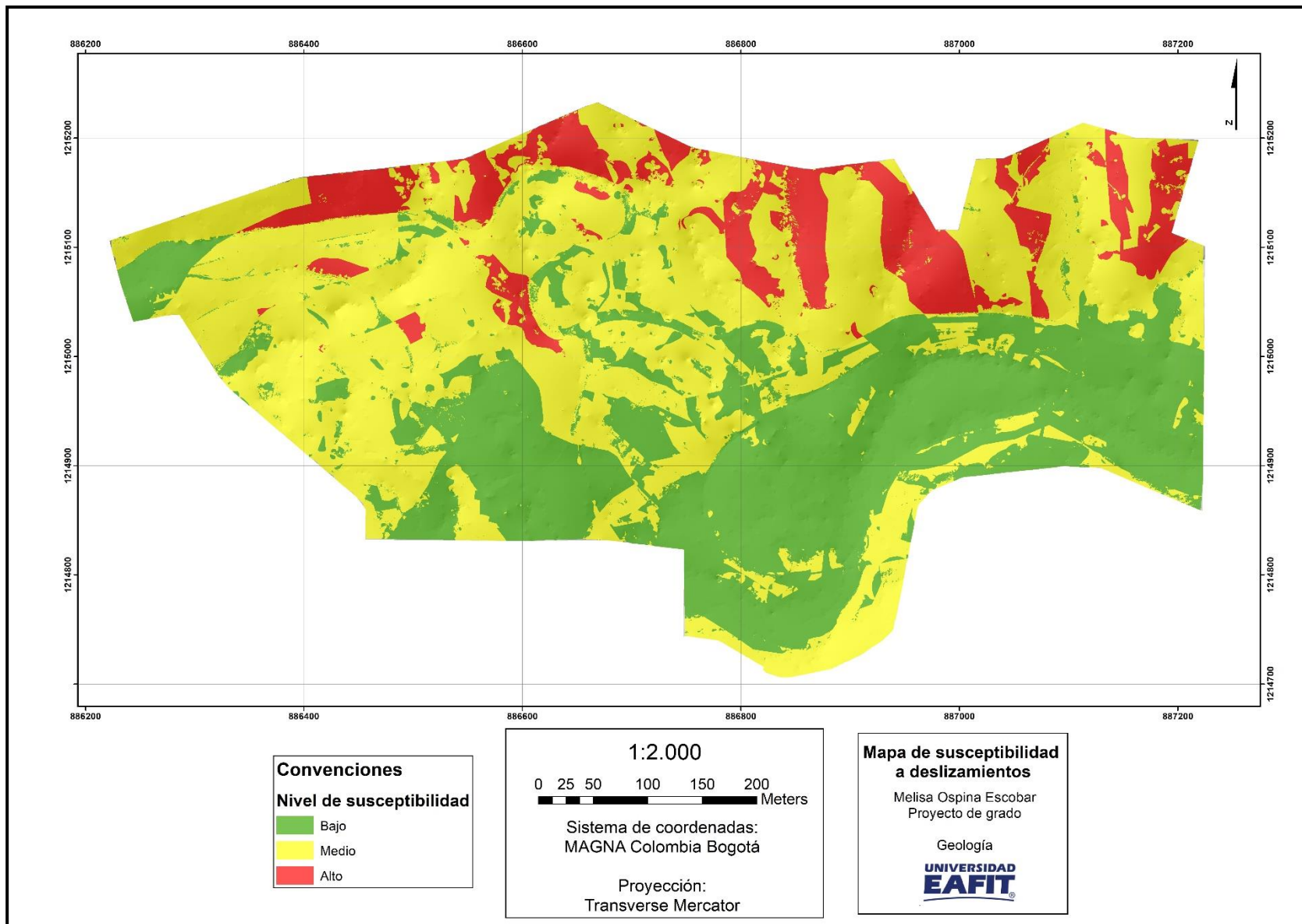


Figura 45. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos generado mediante cartografía de RPAS.

## **10. COMPARACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS Y VARIABLES MORFOMÉTRICAS GENERADAS A PARTIR DE LA CARTOGRAFÍA BASE DEL IGAC Y LA CARTOGRAFÍA BASE DE RPAS.**

Con el fin de presentar las diferencias obtenidas a partir de dos cartografías, son presentados a continuación algunos de los resultados mediante los cuales fue posible evidenciar, de manera más clara, algunos puntos claves de incongruencias en diferentes capas de datos.

