

**EVALUACIÓN METODOLÓGICA DE CAMBIOS GEOMÉTRICOS EN TALUDES CON AMENAZA A
DESLIZAMIENTO UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT)**

BRAYAM STEVE NÚÑEZ ROMERO

INGENIERO CIVIL



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

PROGRAMA DE MAESTRÍA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2020

**EVALUACIÓN METODOLÓGICA DE CAMBIOS GEOMÉTRICOS EN TALUDES CON AMENAZA A
DESLIZAMIENTO UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT)**

**BRAYAM STEVE NÚÑEZ ROMERO
INGENIERO CIVIL**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL**

**DIRECTOR:
PHD. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE MAESTRÍA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2020**

Para todos aquellos que me ayudaron a encontrar el camino

AGRADECIMIENTOS

A todos los docentes que aportaron a mis conocimientos durante mi formación profesional.

Al PhD. Sergio Manuel Pineda Vargas por su compromiso y dedicación en el desarrollo de esta meta.

Al PhD. Jose Vallejo por su bondad y tiempo para leer este documento.

Al PhD. Modesto Portilla por su aporte conceptual para la corrección del documento.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos	2
Objetivo General	2
Objetivos Específicos.....	2
Pregunta de la investigación.....	2
2. ESTADO DEL ARTE	3
3. MARCO TEÓRICO.....	5
3.1. La geotecnia y la erosión.....	5
3.2. La geotecnia y los movimientos de tierra en masa	6
3.2.1. Clasificación de los movimientos en masa.....	6
3.3. Causas de erosión en proyectos de carreteras	10
3.4. La geotecnia y el análisis de estabilidad de taludes	11
3.4.1. Variables de estudio en el análisis de estabilidad de taludes.	12
3.4.2. Metodologías de análisis de estabilidad de taludes.	12
3.4.3. Procedimiento general del diseño, estabilización y mantenimiento de taludes.....	13
3.5. Sistemas de prevención, disminución y elusión de la amenaza a deslizamiento.....	14
3.5.1. Metodologías de prevención del riesgo.....	14
3.5.2. Metodologías de elusión de la amenaza.....	15
3.5.3. Metodologías de control de la amenaza.....	16
3.5.4. Metodologías de estabilización de taludes	16
3.6. Fotogrametría.....	19
4. DISEÑO METODOLÓGICO	20
4.1. Entradas generales de la metodología	21
4.1.1. Trabajo de recolección de información.....	21
4.1.2. Trabajo de campo.	23
4.1.3. Diseño de planes de vuelo.....	25
4.1.4. Ejecución de los planes de vuelo.	26
4.2. Herramientas o procesos generales de la metodología.	26
4.2.1. Procesamiento de imágenes aéreas:	26
4.3. Salidas generales de la metodología	26
5. IMPLEMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE METODOLOGÍA	27

5.1.	Trabajo de recolección de información	27
5.2.	Trabajo de campo	30
5.3.	Diseño de planes de vuelo	46
5.4.	Ejecución de los planes de vuelo.....	51
5.5.	Procesamiento de imágenes aéreas.....	53
5.5.1.	Salidas generales de la investigación.....	58
5.5.2.	Identificación de cambios geométricos en zonas de estudio.....	65
6.	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
6.1.	Estudio Talud 1 noviembre de 2019 a febrero de 2020:	71
6.2.	Estudio Talud 2 noviembre de 2019 a febrero de 2020:	76
6.3.	Estudio Talud 3 noviembre de 2019 a febrero de 2020:	83
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
	Referencias.....	99

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Nomenclatura de las partes de un deslizamiento. [1]	6
Ilustración 2. Movimientos con predominio de trayectoria vertical [25].	7
Ilustración 3. Vuelco por flexión. Tomado de Manual de Ingeniería de Taludes, pág. 15.	8
Ilustración 4. Deslizamiento rotacional. Tomado de Manual de Ingeniería de Taludes, pág. 18.....	9
Ilustración 5. Avalanchas (izquierda) flujos (derecha) Tomado de Manual de Ingeniería de Taludes.	10
Ilustración 6. Bermas construidas para contener caídos. [26]	17
Ilustración 7. Sistemas de contención de caídos y deslizamientos de malla. [26]	18
Ilustración 8. Inyección para relleno de grietas. [26].....	19
Ilustración 9. Elementos más importantes de un VANT tipo multicóptero. [14]	20
Ilustración 10. Modelo digital de terreno obtenido con Fotogrametría. [14].....	20
Ilustración 11. Metodología propuesta para el análisis de cambios geométricos en taludes. (Fuente Propia).....	22
Ilustración 12. Formato de inventario de obras de estabilización de INVIAS.	24
Ilustración 13. Formatos de inventario de inestabilidades Universidad De Granada. [14]	25
Ilustración 14. Ubicación del corredor vial en estudio. [28]	28
Ilustración 15. Mapa geológico municipio de Tona-Santander. [30].....	29
Ilustración 16. Antecedentes de deslizamiento en la vía de estudio. (Imagen suministrada Julián Galvis).....	30
Ilustración 17. Inventario de zonas de ladera vía Tona - El Mortiño	30
Ilustración 18. K1+200. Vía bajo el material de deslizamiento a inicio y fin. (Alta presencia de nivel freático).....	31
Ilustración 19. K1+200. Imagen de dron a 80 metros de altura. Se denota zona con deslizamiento de inicio a fin.	31
Ilustración 20. K1+200. Revegetalización floral de la zona de ladera y pendiente.	32
Ilustración 21. K1+900. Vía de inicio a fin sin afectaciones.....	32
Ilustración 22. K1+900. Zona de ladera rocosa con alta pendiente y acción humana.....	33
Ilustración 23. K2+600. Talud con alta pendiente, materiales arenosos y humedad elevada.....	33
Ilustración 24. K2+600. Dron a 50 metros de altura. Se denota zona boscosa con un claro en el deslizamiento.	34
Ilustración 25. K3+300. Talud con pendiente media, material areno arcilloso y humedad media. .	34
Ilustración 26. K3+300. Zona de ladera arenosa con pendiente media y poca vegetación.....	35
Ilustración 27. K4+200. Vía de inicio a fin con afectaciones por flujo de material. Alta presencia de humedad y neblina.	36
Ilustración 28. K4+200. Material de flujo parte baja del talud (Izquierda). Fotografía de dron erosión parte alta de la ladera (Derecha).	36
Ilustración 29. K4+200. Fotografía dron; erosión de la banca de la vía y la alta presencia de neblina y vegetación.....	36
Ilustración 30. K4+900. Afectaciones a vía desde inicio a fin e invasión de material.	37
Ilustración 31. K4+900. Zona de ladera tipo estoraque con superficie en cizalla por flujo de material.	37
Ilustración 32. K4+900. Fotografía dron; superficies de cizalla y erosión en la parte alta del talud.	37

Ilustración 33. K5+000. Superficie de falla de talud ya estabilizado.....	38
Ilustración 34. K5+000. Superficie de falla talud ya estabilizado zona baja de la vía.	38
Ilustración 35. K5+000. Muro de contención y muros gaviones de zona ya estabilizada.....	38
Ilustración 36. K5+000. Antecedentes a deslizamiento del año 2010. (Imagen suministrada Julián Galvis).....	39
Ilustración 37. K6+000. Inicio y fin de la vía sin afectaciones.....	39
Ilustración 38. K6+000. Superficie de falla y corte de vía perpendicular.	40
Ilustración 39. K6+000. Presencia de vegetación en parte baja que indica que no ha habido deslizamientos.....	40
Ilustración 40. K6+000. Antecedentes a deslizamiento del año 2010. (Imagen suministrada Julián Galvis).....	40
Ilustración 41. K11+400. Inicio y fin de la vía con invasiones de material.	41
Ilustración 42. K11+400. Material acumulado sobre la superficie del talud con amenaza a movimiento y deslizamiento.	41
Ilustración 43. K11+400. Erosión en la parte alta y baja del talud con gran cantidad de material depositado.....	41
Ilustración 44. K11+400. Antecedentes a deslizamiento del año 2010. (Imagen suministrada Julián Galvis).....	42
Ilustración 45. K17+700. Zona de vía con invasiones de material (Izquierda). Zona de acumulación de caídos (Derecha)	42
Ilustración 46. K17+700. Material acumulado sobre la superficie del talud con amenaza a caídos y zona de acumulación.	43
Ilustración 47. K17+700. Erosión en la parte alta y baja del talud. Superficies de falla de un deslizamiento pasado.	43
Ilustración 48. K18+500. Zona de montaña con tres deslizamientos críticos.	44
Ilustración 49. K18+500. Fotografía dron de gran deslizamiento en montaña.	44
Ilustración 50. K18+500. Incidencia del deslizamiento sobre el río en el que pasa el puente de la vía en estudio.....	45
Ilustración 51. Dron DJI MAVIC PRO PLATINUM.....	46
Ilustración 52. Planes de vuelo (Selección de misión doble malla)	48
Ilustración 53. Plan de vuelo Talud 1. Área de 67 m x 76 m con 41 imágenes.....	49
Ilustración 54. Plan de vuelo Talud 2. Área de 144 m x 149 m con 131 imágenes.....	49
Ilustración 55. Plan de vuelo Talud 3. Área de 122 m x 135 m con 59 imágenes.....	50
Ilustración 56. Demarcación puntos de control Talud 1.	51
Ilustración 57. Ejecución planes de vuelo Talud 1.	52
Ilustración 58. Ejecución planes de vuelo talud 3. Radiocontrol conectado a dispositivo de celular.	52
Ilustración 59. Talud 1. Ejemplo de imágenes obtenidas con la ejecución de los planes de vuelo..	52
Ilustración 60. Talud 2. Ejemplo de imágenes obtenidas con la ejecución de los planes de vuelo..	53
Ilustración 61. Talud 3. Ejemplo de imágenes obtenidas con la ejecución de los planes de vuelo..	53
Ilustración 62. Fase de procesamiento inicial visualizada dentro del software Pix4D Mapper.	54
Ilustración 63. Fase de procesamiento gestor puntos de apoyo visualizada dentro del software Pix4D Mapper.	55

Ilustración 64. Fase de procesamiento nube de puntos y malla de triángulos visualizada dentro del software Pix4D Mapper (Izquierda). Porción de nube de puntos resultado del procesamiento de imágenes aéreas (Derecha).	55
Ilustración 65. Clasificación nube de puntos Talud 1. Nube de puntos para objetos (Izquierda) y para terreno (Derecha).	56
Ilustración 66. Modelo digital del terreno Talud 1 (Ejemplo de resultado).	56
Ilustración 67. Fase de procesamiento MDS visualizada dentro del software Pix4D Mapper (Izquierda). Ortomosaico Talud 1 resultado del procesamiento de imágenes aéreas (Derecha).	57
Ilustración 68. MDT Vuelo fotogrametría Noviembre 2019.	58
Ilustración 69. MDT Talud 1 Noviembre 2019.	59
Ilustración 70. MDT Talud 2 Noviembre.	59
Ilustración 71. MDT Talud 3 Noviembre 2019.	60
Ilustración 72. Ortomosaico vuelo de fotogrametría noviembre 2019.	61
Ilustración 73. Ortomosaico Talud 1 Noviembre 2019.	61
Ilustración 74. Ortomosaico Talud 2 Noviembre 2019.	62
Ilustración 75. Ortomosaico Talud 3 Noviembre 2019.	62
Ilustración 76. MDS Vuelo fotogrametría noviembre 2019.	63
Ilustración 77. MDS Talud 1 noviembre 2019.	63
Ilustración 78. MDS Talud 2 noviembre 2019.	64
Ilustración 79. MDS Talud 3 noviembre 2019.	64
Ilustración 80. Talud 1 Resta DSM Noviembre-Diciembre	66
Ilustración 81. Talud 1 Resta DSM Noviembre-Diciembre Corregido.	67
Ilustración 82. Talud 1 Resta DSM Noviembre-Diciembre Corregido (Zoom).	67
Ilustración 83. Comparación ortomosaico noviembre (izquierda) y diciembre (derecha) de 2019.	68
Ilustración 84. Talud 1 Comparación Noviembre-Diciembre. Demarcación perfiles topográficos extraídos.	68
Ilustración 85. Talud 1 Comparación Noviembre-Diciembre. Perfil 1.	69
Ilustración 86. Talud 1 Comparación Noviembre-Diciembre. Perfil 2.	69
Ilustración 87. Talud 1 Comparación Noviembre-Diciembre. Perfil 3.	70
Ilustración 88. Estado de talud 1 noviembre, diciembre, enero y febrero (de izquierda a derecha respectivamente).	72
Ilustración 89. Resumen cambios geométricos Talud 1. Noviembre a diciembre.	73
Ilustración 90. Resumen cambios geométricos Talud 1. Diciembre a enero.	74
Ilustración 91. Resumen cambios geométricos Talud 1. Enero a febrero	75
Ilustración 92. Talud 2 Noviembre (izquierda) Enero (Derecha) escarpe principal del deslizamiento.	76
Ilustración 93. Talud 2 Noviembre (izquierda) Enero (derecha) Cuerpo del deslizamiento.	76
Ilustración 94. Perfiles extraídos del Talud 2 en estudio.	78
Ilustración 95. Resumen cambios geométricos Talud 2. Noviembre a Diciembre.	79
Ilustración 96. Resumen cambios geométricos Talud 2. Diciembre a Enero.	80
Ilustración 97. Resumen cambios geométricos Talud 2. Noviembre a Enero.	81
Ilustración 98. Resumen cambios geométricos Talud 2. Enero a Febrero	82
Ilustración 99. Talud 3. Perdidas de material y depósitos parte baja periodo de diciembre (izquierda) enero (derecha).	84

Ilustración 100. Perfiles extraídos del Talud 2 en estudio.	84
Ilustración 101. Talud 3. Resumen cambios geométricos noviembre a diciembre.	85
Ilustración 102. Talud 3. Resumen cambios geométricos diciembre a enero.	86
Ilustración 103. Talud 3. Resumen cambios geométricos enero a febrero.	87
Ilustración 104. Esquema general de organización de la información y resultados de la metodología.	96

TABLAS

Tabla 1. Factores cualitativos para calificación de amenaza a deslizamiento.....	23
Tabla 2. Resumen factores detonantes para amenaza a deslizamiento.....	45
Tabla 3. Especificaciones dron DJI MAVIC PRO PLATINUM.....	47
Tabla 4. Especificaciones de planes de vuelo para zonas de estudio.	48
Tabla 5. Fechas de los planes de vuelo según la precipitación.....	51
Tabla 6. Especificaciones de equipo de procesamiento y tiempos promedio de procesamiento de imágenes aéreas.	57

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN METODOLÓGICA DE CAMBIOS GEOMÉTRICOS EN TALUDES CON AMENAZA A DESLIZAMIENTO UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT)

AUTOR(ES): Brayam Steve Nuñez Romero

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Sergio Manuel Pineda Vargas

RESUMEN

Esta investigación planteó el uso de una alternativa viablemente económica como lo son los vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo de zonas de amenaza a deslizamiento. Se adaptó una metodología base, simplificándola para la detección de cambios geométricos en zonas de ladera con amenaza a deslizamiento y su aplicación en Colombia, a la vez que se realizó la validación de la metodología por medio del caso de estudio del corredor vial Tona-El mortío con técnicas de fotogrametría y vehículos aéreos no tripulados. Colombia es un país que presenta un alto grado de dificultad en la planeación y construcción de vías, por tanto, gran parte de estas son producto de una inadecuada planeación y estudio de sus corredores viales. El principal problema es la aparición de movimientos de tierra y deslizamientos de taludes y laderas que con la pérdida de estabilidad generan amenazas para los vehículos que transitan las vías y de igual forma afectan económicamente el comercio de la región o el abastecimiento de materias primas. Estas pérdidas económicas y humanas son producto de la falta de una metodología de seguimiento que otorgue resultados en periodos cortos de tiempo, acerca de los movimientos y deformaciones de los taludes que conforman un corredor vial. En este estudio se obtuvieron modelos digitales de superficie y orto mosaicos multitemporales, los cuales por medio de un análisis permitieron la detección de cambios geométricos multitemporales, generando recomendaciones para el monitoreo de zonas de ladera con amenaza a deslizamiento aplicando la metodología planteada.

PALABRAS CLAVE:

VANT, TALUD, DESLIZAMIENTO, MONITOREO, DRON

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: METHODOLOGICAL EVALUATION OF GEOMETRIC CHANGES IN SLOPES WITH THREAT TO LANDSLIDE USING UNMANNED AIR VEHICLES (UAV)

AUTHOR(S): Brayam Steve Nuñez Romero

FACULTY: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR: Sergio Manuel Pineda Vargas

ABSTRACT

This work raised the use of a viable economic alternative such as unmanned aerial vehicles for monitoring landslide risk zones. A base methodology was adapted, simplifying it for the detection of geometric changes in hillside areas with risk of landslide and its application in Colombia, at the same time that the validation of the methodology was carried out through the case study of Tona-El mortíño corridor with photogrammetry techniques and unmanned aerial vehicles. Colombia is a country that presents a high degree of difficulty in the planning and construction of roads, therefore, a large part of these are the product of inadequate planning and study of its road corridors. The main problem is the appearance of earthworks and landslides and slopes that, with the loss of stability, generate risk to vehicles that transit the roads and, likewise, economically affect the region's commerce or the supply of raw materials. These economic and human losses are the result of the lack of a monitoring methodology that provides results in short periods of time, regarding the movements and deformations of the slopes that make up a road corridor. In this study, digital models of surface and multitemporal ortho mosaics were obtained, which through an analysis allowed the detection of multitemporal geometric changes, generating recommendations for the monitoring of areas of slope with risk of landslide applying the proposed methodology.

KEYWORDS:

UAV, SLOPE, LANDSLIDE, MONITORING, DRONE

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que presenta un alto grado de dificultad en la planeación y construcción de vías primarias y secundarias debido a su orografía accidentada, por tanto, gran parte de las vías construidas actualmente en el país son producto de la inadecuada planeación y estudio de sus corredores viales [1]. La generación de estudios geotécnicos a lo largo del corredor vial son necesarios para la construcción de los corredores viales ya que muchas veces se generan zonas de inestabilidad de taludes, que como se ven hoy en día, son la causa de graves desastres que generan pérdidas económicas, ambientales y humanas [2]. A esto podemos sumar el aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos meteóricos y tectónicos que afectan en gran medida los deslizamientos generados en los corredores viales. De igual forma la mecánica de suelos es una de las ramas más inciertas de la ingeniería civil, debido a las múltiples diferencias que se pueden encontrar entre la teoría y la práctica por diferentes complejidades que presenta el suelo como material [3]. El principal problema al que se deben enfrentar los ingenieros, producto de lo mencionado anteriormente, es la aparición de movimientos de tierra y deslizamientos de taludes y laderas que no fueron objeto de ningún tipo de estudio ni estabilización a la hora de construir el corredor vial [3]. Los deslizamientos generados sobre los corredores viales muchas veces no están regulados por ningún factor de precisión, por el contrario, son factores aleatorios como lluvias que saturan el terreno y producen pérdida de estabilidad lo que genera amenazas para los vehículos que transitan las vías y de igual forma afecta económicamente el comercio de la región o el abastecimiento de materias primas [4].

Estas pérdidas económicas y humanas son producto de la falta de una metodología de seguimiento que otorgue resultados en periodos cortos de tiempo, acerca de los movimientos y deformaciones de los taludes que conforman un corredor vial, para de esta forma poder generar planes de contingencia ante cualquier peligro inminente [5]. Existen métodos de monitoreo para zonas de amenaza por medio de la instrumentación de taludes, que consiste en el uso de equipos cada día más avanzados como extensómetros de cuerda, inclinómetros de pared y puntos de control topográfico por GPS, que permiten obtener variables para controlar las características mecánicas más importantes de la zona con inestabilidad [3]. Sin embargo, estos procesos son de alto costo y generalmente se aplican sobre corredores viales de gran importancia y sobre puntos críticos de inestabilidad, por lo que analizar múltiples zonas inestables de un mismo corredor vial de segundo o tercer nivel, que no genera los suficientes recursos para implementar este tipo de tecnologías, no es viable en absoluto. Esto genera múltiples amenazas para este tipo de corredores viales, que muchas veces quedan rezagados y olvidados debido a los múltiples deslizamientos presentados, generando un estancamiento en el desarrollo de muchas poblaciones rurales del país [6].

El avance tecnológico presentado en la última década ha permitido la creación de equipos y técnicas de control y monitoreo de laderas, por medio de las cuales, se pueden monitorear cambios importantes de múltiples variables que desarrollan la inestabilidad de un talud. Actualmente se desarrollan técnicas de control como: control topográfico básico con estaciones de topografía, que representa grandes tiempos de toma de información y adicional a esto muchas veces no permite controlar zonas que no son accesibles por tierra. El control mediante puntos GPS es otra alternativa que permite medir desplazamientos de puntos específicos de un deslizamiento o ladera, sin embargo, la instalación de muchos puntos de control GPS implica un costo que no puede ser asumido en algunos corredores viales. De igual forma, se implementan técnicas más avanzadas como el control mediante escáner de puntos, el cual permite realizar un control superficial de precisión, sin embargo, se lleva a cabo con equipos de alto valor que no pueden ser utilizados en

muchas vías del país por el costo que esto implicaría. También se desarrollan múltiples técnicas de alerta temprana por medio de extensómetros de cuerda, inclinómetros de pared, extensómetros de grietas y sondas, las cuales alertan sobre movimientos de tierra constantes que puede indicar un posible movimiento en masa del terreno. Sin embargo, instalar y controlar información de estos dispositivos implica mano de obra especializada y constante mantenimiento y obtención de datos, los cuales, en zonas rurales, vías secundarias y terciarias del país implica una logística demasiado costosa [3]. Con todo esto en mente, instrumentar taludes y controlarlos con técnicas avanzadas en tecnología existentes actualmente implica un costo que ningún municipio o concesión vial de vías secundarias o terciarias está dispuesto a acarrear.

Los vehículos aéreos no tripulados otorgan una solución óptima para obras lineales debido a que permiten realizar sobrevuelos en áreas moderadas de terreno, obteniendo mapas de elevaciones y nubes de puntos. Con el correcto procesamiento de estos datos se pueden generar variables que pueden ser estudiadas dependiendo el problema que se quiere abarcar. Este tipo de estudios cuentan con un bajo costo en comparación con la instrumentación y monitoreo de taludes debido a la posibilidad de observar múltiples zonas por medio de diferentes sobrevuelos. Por esta razón, los vehículos aéreos no tripulados se convierten en una gran alternativa para el seguimiento de zonas inestables de corredores viales de segundo y tercer nivel [7].

Objetivos

Objetivo General

Evaluar cambios multitemporales en modelos digitales de superficie creados a partir de imágenes de vehículos aéreos no tripulados de taludes de un corredor vial, siguiendo la metodología propuesta que permite monitorear un posible movimiento en masa del terreno.

Objetivos Específicos

- Estudiar zonas con amenaza a deslizamiento en el corredor vial Tona - El Mortiño, siguiendo una metodología cualitativa de evaluación de amenaza, para seleccionar casos representativos.
- Diseñar un experimento con planes de vuelo para VANT por medio del software Pix4D Capture y con apoyo de fotogrametría digital, que permitan recopilar la mayor cantidad de información multitemporal posible de las zonas de estudio.
- Analizar cambios morfométricos de las zonas inestables seleccionadas por medio de modelos digitales de superficie utilizando el software Pix4D Mapper y sistemas georreferenciados.

Pregunta de la investigación

¿Se pueden identificar movimientos de tierra y alertar posibles deslizamientos de taludes de un corredor vial por medio de imágenes aéreas obtenidas a partir de vehículos aéreos no tripulados?

El siguiente documento se divide en 7 capítulos. El primer capítulo denominado introducción describe brevemente el enunciado base, la justificación de la investigación, los objetivos y la pregunta de investigación. El segundo capítulo denominado estado del arte, muestra una revisión bibliográfica a nivel regional, nacional e internacional de monitoreos de laderas con drones. El tercer capítulo denominado marco teórico, describe de manera general los conceptos de erosión,

movimientos en masa, análisis de estabilidad de taludes y métodos de gestión de amenazas a deslizamientos. El cuarto capítulo denominado diseño metodológico, entrega una descripción detallada de las fases para implementar la metodología de estudio planteada y adaptada. El quinto capítulo implementación y ejecución de la metodología, describe a manera de ejemplo el desarrollo de la metodología planteada para un caso de estudio particular. En el sexto capítulo análisis de resultados, se muestran de manera resumida todos los modelos digitales obtenidos por medio de la metodología planteada, y se realiza un análisis a los cambios geométricos encontrados por medio de los modelos en el caso de estudio. El séptimo capítulo denominado discusión conclusiones y recomendaciones, entrega una justificación de los diferentes resultados y problemáticas encontradas al realizar el caso de estudio y todas las recomendaciones generadas para la mejora de la metodología planteada.

2. ESTADO DEL ARTE

A nivel nacional se han realizado pocas investigaciones para el monitoreo de taludes y zonas de deslizamiento con vehículos aéreos no tripulados. [8] desarrollan un proyecto en el cual se realiza una comparación técnica y económica del monitoreo en taludes de un corredor vial por medio de técnicas tradicionales de geodesia y técnicas de fotogrametría con drones. Sin embargo, este proyecto se enfoca en analizar los costos de realizar un seguimiento de puntos topográficos en un mismo periodo de tiempo, con vehículos aéreos no tripulados y por métodos geodésicos tradicionales como estaciones totales de topografía, sin entrar a analizar de ninguna forma desplazamientos en diferentes periodos de tiempo. [9] Planteo una metodología para evaluar la amenaza en corredores viales de montaña en Colombia, por medio de la cual, se utilizan vehículos aéreos no tripulados para establecer una posible amenaza a deslizamiento en un corredor vial. Sin embargo, esta metodología contempla variables de entrada múltiples como mapas de geología, los cuales en muchas zonas del país no están disponibles y de igual forma utiliza algunos factores que no son fácilmente cuantificables. En esta investigación tampoco se realiza un seguimiento a los cambios que puede presentar la ladera o talud durante un periodo de tiempo.

A nivel internacional múltiples investigaciones a lo largo de los años han demostrado la sencillez y economía de realizar monitoreo a zonas de ladera o taludes con alta amenaza a deslizamiento. Es el caso de [10] los cuales, por medio de vehículos aéreos no tripulados realizaron un análisis a la geometría de un deslizamiento ocurrido en un corredor vial en España. Por medio de fotogrametría crearon un modelo digital del terreno y evaluaron variables como rugosidad, pendientes y perfiles topográficos. Sin embargo, la investigación indica a manera de resumen las variables que se pueden obtener por medio de sistemas de información geográfica y vehículos aéreos no tripulados, sin realizar ningún análisis del deslizamiento en diferentes periodos de tiempo. [11] realizaron un seguimiento a un talud excavado de limos, por medio de un sensor de tipo LIDAR. Sin embargo, dado el grado de inclinación necesario para el sensor, las franjas de solape muy pequeñas y elementos de referencia poco estables, obtuvieron resultados con ciertos márgenes de errores, lo cual demuestra que incluso técnicas costosas y avanzadas pueden fallar en ciertas condiciones de terreno. [12] desarrollaron un monitoreo en taludes por medio de vehículos aéreos no tripulados comparando modelos digitales de terreno de diferentes épocas y obteniendo mapas de cambios de elevaciones y erosión. Sin embargo, solo se tomó como análisis los resultados obtenidos por medio de los mapas, es decir no se realizó una comparación por otro método que permitiera establecer si en realidad habían sucedido los desplazamientos. [13] desarrollaron una investigación en la cual hicieron

sobrevuelos a diferentes sectores inestables de un corredor vial y por medio de las imágenes y modelos generados realizaron observaciones visuales basadas en la geomorfología del terreno obtenida. Finalmente propusieron alternativas de solución a varios problemas de estabilidad observados de forma más cualitativa y a juicio de expertos sin analizar cambios o deformaciones en diferentes periodos de tiempo. Una de las documentaciones más importantes en el área de monitoreo en taludes se llevó a cabo por múltiples universidades en España y colaboradores. En esta investigación realizaron sobrevuelos a un corredor vial y crearon una metodología para el análisis de estabilidad de taludes en obras lineales, haciendo análisis visuales, de deformaciones y desplazamientos y finalmente análisis numéricos estableciendo múltiples factores de seguridad para la estabilidad de los taludes de la zona a lo largo de un periodo de tiempo, este estudio será sin duda uno de los pilares para realizar monitoreo y control de deslizamientos en un país como Colombia. [14]

Múltiples investigaciones han llevado a cabo avances significativos con la metodología de monitoreo de taludes con vehículos aéreos no tripulados de esta forma [15] utilizaron orto mosaicos y modelos de elevación de terreno para monitorear múltiples deslizamientos. [16] idearon una metodología para monitorear fisuras en terrenos montañosos con una alta resolución en diferentes periodos de tiempo por medio de vehículos aéreos no tripulados. [17] desarrollaron un algoritmo basados en múltiples imágenes aéreas, en el cual demuestran el comportamiento de un deslizamiento a lo largo del tiempo. [18] por medio de imágenes aéreas obtenidas con un dron, cámaras de bajo costo e información obtenida de una escarpa montañosa, desarrollaron un algoritmo que permite monitorear deslizamientos generando información aceptable y confiable. [19] determinaron que por medio de vehículos aéreos no tripulados se pueden monitorear desplazamientos en taludes con rangos de 15 cm a 10 cm. [20] desarrollaron una metodología para obtener alta precisión al medir desplazamientos en taludes por medio de drones de baja categoría o “mini drones” obteniendo resultados con alta precisión. [21] realizaron monitoreo con vehículos aéreos no tripulados a un deslizamiento, resaltando los principales errores y defectos que tienen las metodologías terrestres y satelitales para desarrollar estos monitoreos al compararlos entre ellos. [22] implementaron un monitoreo a un gran deslizamiento ocurrido en Austria durante 3 periodos de tiempo con vehículos aéreos no tripulados, obteniendo mapas de deformación del deslizamiento con una alta resolución. Finalmente [23] desarrollaron un monitoreo a una gran zona de depósito de basuras, en el cual implementaron una metodología de marcas con colores RGB que, por medio de un software desarrollado en Matlab, reducía los tiempos de procesamiento de la información de deslizamientos y cambios del terreno y aumentaba la precisión de los mismos, permitiendo obtener velocidades de desplazamiento del terreno bajo esta metodología. Todas estas investigaciones actuales permiten con base en una amplia revisión científica implementar la metodología de monitoreo a taludes y zonas de deslizamiento por medio vehículos aéreos no tripulados, con una mayor precisión.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. La geotecnia y la erosión

La denominada geofomología del terreno es aquel desarrollo y cambio del terreno dados procesos de cambio en su forma por factores como el clima que han generado un morfodinamismo en el terreno que ocupamos hoy en día para establecer urbanizaciones y otro tipo de construcciones civiles. Normalmente se habla de dos tipos de procesos, los internos los cuales son los responsables de la creación de las montañas, valles y demás formas generales del terreno y los otros son los externos los cuales son debidos al clima, el agua, los organismos vivos y la materia orgánica los que se encargan de alterar y reducir a un nivel común estas geofomas adoptadas por procesos internos. Todos los elementos del terreno que son liberados, trasladados y alterados por los fenómenos externos comprenden el fenómeno llamado denudación.

La erosión otro termino importante en la geotecnia es el desalojo, transporte y depósito de materiales de la superficie terrestre producto de factores como las lluvias, el viento y el hielo también aportando parte al proceso la acción de la gravedad que actúa como una fuerza direccional selectiva. Cuando la erosión es generada por algún factor diferente a los mencionados anteriormente y en general cambios generados por acción de los humanos se le denomina también erosión antrópica.

Cuando principalmente las fuerzas de gravedad son las actuantes en los procesos de erosión estos se denominan fenómenos de remoción en masa. Existen dos tipologías de este fenómeno encontrando que, desplazamiento en masa es considerado el movimiento de material relativamente solido a drenajes naturales, mientras que el transporte en masa se denomina al movimiento de material en un estado líquido semiviscoso en el cual se mezcla con agua. La principal diferencia entre estos dos movimientos es el estudio científico de ellos ya que los desplazamientos en masa adquieren características estudiadas por la mecánica de sólidos, y el transporte en masa tiene un comportamiento que corresponde al estudio de la mecánica de fluidos.

Los procesos de remoción en masa, erosión y principalmente la acción del hombre son aquellos encargados generalmente de dar forma al relieve del terreno. Por tanto, se puede considerar la erosión como el principal detonante de deslizamientos y otros procesos de remoción en masa lo que indica que se debe estudiar, analizar y controlar los fenómenos de erosión para controlar este tipo de deslizamientos del terreno que tantos desastres han causado y pueden causar.

El clima es otro de los principales agentes de erosión, siendo los fenómenos de precipitación los más críticos para la activación de procesos de erosión. Dependiendo del tipo de clima se puede categorizar que tan grave tiende a ser la precipitación en los procesos de erosión y de forma contraria el papel de la cobertura vegetal es clave para no permitir fenómenos de erosión en el terreno, dado que la cobertura vegetal absorbe parte del agua, estabiliza el terreno y no permite saturación rápida y escorrentía de este. Por tanto, en climas tropicales donde la cobertura vegetal es amplia y la precipitación es alta, el fenómeno de erosión es menos crítico, caso contrario a los climas semiáridos en los cuales los fenómenos de erosión se activan al entrar en acción las lluvias dada su poca cobertura vegetal. Cabe considerar que cualquier acción del hombre en cualquier tipo

de clima que implique la remoción de la cobertura vegetal, va a acelerar el proceso de erosión y por tanto fenómenos de remoción en masa de una forma exponencial, siendo estos cambios los más críticos para los terrenos.

3.2. La geotecnia y los movimientos de tierra en masa

Según las principales referencias bibliográficas en temas de erosión y geotecnia existen 7 tipos de erosión:

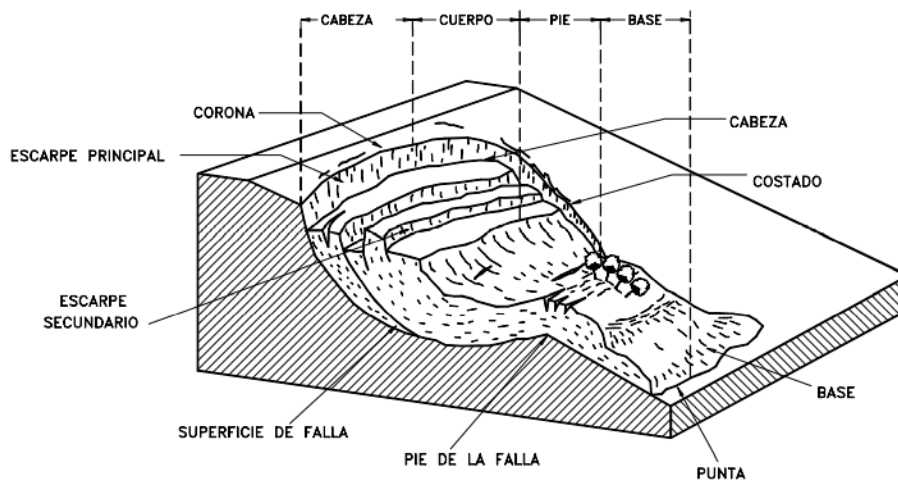


Ilustración 1. Nomenclatura de las partes de un deslizamiento. [1]

La hídrica es producto de aguas pluviales y escorrentía, la fluvial se caracteriza por arrastre de material en cursos de agua, la eólica se basa en el movimiento de los suelos por acción del viento, la glaciaria es aquella en que los suelos se movilizan y transportan con el movimiento de glaciares, la periglaciaria principalmente hace referencia a procesos de congelamiento y descongelamiento, la litoral se produce por la acción del oleaje en las regiones costeras y la kárstica es aquella en la cual los suelos solubles por agua se erosionan formando cavernas. La fluvial, eólica y hídrica son las principales causas de deslizamientos por lo cual son las más importantes para el área de la geotecnia [24].

3.2.1. Clasificación de los movimientos en masa.

Se conoce como movimiento en masa al desplazamiento del terreno que se genera principalmente en laderas o taludes, hacia fuera de sí mismo y en sentido descendente generando un movimiento del terreno que muchas veces es peligroso para la integridad de la zona o el sector. Cabe resaltar que los taludes o laderas pueden ser de origen simplemente natural, es decir que se ha creado por medio de procesos erosivos, o pueden ser artificiales lo que supone la acción del hombre con maquinaria o procesos manuales para generar las excavaciones en la zona y afectaciones a las laderas con el fin de realizar obras de infraestructura en su mayoría corredores viales [24].

Aunque existen numerosas clasificaciones, casi que se ha llegado de manera unánime a establecer una clasificación predominante alrededor del mundo y el área de la geotecnia, clasificando según la

bibliografía los movimientos en cinco mecanismos principales: desprendimiento, colapso, vuelco, deslizamiento, expansiones laterales y flujos [24].

- **Desprendimientos o caídas:** Se genera principalmente cuando parte del terreno, generalmente rocoso y de secciones empinadas de acantilado, se desprende y se desplaza de forma vertical en caída libre o rebotando a través del aire hasta depositarse en la parte inferior del terreno, este tipo de movimientos generalmente se presentan a velocidades altas o extremadamente altas y en taludes de tipo rocoso que permiten el desprendimiento de material por sección o bloques [24].
- **Colapsos:** Este tipo de movimiento se genera por la erosión en su mayoría de las veces creada por el agua ya sea fluvial o de oleaje, en la base de taludes de sección rocosa, lo cual genera el desprendimiento vertical de la masa del talud y meteoriza las rocas que generalmente son la base de este.

Estos dos tipos de movimientos son generalmente conocidos como movimientos con predominio de trayectoria vertical y aunque se generan normalmente en taludes de material rocoso, también pueden predominar en laderas con otros tipos de materiales.

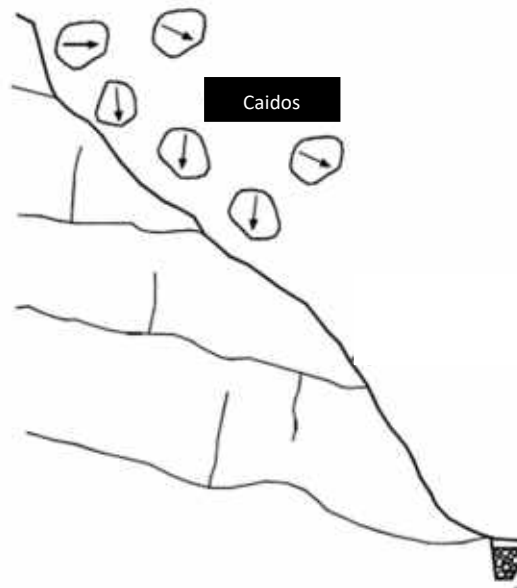


Ilustración 2. Movimientos con predominio de trayectoria vertical [25].

- **Vuelcos:** Se presenta generalmente cuando el terreno ya sea suelo roca, gira sobre su eje situado bajo su centro de gravedad. Generalmente se producen por acción de fuerzas gravitacionales y fuerzas erosivas que generalmente son producto del agua que se acumula en las grietas de los taludes rocosos [24].

- **Vuelcos por flexión:** se generan cuando los taludes en su mayoría rocosos tienden a conformar secciones columnares individuales que una vez sometidas a fuerzas de gravedad y erosivas se inclinan hacia el exterior del talud hasta fracturarse en su centro dada su condición de columnas en voladizo [24].
- **Desplomes:** se producen generalmente en acantilados rocosos en los cuales el talud pierde su base por caídas de rocas y esto produce una desestabilidad al no existir una base que contenga la parte superior esta colapsa por estar una condición de viga en voladizo y cae sobre la base del talud [24].

Estas tres categorías generalmente se producen en macizos rocosos y se conocen como movimientos de giro de bloques conformados por fracturación vertical.

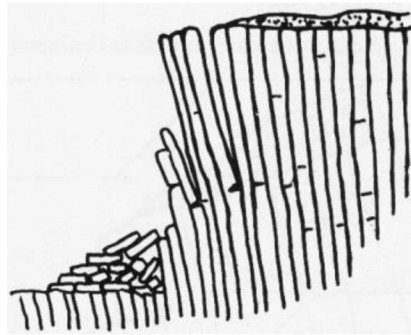


Ilustración 3. Vuelco por flexión. Tomado de Manual de Ingeniería de Taludes, pág. 15.

