

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

**Elaboración de un mapa de susceptibilidad al movimiento de masas en el
tramo final de la conducción Chanlud – Tuñi**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Civil

Autor:

David Esteban Moscoso Astudillo

Wilson Eugenio Romero Aucancela

Director:

Karla Johanna Santacruz Reyes

ORCID:  0009-0000-8192-7948

Tutor:

Daniel Salvador Vélez Parra

Cuenca, Ecuador

2024-11-05

Resumen

Este estudio se centra en la elaboración de un mapa de susceptibilidad a deslizamientos en el tramo final de la conducción Chanlud-Tuñi, ubicado en la cuenca alta del río Machángara, provincia del Azuay, Ecuador. Este estudio emplea la metodología Mora-Vahrson modificada, integrando factores como la pendiente del terreno, la geología, la cobertura vegetal, la humedad del suelo, las precipitaciones y la sismicidad, que permite la identificación y clasificación de zonas que son susceptibles a movimientos de masa. El objetivo principal es identificar zonas con mayor probabilidad de que ocurran deslizamientos y mapearlas, con el fin de proporcionar información relevante para la planificación y mitigación de riesgos. El análisis reveló que las zonas con alta y muy alta susceptibilidad a deslizamientos se encuentran principalmente en sitios aledaños a la vía que conduce a la represa de Chanlud, áreas que se caracterizan por sus pendientes pronunciadas y la presencia de materiales coluviales, que tienen una limitada capacidad de drenaje lo que aumenta su vulnerabilidad a la saturación y, consecuentemente, a los deslizamientos. El trabajo, además del mapa de susceptibilidad, presenta un inventario de deslizamientos en las zonas críticas identificadas en la zona, el cual se utilizó para validar la metodología utilizada y describir la evolución histórica de los deslizamientos presentes en la zona de estudio a través de la revisión de imágenes satelitales y recorridos en campo. La metodología ha demostrado ser efectiva para identificar las áreas de mayor riesgo. Sin embargo, para aumentar la precisión de los resultados, se recomienda intensificar la recopilación de datos, con especial atención en aspectos como la humedad del suelo.

Palabras clave del autor: deslizamientos de tierra, metodología Mora-Vahrson, mecánica de suelos, estabilidad de taludes



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

This study focuses on the development of a landslide susceptibility map for the initial segment of the Chanlud-Tuñi conduit, located in the upper basin of the Machángara River, Azuay Province, Ecuador. The study employs a modified Mora-Vahrson methodology, integrating factors such as terrain slope, geology, vegetation cover, soil moisture, precipitation, and seismicity, which allows for the identification and classification of areas susceptible to mass movements. The main objective is to identify areas with a higher likelihood of landslides and to map them, in order to provide relevant information for risk planning and mitigation. The analysis revealed that areas with high and very high susceptibility to landslides are primarily located near the road leading to the Chanlud dam, characterized by steep slopes and the presence of colluvial materials, which have limited drainage capacity, increasing their vulnerability to saturation and, consequently, to landslides. In addition to the susceptibility map, the work presents a landslide inventory for the critical areas identified in the zone, which was used to validate the methodology employed and to describe the historical evolution of the landslides present in the study area through the review of satellite images and field surveys. The methodology has proven effective in identifying areas of greatest risk. However, to increase the accuracy of the results, it is recommended to intensify data collection, with special attention to aspects such as soil moisture.

Author Keywords: landslides, Mora-Vahrson methodology, soils mechanics, slope stability



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Antecedentes	13
1.2 Planteamiento del Problema	13
1.3 Justificación	14
1.4 Objetivos	15
1.5 Alcance	15
1.6 Descripción del área de estudio	16
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 Movimientos en masa	18
2.1.1 Tipos de Movimientos en Masa	18
2.1.1.1 Deslizamientos	19
2.1.1.1.1 Caídas	20
2.1.1.1.2 Vuelcos	21
2.1.1.1.3 Propagaciones Laterales	21
2.1.1.1.4 Flujos	21
2.1.2 Causas de los movimientos de terreno	23
2.1.3 Factores vinculados al deslizamiento	23
2.1.3.1 Factores condicionantes (intrínsecos)	23
2.1.3.2 Factores desencadenantes (externos)	24
2.2 Susceptibilidad a movimientos en masa	24
2.2.1 Mapas de zonificación	25
2.3 Métodos para zonificar la susceptibilidad	25
2.3.1 Métodos cualitativos (heurísticos)	25
2.3.2 Métodos cuantitativos (estadísticos)	26
2.4 Metodología Mora – Vahrson	27
2.4.1 Aplicaciones de la metodología Mora-Vahrson en estudios previos	28
2.4.2 Metodología Mora-Vahrson modificada	28
2.4.3 Descripción de los parámetros de la metodología MVM	30
2.4.3.1 Factores condicionantes	30
2.4.3.2 Indicadores de factores desencadenantes	31
2.4.4 Clasificación de la susceptibilidad a deslizamientos	32
2.5 Inventarios de deslizamientos	33
2.6 Importancia del SIG en evaluaciones geotécnicas	33

2.6.1	Método Semi automático para delimitación de cuencas.....	34
3.	METODOLOGÍA	35
3.1	Delimitación del área de estudio	35
3.1.1	Recolección de datos topográficos	35
3.1.2	Generación del Modelo digital de elevación (DEM).....	35
3.1.3	Generación de las Microcuencas	35
3.1.4	Delimitación del área	36
3.2	Recopilación de información digital.....	36
3.2.1	Información topográfica	36
3.2.2	Información litológica	36
3.2.3	Información de precipitaciones y evapotranspiración	37
3.2.4	Información de sismicidad.....	37
3.2.5	Información de cobertura vegetal.....	37
3.2.6	Información previa de los problemas identificados en la zona.....	38
3.3	Recopilación de información en campo.....	38
3.4	Trabajo en oficina	39
3.4.1	Aplicación de la metodología Mora-Vahrson modificada.....	39
3.4.1.1	Determinación del parámetro pendiente.....	39
3.4.1.2	Determinación del parámetro geológico	40
3.4.1.3	Determinación del parámetro cobertura vegetal	41
3.4.1.4	Determinación del parámetro de humedad.....	41
3.4.1.5	Determinación del parámetro de sismicidad	43
3.4.1.6	Determinación del parámetro de precipitación.....	44
3.4.2	Generación de los mapas temáticos	45
3.4.2.1	Elaboración del mapa de pendientes.....	45
3.4.2.2	Elaboración del mapa geológico.....	45
3.4.2.3	Elaboración del mapa de cobertura vegetal.....	46
3.4.2.4	Elaboración del mapa de humedad del suelo	46
3.4.2.5	Elaboración del mapa de sismicidad	46
3.4.2.6	Elaboración del mapa de precipitaciones	47
3.4.2.7	Elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos	48
3.4.3	Definición de las zonas críticas	48
3.4.3.1	Muestras de suelo	48
3.4.4	Caracterización de suelos	49
3.4.4.1	Procedimiento para granulometría de gruesos	49