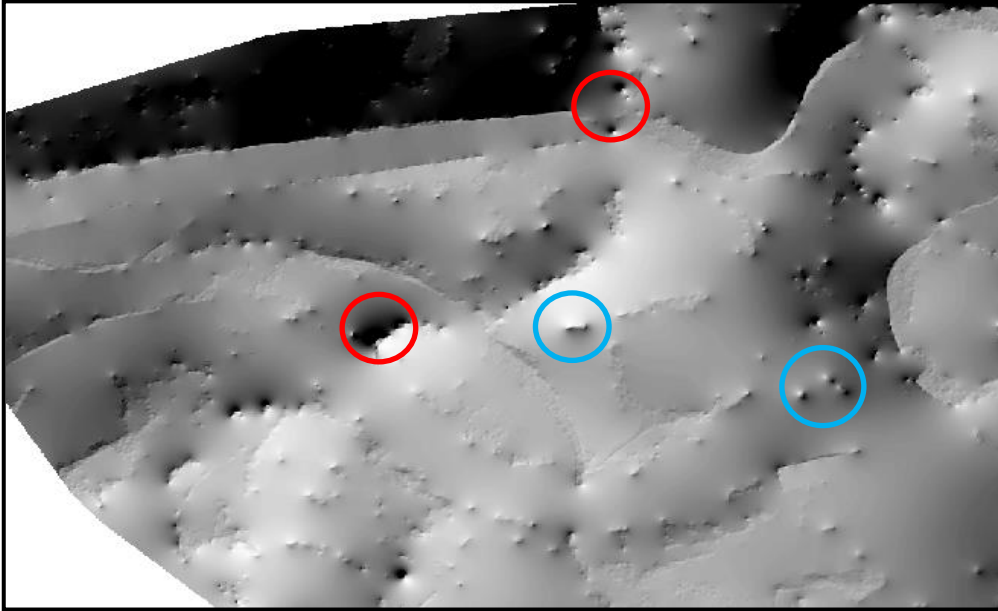
### **10.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

Uno de los puntos claves para la comparación entre ambas cartografías, es el insumo básico a partir del cual son generados los grupos de información necesarios para la construcción del modelo de susceptibilidad, en el cual se encuentra contenida la información altimétrica y morfológica del área en cuestión. Para el caso de la cartografía del IGAC, el modelo básico de trabajo correspondió a un modelo de elevación digital (DEM) cuya resolución es de 2 m/pixel; por otra parte, el modelo obtenido mediante RPAS, corresponde a un modelo digital del terreno el cual cuenta con una resolución (o GSD) de 3,59 cm/pixel. Partiendo de lo anterior, se encuentra entonces que mediante la metodología de RPAS, se tiene un incremento de la resolución aproximadamente de un 300%, con lo cual se esperaba entonces, procesar y generar productos con mayor escala de detalle, lo cual permitiría un análisis eficiente de los mismos. Dichos modelos corresponden al punto de partida para la obtención de las variables morfométricas del área a trabajar, condicionando completamente el detalle y la fidelidad de las variables y, como consecuencia de esto, son generados modelos de susceptibilidad con diferencias.

Uno de los puntos de mayor peso para la comparación corresponde al insumo más básico para la realización de todo el proceso, el cual corresponde entonces al DEM o DTM, según corresponda el caso. Teniendo en cuenta que toda función que se aplique sobre cualquiera de los modelos mencionados anteriormente, traerá consigo errores o incongruencias que el modelo original contenga. Uno de los ejemplos de la situación anteriormente planteada se presenta claramente en el modelo de sombras realizado a partir del DTM, en el cual son encontrados una serie de elevaciones y depresiones las cuales no fueron encontradas en el trabajo de campo realizado. Así mismo, estas características, no tienen congruencia con el modelo de sombras realizado a partir del DEM (IGAC), por lo que se asume que esto corresponde a errores, muy factiblemente derivados del post-procesamiento realizado mediante el software de fotogrametría, en el cual la corrección de ruidos (relacionados a construcciones y vegetación) a partir del MDS no es completamente realizada, obteniéndose entonces un DTM con falsas elevaciones.

En la figura 46A, se resaltan algunos de los errores mencionados anteriormente. Como una medida de verificación, fue necesario generar las respectivas curvas de nivel y superponer los drenajes (Figura 46B), con el fin de constatar que efectivamente estos no correspondieran a zonas que presentaran estos comportamientos. Efectivamente, estos puntos corresponden a inconsistencias topográficas, las cuales se ven representadas en las demás capas de variables morfométricas generadas a partir del DTM.

A.



B.