- **Deslizamientos rotacionales:** Generalmente se produce un movimiento del terreno sobre un plano de falla dentro del mismo, generalmente circular, que tiene su centro en algún lugar situado fuera del talud. La parte superior del deslizamiento queda con grandes inclinaciones que pueden reactivar nuevos deslizamientos y la parte baja del deslizamiento queda con material acumulado generando normalmente formas convexas de terreno. Normalmente los suelos cohesivos son los más predilectos para este tipo de movimientos dada la saturación de estos y la pérdida de cohesión de las partículas [24].
- **Deslizamientos traslacionales:** Similar a lo sucedido en los deslizamientos rotacionales una masa del suelo se desplaza sobre una superficie de falla sin embargo en este caso la superficie de falla no es circular sino lineal lo que produce que el terreno se desplace horizontalmente sobre la falla y no fluya, lo que sucede normalmente en deslizamientos rotacionales. Sin embargo, si el material que se traslada se disgrega este se puede convertir en un flujo de material [24].
- **Reptamientos:** Son movimientos de tipo viscosos que se generan a velocidades extremadamente lentas por lo que son muy difíciles de reconocer. Se caracterizan por el desplazamiento de una gran masa de terreno sobre una superficie de falla, y generalmente ocurren en zonas sometidas a procesos de deforestación y ganadería [24].
- **Propagación Lateral:** Generalmente se asocia al desplazamiento lateral de grandes masas de rocas que están cimentadas o cuya base son suelos que se someten a procesos de licuefacción por su característica de suelos blandos. Esto permite un desplazamiento lateral de varias masas de terreno rocoso grandes pendiente abajo sobre el terreno blando.

- **Escorrimiento:** Normalmente es controlado por procesos de formación de taludes artificiales en proyectos viales donde una vez realizado cortes al terreno se produce un flujo de material que se desliza de forma viscosa [24].
- **Subsidencia:** Normalmente se trata de la consolidación del terreno que normalmente se encuentra bajo los grandes taludes. Aunque no afecte la cara expuesta del talud normalmente produce desplazamientos verticales globales de la masa de terreno dada la consolidación de este [24].

Este tipo de movimientos los cuales normalmente se generan a partir de una superficie de falla en terrenos generalmente no rocosos son conocidos como desplazamientos en masa de terreno.

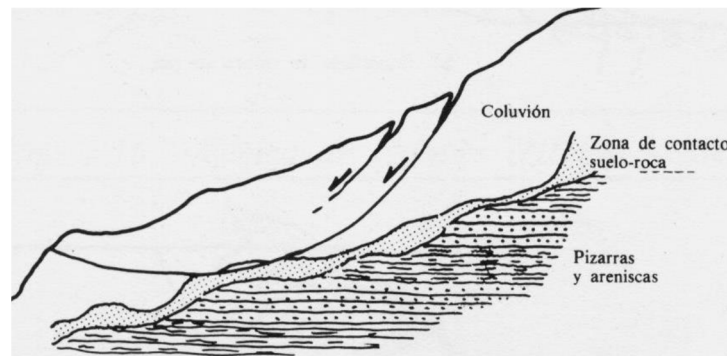


Ilustración 4. Deslizamiento rotacional. Tomado de Manual de Ingeniería de Taludes, pág. 18

- **Flujos:** Normalmente se generan movimientos de tipo viscoso que pueden tener velocidades muy lentas y desplazamientos de centímetros, hasta altas velocidades y desplazamientos de cientos de metros, normalmente estos últimos son los que ocasionan la mayoría de los daños. Normalmente pueden existir flujo de detritos los cuales son movimientos en su mayoría de rocas y flujo de tierras los cuales generalmente se presentan en suelos finos por su carácter más fluido y viscoso [24].
- **Avalancha de rocas y detritos:** Este tipo de movimientos se dan generalmente cuando se produce movimientos de tierra de enorme volumen y en altas velocidades que alcanzan casi los 250 km/h. Son el tipo de movimientos más peligrosos dado la poca prevención y acciones que se pueden tomar contra ellos, por la misma acción súbita de estos [24].

Generalmente todo este tipo de movimientos pueden ser activados por varias causas. La primera de ellas es generalmente la presencia de suelos en su mayoría de arcillas y rocas minerales solubles que tienden tener problemas de resistencias mecánicas. Otro tipo de problemas encontrados en los taludes es que se presenten problemas estructurales como discontinuidades, alternancia entre capas permeables e impermeables. Y por último puede ser una de las principales causas de todos los tipos de deslizamiento cuando se genera cambios a los estados iniciales de los esfuerzos ya sea por factores naturales o humanos [24].

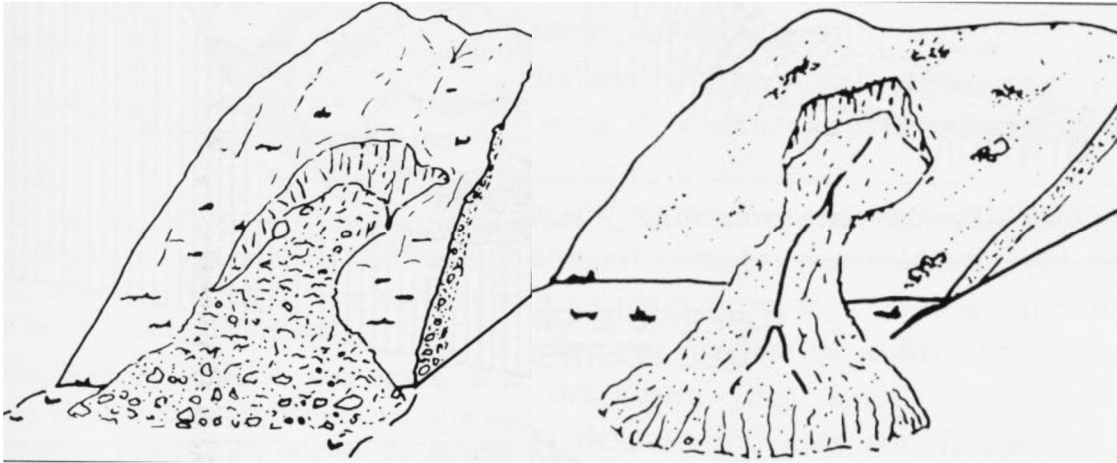


Ilustración 5. Avalanchas (izquierda) flujos (derecha) Tomado de Manual de Ingeniería de Taludes.

3.3. Causas de erosión en proyectos de carreteras

Los proyectos de carreteras se caracterizan por ser obras lineales que generan un corredor sobre un terreno, normalmente en Colombia montañoso, en el cual, se deben ejecutar trabajos de movimientos de tierras que muchas veces afectan el estado natural y el estado de los esfuerzos de los taludes que se encuentran en la zona y que se generan por la construcción del corredor.

Normalmente en la fase de diseño y construcción de los corredores se generan cambios en la morfología de los taludes naturales y artificiales de la zona, de igual forma al tener que atravesar corrientes hidráulicas que muchas veces se hacen inevitables se crean cambios en los patrones hidráulicos que representan estas en la zona afectando de igual forma el régimen de aguas que existe en los taludes. En general en la fase de diseño y construcción se realizan procedimientos que inician o desencadenan procesos erosivos los cuales con el tiempo afectan la estabilidad de los taludes encontrados en los corredores viales.

Realizar taludes producto de excavaciones produce el desprendimiento normal de capas vegetales, o alteración en patrones de aguas internas, que normalmente son los encargados de proteger procesos erosivos es decir, al estar desprovisto un talud de humedad natural y vegetación este queda a merced de los diferentes procesos erosivos, los cuales al interactuar con el talud en mención empiezan a dessecar y a generar deslizamientos y desprendimientos de masa desde la corona hacia su base, alteraciones que muchas veces dan pie al desarrollo procesos de deslizamiento en masa. Lo mencionado anteriormente indica que todo talud que se vea afectado en factores que faciliten la erosión de este, no la estabilidad, deben ser protegidos debidamente con mantos naturales (generalmente revegetalización) y estructuras hidráulicas que faciliten el flujo de aguas sobre canales antes de llegar a generarse escorrentía sobre el talud. Todos estos procedimientos permiten el restablecimiento de su estado natural y la posible prevención de procesos de erosión. A su vez si se tiene algún indicio de inestabilidad el talud debe ser instrumentado con el fin de dar seguimiento a una posible falla de este, procedimiento que no se ejecuta muy seguido en proyectos viales de Colombia dados sus altos costos [24].

Generalmente los taludes creados para llegar a cierto nivel de rasante o taludes de terraplén quedan generalmente expuestos en sus caras exteriores a procesos de erosión, no inestabilidad dado que se hacen estudios para aproximar el Angulo de inclinación de los taludes, por lo que se hace necesario de igual forma proteger como ya se ha mencionado de estos procesos de erosión que si pueden generar cierta inestabilidad.

Cuando se produce el cruce de corrientes hídricas por parte del corredor vial se debe generalmente cuidar los cimientos y laterales de las obras viales de procesos de erosión creados por la corriente. Normalmente se acostumbra en estos sitios de ponedero a proteger con muros de contención o barreras naturales los taludes y cimientos generados de la acción constante del agua sobre estos.

Todas estas obras de control de erosión después de sus años de trabajo en un corredor vial pierden normalmente su capacidad de protección por lo que se deben hacer mantenimientos a todas las zonas pasados los años. De igual forma si los taludes que se instrumentaron presentan algún tipo de falla se deben tomar acciones correctivas que permitan proteger y estabilizar el talud antes de generarse un desastre. En general todo tipo de malas prácticas a la hora de construir corredores viales inducen a procesos de erosión. Estas pueden ser desde la no protección de taludes con revegetalización, como también la falta de construcción de estructuras hidráulicas que permitan canalizar aguas y evitar sus procesos erosivos, también se pueden ocasionar desperdicios de obra y materiales de excavación que muchas veces si no son dispuestos de manera correcta, estos tienden a crear zonas de erosión que con el tiempo crean fallas en los terrenos [24].

3.4. La geotecnia y el análisis de estabilidad de taludes

Cuando se habla de deslizamientos no únicamente se reconoce como uno de los principales problemas del estudio de la geotecnia sino directamente se piensa en causas y soluciones para estos apareciendo principalmente como una de las principales causas el régimen de lluvias y nivel freático del suelo, sin embargo, todos los taludes tienden al equilibrio por lo que una alteración en su geoforma también consta como una de las principales características de los taludes con amenaza a deslizamiento. Los cortes y rellenos que muchas veces se realizan en proyectos de obras viales representan una de las principales causas a deslizamientos en taludes ya que muchas veces por cuestión económica no se hacen los estudios pertinentes de inestabilidad para generar cortes y rellenos que no alteren la geoforma estable del talud. [24] En cualquier caso de inestabilidad deben considerarse múltiples factores meteorológicos y de resistencia a las cargas impuestas que generan múltiples fenómenos como puede ser el ejemplo de la meteorización en nuestro medio tropical.

Por los motivos anteriormente mencionados el desconocimiento de factores tales como los tipos de movimientos en masa, características geomorfológicas, mediciones cuantitativas de la calidad de los materiales de los deslizamientos, causas de falla y tipos de falla, métodos de estabilidad de taludes y muchos otros conceptos se hace inconcebible desde el estudio de los deslizamientos, por lo que se repasaran estos temas con un enfoque en las principales características a tener en cuenta a la hora de estudiar los deslizamientos [24].

3.4.1. Variables de estudio en el análisis de estabilidad de taludes.

Para cualquier estudio que se desee realizar con el fin de analizar la estabilidad o no de los taludes a deslizamiento se necesitan conocer múltiples variables que afectan principalmente el equilibrio de estos. Entre algunas de las principales variables que deben ser estudiadas podemos encontrar:

- **Levantamientos topográficos de terreno:** cuando se desea estudiar una zona a deslizamiento generalmente se hace necesario posicionar sobre planos mucha información acerca de sondeos, apiques, fallas y grietas, etc. Lo anterior hace necesario tener levantamientos topográficos de la zona que permitan posicionar todas estas variables en una zona específica.
- **Geología local:** se debe establecer por parte de los consultores o investigadores que tipo de terreno geológicamente hablando es el que se está tratando, identificando posibles macizos rocosos, depósitos de coluviones etc. Siempre es válido en este tipo de estudio basarse en modelos internacionales con el fin de interpretar la geología de la zona, sin embargo, los análisis locales con información precisa deben intentar realizarse a pesar de los costos y la dificultad que esto implica.
- **Cohesión y Angulo de fricción:** los parámetros de resistencia al corte representan una de las variables más significativas y cuantitativas a la hora de analizar la estabilidad de taludes, con estos factores es posible determinar factores de seguridad al deslizamiento y establecer una amenaza cuantitativa del sector. Sin embargo, es importante que estos factores se determinen bajo condiciones similares a las del terreno en el laboratorio y muchas veces es preferible trabajar con el terreno saturado ya que en estas condiciones la amenaza al deslizamiento es más alta por la disminución de los factores de resistencia al corte [24].
- **Nivel freático:** las condiciones de aguas subterráneas deben ser estudiadas necesariamente al realizar análisis de estabilidad de taludes. Los parámetros de nivel freático permiten determinar zonas en las cuales el talud está siendo sometido a la presión de poros y la disminución de los niveles de resistencia al corte, lo cual es importante para determinar amenaza a deslizamiento. Por medio de piezómetros se pueden medir los diferentes niveles de agua a lo largo de los años y con estos proyectar el máximo nivel freático posible en el terreno para estudiar la amenaza a deslizamiento. En taludes rocosos se establece la presión ejercida por el agua en las grietas y fisuras del terreno lo cual puede afectar la integridad de este.
- **Cargas externas:** Toda carga establecida sobre el talud en estudio debe añadirse al análisis de estabilidad, esto considerando que el empuje lateral de tierras adicional puede generar en el terreno una amenaza a deslizamiento. Deben ser tenidas en cuenta cargas actuantes como los tránsitos de una vía, las cimentaciones de estructuras ya sean superficiales o profundas e incluso los efectos dinámicos del sismo, todo esto con el fin de tener un correcto análisis de estabilidad [24].

3.4.2. Metodologías de análisis de estabilidad de taludes.

Principalmente se identifican dos tipos de metodologías a la hora de realizar un análisis de estabilidad de taludes como lo son los métodos de equilibrio limite y los métodos de elementos

finitos, el primero adoptado por la mecánica de suelo y mecánica de rocas y el segundo es un método más reciente que se encarga de realizar análisis de deformaciones en taludes. A continuación, se presenta un resumen de estas metodologías mencionadas anteriormente:

- **Análisis de equilibrio límite:** se caracteriza principalmente por ser bidimensional y tridimensional considerando una masas rígida o semirrígida. Las principales variables de entrada son la geometría del talud, el modo de falla, parámetros de resistencia al corte e información del nivel freático. La finalidad de la metodología es obtener un factor de seguridad que determine la estabilidad o no del talud sin considerar las deformaciones.
- **Análisis de elementos finitos:** se caracteriza de igual forma como el método de equilibrio límite añadiendo principalmente un comportamiento del material elástico lineal o no lineal. Los datos de entrada solicitados son igualmente geometría y nivel freático, pero adicionalmente, para taludes en roca se pueden considerar campos de esfuerzos naturales y sus discontinuidades. Los resultados que se esperan normalmente en este tipo de análisis son campos de esfuerzos y campos de deslizamiento que permitan considerar la estabilidad o no del talud considerando únicamente pequeños desplazamientos [24].

3.4.3. Procedimiento general del diseño, estabilización y mantenimiento de taludes.

En el procedimiento de diseño y estabilización de taludes el objetivo principal siempre es entregar a los usuarios cercanos a la zona de amenaza una seguridad adecuada, manteniendo un factor de economía y estableciendo una obra civil lo más cercana a la realidad y de posible construcción. A continuación, se presenta un procedimiento de diseño normal que se lleva a cabo en el diseño y estabilización de taludes [24]:

- **Diseños preliminares:** en esta fase se busca abarcar siempre un estimado de los principales problemas de la zona, con valores muy cualitativos y superficiales del sitio, y una evaluación preliminar de las condiciones que establece el terreno en estudio.
- **Investigación de campo:** en el proceso de exploración del terreno lo que se busca es que por medio de la realización de ensayos en el sitio y en el laboratorio y así mismo la instrumentación del talud, obtener información relevante de todas las principales características del talud, para así poder estudiarlo a profundidad más adelante.
- **Modelado:** se busca idealizar por medio de software y las teorías básicas del análisis de taludes mencionadas anteriormente, los mecanismos de falla y estados de esfuerzos del talud que presenta amenaza a deslizamiento.
- **Análisis de resultados:** finalizando la revisión de estabilidad de los taludes se reportan resultados numéricos los cuales por medio de unos análisis permiten determinar conclusiones importantes y protocolos a seguir para la realización de diseños en la estabilización en caso de que lo necesiten los taludes en estudio.
- **Diseño:** por medio de los resultados y el juicio de expertos con experiencia y estudios en el área se diseñan estructuras las cuales cuentan con ciertos criterios de diseño, conceptos, dimensiones, detalles y especificaciones de construcción aportan a la estabilidad de los taludes en estudio.

- **Contratación privada o pública:** una vez realizados los diseños se proceden a realizar los presupuestos, cantidades de obra, determinación de precio y tiempo de ejecución, selección de tipo de contratación y contratista, con el fin de llevar a la realidad las obras civiles establecidas para la estabilización de los taludes en estudio.
- **Construcción y mantenimiento:** finalmente se llevan a buen término las obras diseñadas cumpliendo normativa pactada y vigilada por contratistas de interventoría, realizando ajustes al diseño cuando sean necesarios y también pruebas de uso final de los taludes estabilizados. No se puede olvidar de realizar a futuro debidos mantenimientos rutinarios y obras complementarias que permitan la completa funcionalidad y vida útil de las obras de estabilización realizadas.

3.5. Sistemas de prevención, disminución y elusión de la amenaza a deslizamiento.

Cuando en taludes o laderas se producen niveles de amenaza a deslizamiento se hace necesario medidas capaces de reducir estas amenazas con el fin de no generar desastres. Sin embargo, en muchos casos se presenta una situación crítica en la cual es necesario eliminar completamente la amenaza a deslizamiento ya que las medidas de prevención no son suficientes por lo que se deben tomar acciones de control que eliminen el riesgo. Aun así, en los tiempos actuales las metodologías de control y la construcción de mecanismos que controlen la amenaza a deslizamiento son uno de los problemas más complejos de la ingeniería civil dado su nivel de exactitud y los supuestos e inciertos que se asumen al realizar muchos de estos diseños. Principalmente existen diversas metodologías dependiendo del nivel de amenaza o la solución que se quiera dar a la amenaza de deslizamiento. Esto implica medidas para disminuir o eliminar el riesgo como medidas de prevención, restricciones al área de desarrollo de la amenaza, medidas de elusión de la amenaza, estructuras de control de movimientos, mejoramientos a la resistencia del suelo, protección de la superficie del talud, modificación de la topografía y diseño de terraplenes. A continuación, se hará un repaso superficial de lo que implican cada una de estas metodologías y sus correspondientes contenciones a la amenaza a deslizamiento [26].

3.5.1. Metodologías de prevención del riesgo

La prevención es un programa que deben desarrollar las entidades estatales con el fin de evitar la posibilidad de ocurrencia de amenazas dando un manejo necesario a la vulnerabilidad, esto se debe realizar con el fin único de disminuir las amenazas a deslizamientos en sectores determinados. Una vez realizado el procedimiento general de diseño, es decir, estudiado el talud, analizado los resultados y factores de seguridad de este, se procede a realizar los diseños para la estabilización de este en caso de que lo requiera. Cuando se requiere prevenir la amenaza a deslizamiento existen una serie de métodos que se pueden implementar dependiendo de cada caso de estudio en particular [26].

Uno de los métodos implementados con regularidad es la disuasión de medidas coercitivas que normalmente se realizan cuando la comunidad es consciente del problema y situación de riesgo por la que están pasando y deciden aunar esfuerzos con el estado para disminuir los niveles de riesgo. Sin embargo, el manejo de los factores socioeconómicos de una comunidad es una de las principales restricciones de este tipo de medidas de prevención.

Es también de utilidad poder desarrollar por parte del ente encargado generar la planeación del terreno y generar mapas de ordenamiento territorial. Esto con el fin de proteger la construcción de zonas urbanas en laderas o sitios de alta amenaza, que dada la ocurrencia de un fenómeno de deslizamiento puedan generar grandes desastres. Sin embargo, este método no es útil cuando los terrenos ya han sido construidos y por tanto existe la amenaza de manera inminente dado que es una alternativa de prevención.

La generación de códigos técnicos se ha implementado a lo largo del mundo con muchos casos de éxito. Estos permiten que se tengan estándares de alta calidad para presentar una serie de herramientas de precisión que permiten el control y prevención de amenazas a deslizamiento. Sin embargo, se requiere en nuestro entorno que estos sean impuestos y de obligatorio cumplimiento para que no sean tomados como manuales y por tanto no sean cumplidos por la comunidad profesional y social.

Finalmente, como metodología de prevención menos útil se encuentra la de aviso y alarma. Con esta se busca que las comunidades tengan conocimiento de la ocurrencia inminente de un desastre con lo que se disminuye el riesgo de forma considerable. Sin embargo, no es una metodología muy útil dado que normalmente se aplica cuando ya ha sucedido o está por ocurrir un desastre [26].

3.5.2. Metodologías de elusión de la amenaza

Eludir la amenaza se considera cuando a la hora de formular, gestionar o construir un proyecto este busca evitar que todo elemento en riesgo sea expuesto a un eventual caso de deslizamiento. Para esto existen una serie de metodologías útiles que permiten la elusión del riesgo las cuales se trataran a continuación.

Desde el diseño de los corredores viales se debe evitar la generación de estos sobre sitios de conocimiento previo que tengan un alto potencial a activar deslizamientos o que puedan ser zonas de constante movimiento como coluviones que no permiten el diseño y construcción de vías seguras. En estos casos se busca relocalizar el proyecto o diseñar variantes dado la alta amenaza que se puede presentar en el sector a la ocurrencia de un deslizamiento. Sin embargo, muchas veces esto implica un costo considerable que ningún privado o público está dispuesto a acarrear.

Se pueden generar casos en los cuales generando la remoción de los deslizamientos, cuando estos sean considerablemente pequeños se elimine la amenaza, sin embargo, esto también puede generar que por el cambio geométrico de los taludes se generen nuevos deslizamientos. También se puede generar la remoción parcial de materiales que generan la inestabilidad cuando sus espesores no son muy grandes, sin embargo, cuando existe un nivel freático muy superficial se dificulta retirar el material por posibles fugas del nivel de agua.

Por parte de los diseñadores muchas veces se puede eludir la amenaza generando cortes de baja altura que no realicen grandes cambios a los taludes generando la viabilidad técnica de muchos proyectos. Sin embargo, al generar estos cambios de alturas se afectan las características geométricas del proyecto por lo general desmejorando las condiciones de la vía.

Como metodología final se puede encontrar la elusión completa de la amenaza generando viaductos y puentes que eviten el corte y paso de las vías por terrenos de alta pendiente con material

altamente inestable. Sin embargo, esto crea costos adicionales que muchos proyectos no están dispuestos a acarrear y de igual forma la construcción del puente se debe realizar y diseñar teniendo en cuenta las condiciones inestables del terreno para sus cimientos y el empuje lateral de los terrenos con deslizamientos [26].

3.5.3. Metodologías de control de la amenaza

Por lo general muchos de los proyectos recurren a estas metodologías dado que en una fase de planeación no se tiene en cuenta la amenaza a deslizamiento y por tanto estas metodologías están enfocadas a controlar la amenaza antes de que se genere el riesgo. Muchas de estas metodologías consisten simplemente en estructuras de control de deslizamiento que se construyen en la parte baja de estos.

Se puede recurrir a la construcción de bermas intermedias sobre los taludes las cuales necesitan un espacio extra para generar la construcción. Estas bermas generan una interrupción en la drástica pendiente lo cual permite la estabilización geométrica de los taludes y el control de la amenaza.

De igual forma se pueden generar estructuras de trincheras las cuales sirven al mismo tiempo para controlar las lluvias. Estas estructuras se encargan principalmente de retener movimientos de tierra generando un hueco antes de la vía lo que atrapa los movimientos de tierra y caídas de rocas, sin embargo, se deben señalar y crear estructuras de contención para los vehículos dado la alta amenaza de caída de estos dentro de las estructuras de atrincheramiento.

Algunas estructuras como las de retención se encargan de generar presas y contenciones en la parte baja y salida de fluidos de rocas y deslizamientos ya que por lo general estos cuentan con una desembocadura. Sin embargo, estas estructuras representan muchas veces altos costos por lo que implica su construcción y mantenimiento [26].

3.5.4. Metodologías de estabilización de taludes

Cuando lo que se busca es que no se generen deslizamientos dado el paso inminente de un corredor vial de primer o segundo nivel que tiene alta importancia, lo que se hace normalmente es recurrir a una estabilización del talud. Generalmente se deben determinar qué tipos de sistema de estabilización son convenientes para el tipo de deslizamiento, de igual forma el diseño a detalle de los mismos consiste en una fase de estudios que permita al ingeniero geotecnista entregar una solución viable y segura para la estabilización del deslizamiento y finalmente se puede en caso de no contar con una estabilización completa generar una instrumentación al talud con el fin de monitorear la amenaza al deslizamiento que este representa, aunque estos procedimientos tienden a ser muy costosos. A continuación, se presentan algunas de las metodologías de estabilización conocidas y categorizadas según el tipo [26]:

- **Conformación de talud o ladera:** Cuando lo que se busca generalmente es realizar cambios en la geometría de un talud para con estos, lograr un equilibrio de masas reduciendo las fuerzas que producen los deslizamientos se habla de conformaciones de talud. Se habla específicamente de tres tipos. El primero busca remover materiales de la cabeza del deslizamiento y es muy útil en deslizamientos de tipo rotacional, sin embargo, en

deslizamientos de gran magnitud es económicamente inviable remover todo el material de la cabeza del deslizamiento. El segundo método consta del abatimiento de la pendiente con lo que se busca estabilizar al llegar al Angulo de fricción óptimo del terreno, sin embargo, en taludes de gran altura también se hace económicamente inviable. El tercer y último método consiste en la generación de terrazas en la superficie del talud permitiendo controlar la estabilidad de este y generar obras de control de erosión, es el método más óptimo ya que se busca que cada terraza sea estable de manera independiente.

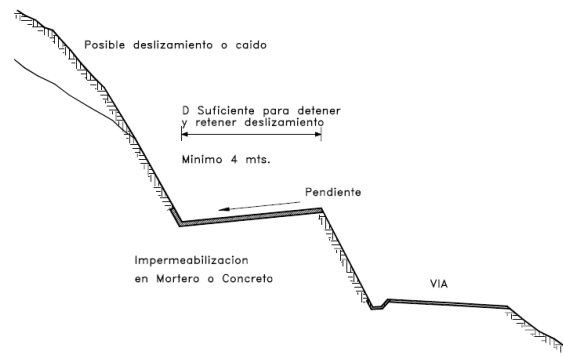


Ilustración 6. Bermas construidas para contener caídas. [26]

- **Recubrimiento de la superficie:** Con este método se busca evitar los efectos erosivos en la superficie del talud y de esta forma asegurar parte de su estabilidad. Existen diversas metodologías, pero lo que es considerado básico es recubrir la superficie ya sea con concreto, o una medida medio ambientalmente mejor vista es la recuperación vegetal de la superficie con árboles, arbusto y pastos. Generalmente otro procedimiento muy realizado es el sellado de grietas, juntas y discontinuidades para evitar infiltración en el talud, sin embargo, dado que pueden existir muchas fallas de este tipo en un talud muchas veces se hace económicamente inviable.
- **Control de agua superficial y subterránea:** Cuando el talud o deslizamiento cuente con problemas de nivel freático alto o erosión por parte del agua en algunas zonas especiales, muchas veces se hace necesario la construcción de estructuras de drenaje eficientes que solucionen estas problemáticas. Las medidas más conocidas son las zanjas de coronación que estabilizan la parte alta de los taludes evitando la infiltración, subdrenes tanto verticales como horizontales para el abatimiento del nivel freático, aunque estos requieren de equipo costoso para su construcción, galerías y pozos de subdrenaje los cuales sirven para estabilizar deslizamientos más profundos, aunque generalmente tienen costos muy elevados. Cabe resaltar que para todo este tipo de estructuras se deben construir estructuras para la entrega de los caudales de abatimiento y estructuras de disipación de energía.
- **Estructuras de contención:** Generalmente gran parte de los taludes con amenaza a deslizamiento tienen como principal característica la inestabilidad geométrica de sí mismos, por lo que las fuerzas actuantes son mayores que las resistentes. Por esto se construyen

diversos tipo de estructuras de contención que aumenten las fuerzas resistentes y generen seguridad y contención de estos deslizamientos por medio de grandes masas de peso o anclajes. Entre las estructuras más conocidas se encuentran los rellenos de bermas y rocas en deslizamientos rotacionales de baja envergadura los cuales requieren de una buena cimentación para instalar el relleno, muros de contención de toda tipología (concreto, tierra armada) los cuales permiten estabilizar pequeñas masas de terreno y taludes que no superen cierta altura dado los inconvenientes que representa para su construcción. Anclajes de tipo pernos o pantallas ancladas los cuales son útiles para contención de taludes medianos y permiten mantener estables grandes franjas de terreno, sin embargo, hay mucha incertidumbre alrededor de sus diseños dadas múltiples suposiciones que se realizan.

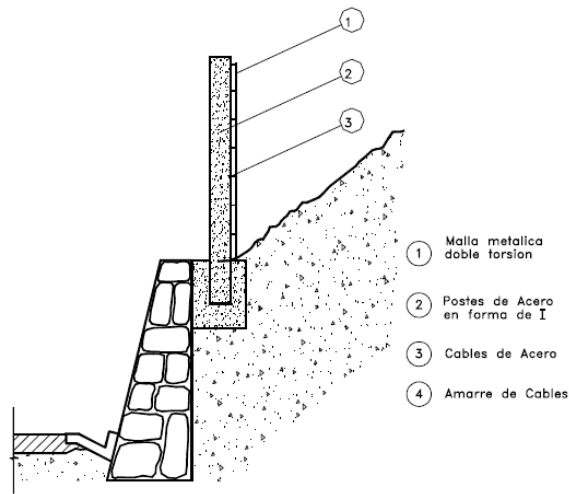


Ilustración 7. Sistemas de contención de caídas y deslizamientos de malla. [26]

- Mejoramiento del suelo:** Con esta técnica lo que se busca es por medio de procesos fisicoquímicos aumentar las características de cohesión y Angulo de fricción de los suelos en los taludes con el fin de que estos nuevos parámetros permitan la estabilidad del talud. Normalmente se utilizan inyecciones de químicos los cuales endurecen los terrenos, pero por otra parte los impermeabilizan. También técnicas menos conocidas y viables como la magmificación y el congelamiento, efectos que respectivamente endurecen y congelan los terrenos, sin embargo, estas tecnologías no son muy utilizadas dados sus efectos a corto plazo y altos costos. Finalmente, los procesos de electro osmosis que se utilizan para reducir los contenidos de agua aumentando cohesión y Angulo de fricción también son viables a corto plazo.

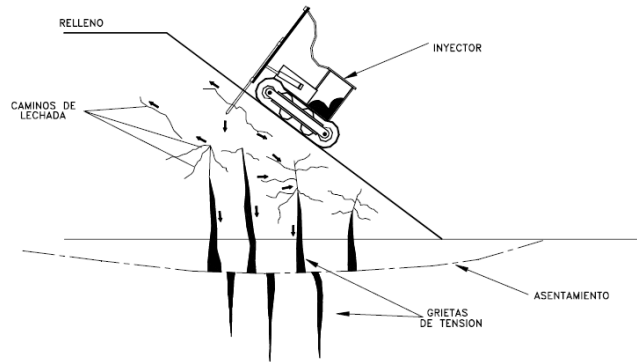


Ilustración 8. Inyección para relleno de grietas. [26]

Como se pudo observar a lo largo de todo el estudio existen muchas técnicas de estabilización y prevención de riesgo útiles a la hora de hablar de deslizamientos por lo que este no es un tema que se venga tratando recientemente y sin embargo, se siguen presentando múltiples desastres día a día lo que indica que hay que seguir en la búsqueda e investigación para encontrar nuevas metodologías que permitan prevenir estos desastres [26].

3.6. Fotogrametría

La fotogrametría es la metodología utilizada con la que por medio de fotografías se puede determinar la geometría de objetos. La fotogrametría permite por medio del uso de puntos de referencia topográficos e imágenes, la medición de coordenadas 3D de terrenos. Se ha estandarizado por convención dos tipos de fotogrametría: terrestre y aérea. La terrestre consiste en fotografías tomadas por medio de vuelos no mayores a 200 metros y ha sido utilizada principalmente en el análisis de problemas locales y zonas de desprendimientos y deslizamientos puntuales generando la precisión en mediciones de hasta 40 mm. La fotogrametría aérea o satelital también denominada espacial, se ha utilizado con imágenes obtenidas entre los 400 metros y los 1000 metros, normalmente obtenidas desde plataformas de observación como helicópteros, aviones o satélites. Esta metodología alcanza precisiones de hasta 100 mm y es utilizada para observar fenómenos de más grande envergadura en zonas de constante movimiento terrestre. Normalmente permite también la comparación, dada su capacidad de barrer grandes cantidades de terreno, de diferentes tiempos de la misma zona lo que permite encontrar cambios significativos que demuestren alteraciones en las zonas de estudio. La innovación más reciente a los métodos fotogramétricos ha sido la obtención de imágenes de alta resolución por medio de vehículos aéreos no tripulados (VANT) los cuales permiten obtener fotografías a zonas de baja accesibilidad dada su portabilidad y maniobrabilidad, este gran avance ha permitido el estudio más a fondo de los deslizamientos de pequeña escala generados normalmente en corredores viales de terreno.

Existen dos tipologías de drones o VANT, los de ala fija y los multirrotores los cuales alcanzan pesos de hasta 25 kg. Los multirrotores pueden tener menor tiempo de vuelo que los ala fija, pero normalmente permiten la obtención de imágenes más estabilizadas ya que se permite la toma de fotografías estáticas, lo cual un VANT de ala fija no puede hacer [14].

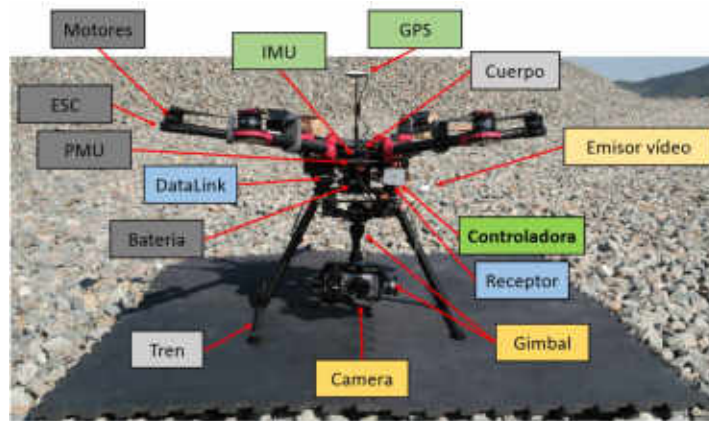


Ilustración 9. Elementos más importantes de un VANT tipo multicóptero. [14]

Adicional a esto existen los programas de tratamiento de imágenes con los cuales, se pueden obtener una gran cantidad de información a partir de las imágenes de un sobrevuelo realizado por cualquier tipo de VANT. Al realizar vuelos a tan bajas alturas se pueden conseguir normalmente resoluciones en ortofotos y modelos digitales de terreno, los cuales son los resultados del procesamiento de las imágenes, de hasta 3 centímetros. Sin embargo, se debe contar con puntos de control en tierra denominados GCPs por sus siglas en inglés, los cuales permiten una interrelación entre los mismos puntos en diferentes fotografías lo que permite normalmente mayor precisión en los modelos que genera el procesamiento normal de las imágenes [14].

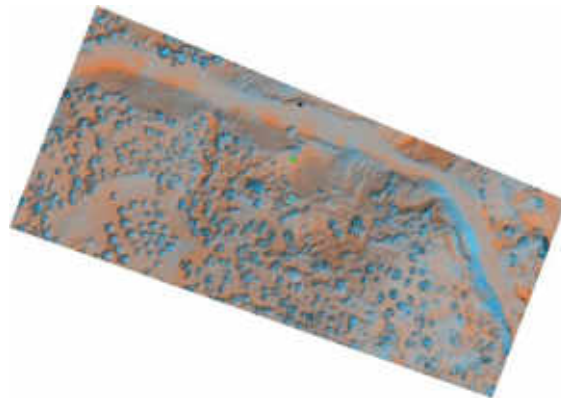


Ilustración 10. Modelo digital de terreno obtenido con Fotogrametría. [14]

4. DISEÑO METODOLÓGICO

Los análisis de estabilidad de taludes son estudios llevados a cabo por el área de la geotecnia, que aunque tienen metodologías de cálculo exactas, en algunas ocasiones no solucionan el problema de deslizamientos debido a los supuestos que se implican en la aplicación de las metodologías. Al mismo tiempo, el costo que conllevan estos estudios dan paso a la planeación y construcción de corredores viales sin un análisis de fondo de las posibles zonas de amenaza a deslizamientos que se generan [3]. Una práctica muy usual es la de analizar únicamente las zonas que se vean afectadas de forma crítica por cortes perpendiculares, o terrenos cuya calidad no es buena. Sin embargo, la realidad es que, aunque se logre contener la amenaza de estas zonas, muchos de los desastres que se dan hoy en día son debido a las secciones de los corredores viales a las cuales no se les hizo

ningún tipo de análisis de estabilidad. Con base en este supuesto y que la mayoría de los corredores viales en el país han sido construidos de esta forma, debido al costo que amerita un análisis a detalle de todas las secciones, se plantea una metodología de monitoreo de zonas inestables por métodos que son una solución viable y económica para la prevención de fenómenos de movimientos en masa de taludes viales.

La metodología propuesta se adapta de la investigación desarrollada por la Universidad De Granada “Nuevas metodologías para el análisis de estabilidad de taludes en infraestructuras lineales” con la cual se plantea una fase de identificación de zonas con amenaza a deslizamiento en un corredor vial que presenten características cualitativas de zonas de deslizamiento, clasificando parámetros que las establezcan como tal. Una vez identificadas estas zonas, se procede a referenciar geográficamente los taludes o zonas de deslizamiento que van a ser objeto de estudio. La referenciación se hace por medio de nombres claves para cada zona y, dado que la metodología incluye fotogrametría, se busca instalar puntos de referencia con coordenadas GPS que permitan poder generar los perfiles topográficos desde los modelos digitales de elevación sobre las mismas zonas en diferentes periodos de tiempo. Cabe resaltar que estos puntos georreferenciados deben establecerse en lugares que no estén inducidos en las zonas de deslizamientos. Una vez establecidos los puntos de referencia se procederá a hacer sobrevuelos con los VANT a las zonas inestables seleccionadas del corredor vial, durante periodos de tiempo consecutivos, con el fin de poder obtener fotografías aéreas que, con el debido procesamiento, permitan obtener modelos digitales del terreno multitemporales, para establecer los cambios geométricos del terreno. Finalmente se procesan las imágenes aéreas adquiridas para generar los modelos y con ayuda de los puntos de referencia marcados, se obtienen perfiles topográficos con los cuales se analizan los cambios geométricos del terreno, tanto en desplazamientos horizontales como verticales durante los periodos de tiempo establecidos, para identificar posibles movimientos de tierra, desplazamientos y deformaciones que generen la alerta de un posible deslizamiento del terreno, llevando a cabo así un monitoreo sobre zonas de amenaza a deslizamiento por medio de vehículos aéreos no tripulados (**Ilustración 11**) [14].

4.1. Entradas generales de la metodología

Ya se ha mencionado que inicialmente se plantean una etapa de entradas o recolección de información, con la cual, se planea iniciar la metodología, esta etapa implica una serie de trabajos iniciales los cuales son descritos a continuación:

4.1.1. Trabajo de recolección de información.

Para iniciar el proceso de recolección de información se hace necesario seleccionar el tramo de estudio. Es muy importante tener en cuenta a la hora de seleccionar el tramo factores como:

- Longitud total evitando largos recorridos que imposibiliten un estudio completo de la zona. En caso de tener tramos extensos (mayores a 20 km) se debe tener en cuenta la división de estos en subtramos.

- Tramos de corredor vial que no cuenten con instrumentación o cuenten con bajos recursos para monitoreo, dado que la metodología planea reemplazar otras metodologías de monitoreo de mayor costo de implementación.
- Revisión de antecedentes e historial de deslizamientos que justifiquen un monitoreo.
- Zonas con climas extremos de periodos secos y periodos de fuertes lluvias.
- Zonas con niveles freáticos altos que generen presiones de poros que desestabilicen los terrenos.