3.4.4.2	Procedimiento para granulometría de finos	49
3.4.4.3	Procedimiento para Limites de Atterberg.....	49
3.4.5	Elaboración del Inventario de deslizamientos	50
4.	RESULTADOS.....	52
4.1	Delimitación y ubicación del área de estudio.....	52
4.2	Geología	54
4.2.1	Geología Regional	54
4.2.2	Geología Local.....	55
4.3	Mapas temáticos aplicando la metodología Mora Vahrson modificada	57
4.3.1	Mapa del parámetro geológico.....	57
4.3.2	Mapa del parámetro de pendientes.....	58
4.3.3	Mapa del parámetro cobertura vegetal	59
4.3.4	Clasificación del parámetro humedad del suelo.....	62
4.3.5	Clasificación del parámetro de sismicidad	63
4.3.6	Mapa del parámetro de precipitaciones	63
4.4	Mapa de Susceptibilidad	65
4.4.1	Análisis de la susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio.....	65
4.4.1.1	Susceptibilidad muy baja.....	66
4.4.1.2	Susceptibilidad baja	66
4.4.1.3	Susceptibilidad media	66
4.4.1.4	Susceptibilidad alta	67
4.4.1.1	Susceptibilidad muy alta.....	67
4.5	Inventario de deslizamientos.....	68
4.5.1	Zonas críticas intervenidas	69
4.5.1.1	Zona crítica 1 (Abscisa vía 8+850)	70
4.5.1.1	Zona crítica 3 (Abscisa vía 7+550)	73
4.5.1.1	Zona crítica 4 (Abscisa vía 7+320)	76
4.5.1.2	Zona crítica 5 (Abscisa vía 7+140)	79
4.5.2	Zonas críticas no intervenidas	82
4.5.2.1	Zona crítica 2 (Abscisa vía 8+110)	82
4.5.2.1	Zona crítica 6 (Abscisa vía 6+470)	85
4.6	Correlación entre el mapa de susceptibilidad y el inventario de deslizamientos ...	88
5.	CONCLUSIONES	89
6.	RECOMENDACIONES	91
7.	Referencias.....	92

8. Anexos.....	96
----------------	----

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación provincial, cantonal y parroquial del sitio de estudio	16
Figura 2. Tramo final de la conducción Chanlud - Tuñi	17
Figura 3. Flujo idealizado de deslizamiento de tierra	20
Figura 4. Esquemas de los tipos de movimientos de masa más comunes	22
Figura 5. Factores vinculados al deslizamiento de tierra	24
Figura 6. Mapa de diseño sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.....	47
Figura 7. Microcuencas ubicadas en la conducción Chanlud - Tuñi	52
Figura 8. Delimitación del área de estudio en el tramo final de la conducción Chanlud - Tuñi	53
Figura 9. Ubicación del área de estudio	53
Figura 10. Depósitos coluviales en el área de estudio	55
Figura 11. Talud expuesto en la abscisa 7+250	56
Figura 12. Afloramientos de roca volcánica.....	56
Figura 13. Mapa de susceptibilidad del parámetro geológico	57
Figura 14. Mapa de susceptibilidad del parámetro pendiente.....	58
Figura 15. Mapa de cobertura vegetal en el área de estudio	60
Figura 16. Mapa de susceptibilidad del parámetro de cobertura vegetal	61
Figura 17. Mapa de Isoyetas de la zona de estudio	64
Figura 18. Mapa de susceptibilidad el tramo final de la conducción Chanlud - Tuñi	65
Figura 19. Ubicación de las zonas críticas identificadas en el área de estudio	68
Figura 20. Imágenes satelitales de la zona crítica 1 en los años 2015 y 2017	70
Figura 21. Imagen satelital de la zona crítica 1 en el año 2022	71
Figura 22. Fotografías de la zona crítica 1	72
Figura 23. Imágenes satelitales de la zona crítica 3 en los años 2021 y 2023.....	73
Figura 24. Fotografías del pozo de hormigón en la zona crítica 3	74
Figura 25. Fotografía de la zona crítica 3 en la actualidad	75
Figura 26. Imágenes satelitales de la zona crítica 4 en los años 2017 y 2021.....	76
Figura 27. Imagen satelital de la zona crítica 4 en el año 2023	77
Figura 28. Fotografía de la zona crítica 4	78
Figura 29. Imágenes satelitales de la zona crítica 5 en los años 2015 y 2021	79
Figura 30. Imágenes satelitales de la zona crítica 5 en los años 2015 y 2022.....	80
Figura 31. Fotografía de la zona crítica 6	81
Figura 32. Imágenes satelitales de la zona crítica 2 en los años 2015 y 2022.....	83
Figura 33. Imagen satelital de la zona crítica 2 en el año 2023	83
Figura 34. Fotografía de la zona crítica 2	85
Figura 35. Imágenes satelitales de la zona crítica 6 en los años 2015 y 2021.....	86
Figura 36. Imagen satelital de la zona crítica 6 en el año 2023	86
Figura 37. Fotografía de la zona crítica 6	88
Figura 38. Mapa de correlación entre los deslizamientos y la susceptibilidad determinada	88