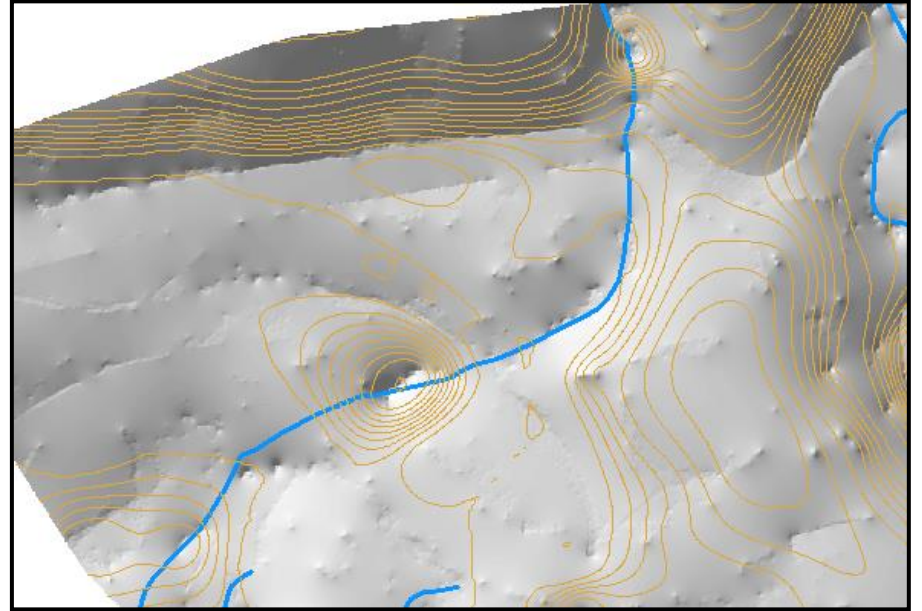


Figura 46. A. Errores topográficos en modelo de sombras generado mediante cartografía IGAC. En azul, se señalan elevaciones y en rojo depresiones. B. Drenajes, curvas de nivel y modelo de sombras generado mediante cartografía de RPAS.

Para la realización de análisis de susceptibilidad, una de las variables de mayor importancia es la pendiente, ya que ésta determina el comportamiento gravitacional de los materiales en el área estudiada. Al realizar la comparación entre las capas de pendientes generadas mediante ambas cartografías (Figura 47), es posible reconocer diferencias drásticas en la pendiente, es decir que mientras que en el modelo de pendientes del IGAC éstas se muestran acordes a la morfología del área verificada en campo, y presenta los cambios en esta variable marcados, el modelo de pendientes generado por cartografía de RPAS no: en este modelo, son encontradas pendientes “suavizadas” y cambios no tan pronunciados como los que efectivamente fueron identificados en el trabajo de campo, lo que podría entonces ser producto del promedio (e inclusive interpolación) de valores de elevación en el DTM.

Dichas inconsistencias, son repetidas en las diferentes variables morfométricas generadas a partir del DTM, arrojando clasificaciones erróneas de la morfología del área. Uno de los ejemplos en los cuales esto es muy visible, corresponde al modelo de curvaturas obtenido, el cual no solo presenta inconsistencias con respecto al modelo generado con la cartografía del IGAC, sino que también es contrario a la realidad topográfica del terreno. Uno de los puntos que pueden resaltarse allí, corresponde al cauce del río Nus, el cual según el modelo de curvatura de la cartografía del IGAC presenta una morfología plana y cóncava, mientras que en el modelo de cartografía de RPAS esta misma zona, muestra una morfología cóncava y convexa, inclusive presentando zonas en las que se alcanzan extremos de concavidad. Lo anterior se presenta en la figura 48.

De igual manera, existen otras características en el modelo de RPAS que deben ser consideradas, una de estas es la reclasificación de las variables con respecto a la resolución del DTM, la cual de igual manera podría estar influenciando las diferencias entre variables morfométricas. Uno de los casos puntuales corresponde a la reclasificación del relieve relativo, ya que al contemplar un tamaño de pixel tan pequeño, con los rangos determinados para la reclasificación no será posible que en este modelo se registren cambios significativos en las alturas que darán como resultado un relieve relativo más fiel al terreno.

Pasando a los modelos de susceptibilidad obtenidos mediante el cruce de las capas de información anteriormente descritas, y teniendo en cuenta las áreas y porcentajes consignadas en las tablas 8y 9, se nota que existe un cambio en el porcentaje obtenido entre ambos modelos de susceptibilidad. No obstante, uno de estos no presenta la efectividad espacial a la que debería estar sujeta un modelo de susceptibilidad a deslizamientos, ya que representa el nivel de susceptibilidad en un área extensa, cuando lo ideal sería lo contrario. Retomando lo anterior, es necesario tener en cuenta que en la naturaleza el comportamiento de la vegetación, pendientes, geformas y demás características del terreno, no siguen patrones geométricos regulares y marcados los cuales son evidenciados en el modelo de susceptibilidad de los RPAS (Figura 49B). Por su parte, el modelo generado a partir de la cartografía del IGAC (Figura 49A), sí presenta la efectividad mencionada anteriormente y la representación de los niveles de susceptibilidad está espacialmente bien representada, teniendo en cuenta las observaciones y suposiciones realizadas durante el trabajo de campo, mostrándose más coherente y congruente con la realidad física del área analizada, que el modelo realizado mediante RPAS.