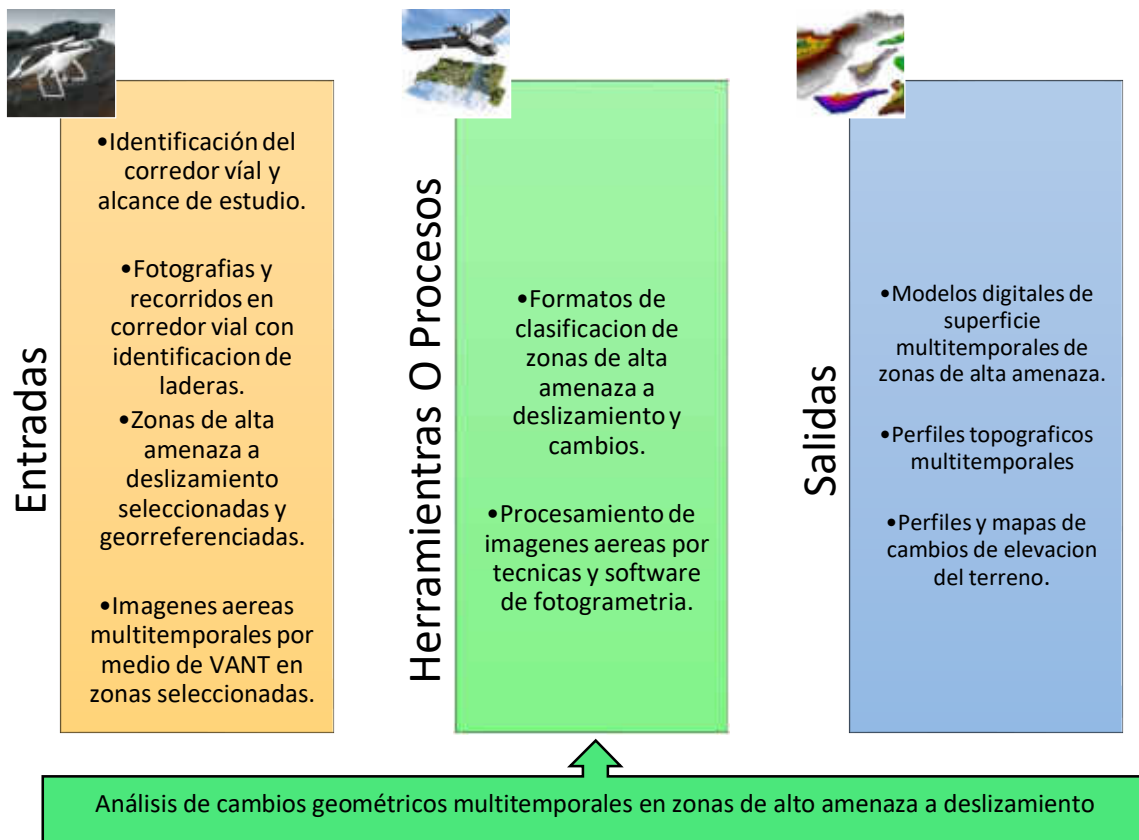


Ilustración 11. Metodología propuesta para el análisis de cambios geométricos en taludes. (Fuente Propia)

Dado que el corredor vial se encuentra identificado desde los objetivos y alcance del estudio, no se tiene una fase de selección, sin embargo, se menciona el cumplimiento de los factores mencionados anteriormente para el tramo de estudio en la fase de implementación de la metodología. Una vez seleccionado el tramo se realiza la recolección de información general del sitio, longitud del tramo, características principales del sector, historial de justificaciones por las cuales se llegó a la escogencia del sector, analizando factores que permitan establecer la importancia de este como zona de amenaza latente a movimientos en masa. Sobre esta misma fase se busca la creación de formatos que permitan llevar a cabo la recolección de información importante en la siguiente fase

que es el trabajo de campo. Adicionalmente se define el alcance del monitoreo, dejando claro el corredor sobre el que se va a realizar el estudio con los desvíos que incluya.

4.1.2. Trabajo de campo.

Una vez obtenida toda la información pertinente de antecedentes, localización del tramo vial en estudio y adaptados los formatos de recolección de información de campo, se procede a hacer los recorridos por el corredor vial. En esta fase lo que se pretende es identificar todas las zonas de ladera que han sido intervenidas o no, con la finalidad de obtener toda la caracterización cualitativa del terreno (i.e., deslizamientos activos, deslizamientos en proceso, deslizamientos ocurridos). De igual manera se identifican las principales características del terreno adyacente a los deslizamientos, como el estado de la vía, tipos de erosión, vegetación (se obtienen imágenes de dron preliminares que permitan una mejor caracterización de zonas de gran altura). Esta fase de investigación de campo permite tener una mejor identificación de todas las zonas de ladera del corredor, con el objetivo principal de identificar zonas que se encuentren según su caracterización con una alta amenaza a deslizamiento o movimientos en masa por medio de una metodología. Como resultado de esta fase se obtiene toda la caracterización de laderas del corredor vial y la identificación de las zonas de deslizamiento con mayor amenaza para la implementación de la metodología de cambios geométricos a desarrollar en los siguientes pasos del diseño metodológico.


La selección de las zonas con mayor amenaza a deslizamiento se realiza escogiendo los taludes o zonas de ladera que cumplan con 6 parámetros cualitativos en el inventario de taludes:

Tabla 1. Factores cualitativos para calificación de amenaza a deslizamiento.

Elevada pendiente (>50°)	Material arenoso	Humedad superficial del terreno	Erosión parte alta	Material depositado superficialmente	Ausencia de vegetación
------------------------------------	-------------------------	----------------------------------------	---------------------------	---------------------------------------------	-------------------------------


Estos factores según la metodología planteada por la Universidad De Granada en España son los principales detonantes de los eventos de deslizamiento. Cabe resaltar que Colombia actualmente cuenta con un manual de inspección visual de obras de estabilización desarrollado por el Instituto Nacional De Vías y La Universidad Nacional De Colombia, sin embargo, este manual y los formatos que se plantean hacen énfasis a inspeccionar obras de estabilización ya realizadas y hace un desarrollo muy corto de las zonas inestables sin estabilizar, esto sin permitir recopilar gran información de estas. Por lo anterior, y dado que se evalúa la metodología planteada por la Universidad De Granada en España se recurrirá al uso de los formatos de recopilación de información planteados por ellos.

En la **Ilustración 12** se muestra el formato de INVIAS en el cual se observa que la sección enumerada 3, hace referencia a la única información posible de capturar de la zona inestable. En la **Ilustración 13** se muestra el formato con el que se recopilara la información de las zonas inestables planteado por la Universidad De Granada, en este se puede observar que toda la información capturada hace referencia a la inestabilidad permitiendo caracterizarla de mejor forma y tener mucha más información de esta, además que permite capturar información valiosa para los VANT.



ESTUDIO E INVESTIGACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LAS OBRAS DE LA RED NACIONAL DE CARRETERAS

Convenio Interadministrativo 0687 de 2003



REGIONAL:

FECHA:

LEVANTÓ:

HOJA: DE:

INSPECCIÓN DE TALUDES Y OBRAS DE CONTENCIÓN

CONTRATO:

NOMBRE DE LA VIA:

NOMBRE DEL SECTOR:

CODIGO DE LA VIA:

CONCESIÓN:

MANTENIMIENTO INTEGRAL:

SECTOR DE ADMON. VIAL N°:

IDENTIFICACIÓN
5. Ubicación
PTI Inicial: PTI Final:

6. Características de la obra
Tipo de obra: (ver reverse)
Otra:

Código:

Longitud: m

Altura: m

Ancho: m

No. de Secciones:

ESTABILIDAD DE TALUDES

a. Tipo de movimiento:

Caída:

Volcamiento:

Deslizamientos:
Rotacionales:

Tradicionales:

Fujos:
Fujos plásticos (creep):

Fujos de desfilas:

Fujos de lodos:

b. Longitud de catada afectada: m

OBRAS DE CONTENCIÓN

Obras	Tipo de daño	Dimensiones	No. Foto	Observaciones
General	Sobrecargas			
	Asestamientos			
	Grietas			
	Desplome			
	Volcamiento			
	Fisuras			
	Grietas			
	Fracturamiento			
	Filtraciones			
	Vegetación			
Drainajes insuficientes				
Drainajes obstruidos				
Riesgo (Inestabilidad)	Obstrucción de bermas			
	Fujos			
	Inestabilidad del terreno			
Materiales en contacto	Juntas flex			
	Refuerzo expuesto			
	Segregación			
	Hormigueros			
	Erosiones			
	Carbonatación			
	Contaminación del concreto			
Fracturas	Punzonamiento			
	Pérdida de juntas			
	Fluoreamiento de placa			
Materiales de refuerzo	Pendientes			
	Asestamiento			
	Exposición del refuerzo			
	Malla			
Obreros	Corrosión			
	Rotura de la malla			
	Pérdida del recubrimiento			
	Agregados			
	Mala compactación			
Tamaño inadecuado				

Ilustración 12. Formato de inventario de obras de estabilización de INVIAS.

INVENTARIO DE INESTABILIDADES DE LADERAS Y TALUDES			
DATOS GENERALES			
Ficha:			
Fecha inventariado:			
Localización:			
pK:			
Coordenadas UTM	X:	Y:	Z:
FOTOS:			
CARACTERÍSTICAS DE LA ESTABILIDAD			
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			
TIPO DE ROTURA			
<input type="checkbox"/> Desprendimiento	Caída de una masa de suelo o roca durante parte de su trayectoria descendiendo por aire.		
<input type="checkbox"/> Vuelcos	Movimiento a rotación hacia el exterior de un conjunto de bloques alrededor de un eje pivotante situado debajo del centro de gravedad de la masa movida.		
<input type="checkbox"/> Deslizamientos	Movimiento de una masa de suelo o de roca de forma rígida a través de una superficie que supera la resistencia al corte del material. <input type="checkbox"/> Rotacionales: la superficie de rotura es curva con concavidad hacia arriba. <input type="checkbox"/> Translacionales: la superficie de rotura es plana y la trayectoria es rectilínea.		
<input type="checkbox"/> Expansiones laterales	Roturas donde el movimiento predominante es la extensión lateral.		
<input type="checkbox"/> Movimientos de flujo	Son propios de suelo y se asemejan al movimiento que presentan los fluidos viscosos. Las partículas no se desplazan ni en trayectorias paralelas ni a la misma velocidad. <input type="checkbox"/> Reptación: movimientos extremadamente lentos y continuos de partículas de suelo y roca de forma superficial y que se ve favorecido por variaciones de humedad y del ciclo del hielo-deshielo. <input type="checkbox"/> Soliflujión: fenómeno complejo donde el suelo fluye deformándose apareciendo superficies de cizalla. <input type="checkbox"/> Coladas de barro: movimientos elongados y lobulados en su pie, dando un relieve positivo sobre la superficie del terreno. <input type="checkbox"/> Coladas de derrubios: característicos de materiales con un elevado porcentaje de partículas de granulometría gruesa. Cuando es rápido y progresivo se utiliza el término avalancha.		
<input type="checkbox"/> Movimientos complejos	Combinación de más de un tipo de movimientos.		
<input type="checkbox"/> Otros			
<input type="checkbox"/> Corrección por drenaje	<input type="checkbox"/> Drenaje superficial <input type="checkbox"/> Drenaje profundo (drenes horizontales, pozos verticales, galerías, etc.)		
<input type="checkbox"/> Corrección por elementos resistentes	<input type="checkbox"/> Anclajes/bulones <input type="checkbox"/> Muros		
<input type="checkbox"/> Mallas			
Otros:			
NOTAS:			
AFECCIÓN A LA CARRETERA			
Afección a la carretera			<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO
Descripción de la afección:			
OBSERVACIONES:			

Ilustración 13. Formatos de inventario de inestabilidades Universidad De Granada. [14]

4.1.3. Diseño de planes de vuelo.

De la fase de trabajo de campo se obtiene como principal insumo la escogencia de los taludes de estudio según la amenaza a deslizamiento que representan. Por lo cual se inicia la fase de creación de los planes de vuelo. Esta etapa corresponde a la selección inicial de los drones con los que se va a realizar la toma de información, toda su caracterización y capacidades técnicas y software de captura y procesamiento de la información. Una vez identificada la capacidad técnica de los drones y la metodología de adquisición y procesamiento de la información, se procede a realizar los planes de vuelo. En estos planes de vuelo se identifica el área que se considera debe ser estudiada para las zonas escogidas como zonas de estudio, las alturas a las cuales debe ser llevado a cabo el vuelo, la velocidad del dron, ángulo de inclinación de la cámara, traslape de imágenes y tipología de vuelo (malla simple o malla doble). Estos planes de vuelo permiten la optimización del tiempo a la hora de iniciar la fase de recolección de información ya que permite generar un procedimiento a seguir en terreno y también permite definir la periodicidad con la que se llevaran a cabo los vuelos y el tiempo entre cada vuelo multitemporal. Adicionalmente en esta fase se plantean los diseños de los GCPs o puntos de control en tierra los cuales permiten obtener mejores calibraciones a la hora de realizar el procesamiento de la información.

4.1.4. Ejecución de los planes de vuelo.

Una vez realizados los planes de vuelo, se procede a la ejecución de los vuelos. En esta fase se busca obtener las imágenes de las áreas de estudio por medio de los VANT. Por tanto, en esta etapa se realizan los vuelos de cada una de las zonas seleccionadas durante un día escogido pertinentemente y en diferentes periodos de tiempo. En esta etapa se busca la calibración de los VANT, la instalación de los puntos de control en tierra y la ejecución de los vuelos para la obtención de imágenes de la zona de estudio. Las imágenes de alta calidad obtenidas en cada uno de los planes de vuelo son almacenadas por el dispositivo VANT, para su procesamiento posterior.

4.2. Herramientas o procesos generales de la metodología.

Una vez obtenida toda la información inicial del desarrollo metodológico se procede a el procesamiento de información por medio de herramientas seleccionadas. A continuación, se busca describir que procedimientos se hacen necesarios para la obtención de resultados significativos en el estudio:

4.2.1. Procesamiento de imágenes aéreas:

Con los insumos obtenidos en los vuelos realizados a cada uno de los taludes en estudio (i.e., imágenes aéreas) se procede a su procesamiento. Para este procesamiento se tiene establecido utilizar la herramienta de Pix4D Mapper, un software de pago obtenido por la universidad. Pix4D Mapper es un software de fotogrametría para el procesamiento de imágenes aéreas obtenidas por medio de vehículos aéreos no tripulados. En este software se introducen las imágenes obtenidas por el dron las cuales se encuentran debidamente georreferenciadas, y por medio de horas de procesamiento, que se establecen según la calidad de los productos que quieran ser obtenidos, se obtienen modelos digitales de superficie, modelos digitales de elevación y ortofotografía u ortomosaico de alta precisión. Estos modelos serán insumos para generar los análisis de variabilidad y cambios geométricos de los deslizamientos estudiados a través del tiempo, ya que dada su alta calidad de imagen y precisión permite obtener información geométrica de grandes áreas de terreno con una precisión de centímetros.

4.3. Salidas generales de la metodología

Con el procesamiento de las imágenes se obtienen los modelos digitales de elevación y superficie, los cuales a través de software de sistemas de información geográfico pueden ser tratados para obtener múltiple información como pueden ser las diferencias de los modelos digitales de superficie para identificar cambios en el terreno. En este caso, en los modelos digitales se busca trazar líneas de referencia que permitan visualizar los perfiles topográficos de las zonas en estudio. A través de gráficas comparativas se busca idealizar los cambios que sufrió el perfil topográfico de un mismo talud en diferentes tiempos de estudio con la finalidad de detectar los posibles cambios geométricos que está sufriendo la zona en estudio. Estos cambios geométricos pueden indicar la estabilidad o no

del talud y posibles desprendimientos de masa o deslizamientos. La finalidad de esta investigación es evaluar la metodología planteada para monitorear zonas con amenaza a deslizamiento por medio de vehículos aéreos no tripulados que ofrecen economía y más versatilidad en la evaluación de taludes con amenaza a deslizamiento.

El alcance de esta investigación se limita a implementar esta metodología en una zona problema, previamente identificada como una sección de corredor vial con antecedentes de deslizamientos. Se establece un tiempo de estudio y monitoreo no mayor a cuatro meses, esto con el fin de perfeccionar la metodología y poder validar su efectividad y su complementación con el uso de drones. Finalmente se busca dejar ciertas pautas y recomendaciones que permitan la implementación en una sección de corredor vial durante un periodo de tiempo más prolongado.

5. IMPLEMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE METODOLOGÍA

5.1. Trabajo de recolección de información

El corredor vial denominado “Tona-El Mortiño” fue seleccionado como zona de estudio por múltiples factores:

- Cercanía de la zona a la ciudad de Bucaramanga para desplazamiento de equipos y personal.
- Denominación de vía terciaria la cual no cuenta con una concesión para mantenimiento y monitoreo dado los costos que esto implica.
- Antecedentes de la zona a deslizamientos con incluso pérdidas de vidas humanas.
- Zona con múltiples cambios de vegetación lo que hace más asertiva la implementación de la metodología en zonas de difícil estudio típicas de Colombia.
- Corredor vial en pésimas condiciones dada la inestabilidad permanente de las laderas y el terreno de banca de la vía.
- Climas extremos con temperaturas de hasta -10°C y 20°C lo cual repercute de gran manera en la estabilidad de los terrenos.
- Nivel freático alto dada su condición cercana a climas de paramo y la presencia de afluentes importantes que alimentan la represa de Tona.
- Es una zona que no se encuentra restringida por la normativa vigente colombiana para sobrevuelos con vehículos aéreos no tripulados hasta alturas de los 120 metros.
- Vía con múltiples fallas en el diseño, lo que genero zonas de alta amenaza a deslizamiento que como se ha evidenciado en algunos años, han llegado a cobrar la vida de muchas personas considerando la tasa poblacional con la que cuenta el municipio de Tona

El corredor vial en estudio denominado El Mortiño-Tona encuentra su punto inicial en la ruta nacional 66 una carretera de tipo transversal. Uno de los tramos viales de la ruta nacional 66 es el que comunica la ciudad de Bucaramanga-Santander con el municipio de Pamplona-Norte de Santander, que se encuentra a cargo de la Agencia Nacional De Infraestructura (ANI). Sobre este tramo mencionado, a la altura del kilómetro 16 se encuentra un desvío en la zona denominada “El Mortiño” donde inicia la vía que comunica con el municipio de Tona-Santander. Una vía municipal de tipo terciario la cual cuenta con aproximadamente 18.9 km denominada también por la

nomenclatura 66ST01, y que registra un porcentaje de vía pavimentada del 73%. (Ilustración 14) [27].

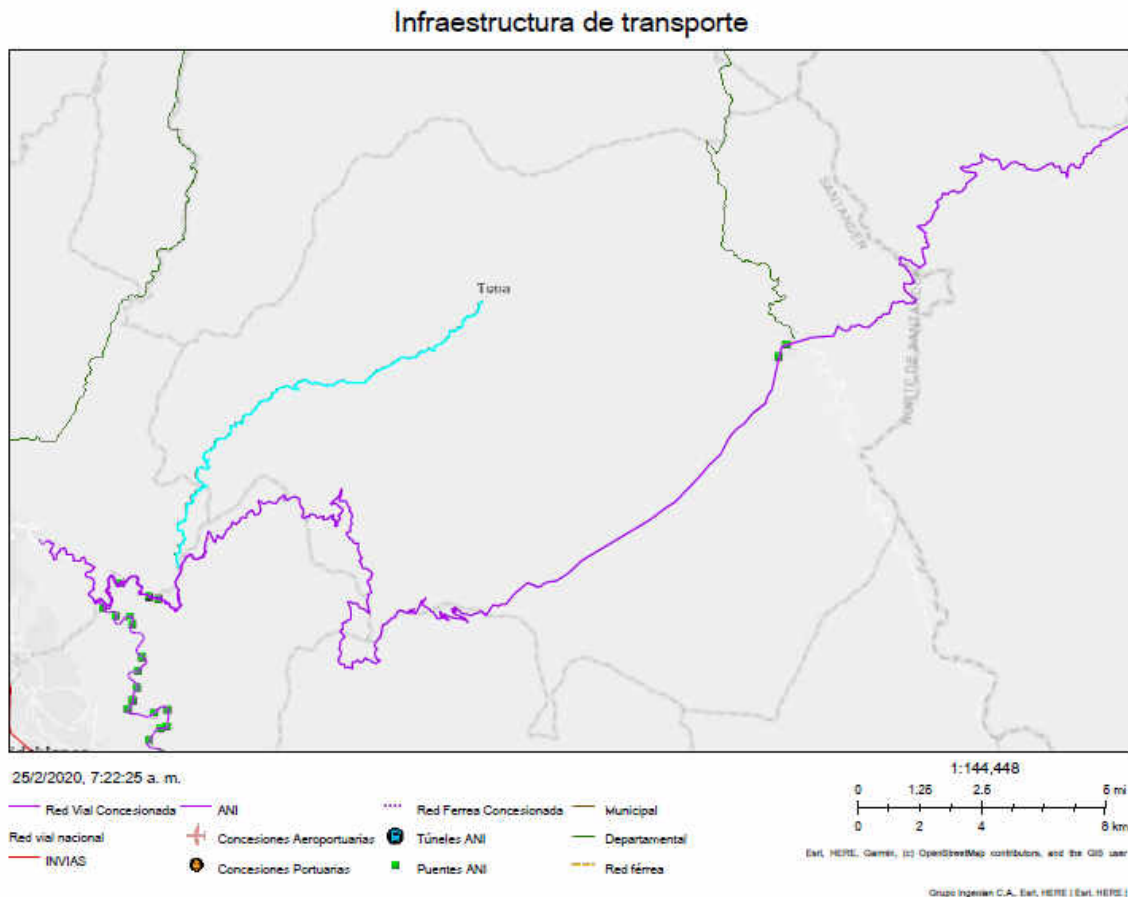


Ilustración 14. Ubicación del corredor vial en estudio. [28]

El municipio de Tona está ubicado en el departamento de Santander con una población de 7239 habitantes. Este municipio se encuentra establecido como zona de reserva dada la presencia del embalse de Tona que abastece de agua el área metropolitana de Bucaramanga. La Cabecera Municipal se encuentra en medio de tres Cerros Andinos, llamados el Palmar, el Molino y el Alto de Tomasa.

El Municipio de Tona se encuentra localizado en el Nororiente de la cuenca superior del río Lebrija, en la provincia de Soto, Departamento de Santander con coordenadas 7.201292, -72.967315. La cabecera municipal está ubicada a 37 Km de Bucaramanga, a 1909 m.s.n.m. y con una temperatura promedio de 18 grados centígrados [29]. Tona está ubicado en la cordillera Oriental y corresponde esta región a la parte alta. Está constituida con piso del cretáceo mezclado con rocas ígneas y rocas metamórficas lo que da un indicio de el alto porcentaje de erosión que pueden presentar primordialmente las masas de suelos superficiales (arenas y limos) dado el clima y su estructura geológica (Ilustración 15) [29].



Ilustración 15. Mapa geológico municipio de Tona-Santander. [30]

En este corredor vial se presentan constantes deslizamientos de tierra como lo dejan entre ver las principales noticias que recorren el país [31]. Sin embargo, el más crítico ocurrió en agosto de 2011 cuando un alud de tierra en el kilómetro 15 de la vía sepulso un bus municipal en el cual se encontraban 6 personas, las cuales fallecieron.





Ilustración 16. Antecedentes de deslizamiento en la vía de estudio. (Imagen suministrada Julián Galvis)

Teniendo todo lo mencionado anteriormente presente, se adoptó inicialmente un formato planteado por la Universidad De Granada España que plantea la metodología evaluada. El objetivo del formato es realizar una fase de recolección de información de campo en la cual se identificaron las diferentes inestabilidades y zonas de ladera del corredor vial. Con esta información se determinaron las zonas de talud con condiciones de amenaza a deslizamiento y se realizó la evaluación metodológica de estos. En los anexos se presenta el formato tipo, tomado del estudio de la Universidad De Granada.

5.2. Trabajo de campo

Una vez acoplado el formato de inventario de inestabilidad de laderas y taludes se realizó la investigación de campo planteada en el diseño metodológico.

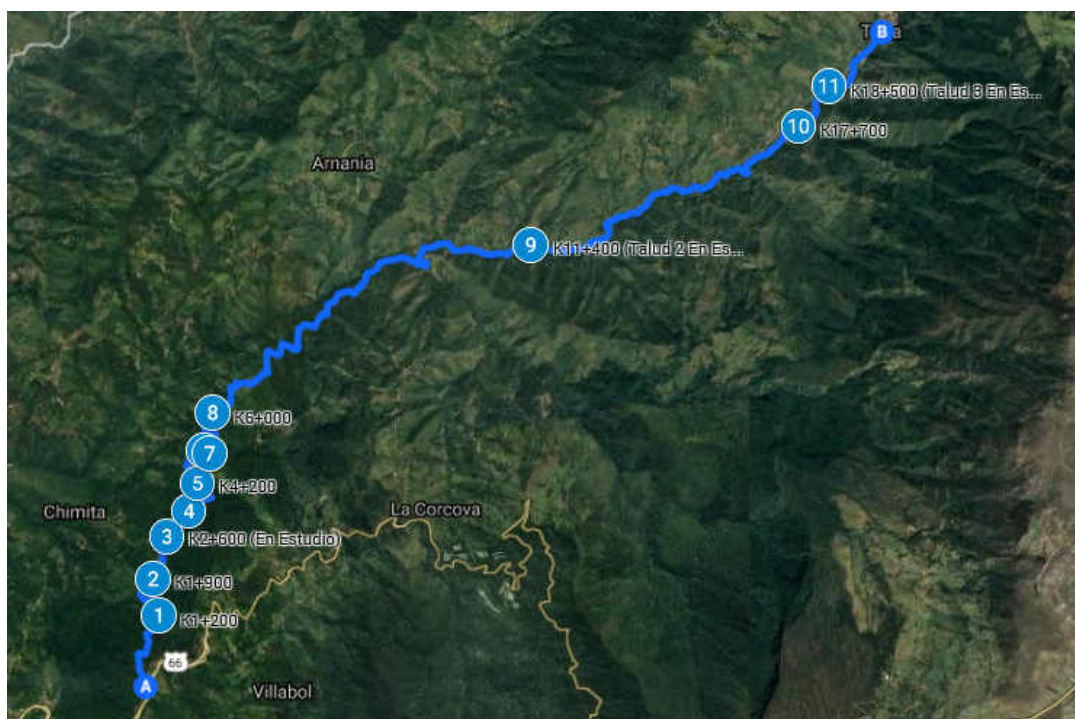


Ilustración 17. Inventario de zonas de ladera vía Tona - El Mortiño

Para la investigación se realizó el recorrido completo del corredor vial en estudio, recopilando información principal de las zonas de ladera encontrada. En resumen, se recopiló información de 11 puntos a lo largo del tramo vial tomando como base el formato de inventario de taludes (**Ilustración 17**). Se realizó un análisis de las patologías encontradas en los 11 puntos los cuales representan zonas de ladera y alta pendiente, al igual que se llevó a cabo un inventario fotográfico de estos. A continuación, se presenta de manera organizada la información obtenida del inventario de deslizamientos en el corredor vial:

- **K1+200**

Identificado con coordenadas 7.12999, -73.05683, se ubica la primera zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser una zona que sufrió grandes afectaciones en el corredor vial debido a un deslizamiento pasado, sin embargo, no se evidencian señales de inestabilidad.

Se denota principalmente materiales arenosos con alta humedad y nivel freático (**Ilustración 18**). Deslizamiento caracterizado por un movimiento traslacional en el cual la superficie de falla es plana y la trayectoria es rectilínea, el cual sobrepasa la vía aproximadamente dos metros por encima (no se retiró el material del deslizamiento).



Ilustración 18. K1+200. Vía bajo el material de deslizamiento a inicio y fin. (Alta presencia de nivel freático)

Se determina como factores determinantes para el deslizamiento el clima de la zona y el alto porcentaje de humedad que presenta el terreno, que al ser arenoso disminuye su ángulo de fricción.



Ilustración 19. K1+200. Imagen de dron a 80 metros de altura. Se denota zona con deslizamiento de inicio a fin.

Cuenta con unas medidas de protección artesanales las cuales consisten en una revegetalización con flora de diferentes tipos y adicionalmente una terraza sobre la corona del talud. Se considera actualmente estable dada la revegetalización y estabilización natural por pendiente (**Ilustración 20**).



Ilustración 20. K1+200. Revegetalización floral de la zona de ladera y pendiente.

- **K1+900**

Identificado con coordenadas 7.13447, -73.05755, se ubica la segunda zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser un talud con alta pendiente, descubierto de vegetación y con una base de material rocoso. No se evidencian señales de inestabilidad.

Se denota principalmente materiales rocosos y arcillas con alta presencia de aguas y nivel freático. Ladera caracterizada por un movimiento en masa de desprendimiento y caída de una masa de suelo o roca la cual durante parte de su trayectoria desciende por el aire. No se detecta afectación alguna al tramo vial de la zona (**Ilustración 21**).



Ilustración 21. K1+900. Vía de inicio a fin sin afectaciones.

Se determina como principales factores determinantes para desencadenar un deslizamiento factores naturales como la meteorización de la roca, la pendiente elevada y la falta de vegetación que genera escorrentías superficiales e infiltración aumentando la presión de poros. Como factores humanos se observa la presencia de excavaciones por obra para retiro de material y generación de corredores peatonales para subir a la montaña.



Ilustración 22. K1+900. Zona de ladera rocosa con alta pendiente y acción humana.

No cuenta con ninguna medida de protección, sin embargo, se considera una posibilidad de movimiento baja dada su condición de rocas areniscas en proceso de degradación por los agentes ambientales, que indican un antiguo deslizamiento rotacional superficial de la masa de suelo sobre el estrato de roca (**Ilustración 22**).

- **K2+600**

Identificado con coordenadas 7.13975, -73.05586, se ubica la tercera zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser un talud con una pendiente muy elevada, descubierto de vegetación, pero rodeado de una zona boscosa lo cual le confiere una humedad y nivel freático que generan escurrimientos de agua en la ladera (**Ilustración 23**).

Se denota principalmente materiales arenosos con alta presencia de humedad. Ladera caracterizada por un movimiento en masa de flujo o solefluación en los cuales el suelo fluye apareciendo superficies de cizalla. Se detecta un deslizamiento superficial de material sobre la vía, sin embargo, dada su condición descubierta en una zona boscosa se concluye que hubo un deslizamiento anterior y sigue en movimiento el terreno, es decir, no se ha logrado estabilizar naturalmente (**Ilustración 24**).



Ilustración 23. K2+600. Talud con alta pendiente, materiales arenosos y humedad elevada.

Se determina como principales factores determinantes para desencadenar un movimiento en masa la erosión ocasionada por el agua, la pendiente elevada y la falta de vegetación que genera escorrentías superficiales e infiltración aumentando la presión de poros.

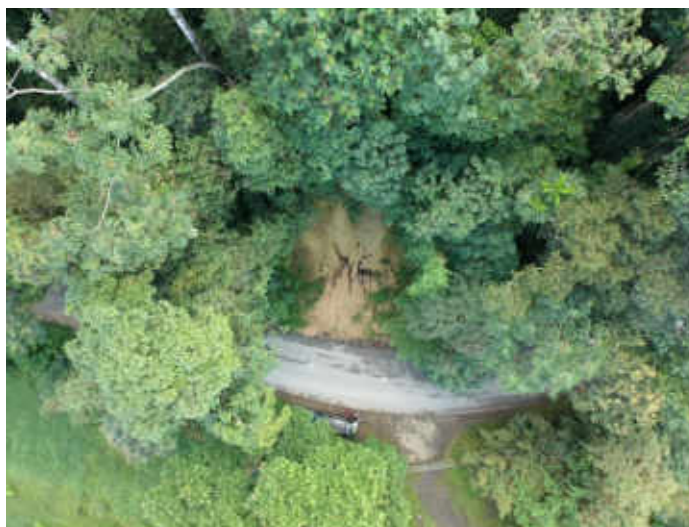


Ilustración 24. K2+600. Dron a 50 metros de altura. Se denota zona boscosa con un claro en el deslizamiento.

No cuenta con ninguna medida de protección, y dada su condición de arena con alto contenido de saturación y elevada pendiente se considera un movimiento antiguo, lo que representa alta probabilidad de deslizamiento. Este deslizamiento puede ser mayor al evidenciado dado que puede presentarse desde una parte más alta de la ladera.

- **K3+300**

Identificado con coordenadas 7.14271, -73.05315, se ubica la cuarta zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser un talud con una pendiente media, descubierto de vegetación, pero rodeado de una zona boscosa lo cual le confiere una humedad y nivel freático muy elevado.

Se denota principalmente materiales arenoso arcillosos con alta presencia de aguas y nivel freático. Ladera caracterizada por un movimiento en masa de flujo o reptación en los cuales se presentan movimientos extremadamente lentos y continuos de partículas de suelo y que se ve favorecido por variaciones de humedad. No se detecta una invasión de material sobre la vía, sin embargo, dado que tiene un escarpe principal se concluye que hubo un deslizamiento anterior pero el terreno se ha logrado estabilizar naturalmente (**Ilustración 25**).



Ilustración 25. K3+300. Talud con pendiente media, material areno arcilloso y humedad media.

Se determina como principales factores determinantes para desencadenar un movimiento la erosión ocasionada por el agua, la pendiente elevada y la falta de vegetación que genera escorrentías superficiales e infiltración aumentando la presión de poros.



Ilustración 26. K3+300. Zona de ladera arenosa con pendiente media y poca vegetación.

No se evidencian señales de inestabilidad, no cuenta con ninguna medida de protección, y dada su condición de arena con alto contenido de saturación representa una baja probabilidad a deslizamiento, sin embargo, se puede observar en la geometría de este que ya se encuentra en condiciones estabilizadas naturalmente (**Ilustración 26**).

- **K4+200**

Identificado con coordenadas 7.14626, -73.05209, se ubica la quinta zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser un talud bastante cubierto de vegetación y con una humedad elevada, sin embargo, tiene una zona de grieta tipo canal por la cual, desde la cabeza del talud, se erosiona material y fluye hasta la base de este. Este flujo de material constante sobre el mismo punto ha erosionado la banca de la vía, cunetas, y bordes, generando una zona de inestabilidad de la banca de la vía.

Se denota principalmente materiales arenoso arcillosos con alta presencia de material grueso. Ladera caracterizada por un movimiento en masa de flujo o coladas de derrubios en los cuales se presentan movimientos extremadamente rápidos y progresivos de partículas de suelo y material grueso. Se detecta una gran afectación a la vía, daños sobre la carpeta asfáltica de rodadura, desprendimiento de bordes de vía y erosión a la banca de esta. Se observa que dado el estado de la vía este tramo ha sufrido obstrucción por el flujo de materiales desde la cabeza del talud (**Ilustración 27**).

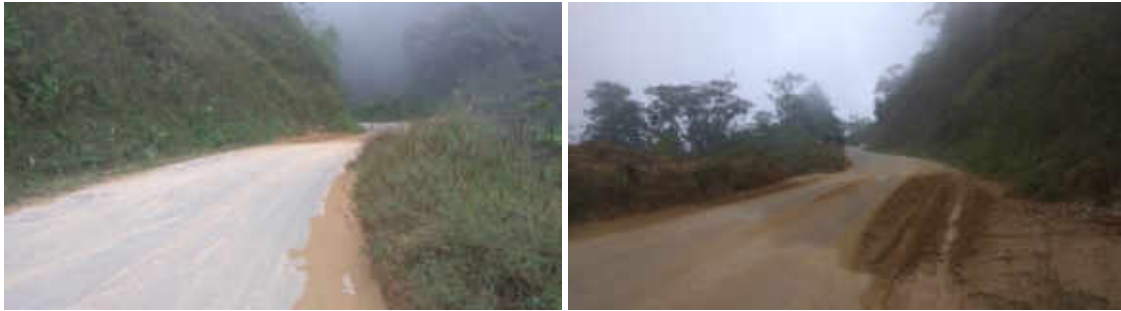


Ilustración 27. K4+200. Vía de inicio a fin con afectaciones por flujo de material. Alta presencia de humedad y neblina.

Se determina como principales factores determinantes para desencadenar un movimiento la meteorización de la cabeza del talud y su erosión por acción del agua. Al mismo tiempo la banca sobre la que se apoya la vía es insuficiente y presenta una alta erosión lo que puede ocasionar pérdida de soporte para la vía.



Ilustración 28. K4+200. Material de flujo parte baja del talud (Izquierda). Fotografía de dron erosión parte alta de la ladera (Derecha).

No cuenta con ninguna medida de protección, y dada su alta afectación a la banca de la vía y el flujo continuo de agua y material erosionado, representa una alta probabilidad a deslizamiento y pérdida de banca. Sin embargo, a la hora de contemplarlo como una posible zona de estudio es imposible realizar vuelos de dron por la capacidad técnica del mismo dada la presencia de vegetación y neblina que obstaculizan la toma de imágenes aéreas. Aun si las condiciones climáticas fueran optimas se dificulta la toma de información por la presencia de vegetación, por lo que se descarta el monitoreo a esta zona de ladera (**Ilustración 29**).



Ilustración 29. K4+200. Fotografía dron; erosión de la banca de la vía y la alta presencia de neblina y vegetación.

- **K4+900**

Identificado con coordenadas 7.1503, -73.05124, se ubica la sexta zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser un talud con pérdida completa de la vegetación y con una humedad elevada, presenta una alta erosión y tiene una formación similar a los estoraques.

Se denota principalmente materiales arenoso arcillosos con alta presencia humedad. Ladera caracterizada por un movimiento en masa de flujo o solefluxión en los cuales se presenta un fenómeno complejo en donde el suelo fluye deformándose y apareciendo superficies de cizalla. Se detecta una gran afectación a la vía, invasión de la zona de calzada con flujos de material y por daños sobre superficie de pavimento se evidencia que en algún momento hubo movimientos en masa de terreno (**Ilustración 30**).



Ilustración 30. K4+900. Afectaciones a vía desde inicio a fin e invasión de material.

La meteorización de la cabeza del talud y su erosión por acción del agua se determinan como principales factores determinantes para desencadenar un movimiento. Al mismo tiempo presenta pérdida total de vegetación lo que influye aún más en el fenómeno de escorrentías y erosión. No cuenta con ninguna medida de protección, y dada su alta afectación a la vía y el flujo continuo de agua y material erosionado, representa una alta probabilidad de deslizamiento (**Ilustración 32**).



Ilustración 31. K4+900. Zona de ladera tipo estoraque con superficie en cizalla por flujo de material.



Ilustración 32. K4+900. Fotografía dron; superficies de cizalla y erosión en la parte alta del talud.

- **K5+000**

Identificado con coordenadas 7.14995, -73.05045, se ubica la séptima zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser un talud con pérdida completa de la vegetación y con una humedad elevada, presenta una alta erosión y evidencia una superficie de falla.

Se denota principalmente materiales arenoso arcillosos con alta presencia humedad. Ladera caracterizada por un movimiento en masa de deslizamientos rotacionales en los cuales se evidencia una superficie de rotura curva con concavidad hacia arriba. Se detecta una gran afectación a la vía, invasión de la zona de calzada con flujos de material y por daños sobre superficie se evidencia que en algún momento hubo un gran movimiento en masa de terreno que ocasiono la completa destrucción de la vía (**Ilustración 33**).



Ilustración 33. K5+000. Superficie de falla de talud ya estabilizado.

Se determina como principales factores determinantes para desencadenar un movimiento la meteorización de la cabeza del talud y su erosión por acción del agua. No presenta vegetación y se evidencia una afectación por excavaciones de obra civil. Cuenta con medidas de protección de banca de tipo muro de contención y muro gaviones por lo que se evidencia una zona ya estabilizada después de un gran movimiento en masa lo que representa una amenaza al deslizamiento mitigada en la que no se evidencian señales de inestabilidad. (**Ilustración 35**).

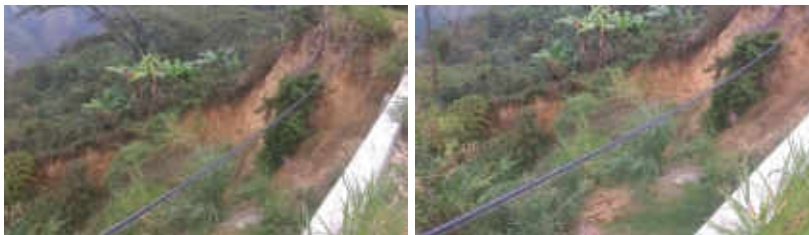


Ilustración 34. K5+000. Superficie de falla talud ya estabilizado zona baja de la vía.



Ilustración 35. K5+000. Muro de contención y muros gaviones de zona ya estabilizada.

Presenta antecedentes de deslizamiento según lo demostrado con un registro fotográfico del año 2010 en una fuerte temporada de lluvias.



Ilustración 36. K5+000. Antecedentes a deslizamiento del año 2010. (Imagen suministrada Julián Galvis)

- **K6+000**

Identificado con coordenadas 7.15483, -73.0501, se ubica la octava zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser un talud con un corte vertical a 90° y presencia de humedad.