Índice de tablas

Tabla 1. Causas de los movimientos de terreno	23
Tabla 2. Clasificación de susceptibilidad a deslizamientos	32
Tabla 3. Clasificación del factor pendiente.....	39
Tabla 4. Clasificación del parámetro de litología.....	40
Tabla 5. Clasificación del parámetro cobertura vegetal.....	41
Tabla 6. Valores mensuales de la evapotranspiración en la cuenca alta del Río Machángara	42
Tabla 7. Valores mensuales de la precipitación de las estaciones cercanas a la zona	42
Tabla 8. Clasificación del parámetro humedad	43
Tabla 9. Clasificación del parámetro de sismicidad	43
Tabla 10. Clasificación del parámetro de precipitaciones	44
Tabla 11. Clasificación del parámetro de precipitaciones	45
Tabla 12. Ficha utilizada para la descripción de los deslizamientos.....	51
Tabla 13. Coordenadas y altitud de los puntos límites del área de estudio	54
Tabla 14. Clasificación del parámetro geológico en el área de estudio.....	58
Tabla 15. Clasificación del parámetro pendiente en el área de estudio	59
Tabla 16. Clasificación del parámetro cobertura vegetal en el área de estudio.....	61
Tabla 17. Humedades obtenidas para la zona de estudio	62
Tabla 18. Clasificación del parámetro humedad del suelo en el área de estudio	62
Tabla 19. Clasificación del parámetro de sismicidad en el área de estudio.....	63
Tabla 20. Precipitaciones máximas en 24 horas para cada microcuenca	63
Tabla 21. Clasificación del parámetro de precipitaciones en el área de estudio.....	64
Tabla 22. Grados de susceptibilidad a deslizamientos de la zona de estudio	66
Tabla 23. Resumen de la información de las muestras de suelo recolectadas, UTM WGS84	69
Tabla 24. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 1.....	72
Tabla 25. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 3.....	73
Tabla 26. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 3.....	75
Tabla 27. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 3.....	76
Tabla 28. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 4.....	78
Tabla 29. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 5.....	79
Tabla 30. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 5.....	81
Tabla 31. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 2.....	82
Tabla 32. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 2.....	84
Tabla 33. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 2	85
Tabla 34. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 6.....	87

Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a mis padres, Wilson y Mélida, quienes, con su apoyo incondicional, sabiduría y sacrificios han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida; gracias por todo su esfuerzo y por estar siempre ahí para guiarme con su ejemplo. A mis hermanos, Andrés, Ruth, Karen y Nathaly, por estar siempre apoyándome y ayudándome, por celebrar mis triunfos y por animarme en los momentos difíciles. Y a mi pareja, por su infinita paciencia, comprensión y cariño; tu apoyo y tu fe en mí me han dado la fuerza para seguir adelante en este largo camino.

Wilson

Dedico este trabajo con todo mi cariño a mis padres, quienes han sido mi constante apoyo y guía en cada paso de este largo camino. También, a mis hermanos, cuya ayuda incondicional ha sido esencial para alcanzar este logro. A todos ellos, mi más profundo agradecimiento.

David

Agradecimientos

Los autores queremos expresar nuestra más sincera gratitud a nuestra tutora, Ingeniera Karla Santacruz, por su invaluable guía, paciencia y apoyo a lo largo de este proyecto. Su conocimiento y dedicación fueron fundamentales para la realización de esta tesis.

Agradecemos también a la empresa ELECAUSTRO por proporcionarnos la información y los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Su colaboración y disposición para compartir sus datos fueron cruciales para el desarrollo de nuestro trabajo.

A todos los que de alguna manera contribuyeron a la culminación de esta tesis, les extendemos nuestro más profundo agradecimiento.

David y Wilson

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador, los movimientos de tierra representan una problemática recurrente y significativa, especialmente en regiones montañosas y zonas con alta actividad sísmica. Estos fenómenos naturales se manifiestan en diversas formas, como avalanchas de lodo, deslizamientos y erosión, afectados por las condiciones climáticas y geológicas. La combinación de un uso inadecuado del suelo, la deforestación y la construcción en áreas de alto riesgo incrementa la vulnerabilidad ante estos eventos, llegando a provocar pérdidas humanas y materiales, afectando gravemente la infraestructura y la economía local.

La incertidumbre en la predicción de deslizamientos radica en la variabilidad de las clases de movimientos, velocidades, modos de falla y materiales involucrados, así como en la complejidad de las interacciones entre factores geológicos y meteorológicos (Suarez, 2009). Esta incertidumbre puede llevar a malas planificaciones en la construcción de infraestructuras, exponiéndolas a riesgos desconocidos, y a un aumento de costos en sistemas de control y mitigación.

Para enfrentar esta problemática, se han desarrollado diversas metodologías que permiten evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, identificando áreas de alto riesgo y facilitando la planificación preventiva. La metodología Mora Vahrson es una de las herramientas más reconocidas para este propósito. Siendo una metodología cualitativa, proporciona un enfoque integral que combina factores geológicos, hidrológicos y geomorfológicos, permitiendo zonificar las áreas con mayor vulnerabilidad.

La zona en la cual se realizará el presente estudio se sitúa la cuenca alta del río Machángara, en la provincia de Azuay. Esta zona, parte del complejo hidroeléctrico Machángara, es crucial para la sostenibilidad de la región. Pese a que la geología de la zona señala una zona rocosa, se pueden encontrar depósitos glaciares y coluviales que, combinados con las condiciones climáticas, hacen que sea una zona particularmente susceptible a movimientos de masa, especialmente durante las épocas de lluvias intensas.

Este estudio tiene como objetivo generar un mapa de susceptibilidad a los movimientos de masa en la cuenca alta del río Machángara, específicamente en el tramo final de la conducción Chanlud-Tuñi. Para ello, se empleará la metodología Mora Vahrson modificada, que permitirá elaborar mapas de susceptibilidad utilizando un sistema de información geográfica (SIG). Además, se llevará a cabo un inventario de deslizamientos para evaluar cómo han cambiado las condiciones en la zona a lo largo del tiempo, proporcionando información relevante para la gestión de riesgos y la planificación territorial.

1.1 Antecedentes

La cuenca del río Machángara desempeña un papel fundamental en el desarrollo de la región, proporcionando recursos esenciales para el suministro de agua potable y riego, además de la generación de electricidad a través de las centrales hidroeléctricas Saucay y Saymirín. Estas centrales, administradas por la empresa Electro Generadora del Austro (ELECAUSTRO S.A.), son cruciales para el abastecimiento energético de Cuenca y sus alrededores.

La central hidroeléctrica Saucay, en particular, se alimenta a través de las conducciones Labrado-Tuñi y Chanlud-Tuñi, dos lugares estratégicos que han enfrentado problemas significativos de deslizamientos y deformaciones en sus canales y tuberías de conducción en los últimos años. Estos problemas representan un impacto negativo en la infraestructura y la seguridad de la zona, provocando interrupciones y afectando la gestión operativa del complejo hidroeléctrico Machángara.

La empresa ELECAUSTRO constantemente a estado realizando trabajos en la zona, y se han identificado varias zonas críticas. Se han implementado diferentes medidas de estabilización, incluyendo drenajes superficiales y sub - horizontales, así como terraceo e inyecciones de consolidación para mitigar los movimientos del suelo. Estas medidas se han enfocado en reducir la saturación y la erosión interna, factores clave en el movimiento de masas (ELECAUSTRO & UCUENCAEP, 2020).