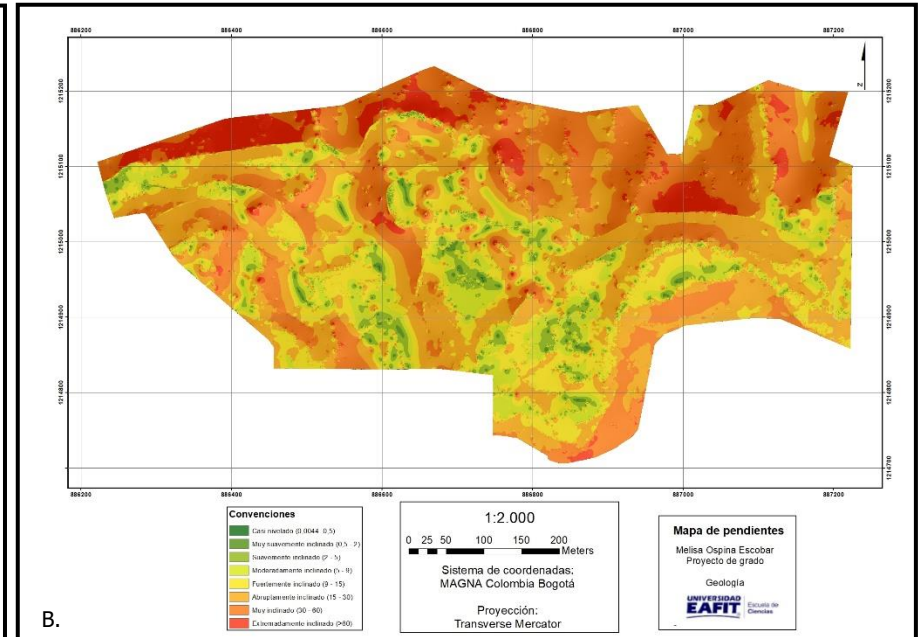
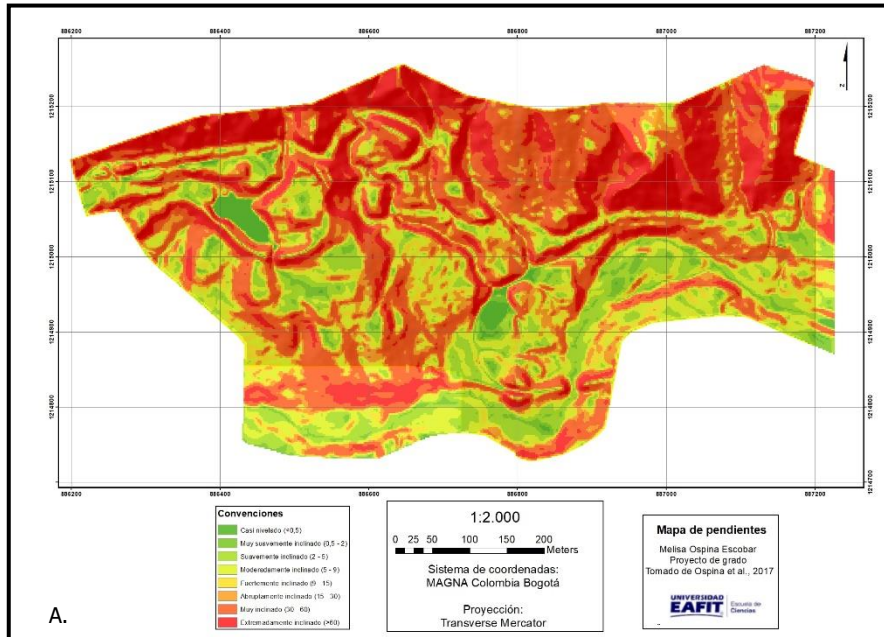


Figura 47. Comparativo de mapas de pendiente. A. Modelo de pendientes generado mediante cartografía del IGAC. B. Modelo de pendientes generado mediante cartografía de RPAS.

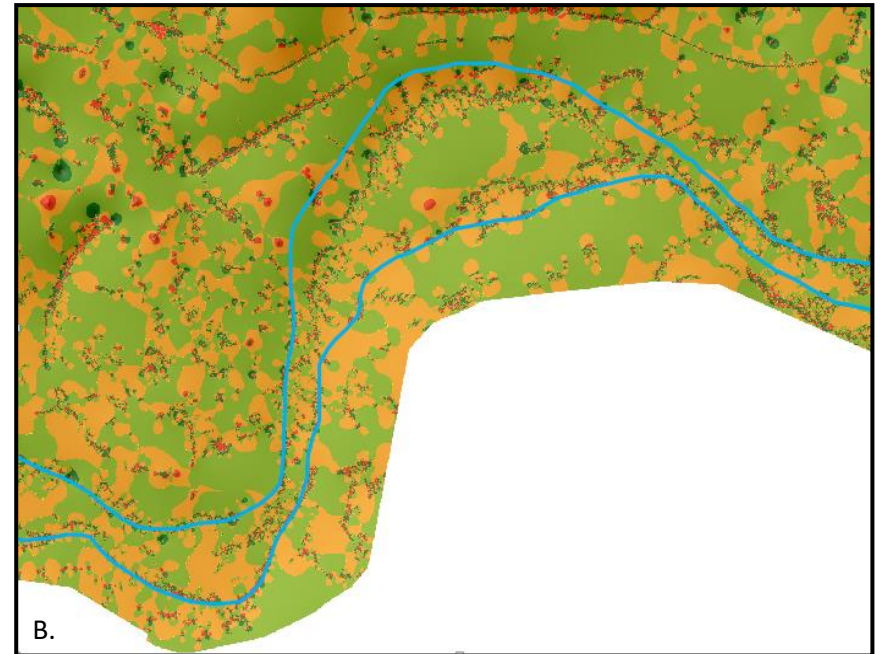
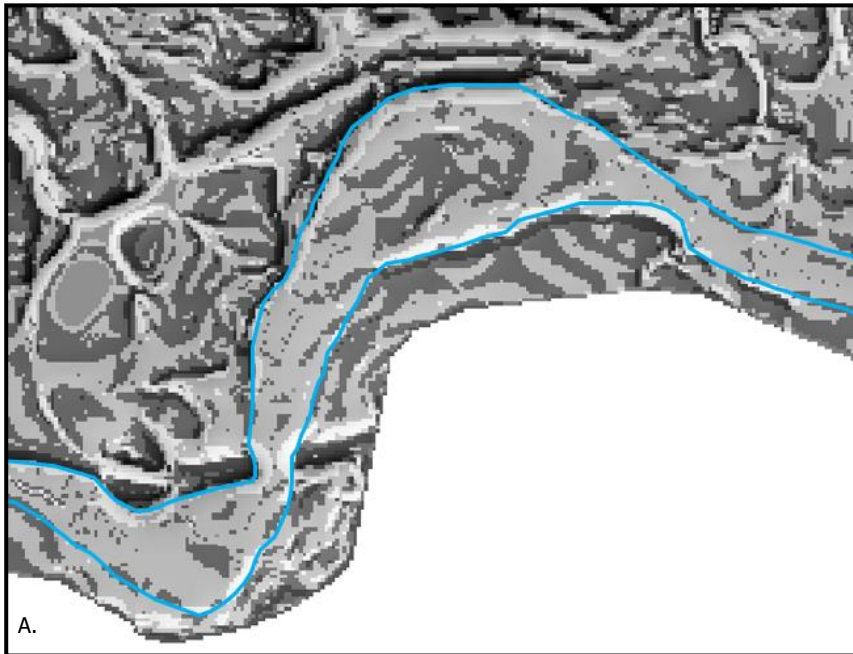