Se denota principalmente materiales arenoso arcillosos con moderada presencia humedad. Ladera caracterizada por un movimiento en masa de desprendimientos en los cuales una masa de suelo o roca durante parte de su trayectoria desciende por el aire. Se detectan leves invasiones de material sobre la vía (**Ilustración 37**).



Ilustración 37. K6+000. Inicio y fin de la vía sin afectaciones.

Se determina como principales factores determinantes para desencadenar un movimiento la meteorización de la cabeza del talud y su erosión por acción del agua. No presenta vegetación y se evidencia una afectación por excavaciones de obra civil en un corte de 90°. Aunque no cuenta con medidas de protección dada su baja altura no representa una amenaza a deslizamiento crítica (**Ilustración 39**).



Ilustración 38. K6+000. Superficie de falla y corte de vía perpendicular.



Ilustración 39. K6+000. Presencia de vegetación en parte baja que indica que no ha habido deslizamientos.

Presenta antecedentes de deslizamiento según lo demostrado con un registro fotográfico del año 2010 en una fuerte temporada de lluvias.

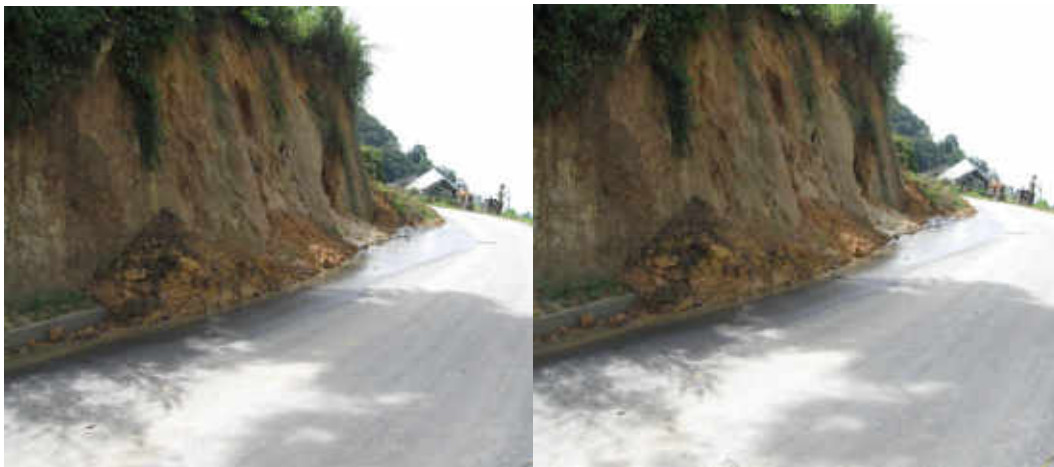


Ilustración 40. K6+000. Antecedentes a deslizamiento del año 2010. (Imagen suministrada Julián Galvis)

- **K11+400**

Identificado con coordenadas 7.17557, -73.01058, se ubica la novena zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser un talud con alta pendiente y de gran altura. Con caídos y fluidos desde la parte superior del talud.

Se denota principalmente una base de talud rocosa, pero con una alta cantidad de material deslizado arenoso simplemente sobrepuesto en el talud. Ladera caracterizada por un movimiento en masa de flujos superficiales de suelo dada su base en roca, principalmente de tipo reptación, los

cuales son movimientos extremadamente lentos y continuos de partículas de suelo y roca de forma superficial que se ve favorecido por variaciones de humedad. Se detectan invasiones de material a la vía lo que puede ser un indicio de una futura afectación (**Ilustración 41**).



Ilustración 41. K11+400. Inicio y fin de la vía con invasiones de material.

Se determina como principales factores determinantes para desencadenar un movimiento la meteorización de la cabeza del talud y su erosión por acción del agua. Adicional a esto el material arenoso sin protección de vegetación tiene una alta probabilidad de erosión (**Ilustración 42**).



Ilustración 42. K11+400. Material acumulado sobre la superficie del talud con amenaza a movimiento y deslizamiento.



Ilustración 43. K11+400. Erosión en la parte alta y baja del talud con gran cantidad de material depositado.

No presenta vegetación alguna y se evidencia una afectación por excavaciones de obra civil en un corte vertical. No cuenta con ningún tipo de medida de protección y dada su gran altura y zonas de

acumulación de material se considera que representa una gran amenaza a deslizamiento y caídos que puede afectar el corredor vial (**Ilustración 43**).

Presenta antecedentes de deslizamiento según lo demostrado con un registro fotográfico del año 2010 en una fuerte temporada de lluvias.



Ilustración 44. K11+400. Antecedentes a deslizamiento del año 2010. (Imagen suministrada Julián Galvis)

- **K17+700**

Identificado con coordenadas 7.19009, -72.97727, se ubica la décima zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser un talud con alta pendiente y de gran altura. Con caídos y fluidos desde la parte superior del talud.

Se denota principalmente un talud rocoso con una alta cantidad de caídos y rocas. Ladera caracterizada por movimiento en masa de desprendimiento dada su estructura rocosa, principalmente de caídas de una masa de suelo o roca durante parte de su trayectoria desciende por aire. Se detectan invasiones de material a la vía, sin embargo, la punta del talud no es el borde de vía por lo que tiene una gran zona de acumulación de material que permite que los caídos no invadan la vía. De igual manera la forma que tiene la ladera permite evidenciar que ya se presentó un gran movimiento en masa en la zona dada sus superficies de falla (**Ilustración 45**).



Ilustración 45. K17+700. Zona de vía con invasiones de material (Izquierda). Zona de acumulación de caídos (Derecha)

Se determina como principales factores determinantes para desencadenar un movimiento la meteorización de la cabeza del talud y su erosión por acción del agua. Adicional a esto el material rocoso sin protección de vegetación tiene una alta probabilidad de erosión y desprendimientos.



Ilustración 46. K17+700. Material acumulado sobre la superficie del talud con amenaza a caídos y zona de acumulación.



Ilustración 47. K17+700. Erosión en la parte alta y baja del talud. Superficies de falla de un deslizamiento pasado.

No presenta vegetación alguna además de ser un talud de gran altura y pendiente elevada. No cuenta con ningún tipo de medida de protección superficial. El talud no representa una alta amenaza a movimientos en masa de deslizamiento que afecte el corredor vial a pesar de su caracterización por caídos, la creación de una zona de acumulación de estos y la identificación de un posible deslizamiento ya ocurrido (**Ilustración 47**).

- **K18+500**

Identificado con coordenadas 7.19502, -72.9734, se ubica la onceava zona de ladera del corredor. Se caracteriza principalmente por ser el talud más grande en estudio con alta pendiente y de gran altura. Presenta tres deslizamientos de terreno los cuales según la caracterización ocurrieron anteriormente pero tampoco se han logrado estabilizar.

Se denota principalmente una estructura de talud rocosa con una gran masa de terreno deslizada pero inestable. Ladera caracterizada por un movimiento en masa de deslizamientos traslacionales donde la superficie de rotura es plana y la trayectoria es rectilínea. Se encuentra en una vía desviada, a 30 metros del corredor principal de estudio y su deslizamiento afecta principalmente una zona de río por el que pasa un puente de la vía en mención. De igual manera la forma que tiene la ladera permite evidenciar que ya se presentó un gran movimiento en masa. El terreno no se encuentra estabilizado, por lo que un gran deslizamiento podría ocasionar una avalancha que afecte los cimientos del puente (**Ilustración 48**).



Ilustración 48. K18+500. Zona de montaña con tres deslizamientos críticos.

Se determina como principales factores determinantes para desencadenar un movimiento la meteorización de la cabeza del talud y su erosión por acción del río en la base del talud. Adicional a esto el material rocoso sin protección de vegetación tiene una alta probabilidad de erosión y desprendimientos.



Ilustración 49. K18+500. Fotografía dron de gran deslizamiento en montaña.

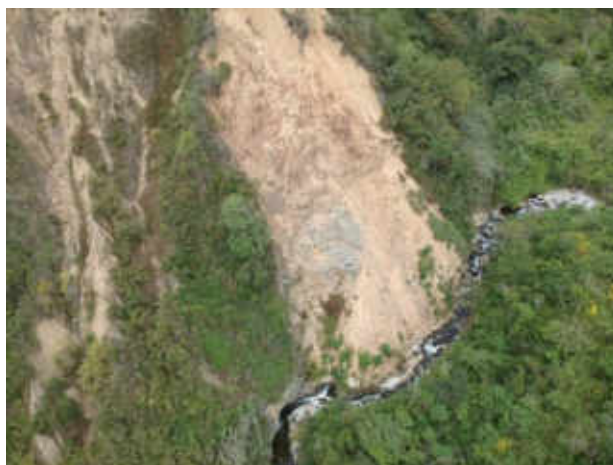


Ilustración 50. K18+500. Incidencia del deslizamiento sobre el río en el que pasa el puente de la vía en estudio.

No presenta vegetación alguna además de ser un talud de gran altura y pendiente elevada. No cuenta con ningún tipo de medida de protección superficial. Esta identificado como un talud con una amenaza crítica a deslizamiento dada la cantidad de masa desprendida y deslizada. Dicho deslizamiento podría afectar no solo la vía sino colapsar el lecho del río provocando una posible avalancha (Ilustración 50).

Tabla 2. Resumen factores detonantes para amenaza a deslizamiento.

Ubicación	Elevada pendiente (>50°)	Material arenoso	Humedad del terreno	Erosión en la cabeza	Material depositado superficialmente	Ausencia de vegetación
K1+200		X	X			
K1+900	X		X			X
K2+600	X	X	X	X	X	X
K3+300		X	X		X	
K4+200	X	X	X	X		
K4+900		X	X	X		X
K5+000			X	X		X
K6+000		X		X		X
K11+400	X	X	X	X	X	X
K17+700	X			X		X
K18+500	X	X	X	X	X	X

Los deslizamientos en el Tramo Tona-El Mortiño de la carretera 66ST01, son relevantes dado que la mayoría de los terrenos son terrenos arenosos y se encuentra depositados superficialmente sobre la roca, ocasionando que generalmente se desarrollen movimientos de flujo superficial del terreno los cuales son críticos como amenaza para los corredores viales. Los taludes que representan mayor amenaza a un movimiento en masa de algún tipo son los ubicados en los K18+500, K11+400 y K2+600. Esto se evidencia en la **Tabla 2** en la cual los taludes mencionados cumplen con todos los factores detonantes para amenaza a deslizamiento. Los factores condicionantes están asociados con el contraste litológico roca y depósitos de vertientes o suelos de origen antrópicos que se han desestabilizado naturalmente. En zonas concretas la elevada pendiente de los taludes permite que el movimiento de flujo sea más fácil de realizar por un detonante. Adicional a esto podemos sumar la poca presencia de material vegetal que arraigue el suelo y evite la erosión. Como último factor asociado a la amenaza a deslizamiento se puede considerar el tipo de suelo arenoso que es más susceptible a procesos erosivos y el cual con la presencia de la presión de poros disminuye el ángulo de fricción y la poca cohesión con la que cuenta, esto conlleva al movimiento en masa de estos tipos de suelos. Los factores desencadenantes tienen que ver con los cambios climáticos, asociados a lluvia y granizadas. Según lo planteado anteriormente se puede por medio de la metodología de inventario de taludes y caracterización cualitativa, encontrar tres zonas que cumplen con todos los factores detonantes de amenazas a deslizamiento planteados por la metodología.

5.3. Diseño de planes de vuelo

Una vez seleccionadas las zonas de estudio consideradas con amenaza a movimientos en masa por posibles lluvias, se procedió a realizar los planes de vuelos.



Ilustración 51. Dron DJI MAVIC PRO PLATINUM

El VANT utilizado en los planes de vuelo se denomina DJI MAVIC PRO PLATINUM un dron de 4 hélices de diseño compacto (**Ilustración 51**). A continuación, se presentan sus especificaciones (**Tabla 3**)

Tabla 3. Especificaciones dron DJI MAVIC PRO PLATINUM.

Dimensiones	H83mm x W83mm x L198mm
Peso	1.62 lbs (734 g)
Velocidad máxima	40 km/h
Tiempo de vuelo máximo	30 minutos
Sistema de posicionamiento satelital	GPS / GLONASS
Precisión de medida	Vertical: +/- 0.1 m (cuando la posición de visión esta activa) o +/-0.5 m Horizontal: +/- 0.3 m (cuando la posición de visión esta activa) o +/-1.5 m
Sensor de cámara	1/2.3" (CMOS), Pixeles efectivos:12.35 M (Total pixeles:12.71M)
Tamaño de imagen	4000x3000
Estabilización	Cabeceo: -90° a +30° Giro: 0° o 90° (Horizontal y vertical) 3-ejes (Cabeceo, giro, guiño)

Con esta tipología de vehículo aéreo no tripulado se utilizó una aplicación móvil para realizar los planes de vuelo denominada Pix4D Capture. Esta aplicación permite planificar y realizar vuelos de vehículos aéreos no tripulados por medio de coordenadas determinadas o cuadros de área.

Para determinar las zonas de estudio con un término identificable se realizó la siguiente nomenclatura:

- Talud 1: K2+600
- Talud 2: K11+400
- Talud 3: K18+500

Cabe resaltar que estas zonas fueron escogidas por medio del trabajo de campo como las de mayor amenaza, y por tanto, el monitoreo se realizara únicamente a estos descartando los otros taludes y zonas de ladera encontradas dado que no representan una amenaza a deslizamiento.

Con la nomenclatura asignada a cada zona de estudio se determinaron las características del vuelo a realizar. Para esto se determinaron: (a) el área a registrar; (b) la inclinación de la cámara; (c) alturas de vuelo; (d) tipología de vuelo; (e) traslapo de imágenes; y (f) fechas en las que se realizaron los vuelos (para realizar una evaluación multitemporal). A continuación, se presentan las características de los planes de vuelos de cada uno de los taludes en estudio (**Tabla 4**)

La determinación del área de mapeo se hizo con base en las imágenes satelitales de la aplicación, permitiendo encerrar un rectángulo que incluyera el talud de estudio, el área sobre este y la zona de influencia. Dicha zona para el talud 1 y 2 es principalmente la vía y construcciones cercanas y para el talud 3 es la zona de río, la vía y los 3 deslizamientos detectados. Cabe resaltar que las áreas de vuelo indicadas en la tabla corresponden a los vuelos 2, 3 y 4 de los taludes 2 y 3. El vuelo número 1 de estos taludes se realizó con un área más pequeña la cual fue necesaria corregir dado que no se

contó con suficiente información de la parte alta del talud después del procesamiento de las imágenes.

Tabla 4. Especificaciones de planes de vuelo para zonas de estudio.

#	Área	Inclinación Cámara	Altura de vuelo	Tipología de vuelo	Traslapo de imágenes	Tiempo de vuelo	Numero de imágenes
Talud 1	67 m x 76 m	90°	80 m	Doble malla	80%	4 minutos 11 segundos	41
Talud 2	144 m x 149 m	90°	80 m	Doble malla	80%	10 minutos	131
Talud 3	122 m x 135 m	90°	120 m	Doble malla	80%	6 minutos	59

La inclinación de la cámara es 90° dado que se realizó fotogrametría de planta para realizar su conversión por métodos fotogramétricos a modelos de 3 dimensiones. Esta inclinación es la óptima para realizar este tipo de vuelos.

La altura de vuelo fue obtenida en la fase de trabajo de campo, allí se estableció por medio de un dron de baja categoría (DJI SPARK) las alturas sobre el nivel de vía en las que el dron podría realizar un sobrevuelo a la misma altura dentro del área a determinar. Para el talud 1 se determinó que sobre una gran área la altura a la que el dron podría volar horizontalmente sin obstrucciones era 80 metros, de igual forma para el talud 2 y 3 se determinó una altura de vuelo libre horizontal de 80 metros y 120 metros respectivamente. Cabe resaltar que para el talud 3 esta altura de vuelo es tan elevada dado que se cuenta con una zona de montaña sobre la cual se están presentando los deslizamientos.

Las tipologías de vuelos se determinan según los resultados esperados, así para un diseño de un modelo en planta (2D) se debe realizar una misión de malla simple. Dado que se pretende obtener resultados en 3D se realizó un vuelo de doble malla los cuales son más aptos para obtener modelos tridimensionales (**Ilustración 52**).

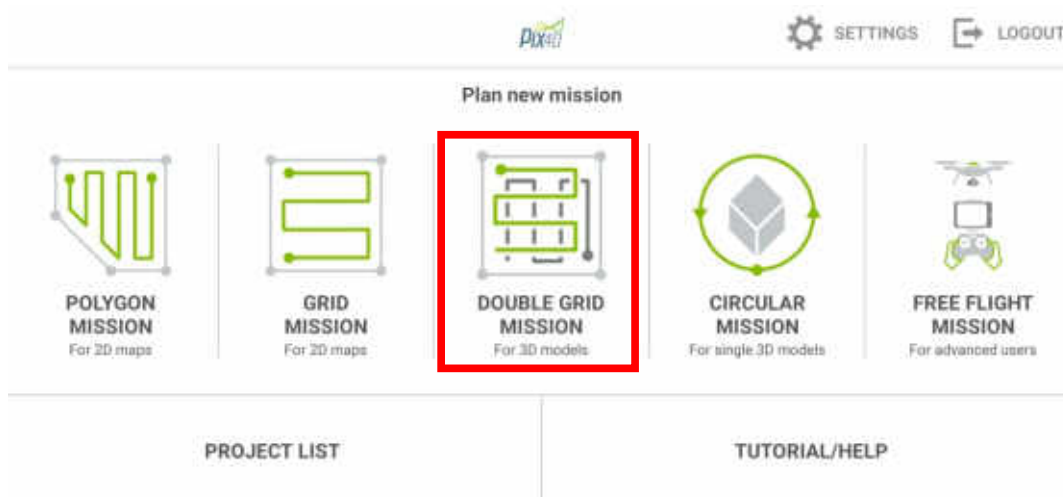


Ilustración 52. Planes de vuelo (Selección de misión doble malla)

El traslapo de las imágenes en la fotogrametría representa mayores tiempos de vuelo, pero permite una mayor correlación y precisión en los resultados finales de los modelos a obtener. Dado que el área a registrar era pequeña se optó por un traslapo del 80% es decir, entre cada imagen un 80% corresponde al área de la imagen anterior.

Los tiempos de vuelo se determinaron dada la velocidad del dron. Para estos vuelos debido a las alturas, los fuertes vientos y la precisión necesaria para los modelos finales se optó por una velocidad de vuelo baja entre 5 y 10 km/h, lo cual determinó los tiempos de vuelo registrados en la **Tabla 4**.

Finalmente, la aplicación utilizada realizó la correlación entre la velocidad, el traslapo y el área para determinar la cantidad de imágenes a obtener en los vuelos. A continuación, se presentan las imágenes de los planes de vuelos definidos para cada uno de los taludes.

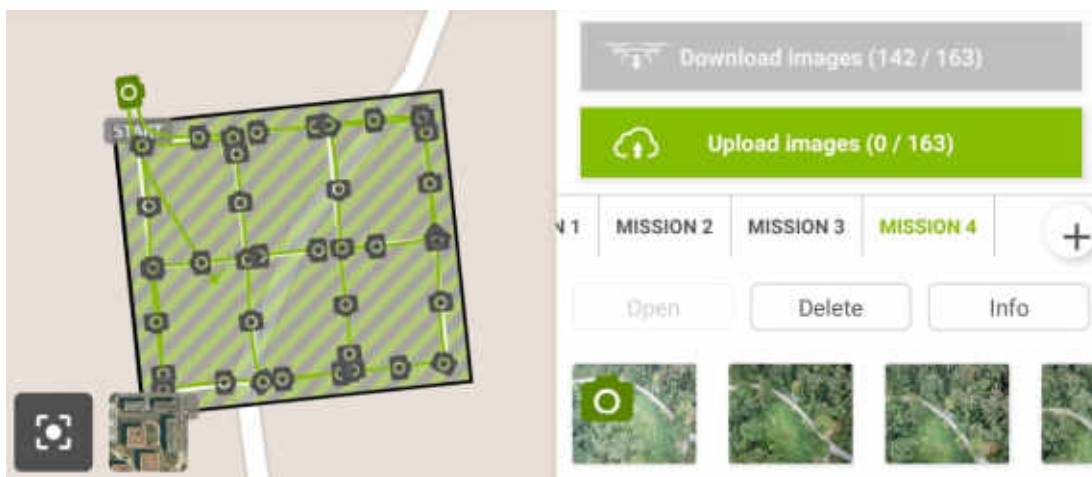


Ilustración 53. Plan de vuelo Talud 1. Área de 67 m x 76 m con 41 imágenes.

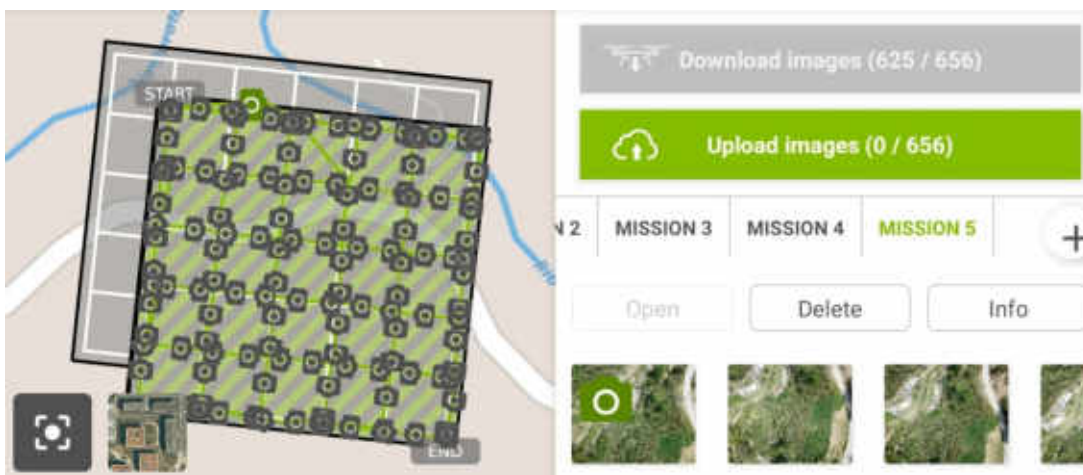


Ilustración 54. Plan de vuelo Talud 2. Área de 144 m x 149 m con 131 imágenes.

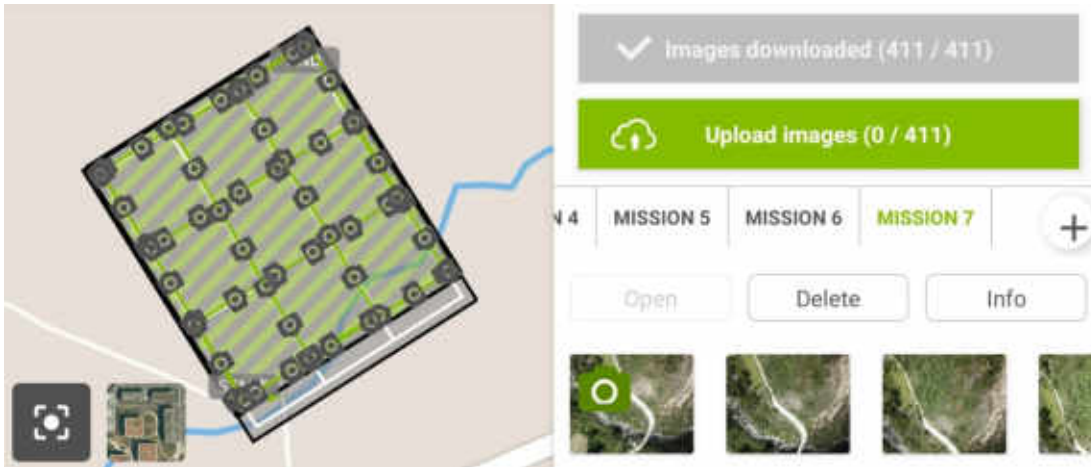


Ilustración 55. Plan de vuelo Talud 3. Área de 122 m x 135 m con 59 imágenes.

Con el desarrollo de esta tipología de planes de vuelo se asegura una precisión de 3cm por píxel lo cual en movimientos en masa representa una alta precisión. Las imágenes que se obtienen por medio de estos planes de vuelo fueron procesadas en la siguiente fase de la metodología con el software de procesamiento de imágenes.

Los puntos de control en tierra permiten obtener una mayor precisión y reoptimización de las imágenes capturadas. Adicionalmente dada una descalibración o toma errónea de datos por parte del dron se pueden relacionar todas las imágenes de diferentes tiempos en un solo sistema de coordenadas. Para estos vuelos dada la precisión que se puede obtener de 3 cm por píxel se instaló sobre una superficie fija (i.e., la vía en estudio) 3 recuadros rectangulares de 33 cm por 23 cm de color blanco y verde, esto permite contrastar los puntos con respecto al pavimento que en su mayoría es flexible (color negro). Los recuadros al tener forma rectangular permitieron la escogencia de un punto de esquina fijo en todas las ocasiones. Adicional a esto se dejaron marcas sobre el pavimento para que la instalación de los GCPs se hiciera sobre el mismo punto en los diferentes periodos de tiempo que se pretende hacer los vuelos.

Ya establecidos los planes de vuelo y los puntos de control en tierra se procedieron a establecer la frecuencia de los vuelos. La metodología planteada pretende establecer cambios geométricos en un mismo sector durante diferentes periodos de tiempo. A la fecha de la investigación se planeó realizar 4 vuelos con una frecuencia de 1 vuelo por mes. Con esto finalmente se obtuvieron 4 modelos digitales multitemporales de cada zona en estudio y por medio de estos se realizó la evaluación de los cambios geométricos. Adicional a esto se tuvo en cuenta el clima de la zona, dado que es una zona de paramo en la cual las precipitaciones se presentan con alta frecuencia, se hizo necesario escoger una temporada en la cual las lluvias sean escasas o nulas para facilitar que el DRON tenga condiciones óptimas de vuelo y visibilidad. La precipitación promedio registrada en el municipio de Tona según las estaciones de Tona, Berlín y Picacho entre los años de 1972 y 2015 es de 150 mm. A continuación, se presentan la frecuencia seleccionada para los planes de vuelo teniendo en cuenta los valores de precipitación promedio (**Tabla 5**).

Tabla 5. Fechas de los planes de vuelo según la precipitación.

#	Fecha	Precipitación (mm)	Observaciones
Vuelo 1	Noviembre 2019	140	Cada vuelo programado incluye un vuelo individual para cada uno de los taludes de estudio (12 vuelos en total al final de la investigación).
Vuelo 2	Diciembre 2019	54.3	
Vuelo 3	Enero 2020	28.5	
Vuelo 4	Febrero 2020	58.5	

Los meses consecutivos en los cuales se presenta una precipitación muy por debajo de la media son diciembre enero y febrero. Se incluye noviembre dado que se necesitó realizar 4 vuelos según lo planeado, y el mes de marzo cuenta con una precipitación mayor a los 150 mm.

Estos planes de vuelo se realizaron teniendo en cuenta que el factor detonante de la amenaza a movimiento en masa es principalmente el agua de precipitación. Sin embargo, dado que la zona en general presenta un alto contenido de humedad (superficialmente visible) se buscó detectar cambios geométricos por presión de poros en los periodos secos. Identificar cambios en periodos secos representa una alta probabilidad de detectar cambios geométricos en periodos críticos como los de lluvia. Teniendo esto en cuenta se consideran que los periodos secos pueden ser la condición más crítica para detectar cambios geométricos mínimos en el terreno y poner a prueba la resolución de captura de información de los vehículos aéreos no tripulados.

5.4. Ejecución de los planes de vuelo

Una vez programados los planes de vuelo y seleccionadas las fechas en las que se realiza el estudio, se procedió a ejecutar los vuelos. A continuación, se muestran los pasos seguidos en la ejecución de los planes de vuelo:

- Se realizó el procedimiento de demarcación de los puntos de control sobre los cuales se establecieron las referencias y amarres para los diferentes vuelos en diferentes periodos de tiempo. Como ya se había mencionado, se demarcaron sobre el pavimento los puntos de control para establecer los mismos en los diferentes periodos de tiempo. Después se posicionaron sobre las marcas los recuadros de dimensiones establecidas con los que se procesaron las imágenes de dron (**Ilustración 56**).



Ilustración 56. Demarcación puntos de control Talud 1.

- Como segundo paso se ejecutaron los planes de vuelo programados. La aplicación Pix4D Capture ejecutó los planes de vuelo de inicio a fin por lo que el dron automáticamente sale del punto de partida se posiciona sobre las zonas a fotografiar y regresa al punto inicial sin necesidad de ningún procedimiento adicional (**Ilustración 57**).



Ilustración 57. Ejecución planes de vuelo Talud 1.

En este procedimiento de obtención de las fotografías se capacitó y recibió apoyo del semillero de investigación de la Universidad Pontificia Bolivariana quienes aprendieron a desarrollar los planes de vuelo y realizaron algunos vuelos de aprendizaje y apoyo a la investigación.



Ilustración 58. Ejecución planes de vuelo talud 3. Radiocontrol conectado a dispositivo de celular.

La simplicidad con la que se ejecutaron los planes de vuelo para la obtención de las imágenes resalta la facilidad de uso de la metodología por parte de personas del común o entes territoriales los cuales pueden ser los interesados en monitorear y controlar zonas de amenaza a deslizamiento. A continuación, se muestran algunas de las imágenes obtenidas de los vuelos:

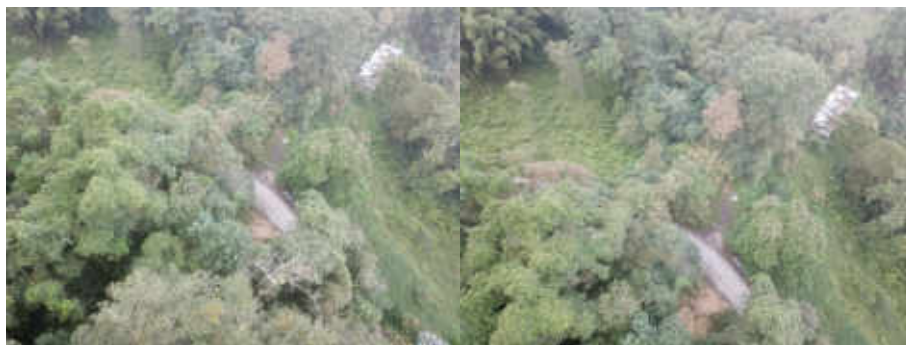


Ilustración 59. Talud 1. Ejemplo de imágenes obtenidas con la ejecución de los planes de vuelo.



Ilustración 60. Talud 2. Ejemplo de imágenes obtenidas con la ejecución de los planes de vuelo.



Ilustración 61. Talud 3. Ejemplo de imágenes obtenidas con la ejecución de los planes de vuelo.

Los planes de vuelo se ejecutaron según lo establecido el mes de noviembre y diciembre de 2019. Para los meses de enero y febrero de 2020 fue necesario ampliar el área de mapeo en los taludes 2 y 3 debido a que parte de la corona de la ladera no estaba siendo mapeada, esto repercute en los resultados presentados más adelante. No se presentaron inconvenientes de fuerza mayor durante la ejecución de los vuelos, sin embargo, es importante resaltar que se deben tener suficientes baterías para la ejecución de los vuelos (1 por vuelo en promedio) para no interrumpir la toma de fotografías durante la ejecución de un plan de vuelo. Adicional a esto cabe resaltar que hubo presencia de neblina durante la ejecución del vuelo al talud 1 en el mes de diciembre, sin embargo, se logró obtener durante un corto periodo de tiempo una zona lo suficientemente despejada para realizar el vuelo.

5.5. Procesamiento de imágenes aéreas

Una vez obtenidas las imágenes aéreas de los vuelos se procedió a realizar el procesamiento de estas. El software de procesamiento utilizado se denomina Pix4D Mapper. Esta herramienta permite procesar imágenes aéreas para la obtención de diversos productos como lo son modelos digitales de terreno, modelos digitales de superficie y ortomosaico. Para llevar a cabo este procedimiento se debió realizar una serie de procesamientos individuales que permiten la obtención de modelos de

alta calidad. A continuación, se describen los pasos individuales seguidos para la obtención de la información de las imágenes aéreas y su importancia en el desarrollo del procedimiento general:

- **Procesamiento inicial:** la fase de procesamiento inicial consiste en la agrupación y organización de las imágenes aéreas en un solo grupo de datos. Esta fase permite la obtención de puntos de referencia entre imágenes y la generación de la nube de rayos que permite visualizar las cámaras, las imágenes y la concordancia de estas en un mismo espacio de trabajo georreferenciado. Adicional a esto se permite la selección de la calidad del procesamiento de los puntos claves los cuales permiten una mayor o menor calidad de procesamiento en las imágenes. Para el procesamiento de todas las imágenes aéreas del proyecto se utilizó como escala de imagen el tamaño original, lo que permitió aproximadamente 10000 puntos clave por imagen permitiendo así aprovechar todo el tamaño de imagen con una mayor calidad.

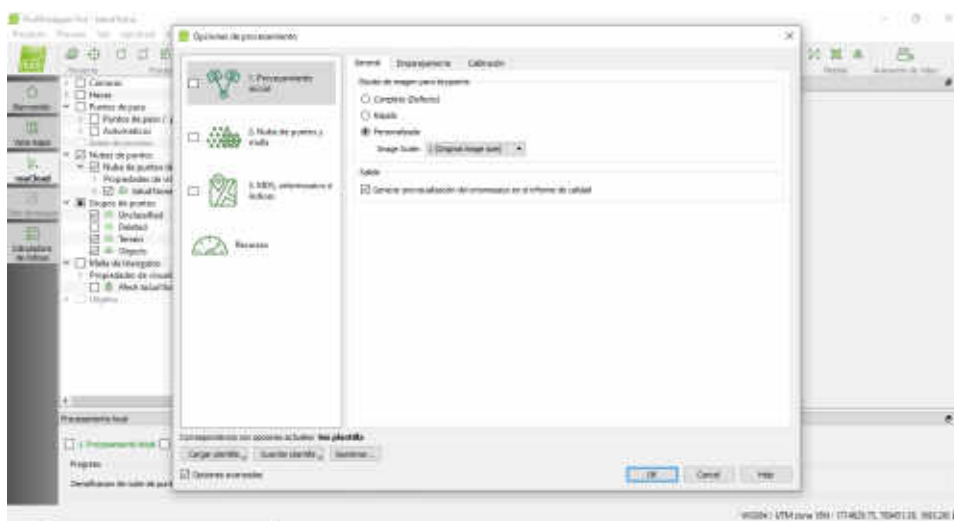


Ilustración 62. Fase de procesamiento inicial visualizada dentro del software Pix4D Mapper.

- **Gestor de puntos de apoyo:** En esta fase del procesamiento se le asignaron al software las coordenadas X, Y, Z y nombres de los diferentes GCPs o puntos de control en tierra. Estas coordenadas se calibran de manera manual, indicando los puntos de control en tierra en cada una de las imágenes que lo contienen, de esta manera el software puede asignar a las diferentes imágenes por medio de los GCPs nuevas coordenadas y alturas permitiendo la calibración de todos los modelos bajo un único amarre de referencia. Este procedimiento es el más importante en el procesamiento de las imágenes dado que permite entre diferentes periodos de tiempo tener imágenes que estén referenciadas en el mismo sistema y por tanto resultados que se puedan comparar entre sí. Estas coordenadas se pueden obtener de GPS de alta precisión o simplemente asignarse automáticamente. Para el caso de este estudio se realizó la asignación de todas las imágenes del primer vuelo automáticamente. Con estas coordenadas del primer vuelo se amarraron los demás vuelos a las mismas coordenadas ya que se evidenció que entre diferentes vuelos las coordenadas X, Y, Z variaban. Con esto se obtuvieron modelos en diferentes periodos de tiempo bajo las mismas coordenadas.

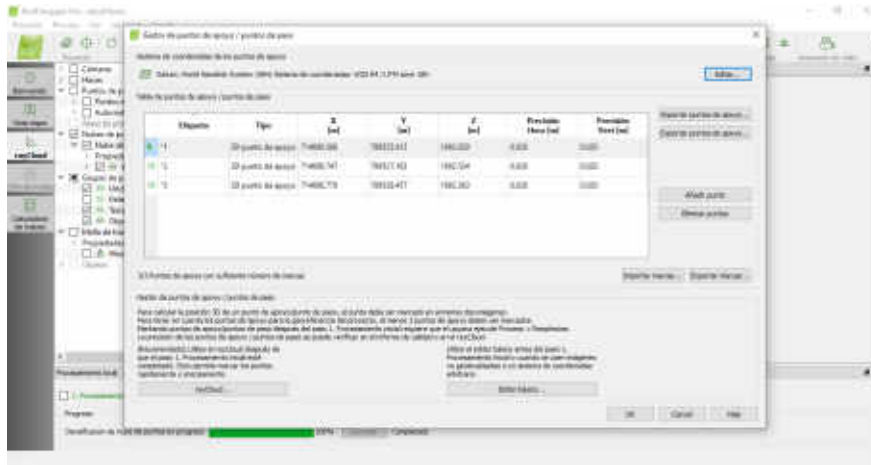


Ilustración 63. Fase de procesamiento gestor puntos de apoyo visualizada dentro del software Pix4D Mapper.

- Generación de nube de puntos y malla de triángulos:** Una vez optimizadas las cámaras, las imágenes y los haces de proyección de estas con los puntos de apoyo se procede a realizar el procesamiento fotogramétrico. Por medio de este procedimiento se obtuvo la nube de puntos del terreno (a través del método fotogramétrico base de triangulación de varias imágenes y orientación en un espacio). Esta nube de puntos se calcula con coordenadas X, Y, Z con base en el procesamiento de las imágenes aéreas. Una vez obtenida la nube de puntos el software realiza la triangulación de estos para obtener una malla de triángulos que permiten visualizar en 3D el terreno en estudio. Para el procesamiento de las imágenes de estudio la nube de puntos se generó con una escala de imagen 1:1 es decir calidad original. Además, se indicó que el procesamiento se realice en el mayor tiempo posible para que la calidad de la nube de puntos fuera la más alta. Con esta nube de puntos de alta calidad la generación de la malla de triángulos también será de alta calidad.

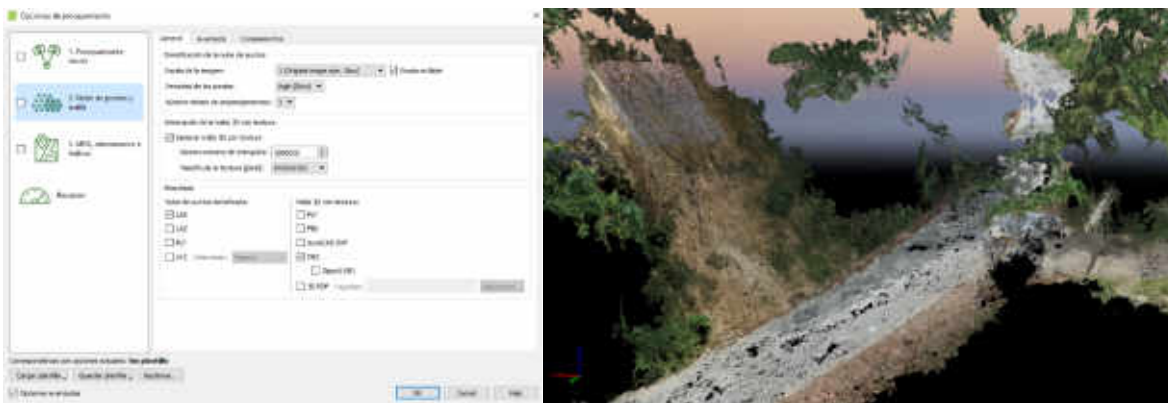


Ilustración 64. Fase de procesamiento nube de puntos y malla de triángulos visualizada dentro del software Pix4D Mapper (Izquierda). Porción de nube de puntos resultado del procesamiento de imágenes aéreas (Derecha).

- Clasificación de la nube de puntos y generación de modelo digital de terreno (MDT):** Una vez obtenida la nube de puntos se procedió a clasificarla. La clasificación consiste en determinar qué puntos corresponden a terreno (e.g., superficie, laderas) y que puntos

corresponden a objetos (e.g., vehículos, casas, árboles) Esta clasificación se hace de forma automática en el software, sin embargo, se encuentra en fase beta por lo que la forma en que se clasifican los puntos es imprecisa. Con base en esta clasificación el software selecciona los puntos correspondientes a terreno y los triangula nuevamente para generar el modelo digital de terreno. Este modelo contiene una superficie en la cual sus puntos corresponden a coordenadas X, Y, Z calculadas con base en los puntos del terreno, por tanto, elimina los objetos y permite tener una topografía del terreno de la zona de estudio. Sin embargo, como ya se había mencionado este procedimiento parte de una clasificación imprecisa de puntos lo que genera un modelo digital de terreno también impreciso. Existen otras metodologías para la clasificación de puntos, sin embargo, estas no son el objeto del proyecto por tanto no se utilizan.