1.2 Planteamiento del Problema

En el área de la conducción Chanlud-Tuñi, recurrentemente se han presentado problemas de estabilidad en los taludes debido a su topografía y condiciones climáticas complejas. Desde la construcción de la presa Chanlud en 1994, estos problemas se han agravado, con episodios recurrentes de movimientos de masas que no solo causan daño en el canal interrumpiendo el suministro de agua potable y energía, sino que también representan gastos económicos significativos y constantes en los trabajos de contención de tierra.

Al ser una zona estratégica, es fundamental que se mantenga operativa de forma continua, y la falta de un registro actualizado sobre la condición de los taludes y su susceptibilidad a deslizamientos, dificulta una gestión y planificación adecuada. En muchas ocasiones, las intervenciones en la zona han sido reactivas, respondiendo a emergencias en lugar de prevenirlas, lo que ha conllevado un mayor gasto de recursos.

Dado lo anterior, es imperativo abordar el problema de manera proactiva, planteando un estudio que permita identificar las zonas más críticas y mapear las áreas susceptibles a deslizamientos. La elaboración de un mapa de susceptibilidad y un inventario de deslizamientos en esta área ayudará a identificar las zonas de mayor riesgo. Con esto, se busca proporcionar a ELECAUSTRO S.A. un registro de la situación actual de la zona, permitiendo la implementación de medidas de prevención y mitigación necesarias para evitar futuros problemas que afecten a la comunidad.

1.3 Justificación

La realización de un mapa de susceptibilidad a movimientos de masa en el tramo final de la conducción Chanlud-Tuñi puede ser abordado desde diferentes puntos de vista:

Desde el punto de vista práctico, la estabilidad de taludes en la zona es crucial para el correcto funcionamiento del complejo hidroeléctrico Machángara. Tener un registro actualizado de las condiciones geotécnicas facilita la planificación y toma de medidas preventivas, reduciendo la frecuencia y magnitud de los eventos de deslizamiento y los daños a la infraestructura del canal, asegurando un suministro de agua constante y eficiente.

Desde el punto de vista académico, el estudio se abordará aplicando la metodología Mora-Vahrson, que contribuirá al conocimiento existente sobre la misma y su aplicación a regiones montañosas con actividades sísmicas y presencia constante de lluvias. Además, se proponen modificaciones a la metodología original, involucrando factores adicionales, por lo cual los resultados obtenidos podrán servir como referencia para futuros estudios y proyectos.

Desde el punto de vista comunitario, existen muchos pobladores en la zona que se dedican a la ganadería y riego. Los beneficios son varios: una mayor protección y seguridad contra los eventos naturales, así como la prevención de daños en la infraestructura que puedan generar interrupciones en el suministro de agua y energía para los habitantes.

Para la empresa ELECAUSTRO S.A., este estudio proporcionará información relevante sobre la condición actual de la zona de estudio, que les permitirá anticipar y actuar de manera preventiva en los riesgos asociados al deslizamiento de tierra. Esto implica una mayor comprensión de los riesgos geotécnicos, permitiéndoles tener una gestión más eficiente de los recursos económicos.

1.4 Objetivos

Objetivo general:

- Elaborar un mapa de susceptibilidad al movimiento de tierra en el área de estudio del tramo final del sistema de conducción Chanlud – Tuñi, mediante el uso de un sistema de información geográfica (SIG).

Objetivos específicos:

- Realizar un levantamiento de información de los factores que contribuyen a la inestabilidad de los taludes en el área de estudio, incluyendo datos topográficos, geológicos, climáticos y sísmicos.
- Elaborar mapas de índice de susceptibilidad para cada uno de los factores que intervienen según la metodología aplicada.
- Aplicar la metodología Mora-Vahrson modificada para determinar la susceptibilidad a deslizamientos, e identificar los factores más influyentes y como se correlacionan.
- Validar los resultados obtenidos mediante la comparación con registros históricos de deslizamientos y evaluaciones en campo.

1.5 Alcance

El presente estudio se enfocará en la evaluación de la susceptibilidad a movimientos de tierra y la generación de mapas. Por cuestiones académicas, se considera únicamente el tramo final, ya que este trabajo es parte de un conjunto de tesis que abarca un área mayor hasta el final de la conducción Chanlud-Tuñi. El tramo final incluye aproximadamente 3 km de conducción y abarca un área de estudio comprendida entre la corona de la montaña y el río.

La investigación incluirá la recopilación de información geológica, geotécnica, topográfica, hidrológica y sísmica, que son factores desencadenantes que contribuyen a la inestabilidad de los taludes en el área. Quedan fuera del alcance estudios hídricos o topográficos detallados, dada la complejidad de la zona y su difícil acceso. Sin embargo, se incorporará información de estudios geotécnicos y trabajos de estabilización realizados por la empresa ELECAUSTRO S.A.

Se aplicará una metodología cualitativa, basada en la metodología Mora-Vahrson, que ha dado buenos resultados en países en vías de desarrollo con condiciones similares. Para la generación de los mapas se utilizará un sistema de información geográfica (ArcGIS). Al finalizar, se espera obtener un mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en un área

detallada de estudio, un inventario de los deslizamientos y un análisis de los factores desencadenantes más representativos, lo que permitirá planificar y gestionar la infraestructura en la región.

1.6 Descripción del área de estudio

La zona de estudio está localizada en la cuenca alta del río Machángara, ubicada en la provincia del Azuay, al noroccidente de la ciudad de Cuenca, en la parroquia Checa, aproximadamente a unos 30km de la ciudad. La figura 1 presenta el mapa de ubicación provincial, cantonal y parroquial del área de estudio.