Figura 48. Comparativo de modelos de curvatura en cauce del río Nus. A. Modelo de curvatura generado mediante cartografía del IGAC. B. Modelo de curvatura generado mediante RPAS.

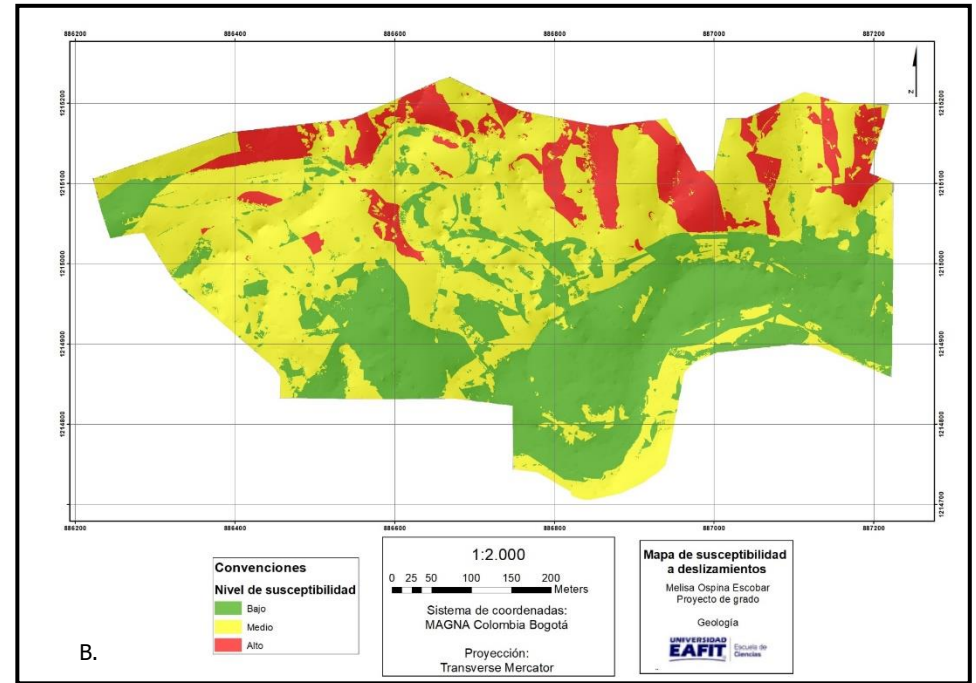
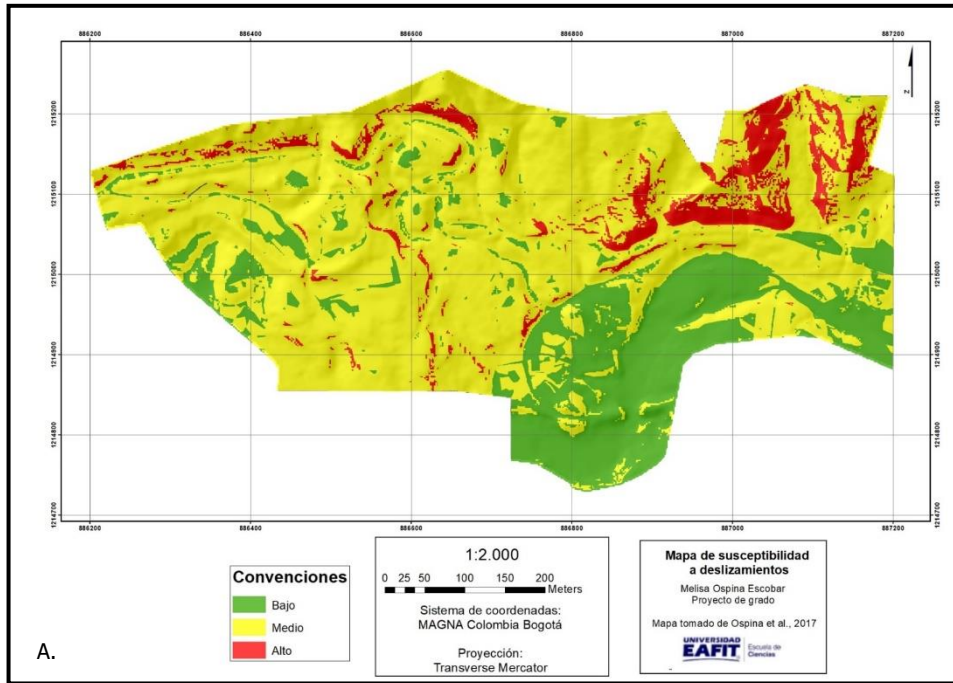