Ilustración 65. Clasificación nube de puntos Talud 1. Nube de puntos para objetos (Izquierda) y para terreno (Derecha).



Ilustración 66. Modelo digital del terreno Talud 1 (Ejemplo de resultado).

- **Generación de modelo digital de superficie (MDS) y ortomosaico:** La última fase del procesamiento general de las imágenes aéreas corresponde a la generación de los modelos digitales de superficie y ortomosaico. Un MDS corresponde la proyección de un terreno con coordenadas X, Y, Z que incluye toda la información de los puntos tanto de terreno como de objetos. Este MDS permite una clasificación más precisa de toda la información de la zona de estudio en un único mapa. El ortomosaico es una visualización real con una

proyección horizontal de la zona de estudio, es decir, es la unión de todas las imágenes aéreas en una única proyección horizontal como fotografía de resultado. Con los modelos digitales de superficie se pueden obtener múltiples mapas por la cantidad de información precisa que este contiene. Para el procesamiento de los modelos del proyecto se utilizó un valor promedio de calidad de 3 cm por cada píxel, esto permitió una mayor precisión en la información que se obtuvo de los modelos digitales de superficie.

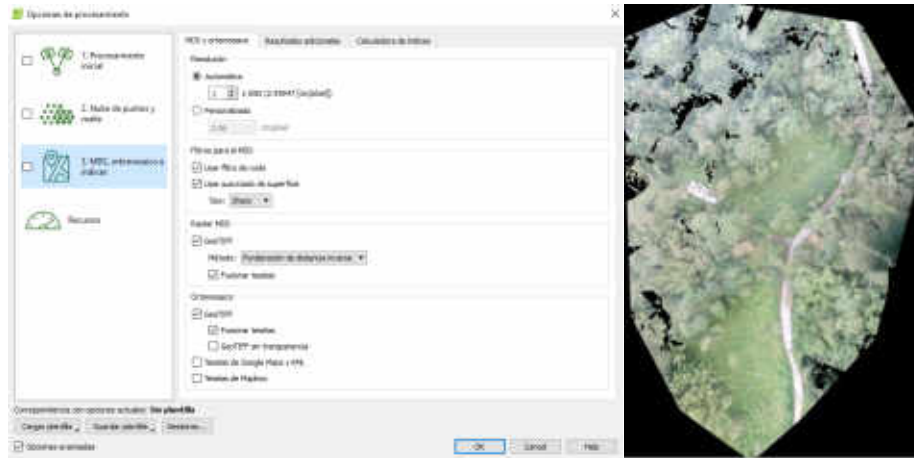


Ilustración 67. Fase de procesamiento MDS visualizada dentro del software Pix4D Mapper (Izquierda). Ortomosaico Talud 1 resultado del procesamiento de imágenes aéreas (Derecha).

Como un aproximado se presentan a continuación los tiempos promedios de procesamiento de imágenes para cada una de las 5 etapas de procesamiento general. Cabe resaltar que estos tiempos están calculados con base en la cantidad de imágenes promedio que se procesaron y la más alta calidad posible de las mismas para un solo vuelo individual. También se muestran las características principales del equipo con el que se realizaron los cálculos.

Tabla 6. Especificaciones de equipo de procesamiento y tiempos promedio de procesamiento de imágenes aéreas.

Característica	
Procesador Intel i5 8250U-1.8GHz	
Memoria RAM 12 GB	
Memoria gráfica Intel UHD Graphics 620	
Etapas de procesamiento	Tiempo promedio de procesamiento (minutos)
Procesamiento inicial	15 minutos
Gestor de puntos de apoyo y reprocesamiento	30 minutos
Generación de nube de puntos y malla de triángulos	60 minutos
Clasificación nube de puntos y generación modelo digital del terreno	120 minutos
Generación modelo digital de superficie y ortomosaico	60 minutos
Tiempo total promedio de procesamiento por vuelo individual	285 minutos (4.75 horas)

Como resultados finales de las 5 etapas del procesamiento general de las imágenes se obtuvieron de cada paquete de imágenes aéreas por vuelo lo siguiente: (a) un modelo digital de terreno (MDT); (b) un modelo digital de superficie (DSM); y (c) un ortomosaico. Estos elementos fueron los insumos principales para la fase final de salidas generales de la metodología los cuales se analizaron a fondo para describir los cambios geométricos multitemporales en zonas de ladera con amenaza a deslizamiento.

5.5.1. Salidas generales de la investigación

A partir de los procesos fotogramétricos y las imágenes aéreas obtenidas en los planes de vuelo del mes de noviembre y diciembre de 2019 y enero y febrero de 2020 se generaron los modelos digitales de terreno, ortomosaicos y modelos digitales de superficie para el talud 1, talud 2 y talud 3. A continuación, se presenta un ejemplo de los resultados de los vuelos realizados para el mes de noviembre de 2019:

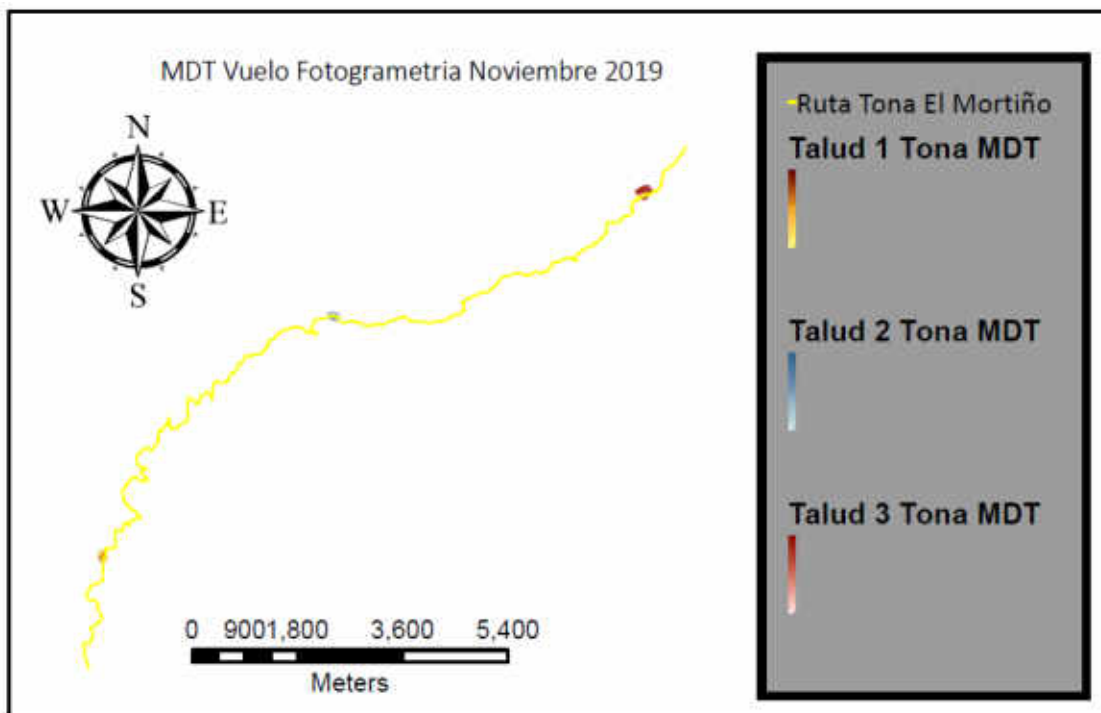


Ilustración 68. MDT Vuelo fotogrametría Noviembre 2019.

Los modelos digitales de terreno mostrados a continuación se generan con la información clasificada de objetos y terreno. La gama de colores enseña desde los colores más claros (parte inferior de las barras) las elevaciones más bajas y los colores oscuros (parte superior de la barra de color) las elevaciones más altas. Se presenta un modelo para cada uno de los taludes a manera de ejemplo (**Ilustración 71**) y un resumen de la ubicación de los tres modelos en el mes de noviembre (**Ilustración 68**).

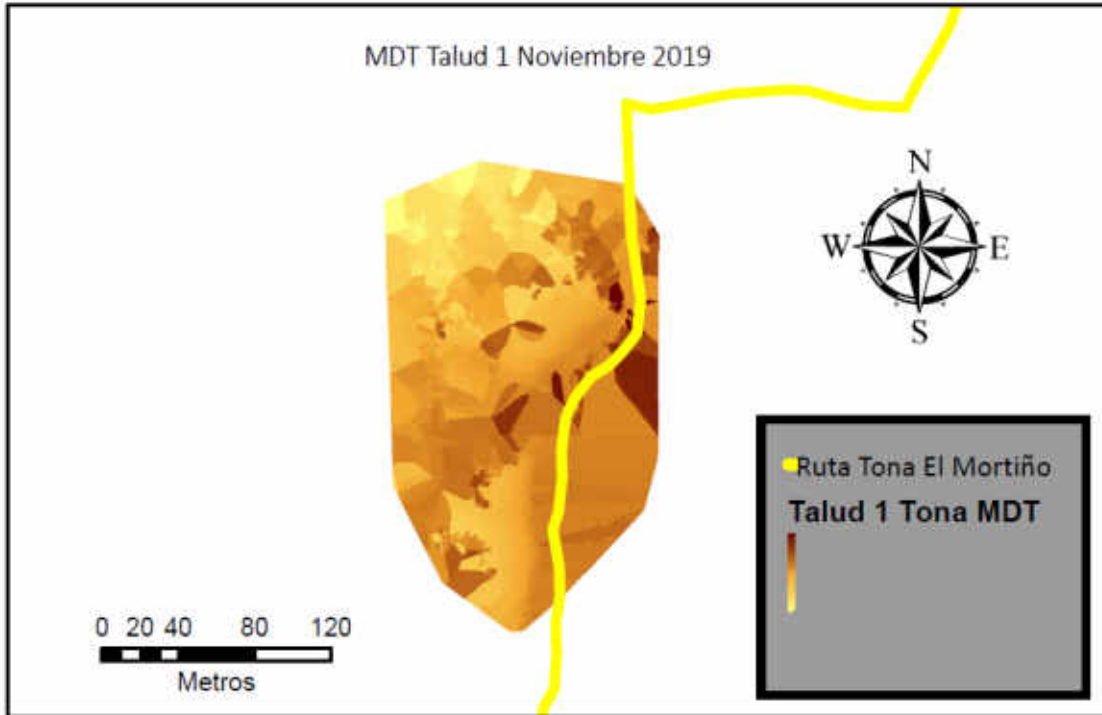


Ilustración 69. MDT Talud 1 Noviembre 2019.

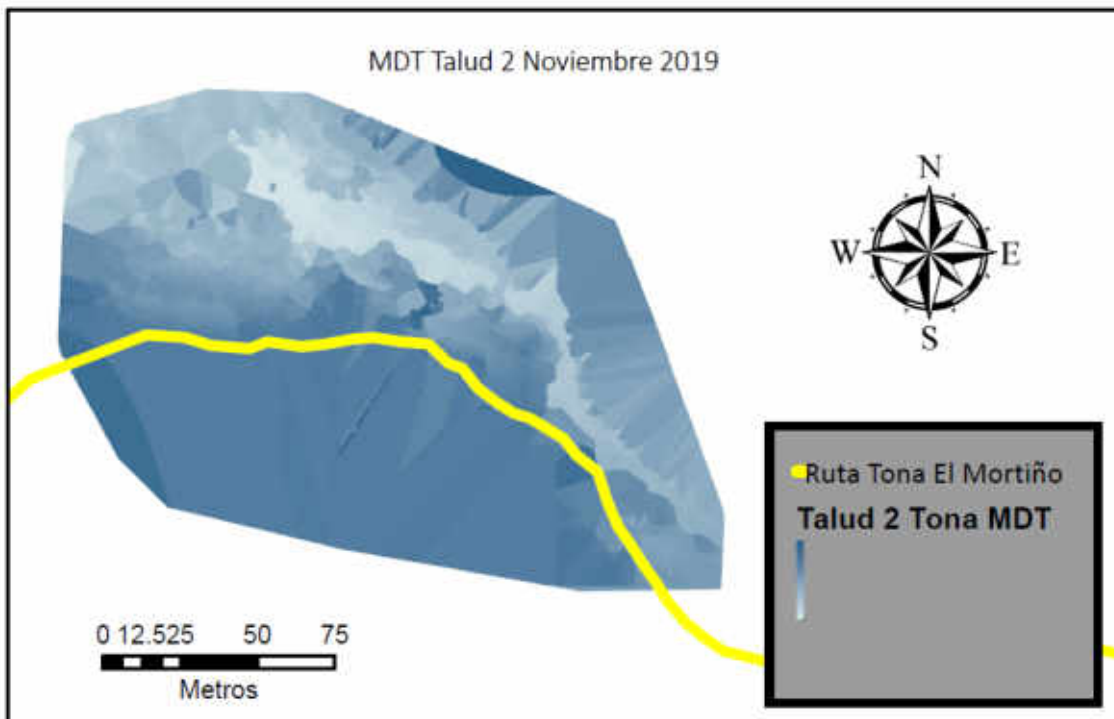


Ilustración 70. MDT Talud 2 Noviembre.

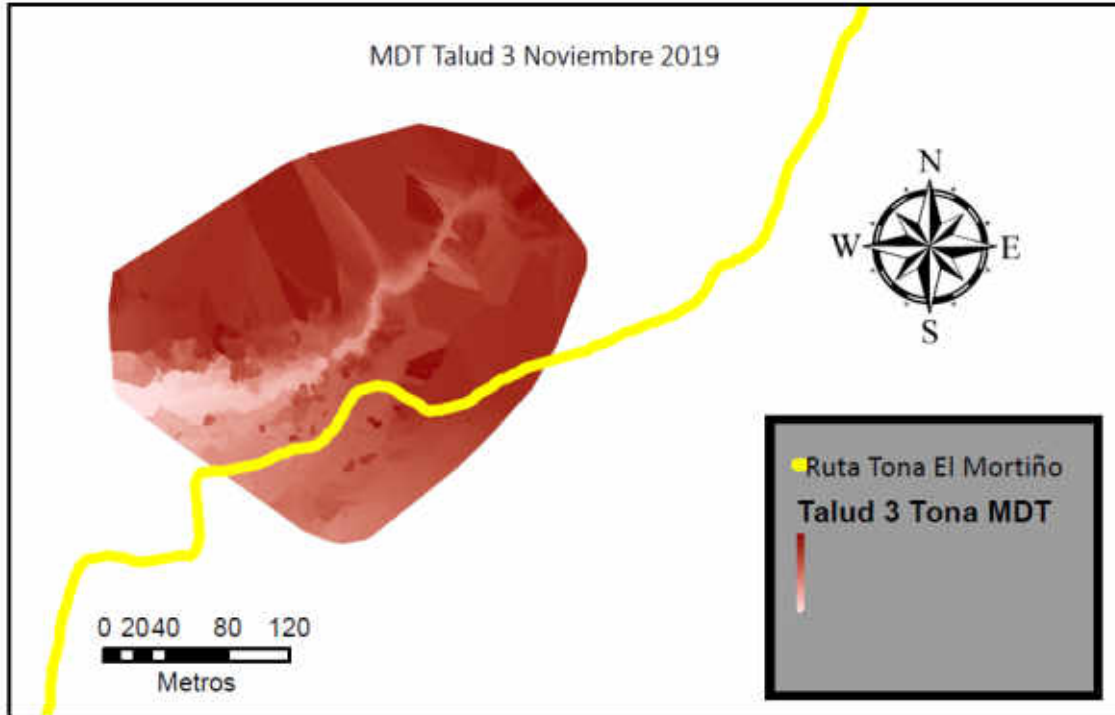


Ilustración 71. MDT Talud 3 Noviembre 2019.

Como se había indicado en la fase de procesamiento de imágenes al realizar la clasificación de la nube de puntos por terreno y objetos se cometen muchos errores por parte del software, los que se ven reflejados en los MDT mostrados anteriormente generando terrenos errados de la realidad.

La **Ilustración 72**, **Ilustración 73**, **Ilustración 74** e **Ilustración 75** entregan los ortomosaicos obtenidos. Estos ortomosaicos brindan una fotografía completa de las zonas donde se encuentran los taludes en estudio, las cuales visualmente permiten observar el estado del terreno en cada uno de los periodos. Estos ortomosaicos representaran un factor importante a la hora de analizar los cambios geométricos del terreno en los diferentes periodos de tiempo.

Se observa en los ortomosaico que la ruta extraída para el corredor vial Tona – El mortiño no se encuentra bien demarcada por Google Earth dado que es una vía terciaria de la cual no se tiene mucha información. Sin embargo, se denota la precisión de las coordenadas GPS de los vuelos dado que relaciona de manera casi precisa el sitio donde se realizó el sobrevuelo.

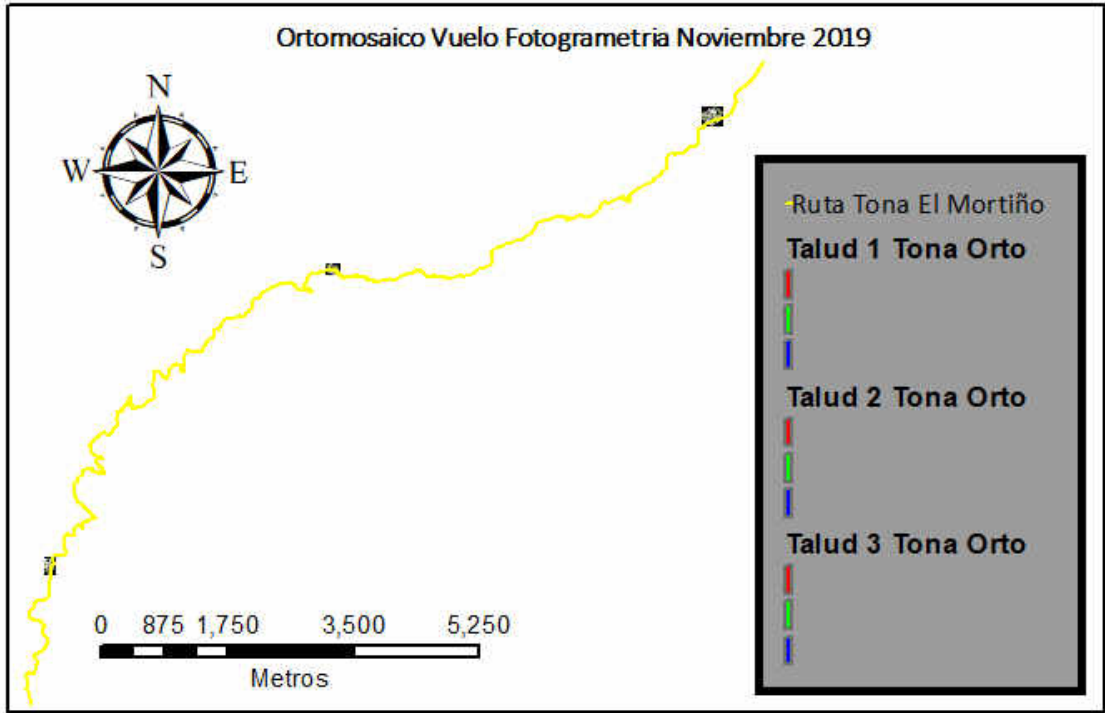


Ilustración 72. Ortomosaico vuelo de fotogrametría noviembre 2019.

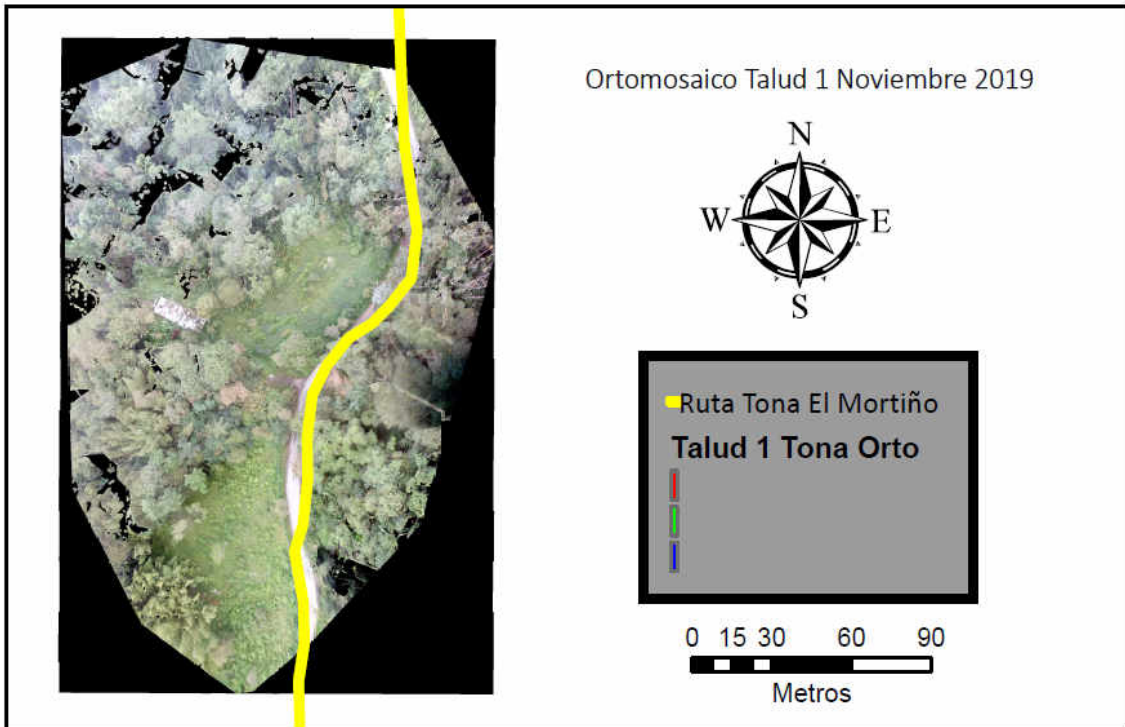


Ilustración 73. Ortomosaico Talud 1 Noviembre 2019.

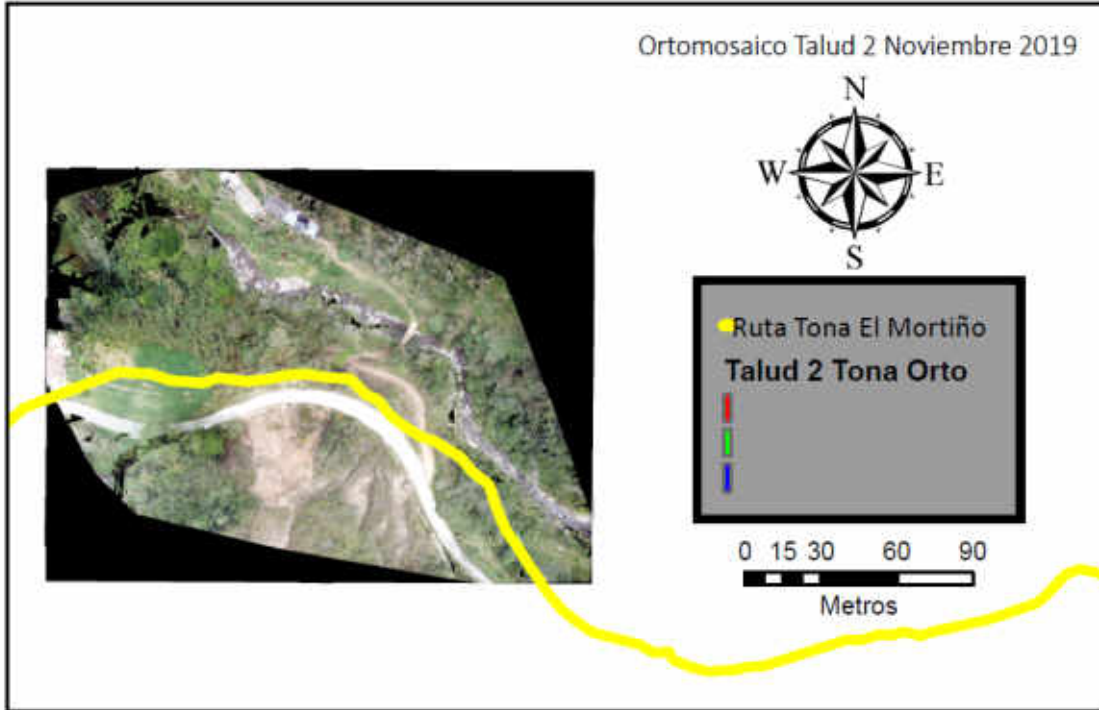


Ilustración 74. Ortomosaico Talud 2 Noviembre 2019.

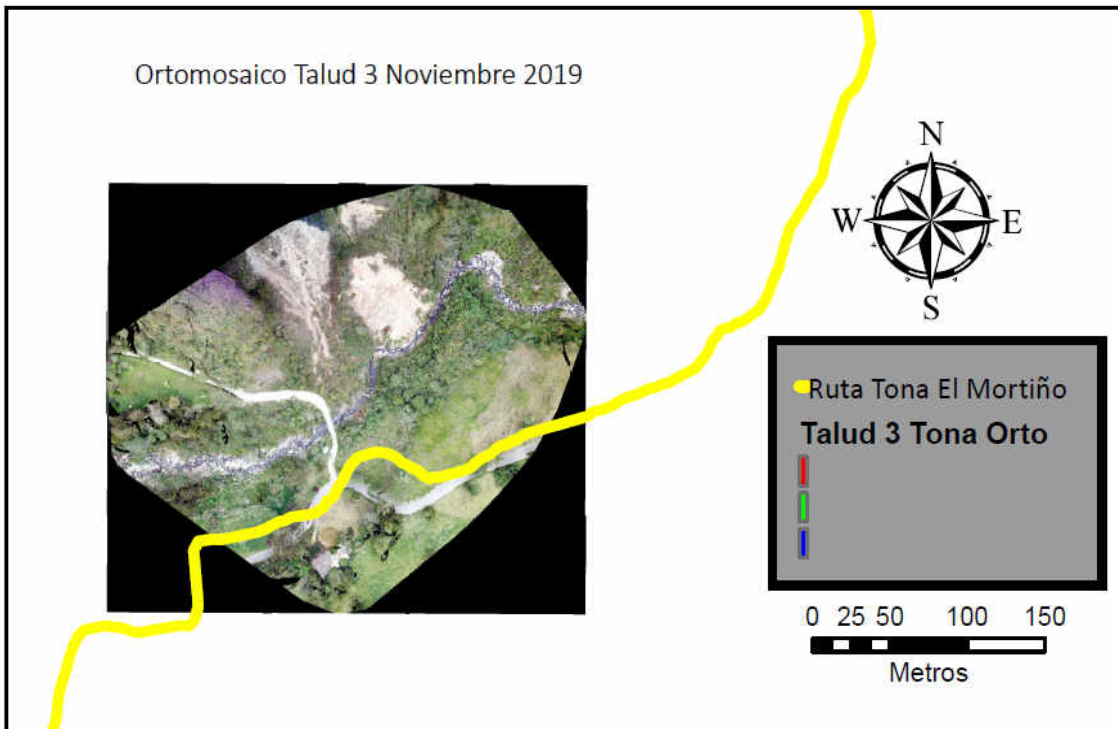


Ilustración 75. Ortomosaico Talud 3 Noviembre 2019.

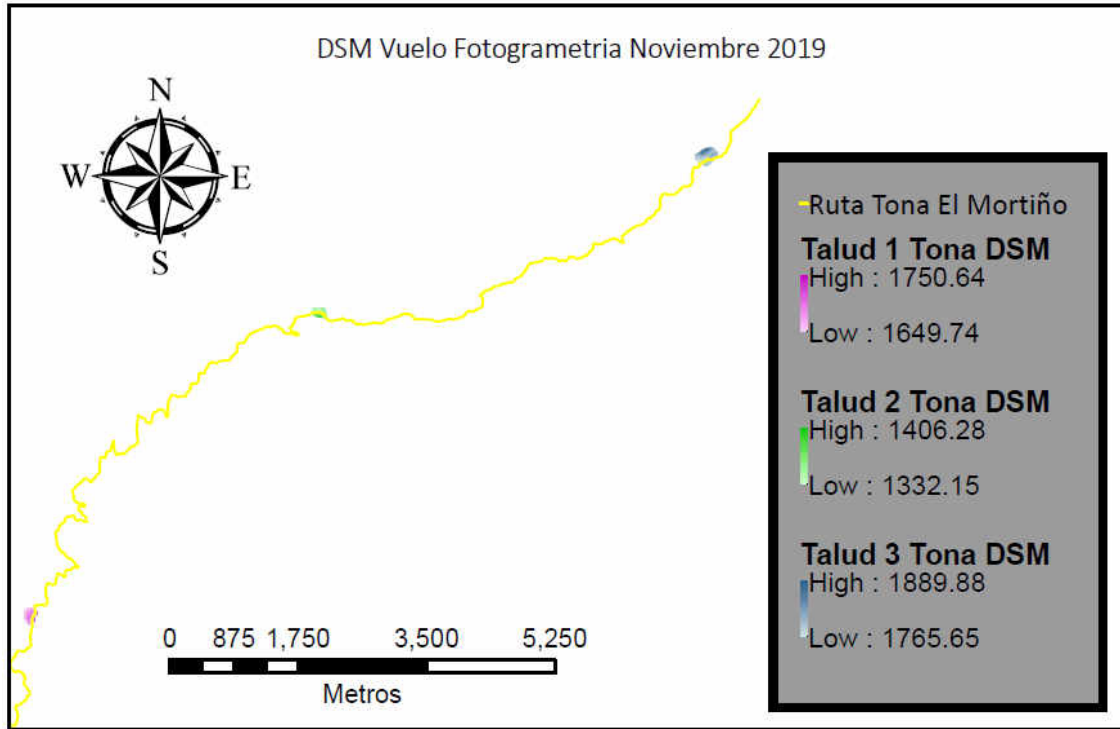


Ilustración 76. MDS Vuelo fotogrametría noviembre 2019.

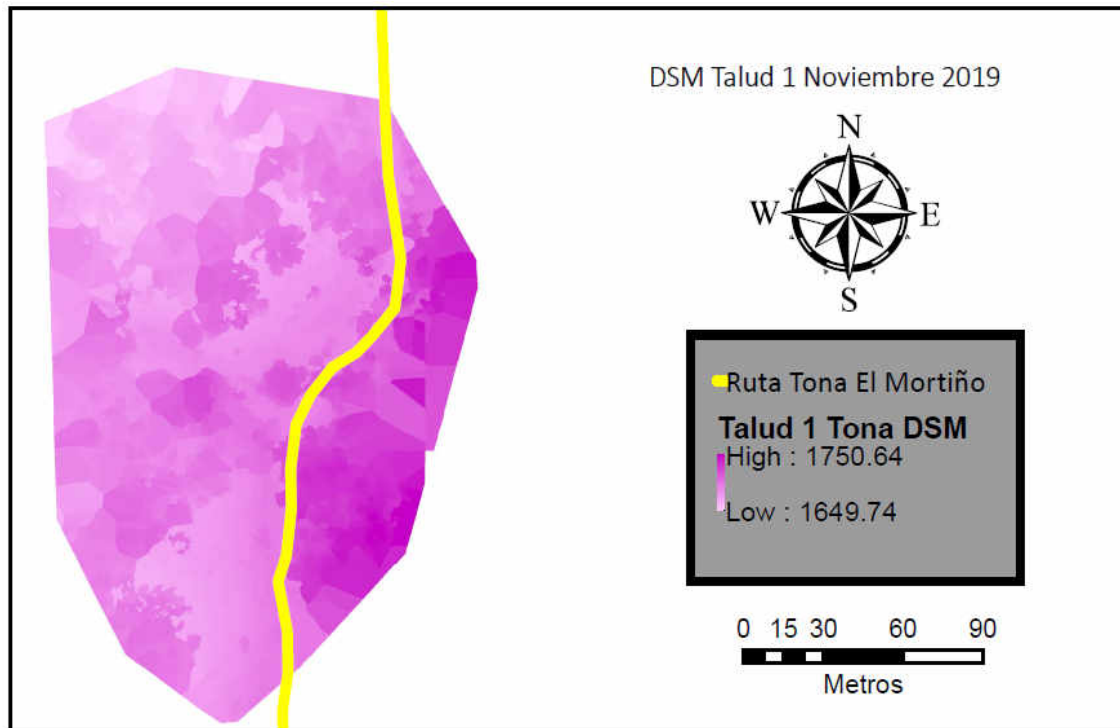


Ilustración 77. MDS Talud 1 noviembre 2019.

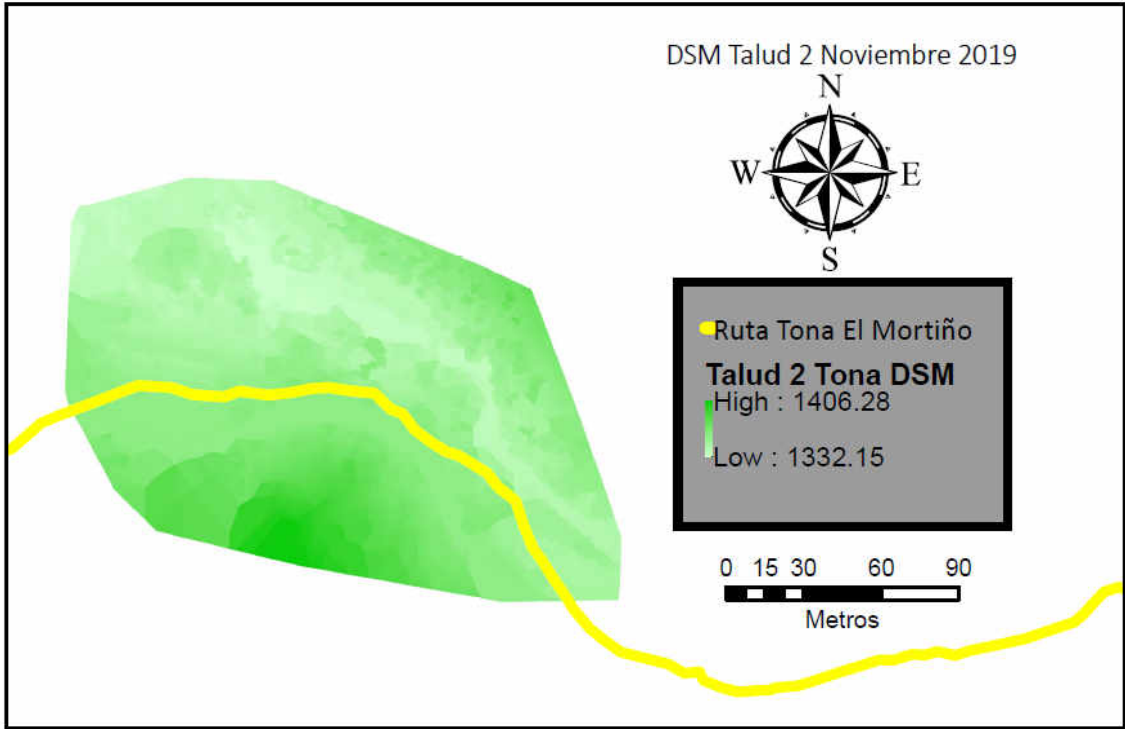


Ilustración 78. MDS Talud 2 noviembre 2019.

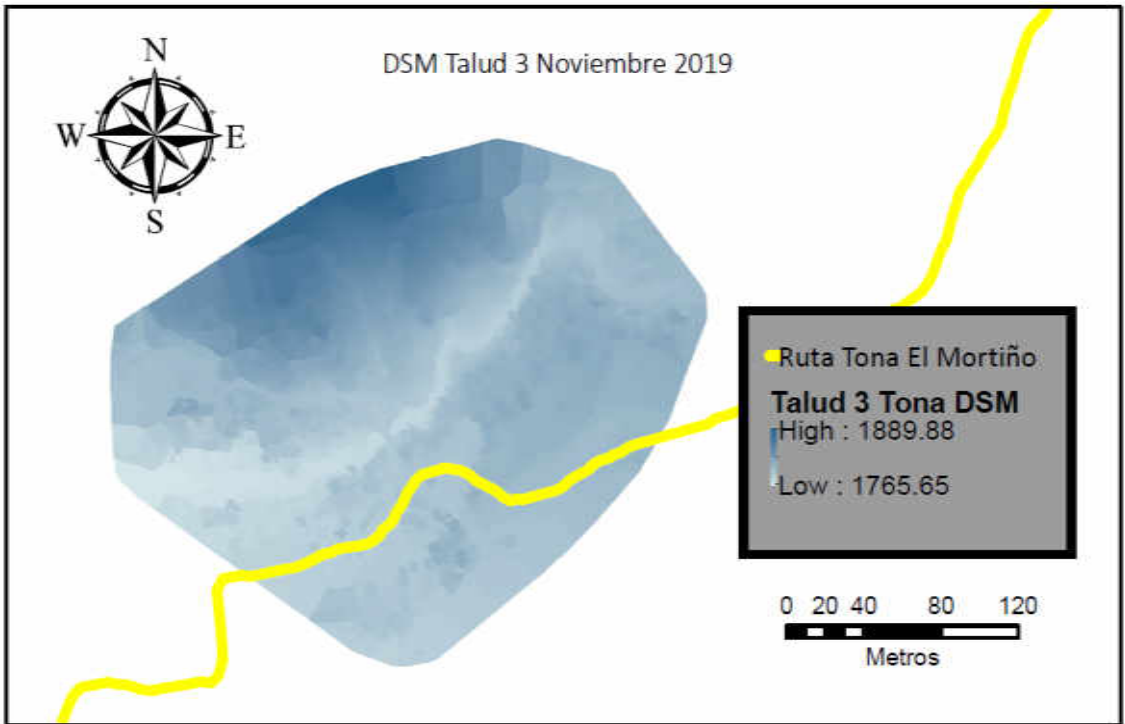


Ilustración 79. MDS Talud 3 noviembre 2019.

Finalmente los modelos digitales de superficie mostrados anteriormente se generan con la información sin clasificar de objetos y terrenos. La gama de colores enseña desde los colores más

claros (parte inferior de las barras) las elevaciones más bajas y los colores oscuros (parte superior de la barra de color) las elevaciones más altas. Se presenta un modelo para cada uno de los taludes a manera de ejemplo (**Ilustración 77**) y un resumen de la ubicación de los tres modelos en el mes de noviembre (**Ilustración 76**).

Como se había indicado en la fase de procesamiento de imágenes, como los modelos digitales de superficie no clasifican el terreno sino las elevaciones de todos los objetos permiten una interpretación más acertada de las elevaciones reales de las zonas de estudio.

Toda la información obtenida para el mes de noviembre presentada anteriormente se obtuvo de igual forma para los meses de diciembre, enero y febrero. Esta información fue necesaria para realizar el procedimiento de las salidas generales de la investigación.

5.5.2. Identificación de cambios geométricos en zonas de estudio

La finalidad de la investigación fue evaluar por medio de una metodología planteada la posibilidad de detectar cambios geométricos en zonas de amenaza a deslizamiento. Por tanto, en el siguiente apartado se presentarán los modelos obtenidos con fotogrametría para determinar la visualización o no de cambios geométricos en taludes. En la identificación propuesta se llevó a cabo una comparativa del terreno de cada talud mes a mes y una comparativa de los perfiles topográficos mes a mes. Con este desarrollo fue posible evidenciar cambios geométricos en taludes con metodología de fotogrametría. A continuación, se presenta un ejemplo del procedimiento de identificación de cambios geométricos para el talud 1. Cabe resaltar que los modelos digitales de terreno no pueden ser comparados entre sí, dado que como se había mencionado anteriormente la clasificación de terreno y objetos realizada por el software es errada. Por lo que se procedió a comparar los modelos digitales de superficie cuya información es verídica según lo existente en terreno.