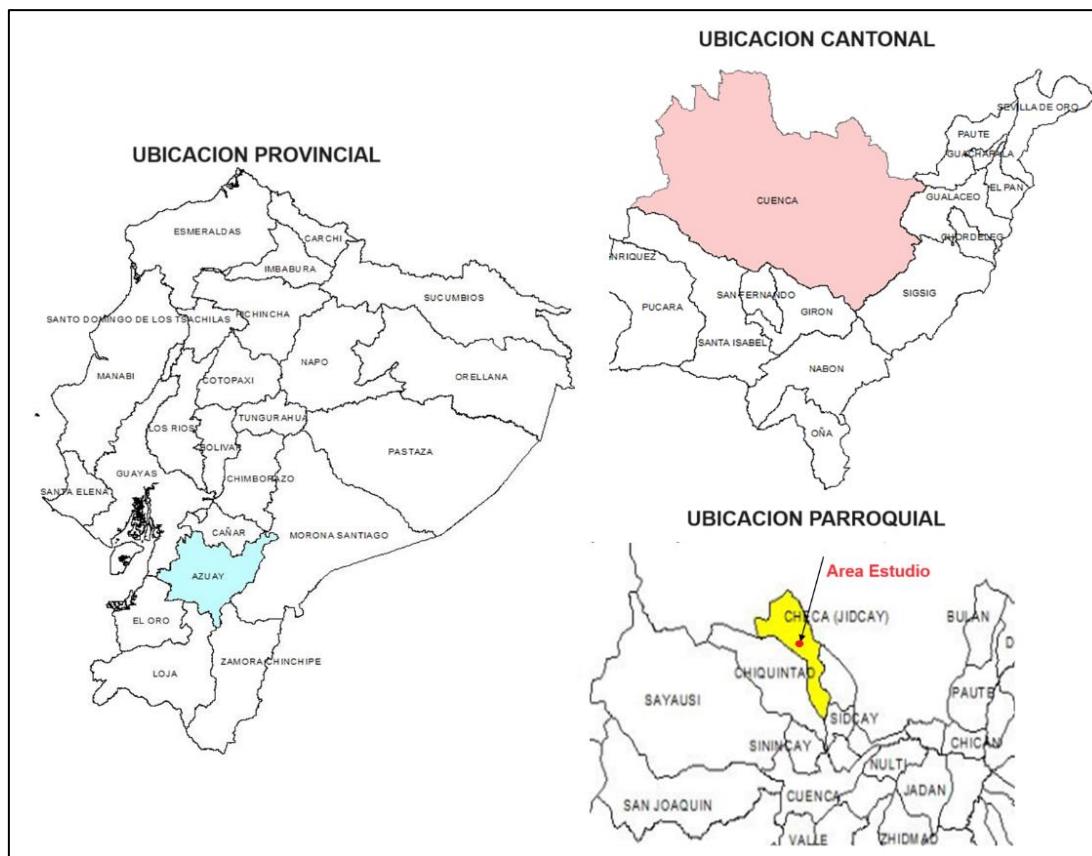


Figura 1. Mapa de ubicación provincial, cantonal y parroquial del sitio de estudio

Fuente: Elaboración propia

El área de estudio se caracteriza por un sistema de conducción compuesto por canales y tuberías que transportan agua desde la represa de Chanlud hasta el reservorio de Tuñi. Esta zona presenta una topografía accidentada, resultado del valle glaciar del río Machángara. Además, está atravesada por varios cuerpos de agua, incluidos ríos y quebradas. Los principales afluentes descienden desde las laderas occidentales en forma de torrentes, originados en los valles suspendidos dejados por los glaciares.

El presente estudio se va centrar en el tramo final de la conducción Chanlud – Tuñi, con un recorrido de aproximadamente 3km como se muestra en la figura 2.

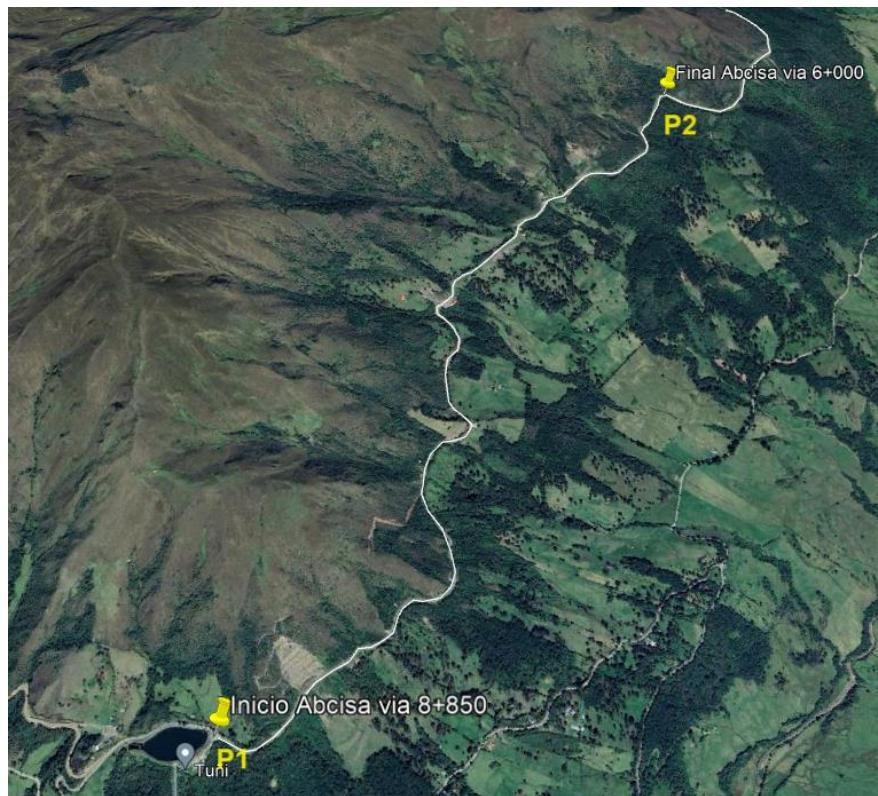


Figura 2. Tramo final de la conducción Chanlud - Tuñi

Fuente: Elaboración propia

2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se ofrece una revisión teórica de los conceptos fundamentales para entender de manera integral los movimientos en masa. Se comienza con un análisis enfocado en el fenómeno de los deslizamientos, examinando los tipos de movimientos de masa y los factores determinantes. Posteriormente, se presenta una revisión de los enfoques existentes para la zonificación de la susceptibilidad y se describe la metodología empleada, con un énfasis particular en la metodología Mora-Vahrson. Finalmente, se aborda la importancia de los mapas de inventario de deslizamientos y la utilización de los SIG (Sistemas de Información Geográfica) en el contexto de los estudios geotécnicos.

2.1 Movimientos en masa.

Según Cruden y Varnes (1991), estos movimientos son todos aquellos desplazamientos de roca, tierra o detritos que se dan por la fuerza de la gravedad. Los movimientos en masa pueden ser lentos como los movimientos por reptación, o rápidos como los deslizamientos.

Corominas y García Yagüe (2002) mencionan que los movimientos en masa desplazan el terreno y lo impactan en pendiente o escarpes y, que debido a las fuerzas de la gravedad estos caen ladera abajo.