Figura 49. Comparativo de mapas de susceptibilidad a deslizamientos. A. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en área de interés generado mediante cartografía del IGAC. B. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en área de interés generado mediante cartografía de RPAS.

En busca de mostrar más claramente las diferencias anteriormente mencionadas, a continuación son presentadas las zonas de mayor variación, en las cuales los factores determinantes de dichas variaciones son las pendientes y coberturas terrestres. En la figuras 50B y 51B, son evidenciados con mayor claridad los patrones geométricos en los cuales se distribuyen los niveles de susceptibilidad, siendo más visible en el nivel alto. Un aspecto a considerar, es que en la figura 51B, el nivel de susceptibilidad alto está fuertemente influenciado por una pendiente muy abrupta en cercanías a la vía Medellín-Cisneros, la cual es tenida en cuenta parcialmente por el modelo de susceptibilidad de cartografía RPAS, caso que sí es positivo en la figura 51A (modelo de susceptibilidad de cartografía del IGAC).

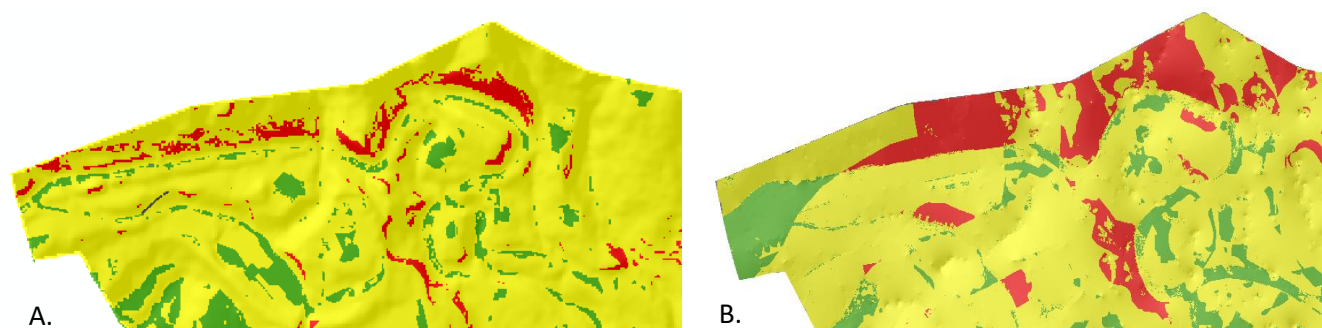


Figura 50. Comparativo de susceptibilidad en la zona noroeste del área de interés. A. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos, generado mediante cartografía del IGAC. B. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos generado mediante cartografía de RPAS.

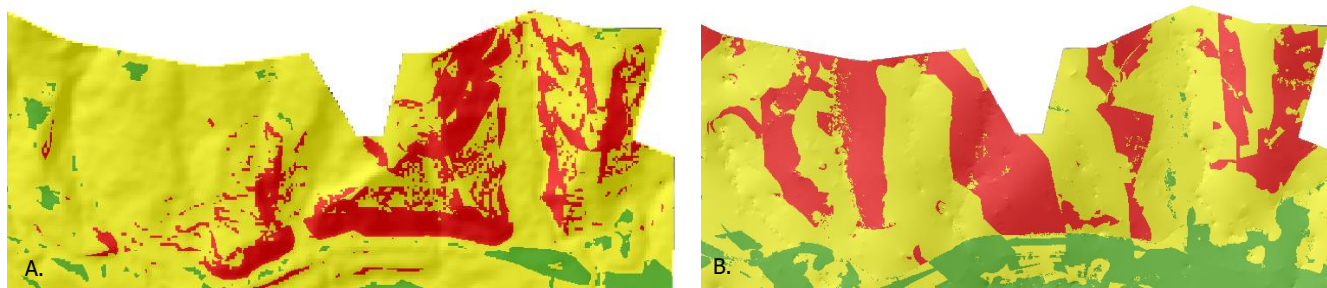


Figura 51. Comparativo de susceptibilidad en la zona noreste del área de interés. A. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos, generado mediante cartografía del IGAC. B. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos generado mediante cartografía de RPAS.