La comparación de modelos digitales de superficie se realizó mes a mes según la campaña. La información que contienen los modelos digitales de superficie son elevaciones del terreno, por tanto, si se realiza una resta de elevaciones se va a obtener un modelo que permita evidenciar los cambios del terreno. Si esta resta da positiva indica la pérdida de material de la zona de estudio. Si la resta da negativa indica el depósito material sobre la zona de estudio. De esta manera se pudieron evidenciar desplazamientos de material de una zona de ladera durante diferentes periodos de tiempo. Los tonos azules (i.e., High) indican que el talud está perdiendo material y los tonos amarillos (i.e., Low) indican que sobre ese sector se está depositando material, es decir, pierden y ganan altura respectivamente. A continuación, se presenta a manera de ejemplo, el proceso de identificación completo de cambios geométricos en la campaña de noviembre y diciembre de 2019 en el Talud 1:

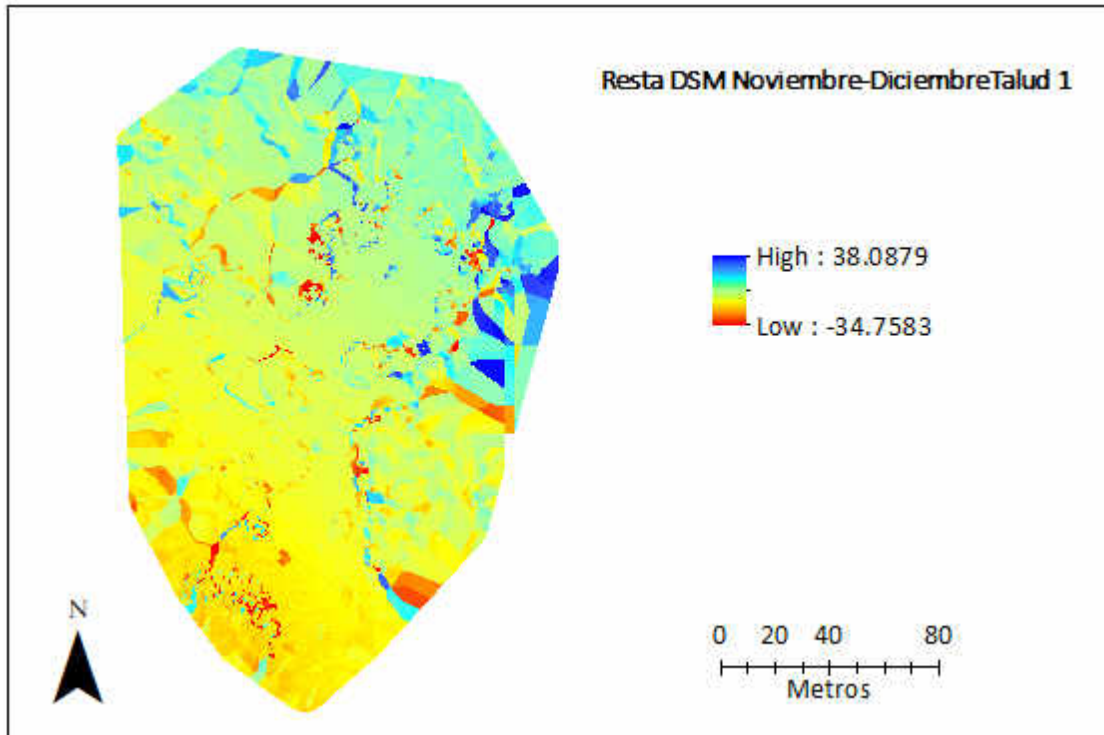


Ilustración 80. Talud 1 Resta DSM Noviembre-Diciembre

Lo primero que se pudo evidenciar es que hay valores extremos que no dejan entrever la escala real de los pequeños desplazamientos de terreno. Una vez revisado se evidencia que estos valores con desplazamientos superiores a 1 metro corresponden a zonas de vegetación en las cuales la fotogrametría tiene problemas al realizar su interpretación como se ha visto en todas las investigaciones. Por tanto, con el fin de eliminar estos desplazamientos de terreno extremos se realizó una corrección igualando a 0 los valores de la resta de los DSM mayores a 1 metro con lo que se generó una resta corregida.

Con la resta corregida se evidenciaron aun valores extremos de un metro que corresponden a vegetación, pero en gran parte se logró corregir los desplazamientos evidenciados por mala interpretación de la vegetación por parte de la fotogrametría. En este modelo los valores negros corresponden a los corregidos. Paso siguiente se realizó un zoom al talud en estudio que se encuentra descubierto de vegetación lo que permitió evidenciar los cambios en su topografía.

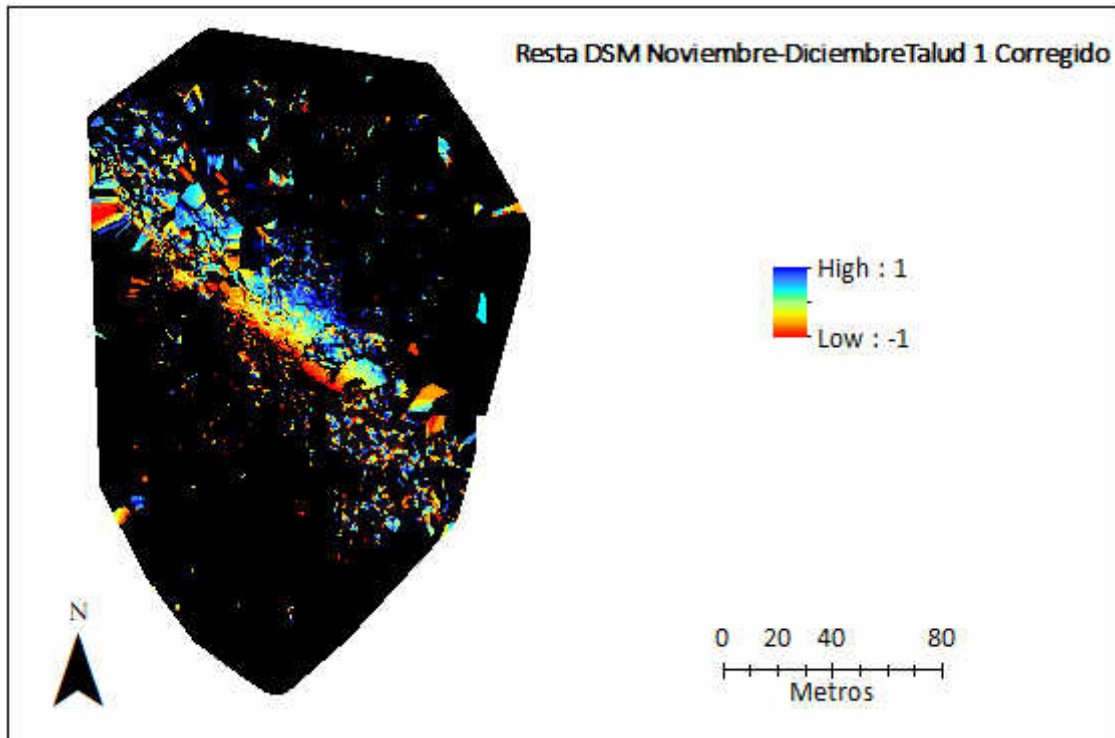


Ilustración 81. Talud 1 Resta DSM Noviembre-Diciembre Corregido

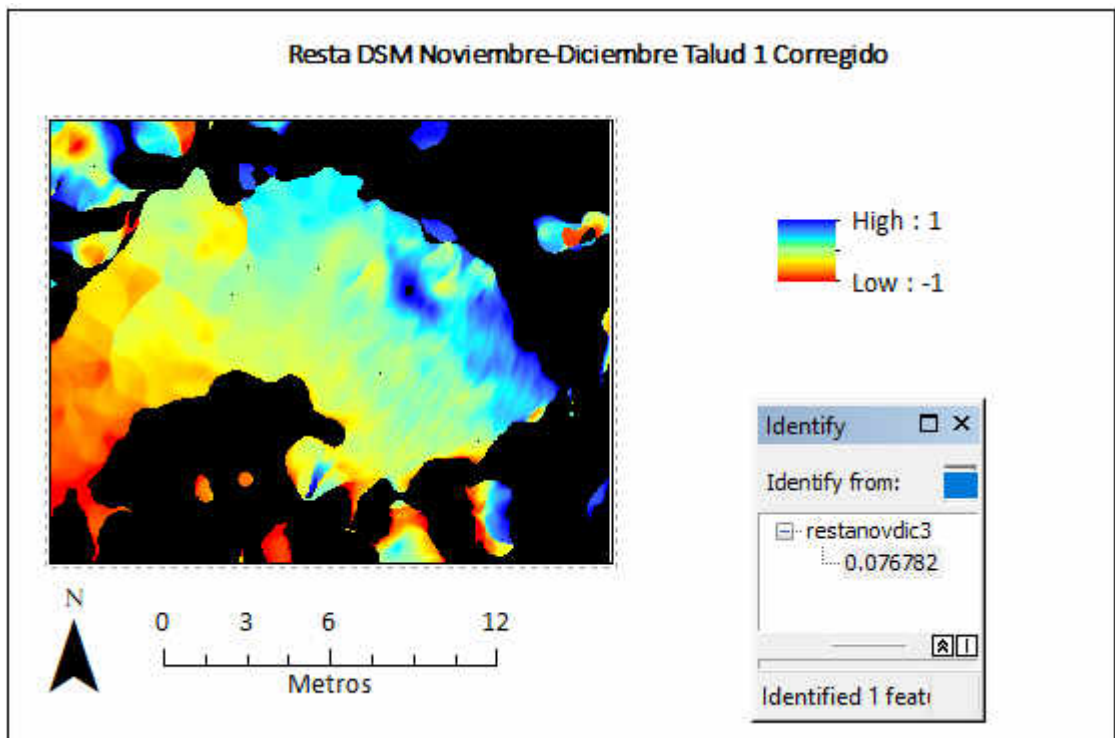


Ilustración 82. Talud 1 Resta DSM Noviembre-Diciembre Corregido (Zoom).

En el zoom realizado a la zona del talud se pudo evidenciar cambios de geometría sobre toda la ladera. Con el fin de corroborar esto se hace una presentación de los ortomosaicos.

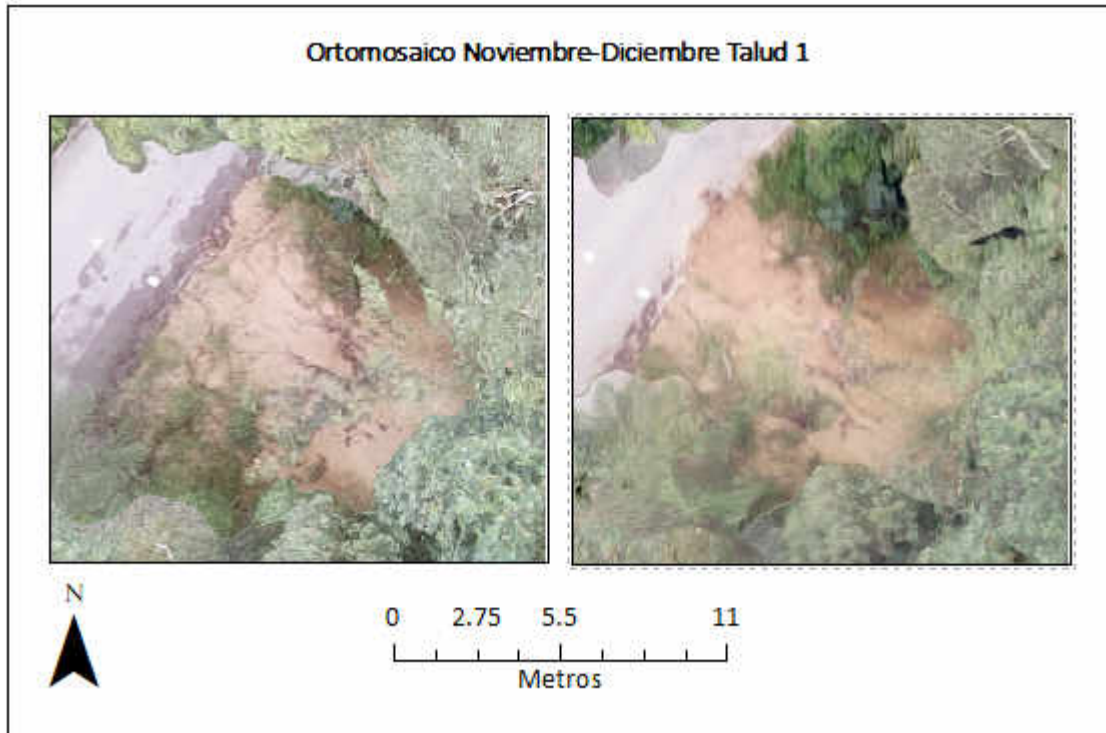


Ilustración 83. Comparación ortomosaico noviembre (izquierda) y diciembre (derecha) de 2019.

Adicional a esto se realizó la extracción de tres perfiles topográficos con el fin de verificar los cambios geométricos del talud. A continuación se muestra la comparación entre los perfiles topográficos extraídos para los periodos de noviembre y diciembre:



Ilustración 84. Talud 1 Comparación Noviembre-Diciembre. Demarcación perfiles topográficos extraídos

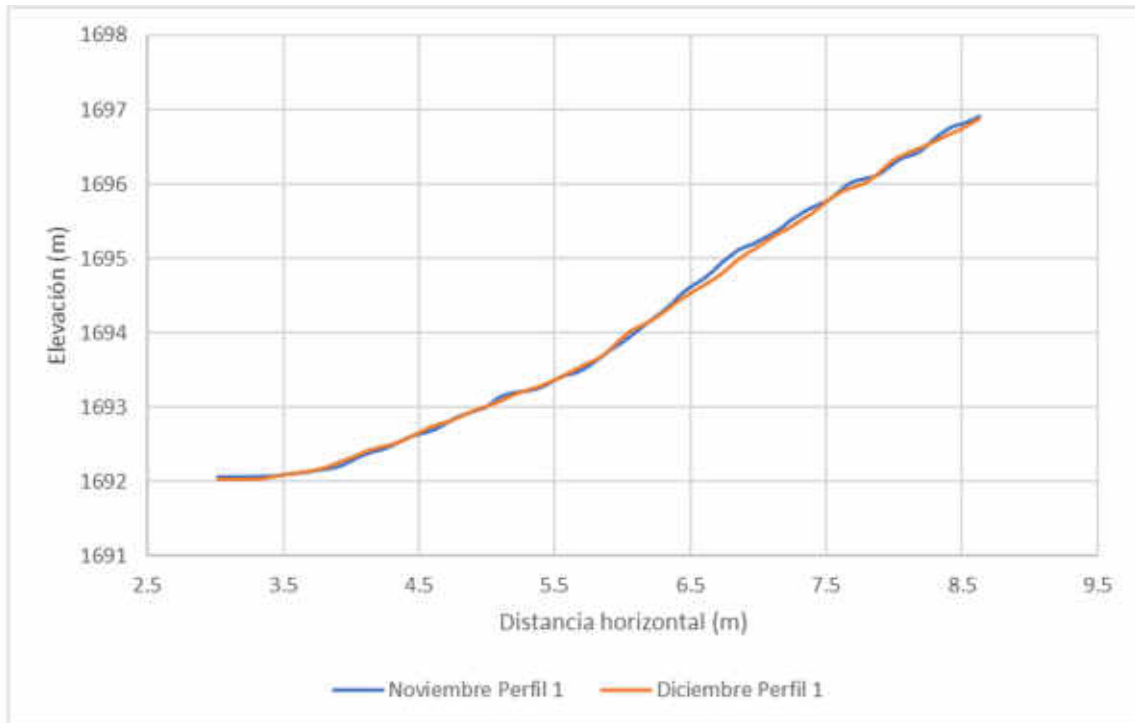


Ilustración 85. Talud 1 Comparación Noviembre-Diciembre. Perfil 1.

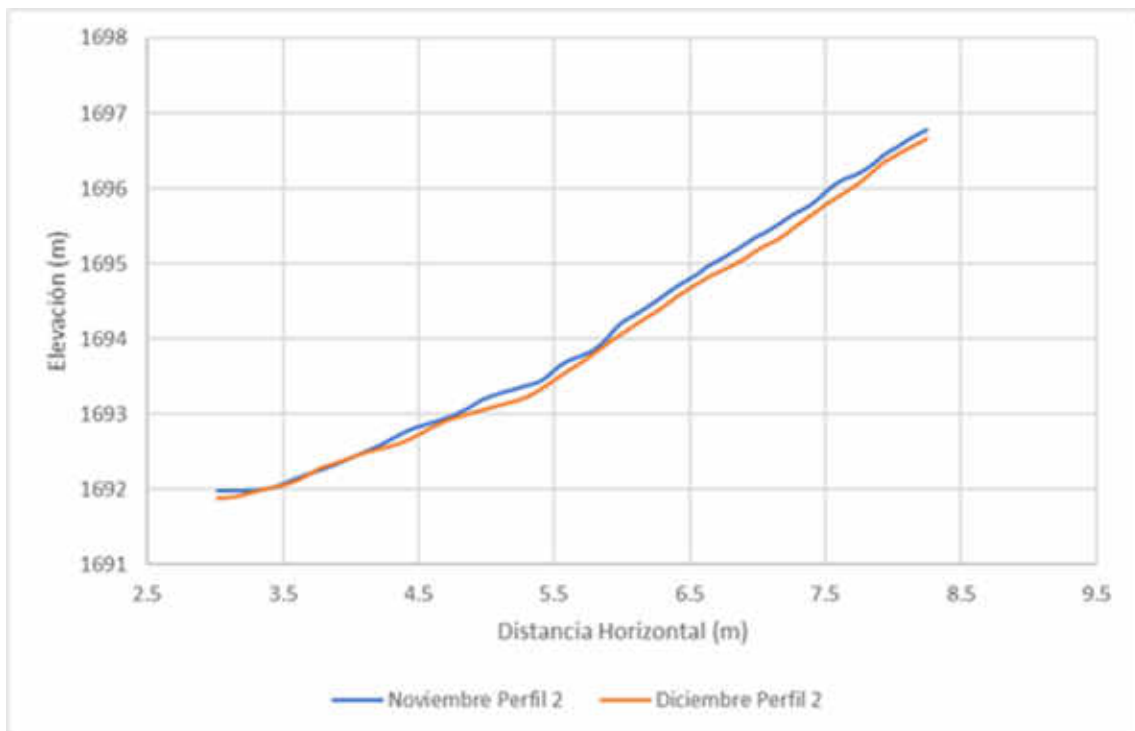


Ilustración 86. Talud 1 Comparación Noviembre-Diciembre. Perfil 2.

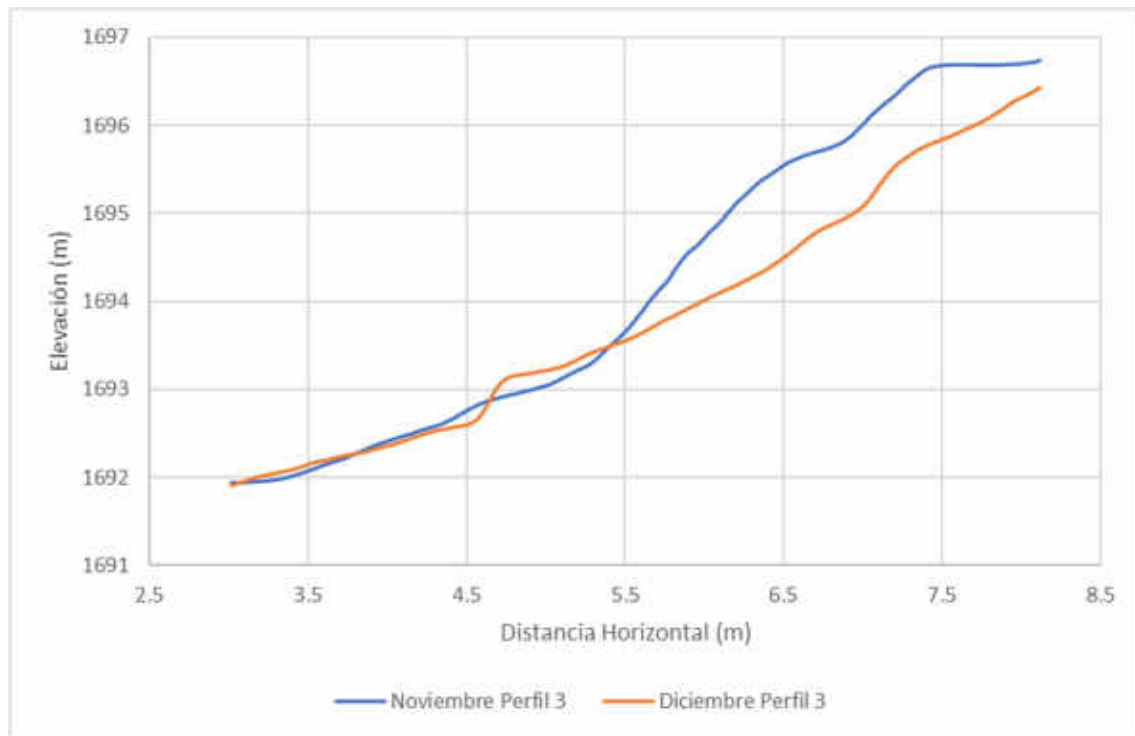


Ilustración 87. Talud 1 Comparación Noviembre-Diciembre. Perfil 3.

A manera de resumen el procedimiento general para la fase de identificación de cambios geométricos de las salidas generales de la metodología incluye:

- Resta de modelos digitales de superficie entre diferentes periodos de tiempo.
- Modelo de corrección de la resta de los DSM por mala interpretación de la vegetación.
- Revisión de mapa con acercamiento a la zona de talud.
- Revisión de ortomosaicos para verificar los cambios en la zona de talud.
- Revisión de perfiles topográficos cercanos a la zona central del talud para evidenciar los cambios en una vista de perfil.
- Formato de resumen de cambios geométricos entre periodos de tiempo para análisis (presentado en el análisis de resultados del documento)

Con esto finalmente se completa la metodología permitiendo el desarrollo de todas las fases de un estudio de monitoreo a zonas de ladera por medio de vehículos aéreos no tripulados, los cuales como se evidencia en la fase final de la metodología por medio de la obtención de imágenes aéreas y un procesamiento posterior, permitieron la identificación de cambios geométricos en zonas de amenaza a deslizamiento.

La intención de la investigación al presentar la metodología de principio a fin es la aplicación y replica por parte de diferentes entes territoriales o empresas privadas para el monitoreo y control de zonas con amenaza a deslizamiento. Se resalta que la adquisición de un VANT de la tipología del estudio y el personal para la adquisición y procesamiento de imágenes aéreas representan un costo muy bajo

a comparación de la instrumentación de zonas con amenaza a deslizamiento u otras metodologías de sobrevuelos (e.g., LIDAR).

6. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la finalidad de analizar los cambios geométricos en cada periodo de tiempo se realizó un formato de resumen de la información.

6.1. Estudio Talud 1 noviembre de 2019 a febrero de 2020:

- **Resta de DSM:** En los formatos de resumen se presentan los gráficos de la resta de los modelos de superficie de meses consecutivos. El talud 1 como se puede observar está perdiendo material en cabeza, el cual está fluyendo sobre la base de este lo que indica el constante movimiento de las partículas de suelo. Este mismo comportamiento se repite durante las comparaciones de noviembre-diciembre, diciembre-enero y enero-febrero. Según se indica en la resta de los DSM las pérdidas (coloración azul) en la parte alta del talud son de aproximadamente 47 cm y sobre la parte baja se están depositando (coloración amarilla) aproximadamente 20 centímetros en promedio de material (**Ilustración 89**). Sin embargo, la precisión del modelo varía hasta 20 centímetros como se puede observar en la vía que es un punto fijo. Esto indica que las variaciones del talud 1 en el periodo de diciembre a febrero son de aproximadamente 27 centímetros. De igual forma se presentaron mayores variaciones del mes de noviembre a enero lo que indica que se ha perdido suficiente material y la geometría del talud ha dejado de ser crítica para el estado de presión de poros en el que se encuentra. Sin embargo, un aumento en la presión de poros producto de las lluvias de la temporada de invierno podría reactivar las variaciones geométricas significativas. Adicionalmente se puede observar que la precisión de los cambios geométricos al acercarse a los bordes de la vegetación varía drásticamente por lo que lo óptimo sería revisar los cambios geométricos en la parte central del talud donde se presentan datos con mayor precisión. Estas variaciones de geometría se pueden evidenciar también en los correspondientes ortomosaicos.
- **Ortomosaico:** En los formatos de resumen se presentan los ortomosaicos de meses consecutivos. En el resumen de noviembre a diciembre se puede observar que en la base del talud se están presentando depósitos de material y la cabeza se observan ligeros deslizamientos y rompimientos de superficie lo que indica que los cambios evidenciados en la resta de los modelos digitales de superficie se corroboran con estas imágenes (**Ilustración 89**). De igual forma en el resumen de diciembre a enero se puede observar que al trazar una línea paralela al deslizamiento nuevamente se presenta mayor depósito de material sobre la punta del talud (el material se acerca más a la línea roja). También se presentan roturas de terreno y concavidades que muestran las líneas del deslizamiento sobre el talud 1, esto indica que hubo desplazamiento de material y cambios geométricos (**Ilustración 90**). En el resumen de enero a febrero se puede evidenciar que aunque en la punta del talud los depósitos de nuevo material son mínimos, sobre la parte media se evidencian en el mes de enero superficies cóncavas y para el mes de febrero se puede evidenciar superficies

convexas, esto indica que evidentemente la cabeza del talud sigue perdiendo material pero esta vez se depositó sobre el cuerpo y pie del talud (**Ilustración 91**). Esto finalmente se puede corroborar con los perfiles topográficos extraídos de los DSM.

- **Perfiles topográficos:** En los formatos de resumen se presentan los perfiles topográficos extraídos de meses consecutivos donde se puede evidenciar lo revisado en los ortomosaicos. Para el resumen de noviembre a diciembre Los perfiles 1 y 2 demuestran la efectividad del DSM, evidenciando únicamente pequeños cambios a la geometría (de centímetros) al igual que como se puede observar en el ortomosaico donde no se ven cambios geométricos aparentes. Sin embargo, el perfil 3 demuestra que una parte del material de la cabeza del talud 1 se deslizo ladera abajo y se depositó en la base como ya se había evidenciado en el ortomosaico. Aunque la masa de material deslizada del perfil 3 parece mayor que la depositada, cabe resaltar que esta masa de material puede ser producto de la cercanía del perfil a la zona de árboles lo que puede generar el error de procesar una masa de terreno que no existe (**Ilustración 89**). En el resumen del periodo de diciembre a enero se presentan ligeros cambios en la geometría en los perfiles 1 y 2, lo cual permite corroborar lo evidenciado en los DSM y el ortomosaico. El perfil 3 sigue mostrando el mismo comportamiento de los anteriores meses, lo que indica que parte de la masa del terreno se sigue deslizando, buscando su ángulo de inclinación y estabilización natural (**Ilustración 90**). En el resumen del periodo de enero a febrero nuevamente se puede evidenciar por medio de los perfiles topográficos lo enunciado en la resta de los modelos digitales de superficie y los ortomosaicos. En este periodo ya se evidencian cambios en la geometría de los perfiles 1 y 2. El perfil 3 sigue mostrando el mismo comportamiento de los anteriores meses, pero al haber perdido gran parte de su material inicial, indica que parte de la masa del terreno ya está logrando una estabilización natural.



Ilustración 88. Estado de talud 1 noviembre, diciembre, enero y febrero (de izquierda a derecha respectivamente)

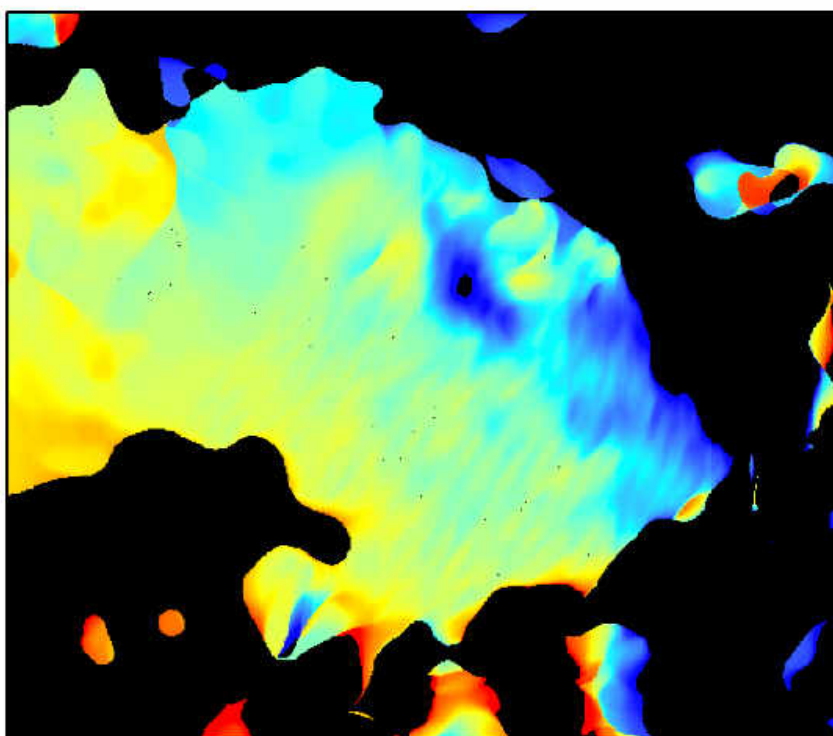
Lo que permite observar la metodología planteada y los resultados analizados se corrobora con las imágenes de los diferentes meses del talud 1 (**Ilustración 88**). En estas se muestra como desde el mes de noviembre a febrero la masa de suelo ha venido disminuyendo y deslizándose desde la cabeza del deslizamiento. Como no se evidencian grandes depósitos sobre la carretera se puede asumir que se ha estado realizando mantenimiento para que los constantes movimientos de masa no invadan la circulación de la vía.

Ortomosaico Noviembre

Ortomosaico Diciembre



Resumen Cambios Geométricos Talud 1 Noviembre-Diciembre



High : 1
Low : -1

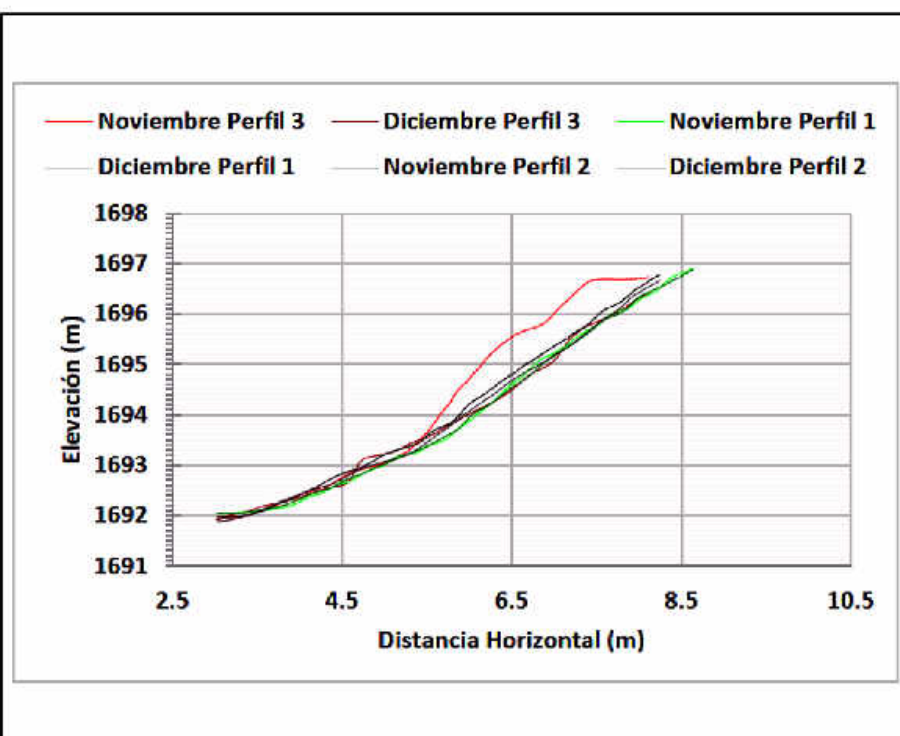
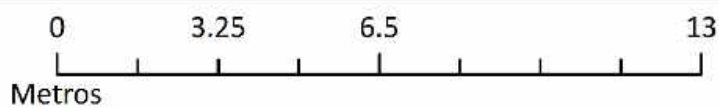


Ilustración 89. Resumen cambios geométricos Talud 1. Noviembre a diciembre.

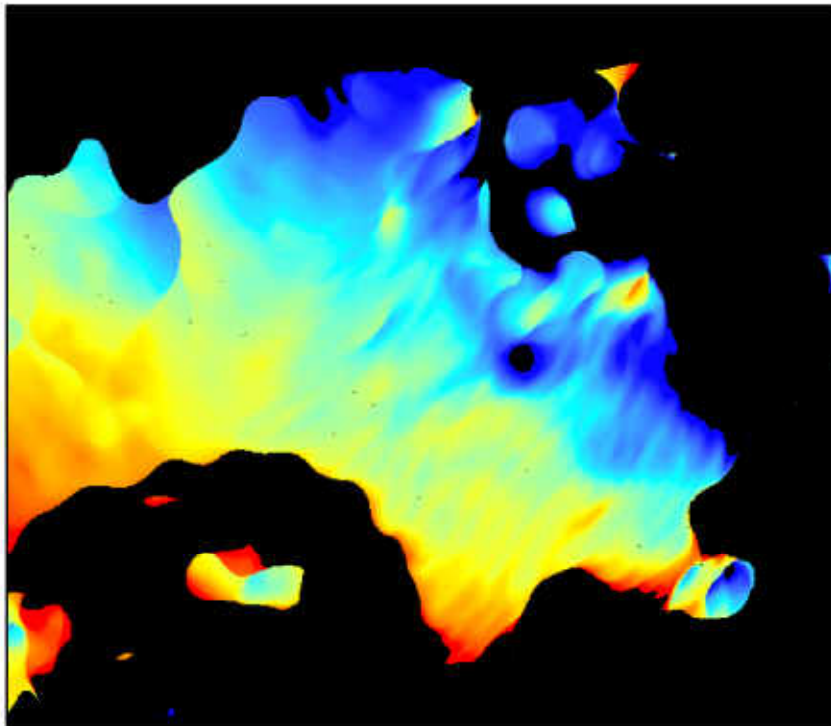
Ortomosaico Diciembre



Ortomosaico Enero



Resumen Cambios Geométricos Talud 1 Diciembre-Enero



High : 1
Low : -1

0 3.25 6.5 13
Metros

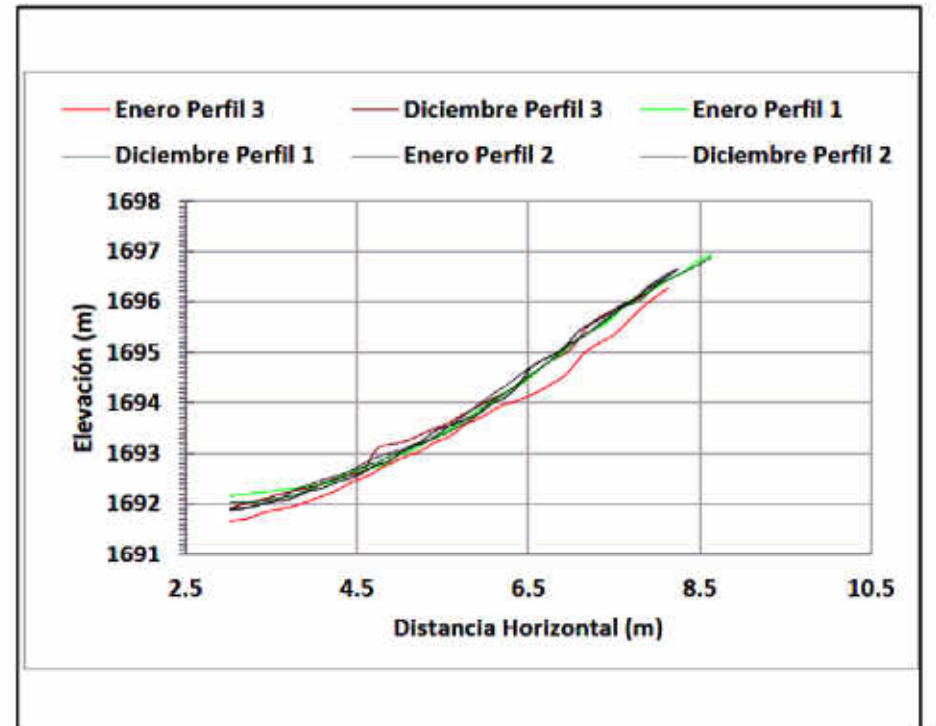


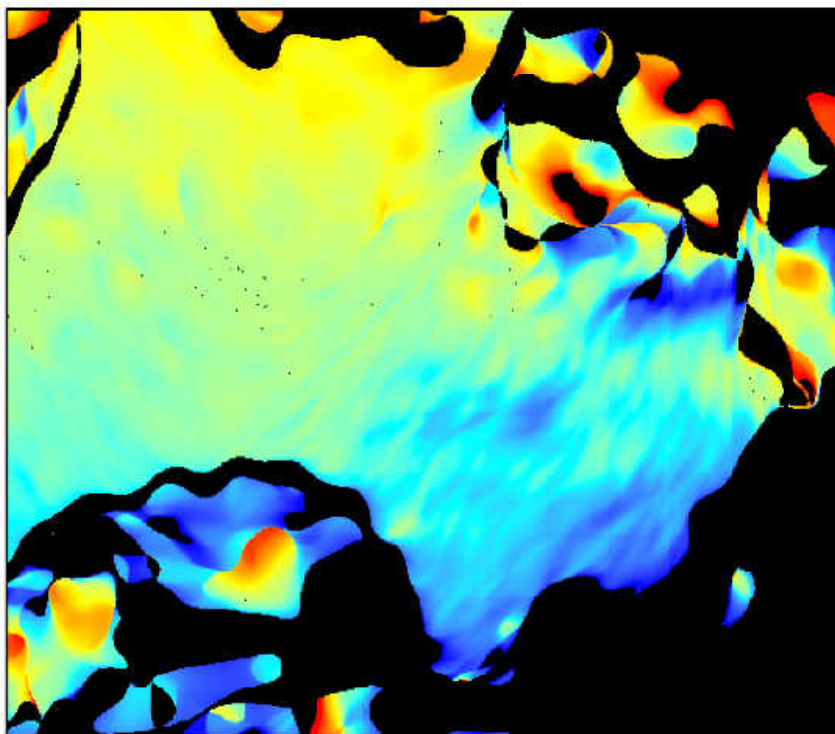
Ilustración 90. Resumen cambios geométricos Talud 1. Diciembre a enero.

Ortomosaico Enero

Ortomosaico Febrero



Resumen Cambios Geométricos Talud 1 Enero-Febrero



High : 1
Low : -1

0 3.25 6.5 13
Metros

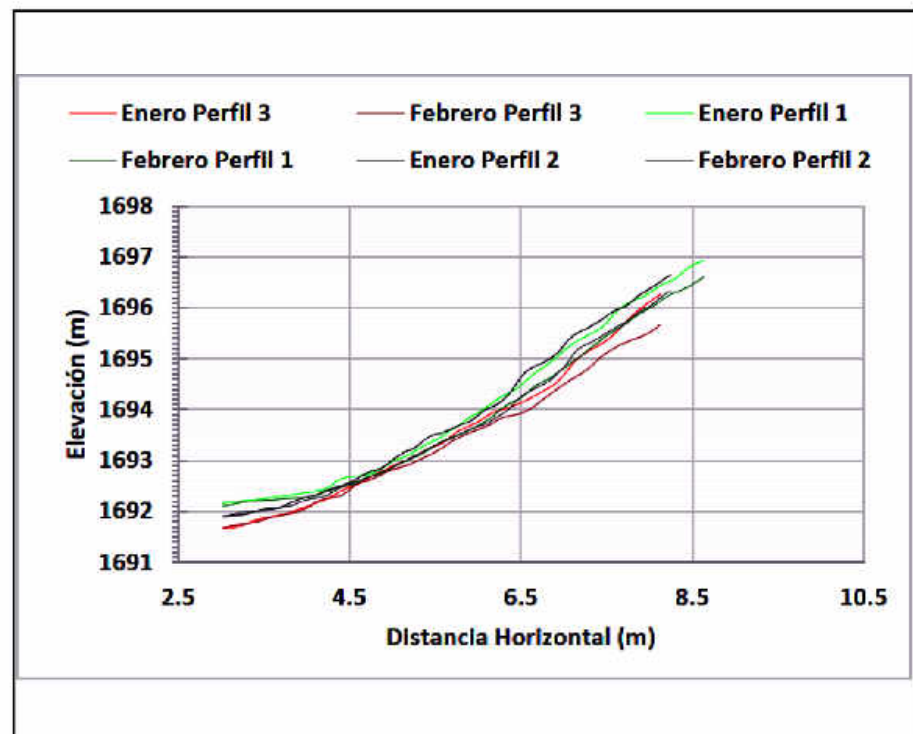


Ilustración 91. Resumen cambios geométricos Talud 1. Enero a febrero

6.2. Estudio Talud 2 noviembre de 2019 a febrero de 2020:

- **Resta de DSM:** En los formatos de resumen se presentan los gráficos de la resta de los modelos de superficie de meses consecutivos. El talud 2 presenta un comportamiento particular según los resultados obtenidos. Durante los meses de noviembre y diciembre el modelo demuestra una pérdida de material sobre toda la extensión del deslizamiento de aproximadamente 30 centímetros generando una gran pérdida de volumen del talud que no se deposita en ningún sector (**Ilustración 95**). En los meses de diciembre y enero el comportamiento es más drástico aun, dado que se generan depósitos de 70 centímetros de material sin ninguna fuente aparente de perdida (**Ilustración 96**). Por estas incongruencias se procede a realizar un análisis de fondo a los modelos. Se detecta el principal problema en el DSM de diciembre, en el cual, se encuentra una deficiencia en la definición de las alturas. Al analizar más a fondo las imágenes de noviembre y enero se detecta que efectivamente se están generando rellenos de material en el cuerpo del deslizamiento durante estos periodos como se muestra en la **Ilustración 92 e Ilustración 93**.