Ritter (2024) destaca que los movimientos en masa se dan cuando la tensión es mayor que la resistencia del material, haciendo que este se desplace de manera descendente debido a la gravedad. Las partículas del material se ven afectadas por el agua que se infiltra al terreno, ya que esta satura las mismas y aumenta la presión y por ende la fricción entre estas partículas disminuye facilitando los deslizamientos. Otro factor importante son las actividades antrópicas las cuales modifican las laderas o pendientes, haciendo que estas sean más vulnerables ante los deslizamientos.

2.1.1 Tipos de Movimientos en Masa

Son varias las clasificaciones que se han hecho a los movimientos en masa, sin embargo, las más usadas son las propuestas por Varnes (1978) y Hutchinson (1958). Dichos autores clasifican a los movimientos en masa considerando 4 factores principales: tipo de material, nivel de deformación del material, mecanismo de desplazamiento y grado de saturación.

Se debe considerar que en la práctica diaria resulta complicado determinar el tipo de deslizamiento debido a que muchos de estos procesos son demasiado complejos y su comportamiento varía mientras estos se desarrollan (GEMMA, 2007).

El presente trabajo utiliza la clasificación propuesta por Varnes en 1978, luego modificada para Cruden & Varnes en 1996. Los autores mencionados clasifican a los movimientos en masa de acuerdo con varios criterios y asignando a cada fase de estos un nombre específico. Varnes (1978) determina el tipo de movimiento considerando criterios morfológicos y el tipo de material.

Es así como se puede clasificar a los movimientos de masa en las siguientes categorías: deslizamientos, caídas, vuelcos, propagaciones y flujos. A continuación, se describen cada uno de los movimientos.

2.1.1.1 Deslizamientos

Se denomina así a los desplazamientos descendentes de suelos o rocas a través de una superficie de rotura. Dependiendo de la forma de la falla estos movimientos pueden clasificarse en translacionales o rotacionales (Varnes, 1978).

- **Deslizamiento rotacional:**

Este tipo de deslizamientos se caracterizan porque su superficie de rotura toma la forma de una cuchara, es decir, esta se curva hacia arriba. Muchas veces el material al desplazarse se mueve como una sola masa cohesionada y su cabeza puede descender casi verticalmente haciendo que la superficie del material se incline hacia la escarpa (Highland & Bobrowsky, 2008). La figura 4A muestra un esquema de este tipo de deslizamiento.

- **Deslizamiento translacional:**

Este tipo de deslizamientos se caracterizan porque la superficie a través de la cual se desplazan tiende a ser relativamente plana. Se sabe que pueden avanzar grandes distancias si la superficie de rotura se encuentra inclinada lo suficiente. Estos deslizamientos por lo general fallan a lo largo de juntas, fallas o en el contacto entre roca y suelo (Highland & Bobrowsky, 2008). En la figura 4B se puede observar un esquema de este tipo de deslizamiento.

Geomorfología de un desplazamiento:

En la figura 3 se muestra un esquema donde se indica la nomenclatura comúnmente utilizada para referirse a las distintas partes de un deslizamiento.

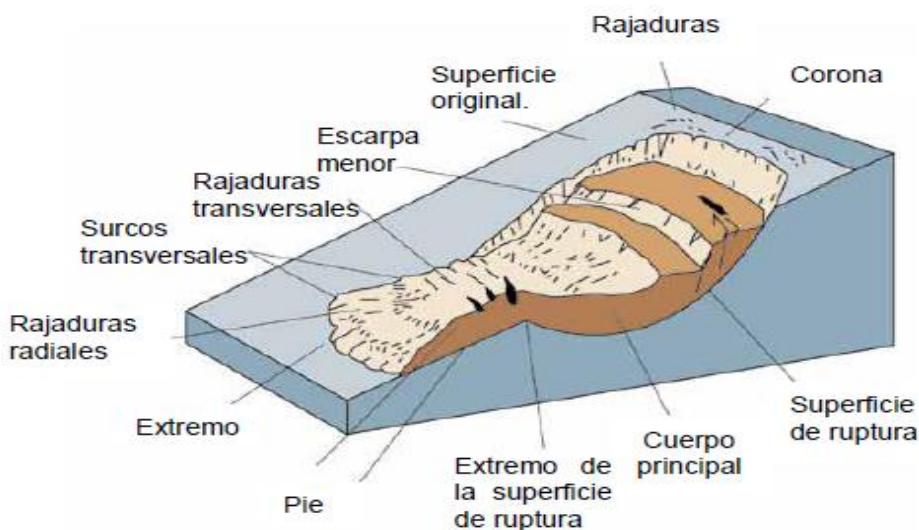


Figura 3. Flujo idealizado de deslizamiento de tierra

Fuente: (USGS, 2008)

A continuación, se definen los principales elementos según (Suarez, 2009):

- **Corona:** Material que no se ha desplazado y que permanece en la parte superior del escarpe.
- **Superficie original:** Inclinación de una ladera en las etapas anteriores al deslizamiento.
- **Rajaduras:** Grietas o fisuras que se forman en la masa de tierra.
- **Escarpa menor:** Pendiente formada por movimientos diferenciales dentro del movimiento de masa.
- **Extremo:** Punto más lejano de la base respecto a la corona.
- **Pie:** Es la parte más baja de la ladera afectada por el deslizamiento.
- **Extremo de la superficie de falla:** Línea en la cual se cruzan la parte superior de la superficie original y la superficie de falla.
- **Cuerpo principal:** Material que se ha desplazado y se sitúa sobre la superficie de falla.
- **Superficie de falla:** Zona donde el material pierde equilibrio y se desliza debido a la acción de la gravedad, separándose de la ladera restante.
- **Escarpa mayor:** Pendiente fuerte alrededor del deslizamiento.

2.1.1.1 Caídas

Las caídas se producen cuando unidades de suelo o roca se sueltan y caen desde una ladera rebotando o rodando (Varnes, 1978). Estos movimientos de masa pueden ser rápidos o

extremadamente rápidos (Cruden & Varnes, 1996). Cabe recalcar, que este tipo de movimientos no son masivos ni del tipo flujo (GEMMA, 2007). En la figura 4C se aprecia un esquema de este tipo de movimientos en masa.