## 10.2 COMPARACIÓN DE PROCEDIMIENTOS

Considerando las descripciones de los resultados obtenidos y lo expuesto en el numeral anterior, y enfocando el siguiente análisis específicamente a la metodología de adquisición de datos cartográficos mediante RPAS, hay que decir que es necesario implementar o desarrollar una metodología que asegure la veracidad de la cartografía obtenida mediante estas herramientas, en la cual sean integrados además procedimientos de control en tierra y/o amarres cartográficos mediante

los cuales sea posible realizar las correcciones altimétricas correspondientes a la cartografía generada mediante RPAS, cuya densidad estaría sujeta a la magnitud del estudio a realizar. Igualmente, es necesario desarrollar un protocolo en el cual el procesamiento de los datos adquiridos no sea un procedimiento automatizado, sino que tenga el control de un experto que sea quien esté a cargo de verificar y corregir los posibles errores generados durante el post-procesamiento de la información. A partir de lo anterior, se tendría entonces que el procedimiento de adquisición de cartografía base no sólo se vería incrementado en tiempo, sino también en costos.

Dado lo anterior, en la tabla 12, son comparados los procedimientos requeridos para obtener una cartografía básica confiable y de buena calidad, los cuales son descritos a grandes rasgos y los tiempos dados en esta, son aproximados.

Tabla 10. Comparación de procedimientos de levantamiento de información.

Ítem	RPA		Cartografía estándar	
	Método	Duración	Método	Duración
Adquisición de datos	Creación y ejecución de líneas de vuelo con RPAS.	1 día	Toma de aerofotografía digital.	1 día
Control terrestre	Toma de puntos de control en campo.	4 días	Toma de puntos de control en campo.	2 días
Generación y corrección modelo de elevación, modelo de superficie, ortofotomosaicos, cartografía base y entrega de productos.	Procesamiento de información mediante software fotogramétrico.	10 días.	Aerotriangulación de vuelos fotogramétricos, restitución fotogramétrica, generación de ortofotomosaico, cartografía base y entrega de productos.	15 días
Fotointerpretación	Uso DTM, DSM y ortofotomosaico.	2 días	Fotografías aéreas y ortofotos.	3 días
Identificación de procesos morfodinámicos.	Ortofotomosaico y DSM.	1 día	Recorrido de campo en la zona y ortofotos.	3 días

Teniendo en cuenta lo presentado, puede en consecuencia afirmarse que la adquisición de datos cartográficos mediante el uso de RPAS, representa una opción con tiempos de ejecución menores, pero sin embargo esto está sujeto a la extensión del área a trabajar y a los costos de ejecución de los diferentes procedimientos.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En este caso, a pesar de haber obtenido, un modelo digital del terreno de mayor resolución, realizado a partir del procesamiento de información generada por un RPAS, éste contiene errores (ruidos) los cuales no son completamente eliminados durante el post-procesamiento automatizado realizado por el software de fotogrametría, por lo cual no es apto para la generación de variables morfométricas.
- La misma herramienta y metodología empleada con esta, pueden ser una buena opción para la adquisición y tratamiento de datos, siempre y cuando se realicen los controles y amarres en tierra respectivos que aseguren la fidelidad de los datos que serán generados.
- Los resultados obtenidos durante la realización de este proyecto, aunque no son iguales si pueden ser comparables debido a que son evaluados mediante una misma metodología de zonificación, sin importar la de adquisición de datos realizada.
- Se evidencia, que el reconocimiento de unidades geomorfológicas mediante el uso del Modelo Digital de Superficie, representa una opción no solo más rápida, sino con mejor resolución y concepción general, ya que a partir de dicho modelo es posible conceptualizar la geoforma en sus tres dimensiones, procedimiento que no es posible realizar mediante ortofotos y/o modelo de sombras.
- A pesar de haber obtenido un Modelo Digital del Terreno no apto, productos como el Modelo Digital de Superficie y ortofotomosaico, son adecuados y de buena resolución, aun habiendo sido obtenidos con un equipo pequeño y no profesional.
- El uso de RPAS es de gran utilidad para estudios de detalle, sin embargo en estudios de carácter regional no sería tan eficiente debido a su cubrimiento limitado. Esta es una herramienta que debe seguir siendo explorada.
- Se recomienda realizar la adquisición de datos mediante RPAS, ya que éste es un método con el cual es generada información de alta calidad, actualizada y rápida de zonas en diferentes condiciones, facilitando y mejorando la calidad de la fointerpretación, delimitación de unidades geomorfológicas e inclusive un inventario de procesos morfodinámicos actualizado.
- A futuro, queda planteada la realización de investigaciones en las cuales se pueda eventualmente comprobar que la implementación de puntos de control y amarre en tierra y la adquisición de datos mediante Vehículos Aéreos Tripulados Remotamente sea una opción espacialmente más efectiva.
- Las variables que condicionan la susceptibilidad a deslizamientos en la zona, corresponden principalmente a zonas de pendientes medias a altas, perfiles de suelos con texturas finas a medias, control estructural, cambios en el uso de los suelos, entre otros. Dichas variables, no solo corresponden a procesos naturales, sino que también se encuentra el componente antrópico en los cambios del terreno.
- Los RPAS, son herramientas de fácil operación, las cuales permiten la adquisición fiable de datos para realizar procesos que involucren información cartográfica; el uso de estos equipos es