Ilustración 92. Talud 2 Noviembre (izquierda) Enero (Derecha) escarpe principal del deslizamiento.



Ilustración 93. Talud 2 Noviembre (izquierda) Enero (derecha) Cuerpo del deslizamiento.

Según se muestra en las anteriores imágenes, del escarpe principal del deslizamiento entre noviembre y enero se han generado grandes pérdidas del material las cuales han dejado más a la vista el material rocoso de estructura del Talud 2 (**Ilustración 92**). En el cuerpo del deslizamiento se muestra que las concavidades y zonas con espacios han sido rellenadas y casi todo este sector ha acumulado material (**Ilustración 93**). Revisando esta observación se procede a hacer un formato de resumen especial para los cambios geométricos entre el mes de noviembre y enero. En este resumen se muestra un DSM con mayor exactitud donde se ven los rellenos de las partes centrales del talud de aproximadamente 30 centímetros (**Ilustración 97**). Por tanto, una vez validada esta información, se procedió a dar por eliminado el vuelo del mes de diciembre. Como principales causas del error en el procesamiento de las imágenes se puede observar la sobreexposición que genero la toma de imágenes en tiempos de sol de medio día, generando pérdida de calidad en las imágenes y un modelo de baja calidad y calibración. Una vez solucionado el inconveniente en el mes de diciembre se procedió a analizar los cambios del periodo de enero a febrero. Durante este periodo no se detectan grandes cambios geométricos en el terreno según la escala de este (**Ilustración 98**). Lo que se puede deducir de estos DSM es que principalmente durante noviembre y enero el talud presento acumulamiento de material en el cuerpo y pie del deslizamiento proveniente del desgaste y erosión del escarpe principal del mismo. Durante el mes de enero y febrero se detuvo el desprendimiento de material y se mantuvieron los niveles topográficos del terreno. Es importante recalcar la precisión de los DSM al demostrar los depósitos de material en un periodo y la poca alteración de la geometría durante otro periodo. Esto se puede corroborar en los ortomosaicos presentados.

- **Ortomosaico:** En los formatos de resumen se presentan los ortomosaicos de meses consecutivos. En el resumen de noviembre a diciembre se puede observar la diferencia de calidad de las imágenes demostrando la sobreexposición solar que generó los problemas en el DSM de diciembre (**Ilustración 95**). De igual forma en el resumen de diciembre a enero se puede observar la misma sobreexposición del mes de diciembre comparada con la calidad de la imagen de ortomosaico del mes de enero (**Ilustración 96**). En el resumen de enero a febrero se puede evidenciar la poca alteración de todas las partículas y rocas en la zona de ladera lo que corrobora principalmente los inexistentes cambios geométricos detectados en los DSM de este periodo (**Ilustración 98**). Esto finalmente se puede corroborar con los perfiles topográficos extraídos de los DSM.
- **Perfiles topográficos:** En los formatos de resumen se presentan los perfiles topográficos extraídos de meses consecutivos. En los perfiles topográficos se puede evidenciar lo revisado en los ortomosaicos. Para el resumen de noviembre a diciembre Los perfiles demuestran los errores ya detectados en los DSM, evidenciando pérdidas de 30 centímetros en toda la superficie del Talud 2 (**Ilustración 95**). Al realizar la corrección y comparar únicamente los meses de noviembre y enero se detecta en los perfiles topográficos los depósitos y desprendimientos de material observados en los DSM y los ortomosaicos. Esto permite corroborar la existencia de un movimiento y acumulación de material sobre toda la ladera entre los meses de noviembre y enero (**Ilustración 97**). Finalmente, en los perfiles del periodo de enero a febrero no se detecta ningún cambio geométrico tal como se evidencio durante la etapa de comparación de los DSM.



Ilustración 94. Perfiles extraídos del Talud 2 en estudio.

Los resultados y observaciones de la metodología planteada de monitoreo a cambios geométricos en taludes permiten evidenciar el comportamiento del talud 2 durante los meses de estudio. En estos resultados se muestra como desde el mes de noviembre a enero la masa de suelo ha venido disminuyendo y deslizándose desde el escarpe principal. Los depósitos de material sobre el cuerpo y el pie del deslizamiento detectados por el estudio representan una gran amenaza para la temporada de lluvias. Todo el material que ha generado el cambio de la geometría del talud se encuentra simplemente sobrepuesto en la base rocosa del Talud 2 y en su mayoría son materiales arenosos y caídos de roca. Esta gran masa de material es completamente susceptible a un movimiento en masa de flujo durante las temporadas de lluvias que se aproximan después del estudio y puede ocasionar una tragedia para los vehículos o personas que transiten por el sector.

Ortomosaico Noviembre

Ortomosaico Diciembre



Resumen Cambios Geométricos Talud 2 Noviembre-Diciembre

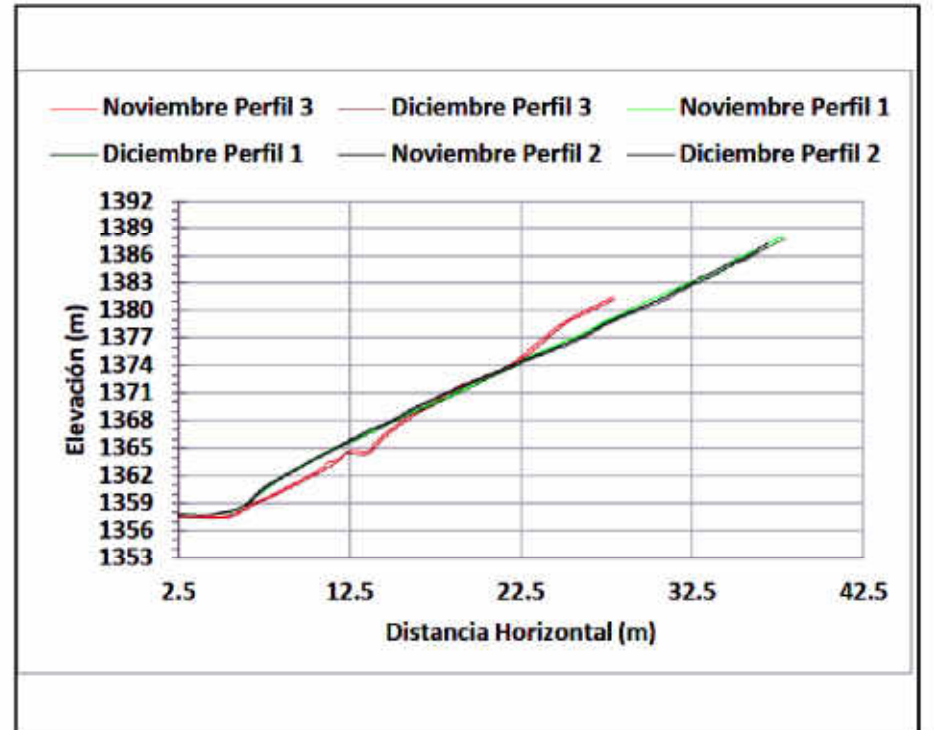
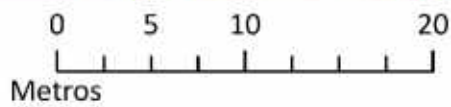
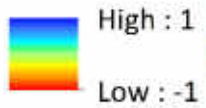
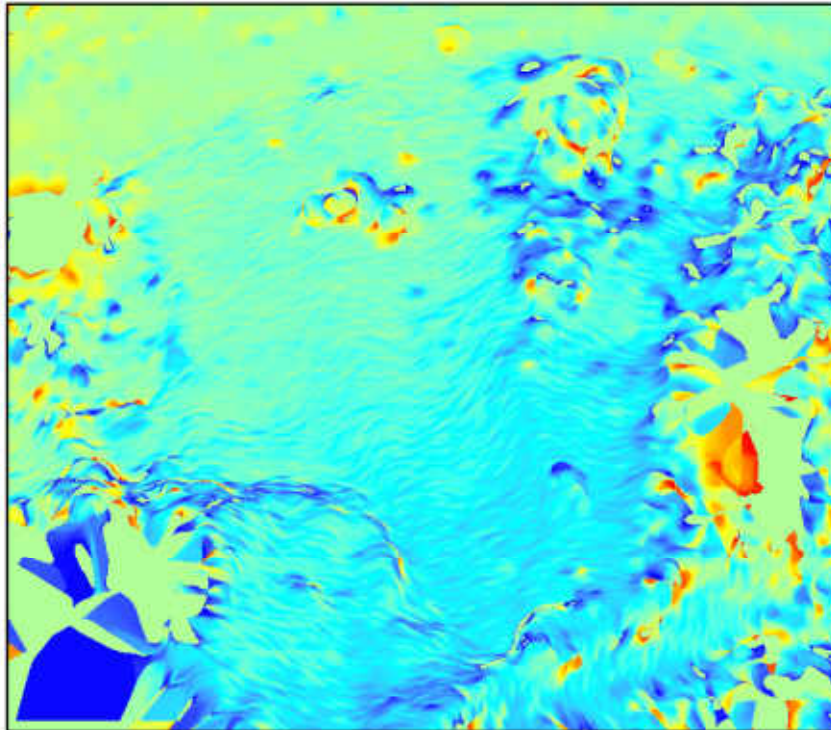


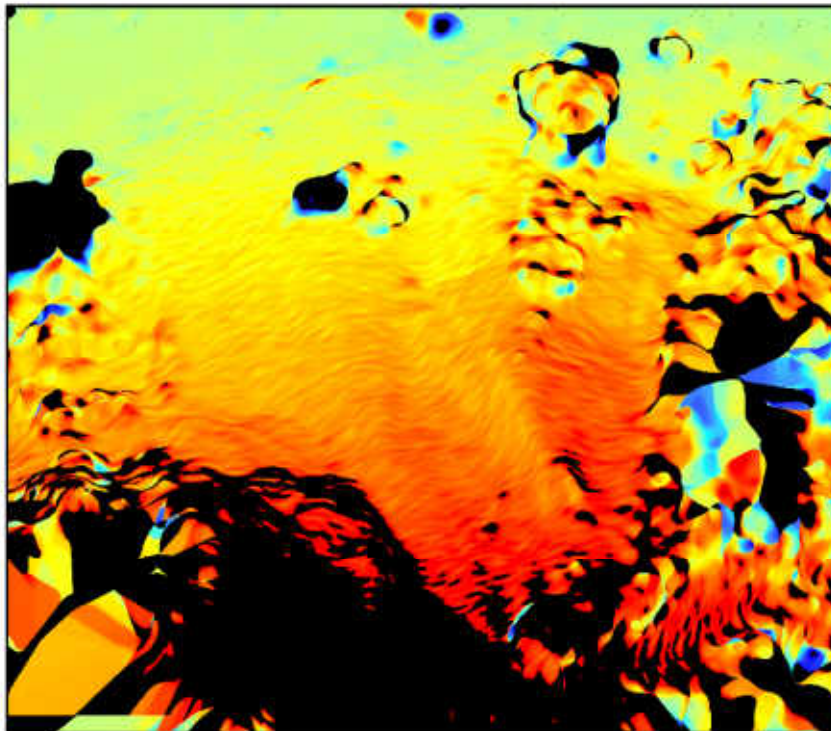
Ilustración 95. Resumen cambios geométricos Talud 2. Noviembre a Diciembre.

Ortomosaico Diciembre

Ortomosaico Enero



Resumen Cambios Geométricos Talud 2 Diciembre-Enero



High : 1
Low : -1

0 5 10 20
Metros

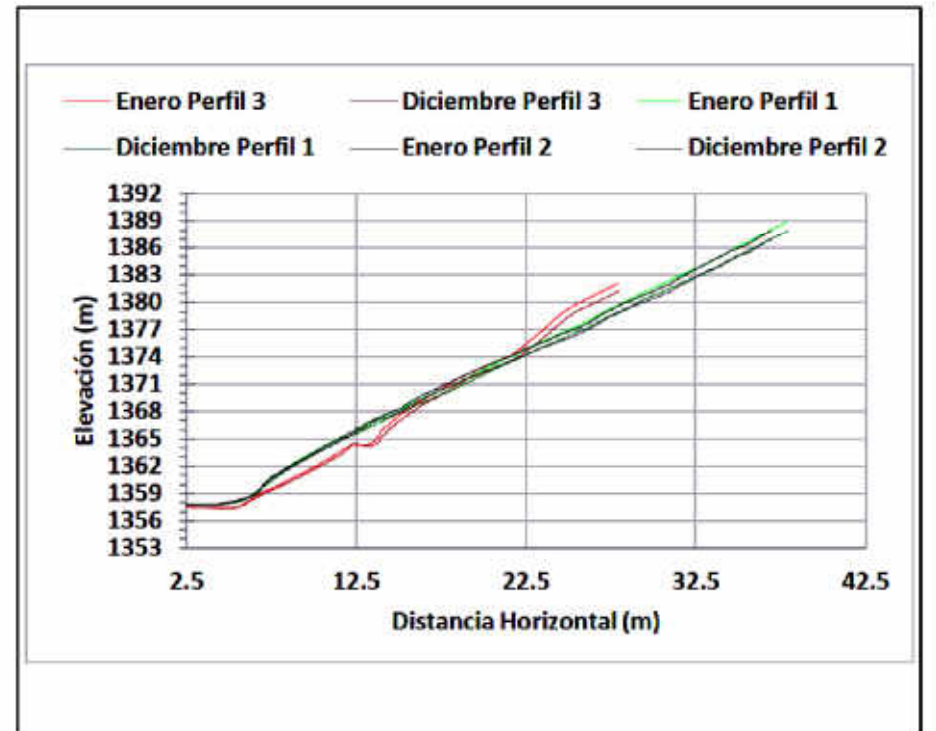


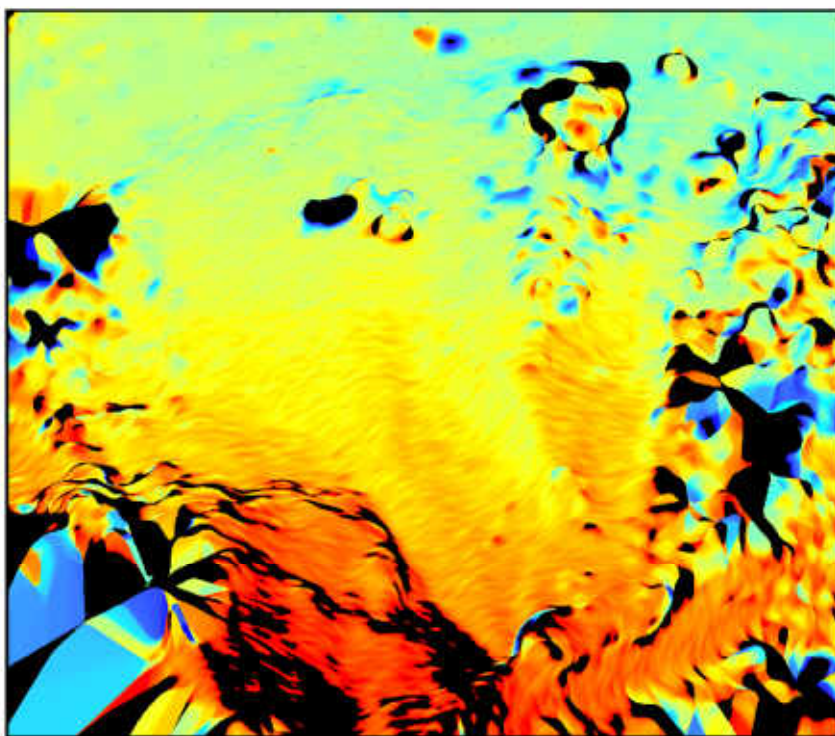
Ilustración 96. Resumen cambios geométricos Talud 2. Diciembre a Enero.

Ortomosaico Noviembre

Ortomosaico Enero



Resumen Cambios Geométricos Talud 2 Noviembre-Enero



High : 1
Low : -1

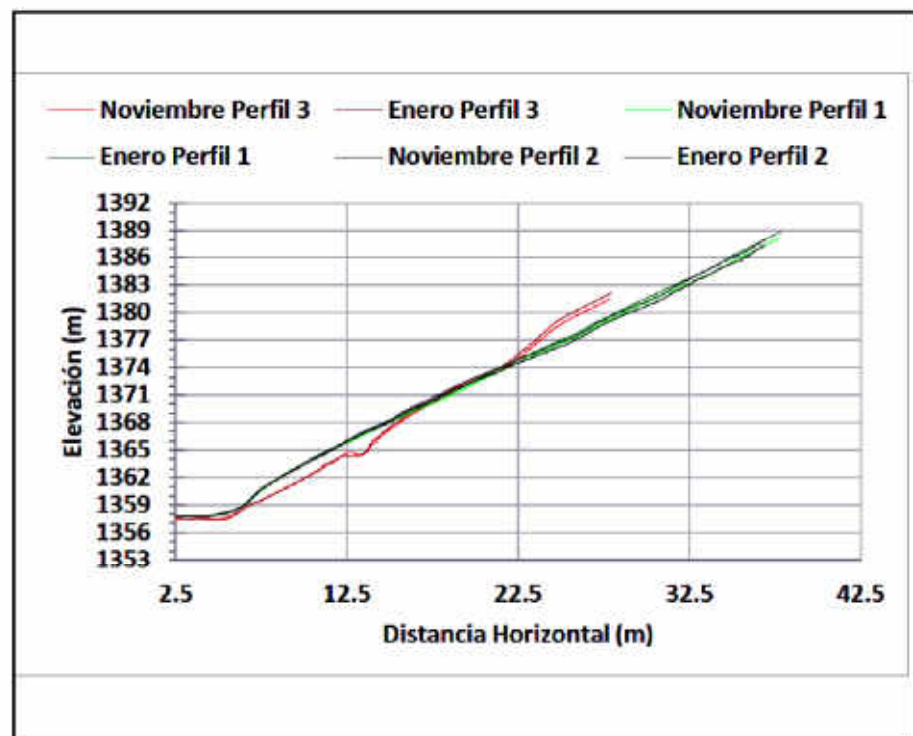
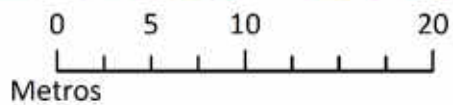


Ilustración 97. Resumen cambios geométricos Talud 2. Noviembre a Enero.

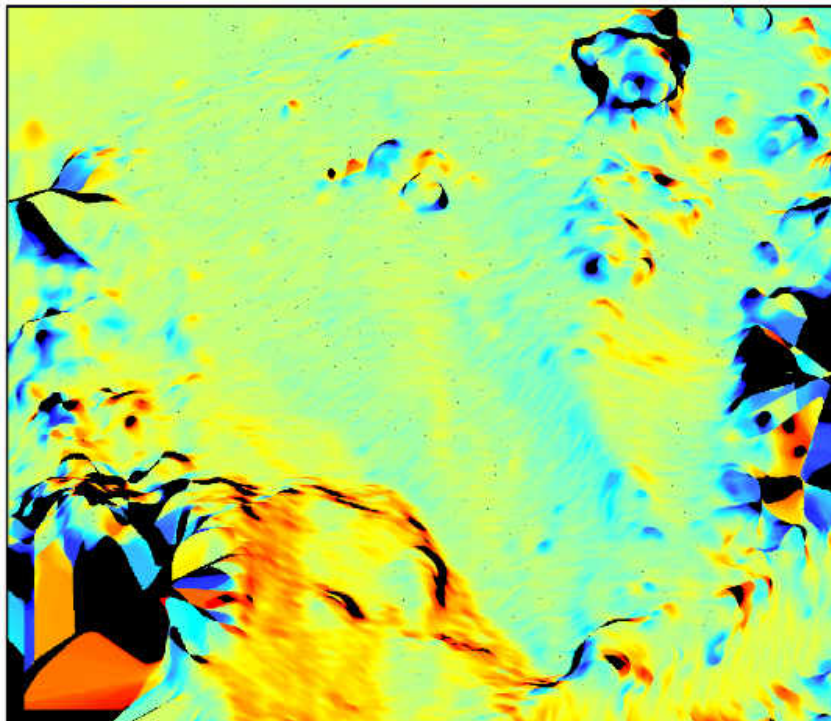
Ortomosaico Enero



Ortomosaico Febrero



Resumen Cambios Geométricos Talud 2 Enero-Febrero



High : 1
Low : -1

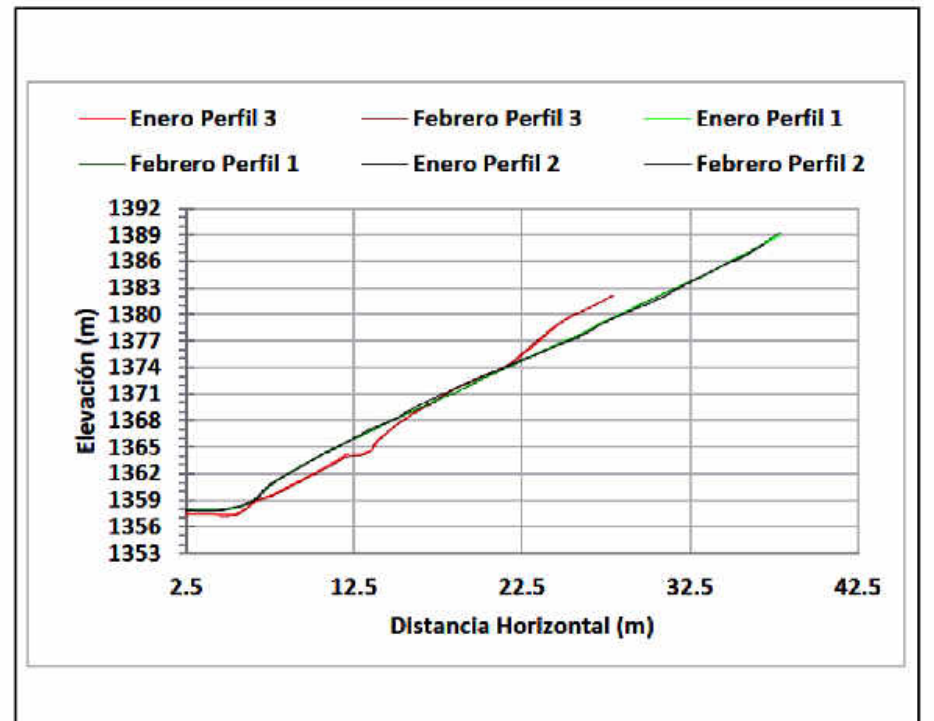
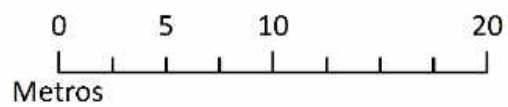


Ilustración 98. Resumen cambios geométricos Talud 2. Enero a Febrero

6.3. Estudio Talud 3 noviembre de 2019 a febrero de 2020:

- **Resta de DSM:** En los formatos de resumen se presentan los gráficos de la resta de los modelos de superficie de meses consecutivos. El talud 3 presenta en los meses de noviembre a diciembre unos ligeros movimientos de hasta 20 cm. Sin embargo, dado que la precisión del modelo es de 20 centímetros en altura y con una correspondiente revisión a las imágenes de ortomodelo, se relacionan estos movimientos a la incertidumbre del modelo (**Ilustración 101**). Sobre el periodo de diciembre a enero el modelo cambia el comportamiento y presenta pérdidas de material sobre el cuerpo y la cabeza del deslizamiento que están dentro del rango de incertidumbre. Sin embargo, en la base del deslizamiento las pérdidas y rellenos superan los 40 centímetros lo cual indica posibles movimientos de terreno y cambios de la geometría (**Ilustración 102**). La resta indica que el material se ha desplazado sobre la base del deslizamiento (un resultado que corroboran los ortomosaicos mostrados). El periodo de enero a febrero presenta una pérdida de material en la escarpa principal y depósito en la base exagerado (**Ilustración 103**). Al realizar el análisis correspondiente de ortomosaicos y modelos digitales de superficie se detecta que la imagen y modelos de febrero se encuentran mal geolocalizados es decir los puntos de control en tierra para estas imágenes fueron insuficientes dada la altura de 120 metros y el área de mapeo para geolocalizar todas las imágenes. Al intentar comparar dos imágenes geolocalizadas en diferentes espacios el modelo automáticamente detecta cambios exagerados. Esto indica que instalar más puntos de control en tierra para alturas de vuelo tan elevadas es importante a la hora de calibrar los modelos. Esto se puede evidenciar de mejor manera en los perfiles correspondientes a este periodo.
- **Ortomosaico:** En los formatos de resumen se presentan los ortomosaicos de meses consecutivos. Sobre el periodo de noviembre y diciembre no se encontraron diferencias entre los ortomosaicos por lo que se puede concluir que la masa de terreno se mantuvo estable sin cambios geométricos ni desplazamientos (**Ilustración 101**). Durante el periodo de diciembre a enero se presentan cambios por fuera del rango de incertidumbre del modelo lo que permite inducir unos movimientos. Una vez revisados los ortomosaicos se puede evidenciar que se ha desplazado parte del terreno del cuerpo y pie del deslizamiento y se ha depositado sobre base, lo que se puede corroborar con la información del DSM (**Ilustración 102**). Los ortomosaicos una vez más permiten corroborar los movimientos significativos presentados en la resta de los modelos digitales de superficie permitiendo validar nuevamente la metodología para detectar cambios geométricos durante diferentes periodos de tiempo. Durante el último periodo, los ortomosaicos no presentan cambios, sin embargo, no se puede obtener un DSM confiable por la geolocalización incorrecta que presentaron los resultados del mes de febrero (**Ilustración 103**).



Ilustración 99. Talud 3. Perdidas de material y depósitos parte baja periodo de diciembre (izquierda) enero (derecha).

- Perfiles topográficos:** Los perfiles topográficos no presentan mucha información dada la magnitud del talud comparada con los movimientos (**Ilustración 100**). Sin embargo, presentan un comportamiento que permite describir lo mencionado anteriormente en las restas de los modelos digitales de superficie y los ortomosaicos. En los perfiles del periodo de noviembre a diciembre no se presenta ninguna diferencia relevante, lo que corrobora la inexistencia de movimientos en este periodo (**Ilustración 101**). Los perfiles del periodo de diciembre a enero evidencian acumulaciones de material en la parte baja de hasta 60 centímetros como se muestra en los ortomosaicos (**Ilustración 102**). Para el periodo final de enero a febrero se puede corroborar que todo el perfil correspondiente a febrero dibuja una línea paralela con respecto a enero lo que permite identificar una vez más lo visualizado en los ortomosaicos, es decir, todo el modelo digital de superficie de febrero se encuentra geolocalizado más hacia el occidente (**Ilustración 103**).

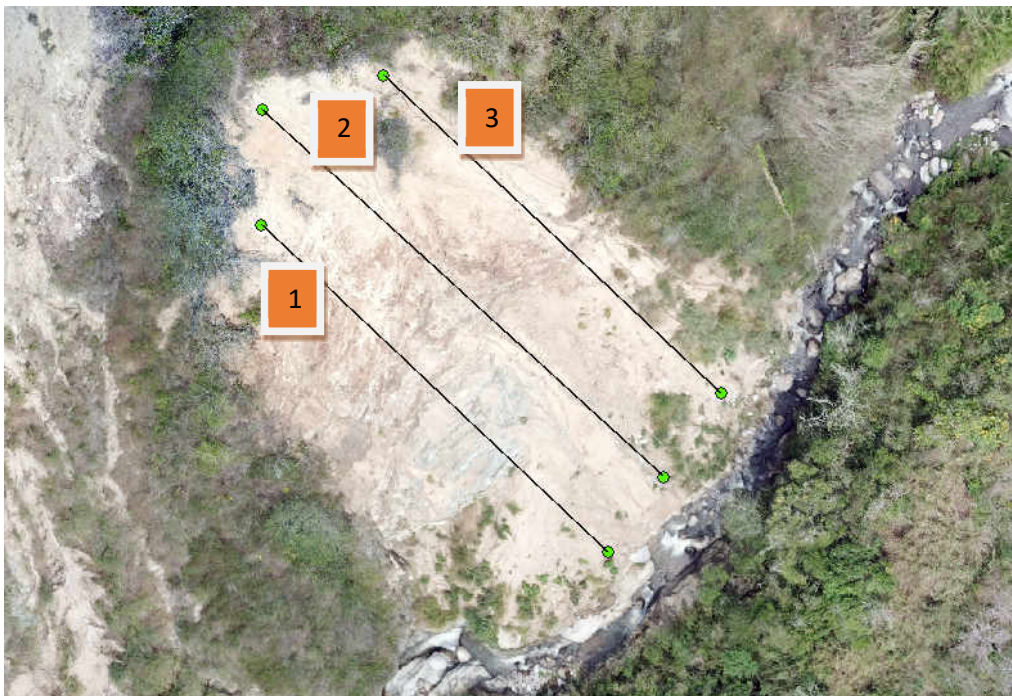


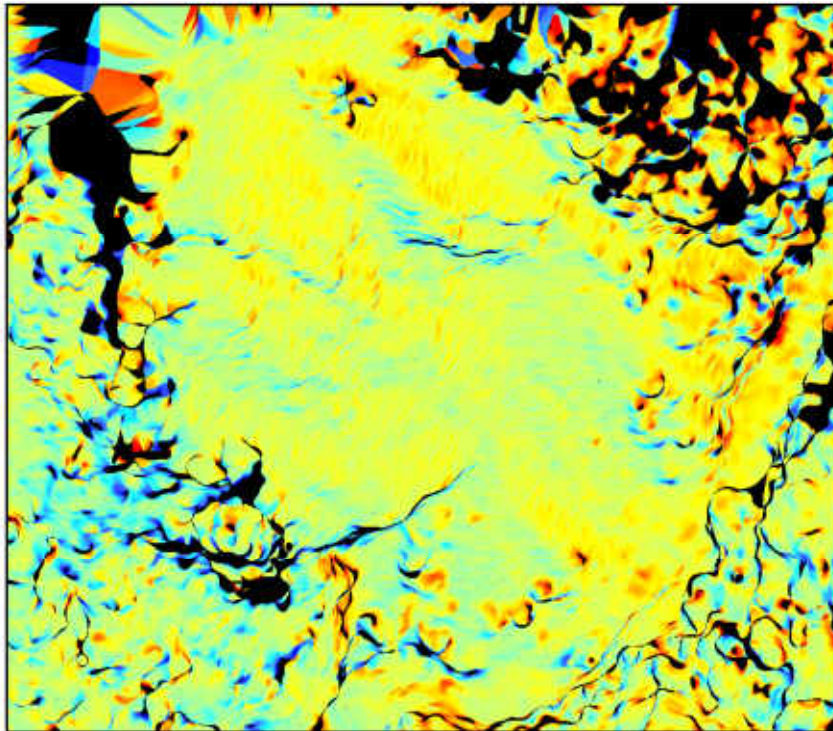
Ilustración 100. Perfiles extraídos del Talud 2 en estudio.

Ortomosaico Noviembre

Ortomosaico Diciembre



Resumen Cambios Geométricos Talud 3 Noviembre-Diciembre



High : 1
Low : -1

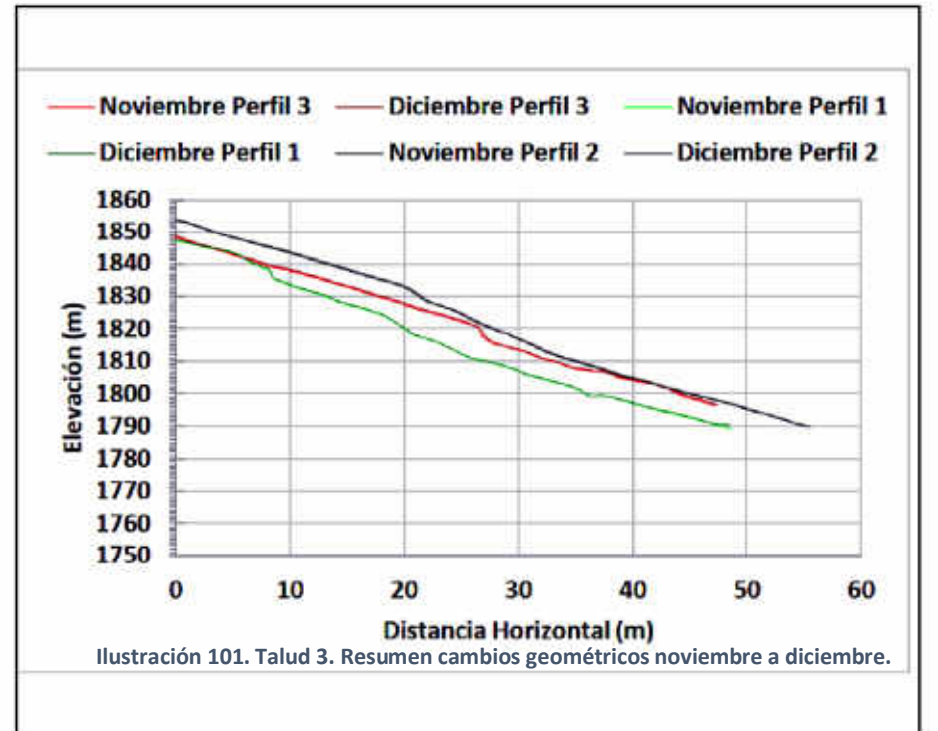
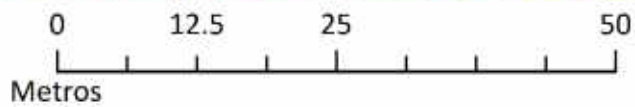


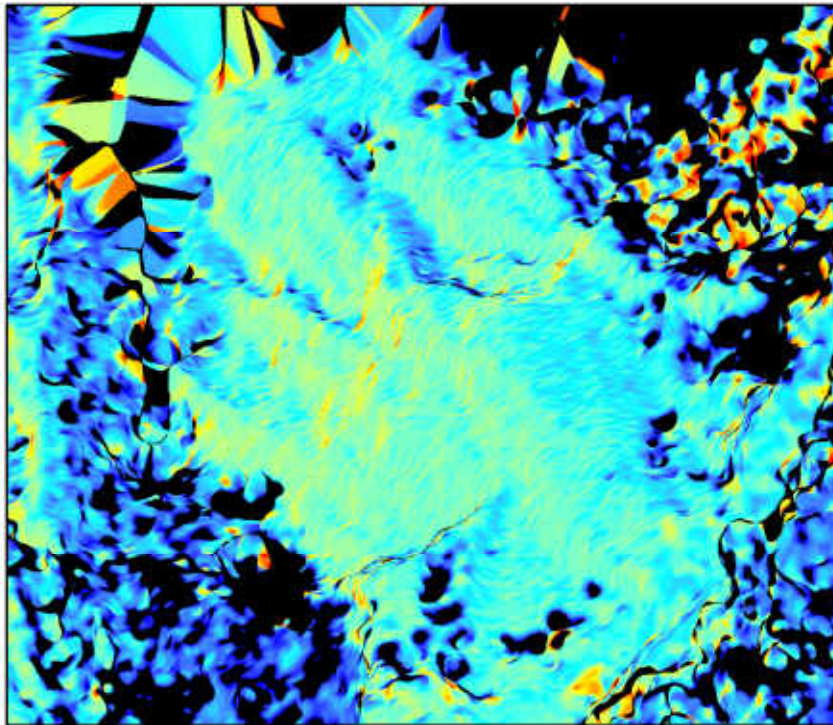
Ilustración 101. Talud 3. Resumen cambios geométricos noviembre a diciembre.

Ortomosaico Diciembre

Ortomosaico Enero



Resumen Cambios Geométricos Talud 3 Diciembre-Enero



High : 1
Low : -1

0 15 30 60
Metros

Enero Perfil 3 Diciembre Perfil 3 Enero Perfil 1
Diciembre Perfil 1 Enero Perfil 2 Diciembre Perfil 2

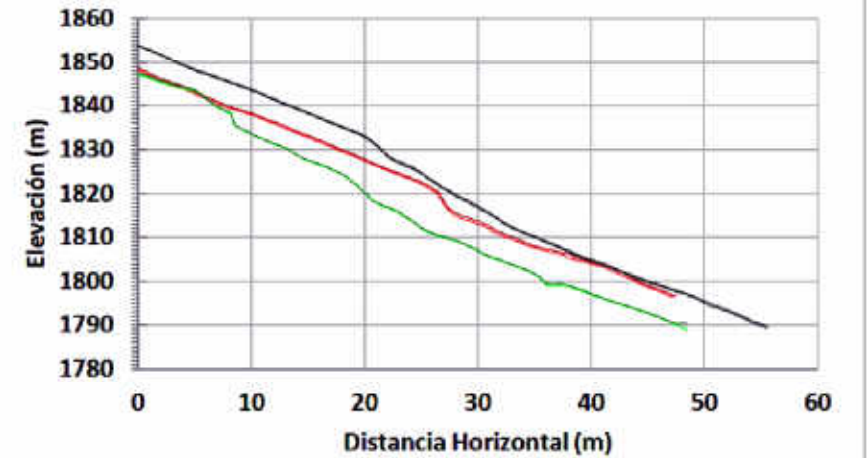


Ilustración 102. Talud 3. Resumen cambios geométricos diciembre a enero.

Ortomosaico Enero

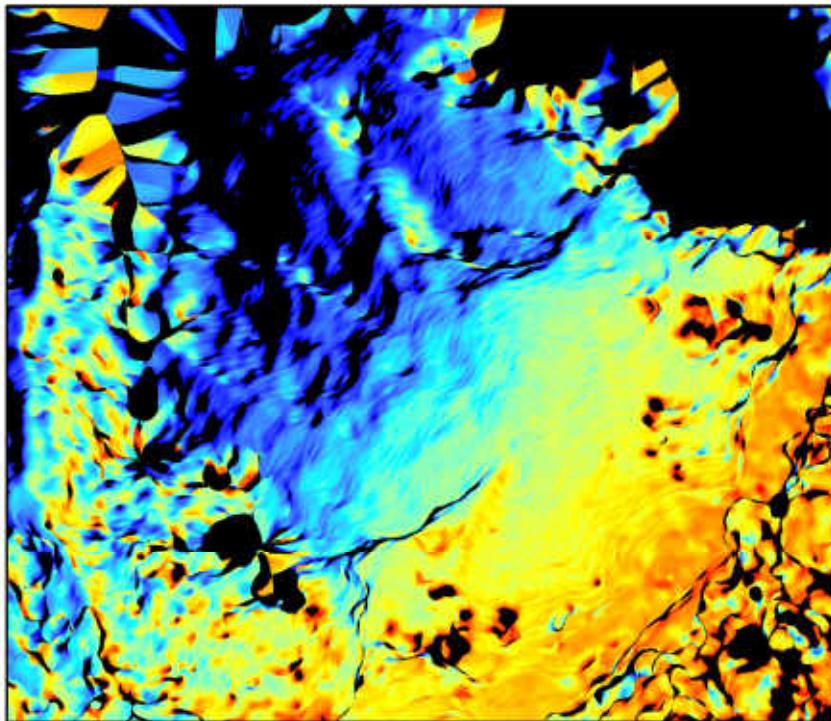


Ortomosaico Febrero



Resumen Cambios Geométricos Talud 3 Enero-Febrero

N



High : 1
Low : -1

0 12.5 25 50
Metros

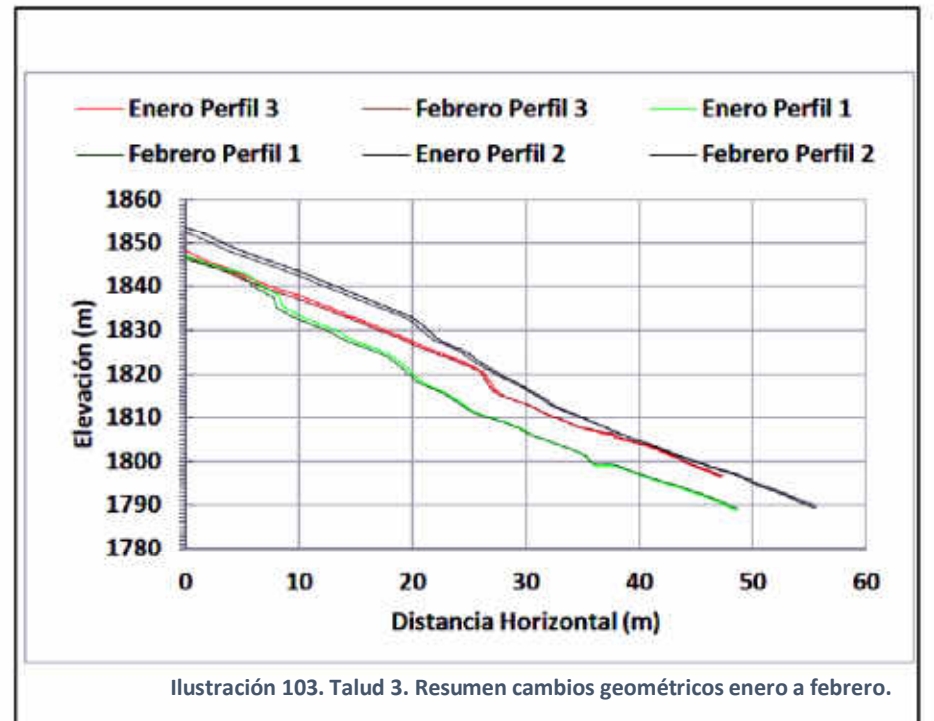


Ilustración 103. Talud 3. Resumen cambios geométricos enero a febrero.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El monitoreo de zonas de ladera es un trabajo que en nuestro país no se ha realizado con las frecuencias ni se le ha dado la suficiente importancia que amerita. Sin embargo, múltiples desastres que han ocurrido en nuestro territorio colombiano han llevado al sector privado, sector público y la educación a interesarse en este tema. La investigación desarrollada ha permitido acoplar una metodología de la Universidad De Granada en España para el monitoreo de corredores viales con múltiples problemáticas por deslizamientos. Esta metodología ha demostrado ser útil en el análisis de corredores viales según lo llevado a cabo con esta investigación. A continuación se presenta las conclusiones obtenidas de la implementación de cada fase de la metodología y las recomendaciones generales para su correcta implementación.