2.1.1.2 Vuelcos

En este tipo de movimientos los bloques de suelo o roca rotan hacia adelante alrededor de un pivote, generalmente influenciados por la gravedad, empujes o presión de fluidos en las grietas (Varnes, 1978). El vuelco puede manifestarse de varias maneras: se tiene el vuelco en forma de bloque, donde grandes fragmentos de roca se desprenden y giran sobre un punto fijo, y el vuelco flexional, que ocurre cuando las masas de roca y suelo se inclinan debido a la flexión del material (GEMMA, 2007). En la figura 4D se observa un esquema de este tipo de movimiento.

2.1.1.3 Propagaciones Laterales

Estos movimientos usualmente se dan en terrenos con pendientes suaves o planos, y por lo general son producidos por la licuefacción del suelo luego de un movimiento brusco como por ejemplo un terremoto (USGS, 2008). Las propagaciones laterales ocurren principalmente por la deformación interna de los materiales y se puede considerar como la etapa final de varios movimientos cuyo principal mecanismo de desplazamiento es la deformación interna (GEMMA, 2007). En la Figura 4E se muestra la falla de este tipo de movimientos.

2.1.1.4 Flujos

Este tipo de movimientos en masa se caracterizan porque los materiales se desplazan de manera similar a un fluido ya sea de forma rápida o lenta y con materiales saturados o secos. Varias veces pueden ser el producto de otros movimientos como deslizamientos o caídas (Varnes, 1978) (GEMMA, 2007).

Se clasifican en varias categorías:

- **Flujos de detritos (Debris Flow):** Son movimientos rápidos de tierra, roca y materia orgánica causados por el flujo superficial de agua resultante de lluvias intensas. Los materiales involucrados generalmente poseen un porcentaje menor al 50% de finos (USGS, 2008). Un esquema de este tipo de flujo se puede ver en la figura 4F.
- **Avalancha de detritos (debris avalanche):** Como se observa en la figura 4G, una avalancha de detritos es una variación de un flujo de detritos, con la diferencia de que en este caso los desplazamientos son rápidos a extremadamente rápidos (USGS,

2008). Ese tipo de movimientos se caracterizan porque, de un simple deslizamiento superficial, puede convertirse en un flujo a medida que se desplaza, debido a la distorsión interna que sufre (GEMMA, 2007).

- **Flujo de lodo (Mudflow):** Es un movimiento de masas similar al flujo de detritos con la diferencia de que en este caso el material desplazado posee al menos 50% de partículas del tamaño de arenas, limos o arcillas (USGS, 2008). En este caso el material posee una cantidad de agua mucho mayor que la del material original, por lo que el desplazamiento es extremadamente rápido (GEMMA, 2007).
- **Flujos de tierra (Earthflows):** Son movimientos de material fino o rocas portadoras de arcilla que se dan generalmente en terrenos con pendientes moderadas bajo condiciones saturadas (USGS, 2008). Generalmente se considerada como un movimiento lento (GEMMA, 2007). La figura 4H muestra un esquema de este tipo de flujo.
- **Desplazamiento lento (Creep):** También conocido como reptación, es un movimiento lento de suelo o roca cuesta abajo. Es imperceptible, sin embargo, puede ser reconocido por troncos de árboles curvados, postes o cercas inclinadas y pequeñas ondulaciones o crestas del suelo. Por lo general se da debido a que la tensión cortante interna causa únicamente una deformación, pero no una falla abrupta (USGS, 2008).

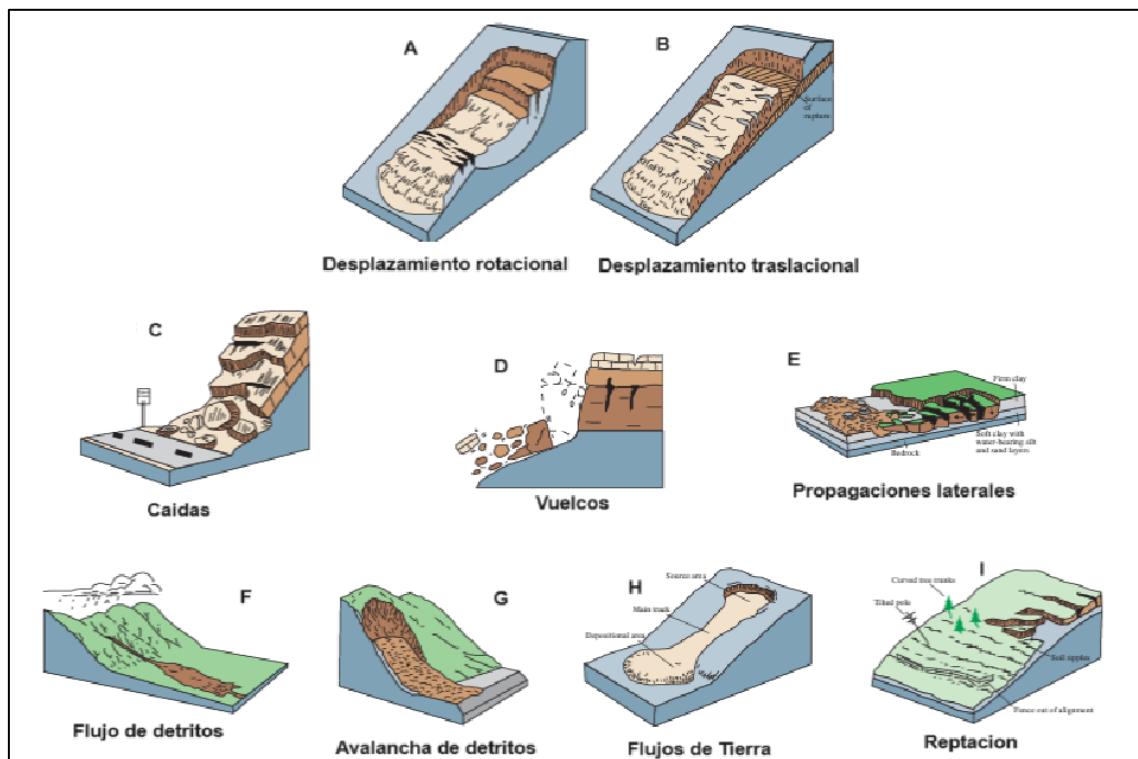


Figura 4. Esquemas de los tipos de movimientos de masa más comunes

Fuente: (USGS, 2008).

2.1.2 Causas de los movimientos de terreno

Según Cruden y Varnes (1996), los movimientos del terreno pueden ser causados por varios factores como precipitaciones intensas, actividades antrópicas, factores geológicos y causas morfológicas.

A continuación, se presenta la tabla 1 que resume las principales causas relacionadas con los movimientos de masa, clasificadas según su origen.