de gran utilidad, pero es necesario que sean operados de manera segura y ordenada, y que el procesamiento de la información adquirida sea realizado por personas idóneas e integre metodologías de control topográfico que garanticen la confiabilidad en los productos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aeronáutica Civil Colombiana. (2015). Circular reglamentaria 002: Requisitos de aeronavegabilidad y operaciones para RPAS.
- Alcántara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4), 107-124.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas (PMA: GCA). (2007). Movimientos en masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, publicación Geológica Multinacional, No.4, 432 p.
- Brabb, E. E., & Pampeyan, E. H. (1972). *Preliminary map of landslide deposits in San Mateo County, California* (No. 344).
- Castellanos Abella, E. A. (2008). Multi-scale landslide risk assessment in Cuba. ITC.
- Cediel, F., & Shaw, R. P. (Eds.). (2018). *Geology and Tectonics of Northwestern South America: The Pacific-Caribbean-Andean Junction*. Springer.
- Dall'Asta, E., Forlani, G., Roncella, R., Santise, M., Diotri, F., & di Cella, U. M. (2017). Unmanned Aerial Systems and DSM matching for rock glacier monitoring. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 127, 102-114.
- Dearman, W. R. (2013). *Engineering geological mapping*. Elsevier.
- Felicísimo, Á. M. (1994). *Modelos digitales del terreno*. Oviedo: Pentalfa.
- González, M. (2015). *Comparación entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1: 25.000 en el municipio de Santa Bárbara, departamento de Antioquia* (Tesis de pregrado, Universidad EAFIT).
- Havens, K. J., & Sharp, E. J. (2015). *Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild: A Methodology*. Academic Press.
- IDEAM (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72 p.
- IDEAM. (2013). Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1: 100.000. Bogotá. 88 p.
- INGEOMINAS (1970). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Subzona IIB). Plancha 132 (Yolombó). Mapa geológico de Colombia. Memoria explicativa.
- INGEOMINAS. (1970). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Subzona IIB). Plancha 132 (Yolombó). Mapa geológico de Colombia.
- Londoño, J. P. (2006). Evaluación holística de riesgo frente a deslizamientos en Áreas Urbanas Andinas, Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo (Doctoral dissertation, Tesis. Manizales).

- Ospina, M., Gómez, V., Cárdenas, G., Franco Y. (2017). Zonificación de amenaza por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el municipio de Cisneros (Antioquia), por los métodos geomorfológico directo y análisis jerárquico (Trabajo final asignatura Geología Ambiental, Universidad EAFIT).
- Niethammer, U., James, M. R., Rothmund, S., Travelletti, J., & Joswig, M. (2012). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, 2-11.
- Rossi, G., Tanteri, L., Tofani, V., Vannocci, P., Moretti, S., & Casagli, N. (2017). Brief Communication: Use of multicopter drone optical images for landslide mapping and characterization. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. (February)*, 1-14.
- Ruff, M., & Czurda, K. (2008). Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology*, 94(3-4), 314-324.
- Rusnák, M., Sladek, J., Kidová, A., & Lehotský, M. (2018). Template for high-resolution river landscape mapping using UAV technology. *Measurement*, 115, 139-151.
- Saaty, T. (1990). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. The Analytic Hierarchy Process Series, vol. I.
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 100.000. *Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental*, 88p. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá-Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2013. Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza relativa por Movimientos en Masa. Escala 1:100.000. Bogotá. 158 Pág.
- Servicio Geológico Colombiano (S.G.C). (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá. 182 p.
- Servicio Geológico Colombiano (S.G.C). (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000*. Bogotá. 217 p.
- Sidle, R. C., & Ochiai, H. (2006). Landslides: processes, prediction, and land use. *Water resources monograph series*.
- Soeters, R., & van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. In A. K. Turner, & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides, investigation and mitigation (Transportation Research Board, National Research Council, Special Report; 247)* (pp. 129 - 177). Washington D.C., USA.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos: Análisis geotectónico*. Santander: Editorial U.I.S.
- Tofani, V., Segoni, S., Agostini, A., Catani, F., & Casagli, N. (2013). Use of remote sensing for landslide studies in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(2), 299-309.
- Turner, A. K., & Schuster, R. L. (1996). Landslides: Investigation and Mitigation: Transportation Research Board Special Report 247. *National Research Council, Washington, DC*, 673.
- Turner, D., Lucieer, A., & De Jong, S. M. (2015). Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7(2), 1736-1757.

Van Westen, C. J. (1993). Remote sensing and geographic information systems for geologic hazard mitigation. *ITC journal= bulletin de l'ITC*, (4), 63-71.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.

Vasuki, Y., Holden, E. J., Kovesi, P., & Micklethwaite, S. (2014). Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, 69, 22-32.

Vilela, E., (2017) Cisneros Technical Report NI 43-101, prepared by LINAMEC SAC for Antioquia Gold Ltd. effective date September 24, 2017.