- **Fase 1: Recolección de información**

La fase de recolección de información comprende inicialmente un trabajo de oficina que ayuda a caracterizar e identificar el corredor vial que se desea estudiar. Es fundamental que en esta fase se identifiquen previamente todas las posibles combinaciones de corredores viales secundarios que afecten el corredor vial en estudio. Un ejemplo de esto fue el estudio del Talud 3 que se localizaba en un desvío cercano al corredor principal. En la implementación de la metodología, el desconocimiento en la etapa de recolección de información de estos desvíos del corredor principal generó dudas acerca del proceder con ese talud en concreto, que sin embargo se incluyó en el estudio. En conclusión, se debe tener una identificación exacta del corredor o corredores viales a estudiar para determinar el alcance de la implementación de la metodología.

Adicionalmente dado que se plantea una metodología de monitoreo, es importante recalcar que la etapa de recolección de información y definición del alcance se debe actualizar cada vez que se detecten nuevas anomalías y se deseen incluir nuevos corredores viales al estudio. Adicional a esto, se debe integrar a la fase de recolección de información los resultados de la implementación de la metodología en periodos anteriores con el fin de generar un historial de estudio pertinente.

La justificación de incluir una fase de recolección de información radica principalmente en tres factores: (i) la definición de un alcance para el monitoreo; (ii) la creación de un historial de la implementación del monitoreo en periodos anteriores; y (iii) la estimación de unos costos estimados para la etapa de trabajo de campo. Aunque el documento no implique una descripción detallada de los costos incurridos para el estudio, es claro que es una metodología de monitoreo de menor costo que las metodologías de instrumentación. Se deja como recomendación para futuros estudios y seguimientos a la metodología, la implementación de una fase de detalle que permita estimar los costos y hacer un seguimiento y comparación con metodologías que son tendencia en el campo del monitoreo de taludes y zonas de ladera.

Los formatos de recolección de la información también hacen parte importante de esta fase. Los formatos de recolección se deben actualizar con cada nueva implementación de la metodología para mantener constantes mejoras a esta e incluir nuevas características que no se encuentren en los formatos pero sean necesarias. En los anexos se muestran los formatos utilizados para recolección de información los cuales se toman de la metodología utilizada por la Universidad De Granada en España.

- **Fase 2: Trabajo de campo**

La fase de trabajo de campo comprende principalmente los recorridos realizados por el corredor vial de estudio. Es importante tener conocimiento previo de la ruta que se desea estudiar en el alcance de la aplicación de la metodología para poder implementar unos recorridos eficaces. Se debe de preferencia incurrir en paradas sobre cada talud o ladera que presente indicadores de deslizamientos nuevos, pasados o activos. La implementación de la fase de trabajo de campo en la metodología permitió en este estudio realizar una completa caracterización e inventario de las zonas a deslizamiento para la correcta escogencia de las zonas de estudio.

Para la fase de trabajo de campo, se observó principalmente que la identificación de zonas a deslizamientos fue bastante sencilla por sus características particulares. Sin embargo, algunos factores no fueron tenidos en cuenta a la hora de realizar el estudio (e.g.). Por esta razón se recomienda tener en cuenta las siguientes actividades en la fase de trabajo de campo.

1. **Incluir en los formatos de inventario de zonas de ladera hora de inicio de estudio y finalización:** Esto es necesario dada la cantidad de información y fotografías que serán tomadas durante el trabajo de campo. Esto permite a la hora de digitalizar los formatos la inclusión de fotografías y de más información que se haya adquirido durante ese periodo de tiempo.
2. **Incluir en los formatos de inventario las alturas de las fotografías de caracterización del DRON:** La finalidad de esta inclusión es que cuando se realice el trabajo de campo se tomen fotografías ortogonales al talud inventariado a diferentes alturas permitiendo tener un historial de fotografías que permita tener una base de datos más amplia para realizar la caracterización del deslizamiento durante la fase de digitalización de la información. Adicional a esto las alturas permiten determinar a qué elevación el dron puede realizar los planes de vuelos horizontalmente sin obstáculos y evitar que en la fase de diseño de planes de vuelo se asignen alturas erradas que puedan llevar a accidentes o pérdidas del equipo.
3. **Incluir en los formatos de inventario de taludes el clima particular de la zona:** Esto dado que por la orografía colombiana se pueden presentar cambios de clima drásticos en menos de 20 km de recorrido, como fue el caso del corredor vial de Tona-El mortiño. Se identifico principalmente zonas en las cuales el clima puntual generaba neblina sobre la zona y otros sectores en los cuales se presentaba sobreexposición por el sol.
4. **Realizar fotografías verticales desde la zona de talud permitiendo observar la visibilidad que otorga la alta vegetación a este:** Cuando se realizó el procesamiento de la información se pudo observar que las zonas de ladera que estén rodeadas por alta vegetación pueden ser estudiadas siempre y cuando tengan claros verticales que permitan al dron fotografiar la zona de talud de forma vertical (Talud 1 como ejemplo).
5. **Ubicar posibles zonas para la instalación de puntos de control en tierra adicionales a las impuestas frente a la zona del talud en el pavimento:** Si se cuenta con una vía de alto o medio transito se puede ver interrumpida la visibilidad de los GCPs por el DRON a la hora de capturar las imágenes. Adicional a esto los GCPs en múltiples puntos permiten la mejor caracterización del terreno y precisión de la información durante la etapa de procesamiento.

6. **Realizar registro fotográfico en terreno de cada zona de talud inventariada:** En caso de presentarse una anomalía o deslizamiento futuro, esta información permitirá tener un registro inicial de las laderas que permita conocer su estado inicial si la zona no fue escogida como de estudio.
7. **Determinar los factores que por el tipo de material pueden desencadenar un movimiento en masa:** A la hora de caracterizar la zona de ladera inventariada se debe considerar la presencia de nivel freático y agua de escurrimiento dado que esto representa el estado de presión de poros al que se encuentra sometido el talud inventariado en ese momento.
8. **Inventariar las zonas con protección o estabilizaciones realizadas:** Esto permite tener un historial práctico de todos los movimientos en masa ocurridos o no, que permita dada la posible desestabilización de la masa de terreno, caracterizar el estado inicial del mismo.
9. **Inventariar las zonas relacionadas con todos los tipos de deslizamientos:** Hay que resaltar que aunque en el documento se realizó el inventario a zonas con cicatrices de deslizamientos pasados, el formato debe incluir y ser estricto para el inventario de zonas que puedan presentar cualquier tipo de deslizamiento. Aunque no sean visibles hay que añadir parámetros que permiten identificar zonas que posiblemente se pueden desestabilizar ante cualquier tipo de detonante. Para esto hay que hacer una revisión bibliográfica mas a fondo que permita reunir las características de estas zonas y acoplarlas al formato de inventario de taludes e inestabilidades.

De manera general se puede concluir que la fase de trabajo de campo inicial es la más importante de la metodología. Una buena obtención de información base del corredor vial y la caracterización de la mayor cantidad de información posible, permiten al profesional en ingeniería en oficina determinar correctamente las zonas con posible amenaza a deslizamiento y zonas que principalmente pueden ser de estudio para el corredor.

La identificación de zonas que cumplieran con todos los factores planteados que pueden desencadenar un evento de movimiento en masa, permitieron según la metodología implementada, la caracterización de tres zonas con amenaza a deslizamiento ante un posible detonante como pueden ser las lluvias que generan saturación del terreno, presión de poros adicional y escorrentía superficial. Esto indica que fue posible por medio de la metodología de evaluación de zonas con amenaza a deslizamiento, seleccionar casos representativos para el corredor vial “Tona-El Mortiño”.

En caso de realizarse la implementación de la metodología de forma constante en el corredor vial, es importante que se realice un nuevo inventario de movimientos en masa al menos en cada cambio de periodos de lluvia y periodos secos, permitiendo actualizar las zonas de estudio constantemente.

- **Fase 3: Diseño y ejecución de planes de vuelo**

El diseño de vuelos comprende el establecimiento de las principales características de los vuelos a realizar en los taludes escogidos como zonas de estudio. Las imágenes aéreas del estudio se obtuvieron por medio de los planes de vuelo planteados desde la etapa de diseño, sin embargo, es importante que se tenga claridad de los recursos con los que se cuenta para ejecutar los planes de vuelo. El DRON con el que se va a tomar las imágenes debe contar con estabilizadores de cámara y vuelo que permitan obtener imágenes de calidad con buen enfoque. Adicional a esto, debe ser un

DRON con capacidad de volar en alturas elevadas dado que como se evidencio en el Talud 2, algunas veces se hace necesario el estudio de zonas de montaña. Finalmente se debe realizar la escogencia de programas de procesamiento y planes de vuelo que sean compatibles con el DRON seleccionado.

Como conclusiones generales de la fase de diseño de vuelos se observó la necesidad de realizar vuelos de prueba que permitan visualizar de manera previa el alcance de las fotografías registradas. Como se evidencio en el Talud 2 y Talud 3 una vez iniciada la metodología y seleccionados los planes de vuelo fue necesario ampliar las áreas debido a la falta de información de la parte alta del talud. Este evento únicamente se evidencio a la hora de realizar el procesamiento de imágenes por lo que si no se establece un vuelo de prueba se puede perder tiempo con vuelos que no otorguen información alguna.

En cuanto al software y el DRON es importante mencionar que esto implica un costo inicial para la implementación de la metodología. Sin embargo, como se puede observar en la etapa de resultados, monitorear zonas con amenaza a deslizamiento es viable con estos dispositivos. Por esta razón, para los diversos entes privados y públicos de sistemas de gestión de riesgos es una inversión baja en comparación con los beneficios que podría traer analizar cambios geométricos en taludes. Se estima aproximadamente una inversión de 30 millones de pesos colombianos para tener un dispositivo y un software que permitan obtener los resultados entregados por esta investigación, lo cual ante el valor de las pérdidas humanas o materiales que se puedan tener por no monitorear estas zonas, es un valor insignificante.

Para la implementación de la metodología es importante determinar la periodicidad de los vuelos y las fechas en las que se deben realizar. De manera general se concluye que los vuelos mensuales permiten identificar cambios en zona a deslizamiento que pueden estar indicando un movimiento en masa. Además, la etapa de procesamiento de información es más extensa en cuanto a más zonas de estudio se seleccionen. Se determina que aproximadamente para el estudio de tres zonas, el tiempo estimado de procesamiento de imágenes es de una semana y de presentación de resultados 2 semanas. Este tiempo promedio se debe tener en cuenta a la hora de definir la periodicidad de los vuelos, dado que frecuencias muy bajas (una semana) no van a permitir el completo procesamiento de la información ni entrega de resultados por lo que no es conveniente. Por otro lado, frecuencias muy largas de dos meses o más generan tiempos en los cuales el talud o la zona de ladera puede desestabilizarse y generar el movimiento en masa que se está intentando monitorear.

Adicional a esto se determinó que la metodología al detectar cambios geométricos en taludes cuando no se tiene presencia de fuertes lluvias o temporadas secas permite establecer la incidencia o no de mayores desplazamientos o movimientos de terreno durante las temporadas de lluvia. Esto nos permite concluir que la metodología de manera general debería planearse para la ejecución de los vuelos 4 meses con anterioridad a las temporadas de lluvia, permitiendo así detectar movimientos de terreno que serán mucho más susceptibles con la presencia de lluvias por la incidencia que genera la presión de poros y la escorrentía superficial en los deslizamientos. Una buena planeación de la periodicidad permite generar estrategias de prevención ante posibles amenazas a deslizamiento detectadas por los cambios geométricos evidenciados durante la etapa de estudio.

Para esta fase es importante si se desea implementar la metodología tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Se debe realizar la escogencia de software de planes de vuelo que sean sencillos de usar para que cualquier persona pueda llevar a cabo la fase de vuelos.
2. La realización de áreas de vuelo en formato KMZ o KML permiten escoger con mayor precisión las áreas de estudio a fotografiar.
3. Es importante diseñar una bitácora de vuelo que permita una vez iniciada la fase de ejecución de los vuelos, guardar la información de horarios del vuelo y si es el caso vuelos fallidos, permitiendo en las etapas de diseño descartar imágenes que no corresponden a los planes finalmente ejecutados.
4. Se debe realizar la escogencia de puntos de control y marcas de terreno que contrasten bien con la zona de la instalación y estén despejadas de obstáculos.
5. Es importante denominar por medio de una nomenclatura adecuada las zonas que van a ser objeto de estudio con los planes de vuelo.
6. Crear un único vuelo para cada zona de estudio que permita la mejor comparativa entre los resultados de diversos periodos ya que como se evidencio durante los resultados, tener vuelos con diferentes áreas representa problemáticas a la hora de comparar los resultados.

Como conclusiones generales de la fase de ejecución de los planes de vuelo se puede recalcar la necesidad de instalación de los puntos de control de forma fija, en áreas de completa visibilidad durante todo el vuelo para permitir una mejor correlación de las imágenes. La ejecución de planes de vuelo durante condiciones adversas de visibilidad o condiciones de sobreexposición del sol repercute en la calidad de los resultados (como se evidencio en el vuelo realizado el mes de diciembre en el Talud 2 donde se debieron descartar los resultados del vuelo), por lo que se debe tener en cuenta estas condiciones a la hora de ejecutar o no un plan de vuelo. Es importante que los encargados de los planes de vuelo calculen los tiempos aproximados de la duración de la campaña total (ejecución de todos los vuelos a las diferentes zonas de estudio en el corredor vial) con el fin de estimar un promedio de duración de la etapa de ejecución de los planes de vuelo. Al ejecutar cada vuelo se debe tener presente la ejecución con la cámara completamente ortogonal al terreno para obtener mejores resultados. De igual forma, también tener presente la previsualización de la calidad de las imágenes obtenidas para no perder tiempos de procesamiento con vuelos de los que no se obtuvieron imágenes con buena calidad. Como optimización a la metodología planteada se pueden dar coordenadas GPS de alta precisión a los puntos de control para geolocalizar con mayor precisión los modelos obtenidos. Sin embargo, los modelos digitales obtenidos se geolocalizan muy bien sobre el terreno de estudio.

Calibrar el DRON, actualizar firmwares y softwares y obtener las previsualizaciones de los mapas de las zonas de estudio en las aplicaciones móviles para los vuelos, permite una correcta ejecución de estos. Lo anterior se sugiere debido a que la mayoría de las zonas de estudio son alejadas de zonas pobladas por lo que contar con una conexión a internet que permita descargar toda esta información en campo es muy complejo en la mayoría de las situaciones. Por eso, obtener todas estas actualizaciones antes de salir en la campaña de vuelo a ejecutar los planes permite mejorar los tiempos de toma de información.

Finalmente se evidencia que la planeación y diseño de los planes de vuelo realizados para la investigación permitió recopilar la mayor cantidad de información multitemporal posible de las zonas de estudio con lo cual se obtuvieron fotografías que fueron procesadas satisfactoriamente en las otras etapas de la metodología.

- **Fase 4: Procesamiento de imágenes aéreas**

Una de las principales problemáticas a la hora de procesar las imágenes aéreas es capacitar al personal encargado de realizar este procedimiento por primera vez. Sin embargo, una curva de aprendizaje de múltiples procesamientos permite agilidad en el proceso. Principalmente se evidencio que el uso de un software de procesamiento sencillo es importante para la ejecución del procesamiento de imágenes aéreas. Contar con un software intuitivo permite mejores tiempos de procesamiento y evita reprocesos que pueden incurrir en muchas horas más para la adquisición de resultados.

De manera general, obtener un buen producto requiere que todos los pasos explicados en el procesamiento de imágenes aéreas se ejecuten a la calidad óptima y las velocidades más bajas. De esta manera se permite que los resultados obtenidos tengan una buena calibración y precisión, que permitan a la hora de compararlos multitemporalmente un mejor análisis. Ejecutar este procedimiento con los estándares ya mencionados requiere tiempos de procesamiento extendidos que se explican en la **Tabla 6**. Estos tiempos de procesamiento presentados a manera de ejemplo se deben calcular en la metodología implementada. Obtener estos tiempos de procesamiento permiten tener una metodología calibrada a la zona y con la cantidad de zonas en estudio que se deseen monitorear. Adicional a esto, los tiempos de procesamiento permiten a la persona encargada del monitoreo establecer con mayor pertinencia las frecuencias de los vuelos en los diseños de planes de vuelo considerando que con muchas horas de procesamiento las frecuencias se extienden y a menores horas de procesamiento estas frecuencias pueden disminuir.

De cada una de las fases del procesamiento de imágenes aéreas es importante concluir y recomendar:

1. En la fase de procesamiento inicial es importante que las imágenes aéreas obtenidas estén georreferenciadas y cuenten con buena calidad, de lo contrario el software utilizado no será capaz de interpretar ni crear puntos clave para el procesamiento de todas las imágenes aéreas. Es importante resaltar que la metodología de fotogrametría hace que cada imagen dependa de la anterior por el traslapo que hay entre ellas. Por esta razón, la mala calibración o calidad de una fotografía puede llevar a una incorrecta calibración del modelo. Para esto se deben verificar las imágenes antes de iniciar la fase de procesamiento inicial con el fin de chequear la calidad de estas.
2. A la hora de gestionar los puntos de apoyo es importante tener en cuenta que los vuelos normalmente serán realizados a grandes alturas por lo que contar con GCPs que contrasten sobre el terreno permitirá seleccionarlos y calibrarlos de mejor manera en el procesamiento de las imágenes aéreas. También es necesario tener en cuenta el tamaño de pixel con el que cuenta el modelo dado que tener puntos de apoyo con un objeto (punto, cuadrado, rectángulo, etc.) que cuente con al menos dos veces el tamaño de pixel permitirá visualizarlo

y seleccionarlo en la mayor cantidad de imágenes posibles sin importar mucho la calidad de estas.

3. Antes de iniciar la fase de nube de puntos y malla de triángulos es importante revisar que el modelo se esté ejecutando correctamente, y que la previsualización de la imagen ortomosaico que arrojan la mayoría de los softwares sea buena. Esto con el fin de no tener una fase de procesamiento inicial errada dado que las fases siguientes son las que más consumen tiempos de procesamiento de imágenes. Es importante que una vez finalizada la fase de malla de triángulos y nube de puntos se visualice la posición de los puntos de control dentro de estos productos. Lo mencionado anteriormente se plantea dado que en múltiples ocasiones, los puntos de control no se localizan correctamente dentro de la visualización de la nubes de puntos y mallas de triángulos, lo que puede sugerir un error en la fase de procesamiento inicial.
4. Como se observa en el estudio no se tienen en cuenta los modelos digitales de terreno dado que, durante su fase de procesamiento, la clasificación de puntos y la generación de MDT es un procedimiento que aun cuenta con muchos errores. La utilización de otros software y mayores horas de procesamiento podría permitir el uso de estos modelos con una mayor precisión. Sin embargo, la metodología planteada permitía evaluar cambios geométricos con la generación de modelos digitales de superficie por lo que no se encontró la necesidad de generar una corrección a los modelos digitales de terreno. Cabe resaltar que obtener información verídica de un modelo digital de terreno permitirá optimizar tiempos de procesamiento ya que se podría evitar la fase de generación de modelos digitales de superficie, que consume más horas de procesamiento. Aunque la metodología de fotogrametría con dron aún tiene muchas falencias en sectores con alta vegetación, se debe considerar la calibración futura de modelos que permitan mejorar este procedimiento.
5. Los modelos digitales de superficie y los ortomosaicos son el principal insumo para los análisis de cambios geométricos. El tener un DSM bien calibrado, de alta calidad y precisión permite medir cambios geométricos que pueden llegar al centímetro. De igual forma, la obtención de ortomosaicos permite (como se evidencio en los taludes de estudio) la visualización de los cambios geométricos detectados por medio de los DSM. De esta manera se podrá corroborar la información y tener una base más amplia para la toma de decisiones y verificación de los análisis finales obtenidos. Visualizar en una planta la imagen de toda la zona de estudio permite al encargado de los monitoreos obtener mucha información visual que permite caracterizar mejor los cambios geométricos.

De manera general, se concluye de la fase de procesamiento de imágenes aéreas, la necesidad de capacitar el personal encargado del monitoreo. Adicionalmente, permitir que sean los mismos encargados de los vuelos quienes procesen las imágenes para que puedan corroborar la información de campo con la de oficina, y facilitar así la detección de errores (como los detectados en el mes de diciembre en el Talud 2). Esto también permite una curva de aprendizaje para optimizar en cada vuelo tiempos de procesamiento y generar experticia en los encargados del monitoreo.

- **Fase 5: Salidas generales de la investigación**

La obtención de modelos digitales de terreno, modelos digitales de superficie, ortomosaicos y diversos perfiles topográficos genera una cantidad de buena información para realizar un análisis de cambios geométricos en los diferentes taludes de estudio. Sin embargo, al contar con una cantidad de información tan amplia y no generar un proceso de organización y obtención de resultados puede llevar a la pérdida de datos o incluso generar mayores tiempos de análisis. Por esto, a manera general se concluye y recomienda realizar un protocolo de trabajo para cada condición especial de implementación de la metodología que permita tener la información organizada y mejorar la fase de entrega de resultados.

En cuanto a la fase de análisis de cambios geométricos es importante resaltar que la corrección realizada a la resta de los modelos digitales de superficie permitió una mejor visualización de la escala de los movimientos generados en las zonas de talud. Esto debido a que, en su mayoría, se generaban movimientos pequeños a comparación con los movimientos detectados para la vegetación que descalibraban el modelo. Generar correcciones a movimientos superiores a 1 metro e inferiores a un metro permite descartar los cambios geométricos errados detectados en alta vegetación.

Finalmente es necesario contar con archivos preparados para cargar la información que permitan optimizar procedimientos de obtención de información (e.g., plantillas de Excel calibradas, plantillas cartográficas de ARCGIS). Todo esto aporta a que la fase de organización de las salidas generales de investigación, y posterior entrega de resultados para análisis de información, se haga de manera metódica y organizada, ahorrando así tiempos de los procesos.

Como conclusión principal de la fase de salidas generales se resalta la creación del formato de resumen de información. Este formato permite entregar todos los resultados de una zona de estudio en cada campaña de vuelo realizada para su análisis de una forma más rápida. Así mismo los formatos de resumen permiten generar un historial de información de todos los meses. Esto tiene mucho potencial para generar los historiales de cambios geométricos y así conocer cuáles serán los cambios que presente una ladera antes de su desestabilización. A continuación, se presenta un esquema ejemplo del estudio del talud 1 entre los meses de noviembre y diciembre, para la organización de las salidas generales de la metodología y la creación de una jerarquía de procesos que permita optimizar tiempos de generación de resultados (**Ilustración 104**).

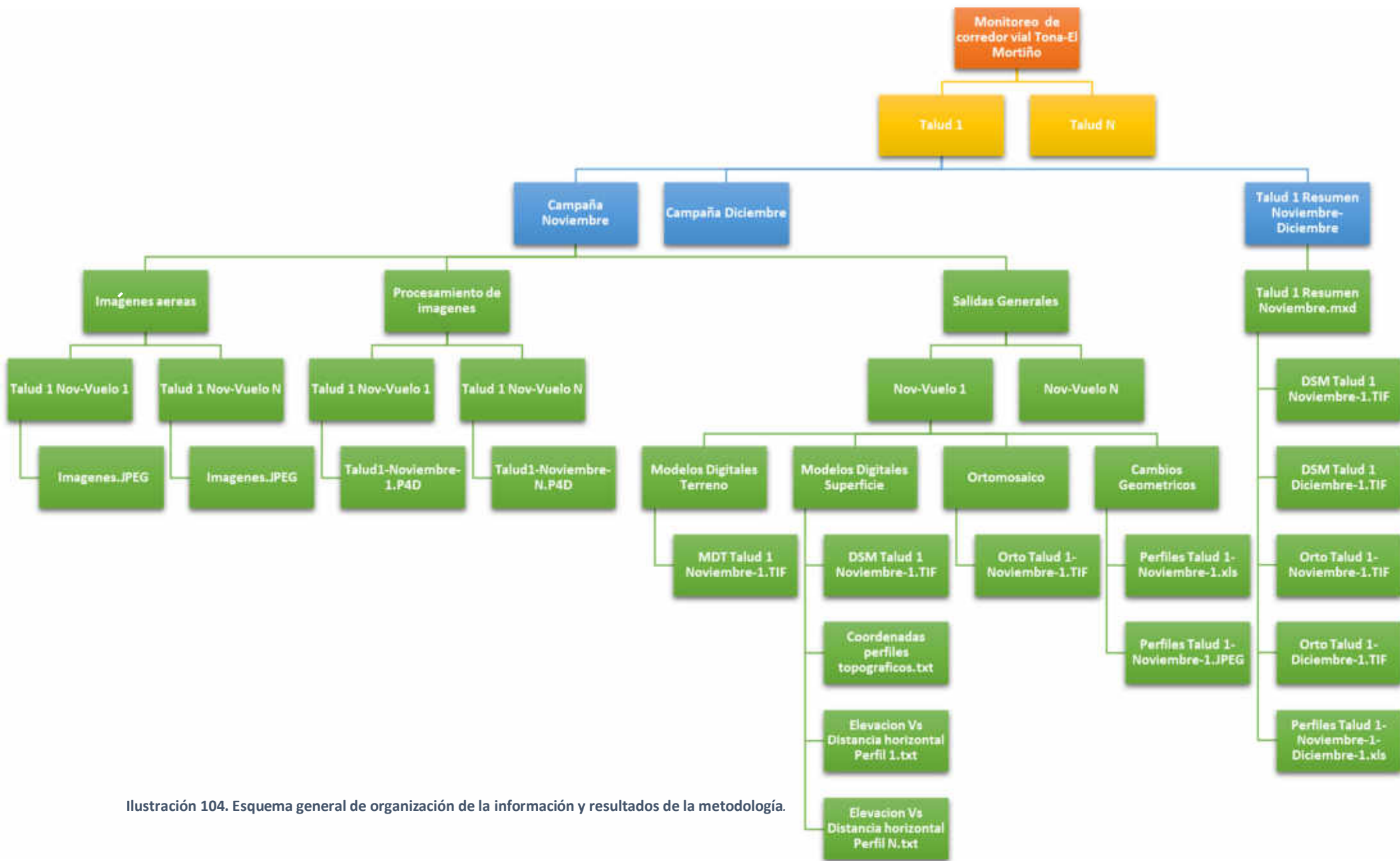


Ilustración 104. Esquema general de organización de la información y resultados de la metodología.

- **Fase final: Estudio de taludes durante el periodo de investigación.**

La obtención de DSMs multitemporales y su uso en el análisis de cambios geométricos en taludes, ha sido la tarea con mayor peso en el proyecto y de la que se han obtenido las principales conclusiones. Una de ellas es que los datos obtenidos mediante técnicas de fotogrametría se pueden combinar para la elaboración y comparación de DSMs. Tal y como se puede observar en los resultados del proyecto para los distintos taludes estudiados, se ha podido identificar con suficiente detalle las distintas zonas activas, con su zona de erosión y depósito, donde los DSMs han mostrado suficiente resolución para llevar a cabo modelos físicos de los taludes. Esto indica que es imprescindible utilizar datos de alta resolución que actualmente se pueden obtener con facilidad mediante fotogrametría.

El análisis de las salidas obtenidas del procesamiento de imágenes aéreas permite realizar la comparación clara de los taludes en estudio en diferentes periodos de tiempo. Esta comparación se hace relacionando las alturas de los diferentes modelos digitales de superficie obtenidos con las imágenes aéreas de los planes de vuelo. Por medio de esta comparación se obtienen restas de modelos digitales de superficie, comparativas de ortomosaicos y perfiles topográficos de diferentes periodos de tiempo. La evaluación realizada a estos resultados permite observar los cambios geométricos que está presentando la zona de estudio. Adicionalmente indica que la metodología planteada funciona sobre áreas pequeñas y focos de movimientos en masa que aun así se encuentren inmersas dentro de una zona boscosa como es el caso del Talud 1. Aunque presenta dificultades evaluar el talud 1 dentro de la zona de alta vegetación por los errores que incide en el modelo digital de superficie, se evidencia que las partes centrales del talud pueden ser monitoreadas sin ningún inconveniente, dado que la vegetación no afecta la información que se contiene en estos sectores. Adicionalmente se evidencia que posicionar los puntos de control frente al talud en la zona central permite una mayor precisión de la información que se obtiene de estos.

Los estudios fotogramétricos y procesamiento de información han permitido implementar una metodología de monitoreo a zonas de amenaza a deslizamiento que con la suficiente resolución han permitido visualizar y analizar cambios morfológicos multitemporales en las zonas de estudio. La fotogrametría permite analizar fotos aéreas históricas y conocer la geometría del terreno en el pasado lo que puede ser útil en ciertas condiciones. En el estudio realizado, este tipo de datos son la base para realizar análisis de estabilidad basados en condiciones pre- y post- fallo del talud. Es importante resaltar que la investigación planteaba como alcance evaluar si se podían detectar o no cambios geométricos en zonas de amenaza a deslizamiento. El haber detectado estos cambios durante temporadas climáticas sin lluvias genera una nueva idea de investigación. La nueva hipótesis plantea que monitorear día a día zonas con amenaza a deslizamiento durante temporadas de lluvia y guardar la información, permite, ante un evento de deslizamiento futuro analizar los cambios geométricos que se dieron antes de la ocurrencia del evento. Si los cambios geométricos representan un patrón constante en los deslizamientos se puede mejorar la metodología a un monitoreo de cambios geométricos patrones que indiquen un inminente deslizamiento en taludes con similares condiciones.

Como conclusión del estudio realizado, se sugiere implementar la metodología propuesta durante temporadas de verano. Como ya se ha mencionado, el detectar taludes que presentan cambios geométricos durante la ausencia de lluvias permite estar alerta una vez se inicie la temporada de lluvias donde se presentará una fase crítica de la estabilidad.

Adoptar medidas preventivas ante masas de material con movimiento, detectadas por medio de la metodología, debería ser el paso por seguir en el caso de que la metodología planteada llegara a manos de los entes territoriales encargados.

Como aparte final de los resultados se puede concluir que el profesional encargado de interpretar los resultados debe realizar una correcta auscultación de todos estos. Inicialmente se deben identificar cambios significativos dentro de las restas de modelos digitales de superficie que pueden indicar dos posibles opciones. La primera de estas es que como se evidencio en el desarrollo metodológico los cambios se asuman como movimientos y cambios geométricos reales del terreno. Lo segundo que se puede detectar al encontrar cambios significativos (por encima de las incertidumbres de los modelos) es que se generen errores durante el procesamiento de la información, como se pudo evidenciar con el Talud 2 al realizar mal el procesamiento de la imagen por efecto de la sobreexposición del sol o en el Talud 3 al tener insuficientes puntos de control para geolocalizar la imagen debidamente. Una vez detectados los cambios o no del modelo digital de superficie se procede a corroborar los mismos por medio de los ortomosaicos los cuales visualmente generan información acerca de cómo cambió la imagen ortogonal de los taludes. Estos cambios visuales evidentes permitieron en todos los estudios realizados corroborar los movimientos descritos por los modelos digitales de superficie validando la aplicación de la metodología. Finalmente, los perfiles topográficos permiten evidenciar tanto los errores (como se evidencio con la mala geolocalización del Talud 3) como los resultados obtenidos por los modelos digitales de superficie y corroborados por los ortomosaicos.

De esta manera, para la interpretación de los cambios geométricos planteada por la metodología se hace necesario el uso de los tres esquemas de resultado planteados, por lo que ignorar alguno de estos resultados conllevaría a la selección de movimientos o cambios geométricos que pueden ser errados en las zonas de estudio.

Como pauta final se evidencia que la metodología al depender de fotogrametría falla en múltiples aspectos. Sin embargo, la correcta interpretación de las imágenes y resultados obtenidos y el aprendizaje generado con los errores de esta permite la no repetición de estos y la obtención de modelos más precisos y con mayor cantidad de información. Encontrar esta cantidad de información con precios relativamente bajos como pueden ser la adquisición de un vehículo VANT resalta una de las principales ventajas de monitoreo de esta metodología.

REFERENCIAS

- [1] J. Suarez Diaz, Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Bucaramanga: Instituto de investigaciones sobre erosion y deslizamientos, 1998.
- [2] Universidad Catolica De Oriente, AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA E INUNDACIONES ZONA URBANA, Guarne, 2014.
- [3] C. A. Peña Rincon, Monitoreo y modelo sistematico a deslizamiento superficial de suelos para manizales (Tesis de doctorado), Manizales: Universidad Nacional De Colombia, 2014.
- [4] J. E. Cruz Lopez, DIAGNÓSTICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA LOCALIDAD DE USME A TRAVÉS DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LIBRE DISTRIBUCIÓN (Tesis Pregrado), Bogota: Universidad Catolica de Colombia, 2013.
- [5] J. Olmos Olmos, ESTUDIO DE AMENAZA Y VULNERABILIDAD POR FENOMENOS DE REMOCIÓN EN MASA, Somondoco: Boyaca, 2013.
- [6] R. E. Bardai y e. al, «Análisis geométrico de derrumbamiento basado en plataformas DRON y procesado mediante Sistema de Información Geográfica: Talud Xunqueira, España,» *Tecnología de la construccion* , pp. 675-680, 2016.
- [7] L. M. Fernandez, CALCULO DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO DELTERRENO EN LORCA MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA (Tesis Magister), Lorca, España: Universidad Politecnica de Madrid, 2014.
- [8] R. H. Avila Camargo y A. Franco Giraldo, COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL MONITOREO DE TALUDES O LADERAS INESTABLES EN EL MUNICIPIO DE ZETAQUIRA – BOYACÁ MEDIANTE TÉCNICAS TRADICIONALES DE TOPOGRAFÍA Y TÉCNICA MODERNA DE DRONES, Aguada, Caldas: Universidad Militar Nueva Granada, 2018.
- [9] E. Garzón M., «Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza de corredores viales de montaña de la red vial nacional,» *Actas de Ingeniería*, pp. Vol. 2, pp. 82-90, 2016.
- [10] R. E. Bardai, S. Lagüela López, D. Roca y H. González-Jorge, «Análisis geométrico de derrumbamiento basado en plataformas DRON y procesado mediante Sistema de Información Geográfica: Talud Xunqueira, España,» *Tecnología de la construcción*, pp. 675-680, 2016.
- [11] R. Tomas, M. Cano, A. Antonio, A. J. Riquelme y J. L. Pastor, «INTEGRACIÓN DE DATOS GEOMORFOLÓGICOS, GEOTÉCNICOS Y NUBES DE PUNTOS 3D PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN TALUD EXCAVADO EN LIMOS EROSIONABLES,» de *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Barcelona, España, 2017.

- [12] R. RUIZ-CARULLA, J. COROMINAS y M. HÜRLIMANN, «EXPERIENCIAS CON DRONES PARA EL ESTUDIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA,» de *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Santander, España, 2017.
- [13] P. MONTALVO VILLACÍS, S. SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, J. D. LÓPEZ VALERO y A. ESTÉVEZ PASCUAL, «LOS TALUDES DE LA VÍA ALÓAG-SANTO DOMINGO. EMPLEO DE DRONES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE INESTABILIDADES,» de *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Santander, España, 2017.
- [14] Universidad/es / Empresas colaboradora /UNIVERSIDAD DE GRANADA / EIFFAGE, «NUEVAS METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN INFRAESTRUCTURAS LINEALES,» AGENCIA DE OBRA PÚBLICA DE LA JUNTA DE ANDALUCIA, Andalucía, España, 2015.
- [15] U. Niethammer, S. Rothmund, U. Schwaderer, J. Zeman y M. Joswig, «Open source image-processing tools for low-cost UAV-based landslide investigations,» *Remote Sens*, pp. 161-166, 2011.
- [16] A. Stumpf, J. Malet, N. Kerle, U. Niethammer y S. Rothmund, «Image-based mapping of surface fissures for the investigation of landslide dynamics.,» *Geomorphology 186*, pp. 12-27, 2013.
- [17] D. Turner, A. Lucieer y S. De Jong, «Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV).,» *Remote Sens*, pp. 1736-1757, 2015.
- [18] A. Al-Rawabdeh, F. He, A. Moussa, N. El-Sheimy y A. Habib, «Using an unmanned aerial vehicle-based digital imaging system to derive a 3D point cloud for landslide scarp recognition.,» *Remote Sens*, p. 95, 2016.
- [19] T. Fernández, J. Pérez, J. Cardenal, J. Gómez, C. Colomo y J. Delgado, «Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques,» *Remote Sens*, p. 837, 2016.
- [20] M. Peppas, J. Mills, P. Moore, P. Miller y J. Chambers, «Accuracy assessment of a UAV-based landslide monitoring system.,» *Remote Sens*, pp. 895-902, 2016.
- [21] H. Lin, H. Huang, Y. Lv, X. Du y W. Yi, «Micro-UAV based remote sensing method for monitoring landslides in Three Gorges Reservoir, China,» de *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, China , 2016.
- [22] R. Eker, A. Aydın y J. Hübl, «Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study,» *Environ. Monit. Assess.*, p. 28, 2018.

- [23] K. Özgür Hastaoğlu, Y. Gül, F. Poyraz y B. Can Kara, «Monitoring 3D areal displacements by a new methodology and software using UAV photogrammetry,» *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, pp. 1- 12, 2019.
- [24] C. E. Escobar Potes y G. Duque Escobar, *Geotecnia para el tropico andino*, Manizales: No publicado, 2016.
- [25] J. Suarez Diaz, *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, Bucaramanga: Instituto de investigaciones sobre erosion y deslizamientos, 1998.
- [26] J. Suarez, *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda, 1998.
- [27] Ministerio De Transporte, *Resolucion 339 de 1998*, Colombia: Republica De Colombia, 1999.
- [28] Ministerio De Transporte, «Infraestructura De Transporte,» Mintransporte, [En línea]. Available: <http://sinc.mintransporte.gov.co/visores/>. [Último acceso: 25 febrero 2020].
- [29] MinTIC, «Municipio Tona,» MinTic, [En línea]. Available: <http://www.tona-santander.gov.co/tema/municipio>. [Último acceso: Febrero 25 2020].
- [30] J. Gómez, N. Montes, Á. Nivia y H. Diederix, «Atlas Geológico de Colombia,» Servicio Geologico Colombiano, Bogota, 2015.
- [31] *Calamidad pública municipio Tona, Santander.*, (Resolucion 28 de 2010).
- [32] J. P. Rivcoba Rojas, *SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA DIAGNOSTICAR DESLIZAMIENTOS DE TERRENO EN SECTORES CORDILLERANOS*, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2013.
- [33] J. C. Vazquez Paulino, M. A. Backhoff Pohls, J. O. Gonzalez Moreno y E. M. Morales Butista, *Establecer la vulnerabilidad y evaluar el riesgo por deslizamientos, inundaciones pluviales y socavación de puentes en la Red Federal de Carreteras*, Mexico DF: Instituto Mexicano del Transporte, 2016.
- [34] A. O. Oliva Gonzalez, «INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE TALUDES Y LADERAS,» Grupo ITEICO Euroamericano., Ciudad De Mexico, 2015.
- [35] J. A. Vega Gutierrez, *ESTIMACIÓN DEL RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS GENERADOS POR EVENTOS SISMICOS EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN USANDO HERRAMIENTAS DE LA GEOMÁTICA (Tesis De Maestria)*, La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2013.