Tabla 1. Causas de los movimientos de terreno

Causas de los movimientos de masa			
Por procesos físicos	De origen antrópico	De índole geológica	Morfológicas
Intensas precipitaciones (lluvias intensas prolongadas)	Actividades de construcción y desarrollo (excavación, deforestación)	Debilidades estructurales en materiales.	Levantamientos tectónicos
Cambios rápidos en los niveles de agua (descenso rápido, licuefacción)	Prácticas agrícolas	Permeabilidad constante, materiales con diferente plasticidad	Erosión (fluvial, glaciar, subterránea, de los márgenes laterales)

Fuente: Modificado de (Cruden & Varnes, 1996)

2.1.3 Factores vinculados al deslizamiento

Los deslizamientos de tierra son fenómenos que resultan de la combinación de diversos parámetros que pueden ser climáticos, geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y humanos (USGS). Los factores involucrados se dividen en dos categorías:

2.1.3.1 Factores condicionantes (intrínsecos)

Se relacionan con la naturaleza y características propias del medio natural. Estos factores incluyen la litología, la pendiente del terreno, la estructura geológica y las condiciones hidrológicas (GEMMA, 2007). Zeng & Yan (2024) destacan que la humedad afecta a la cohesión y el ángulo de fricción del suelo, lo que reduce su resistencia y conlleva mayores riesgos de colapsar.

2.1.3.2 Factores desencadenantes (externos)

Son los eventos que actúan como detonantes del deslizamiento. Dentro de este grupo se encuentran las lluvias intensas y los sismos (GEMMA, 2007). Por ejemplo, las precipitaciones muy intensas provocan una saturación excesiva, lo que desencadena un aumento del peso disminuyendo la resistencia del suelo.

En el esquema, presentado en la figura 5 se resumen los principales factores vinculados al deslizamiento:

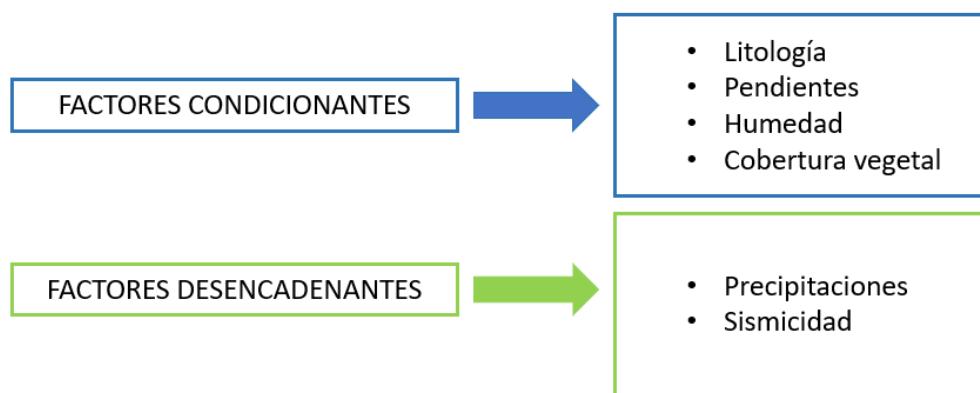


Figura 5. Factores vinculados al deslizamiento de tierra

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Susceptibilidad a movimientos en masa

Suarez (2009) señala que la susceptibilidad a movimientos de masa es la probabilidad de que un área de terreno sufra deslizamientos, considerando las características locales del terreno. La susceptibilidad evalúa factores como la humedad, la litología, y las pendientes para determinar las probabilidades de ocurrencia de un deslizamiento.

La evaluación de la susceptibilidad se utiliza generalmente para crear mapas que indican las zonas más propensas a sufrir deslizamientos, proceso conocido como zonificación de susceptibilidad. Este proceso implica dividir el terreno en áreas homogéneas según un criterio previamente establecido, y calificar cada una según su grado real o potencial de amenaza o riesgo (Suarez, 2009).

Los mapas de susceptibilidad buscan proporcionar información sobre los lugares más estables e inestables de una región, categorizando las áreas en rangos que varían desde muy baja hasta muy alta susceptibilidad a deslizamientos. Estos mapas se emplean para

gestionar el desarrollo de una zona, evitando la construcción en áreas potencialmente inestables. Aunque la zonificación no es exacta, ayuda a evaluar parcialmente la incertidumbre, permitiendo implementar medidas para mitigar y prevenir los desastres en las zonas afectadas.

2.2.1 Mapas de zonificación

La zonificación permite generar diferentes mapas que se indican a continuación:

- **Mapa de susceptibilidad a deslizamientos:** Un mapa de susceptibilidad es una representación cartográfica que clasifica las unidades de terreno en áreas con características y potencial de inestabilidad similares (Suarez, 2009).
- **Mapas de inventario:** Este tipo de mapas indican las zonas que han sido afectadas por los movimientos de masa. (Gonzalez de Vallejo, 2006).

Es importante destacar que, para lograr una evaluación más precisa de la susceptibilidad y amenaza por deslizamientos, es necesario emplear métodos adicionales como el análisis geotécnico detallado, la modelización numérica, el monitoreo en tiempo real y estudios de estabilidad de taludes. También es fundamental considerar observaciones de áreas que hayan experimentado cambios similares en el uso del suelo. Un análisis detallado que combine métodos cualitativos y cuantitativos ofrece una visión más completa y exacta.

2.3 Métodos para zonificar la susceptibilidad

Existen diferentes metodologías para conocer o identificar las zonas susceptibles a deslizamientos, las cuales se clasifican en dos grandes grupos: cualitativos y cuantitativos.

2.3.1 Métodos cualitativos (heurísticos)

Según Suarez (2009), los enfoques cualitativos se basan en la experiencia de profesionales expertos quienes en base a su conocimiento definen las reglas y criterios de estabilidad. Se caracterizan por su simplicidad y rapidez en la aplicación, asignando pesos a diversos factores según su contribución percibida. La información necesaria para aplicar esta metodología no tiene necesariamente que ser exacta, se busca utilizar datos de fácil acceso o que puedan ser estimados de manera subjetiva, basándose en el juicio y experiencia del experto.

Las metodologías cualitativas, incluyendo la metodología Mora-Vahrson, estiman la susceptibilidad ponderando la importancia de varios factores, tales como la topografía, la

geología, la precipitación y la humedad. Estos factores se clasifican en grados de susceptibilidad, que luego se combinan para generar un mapa final de susceptibilidad, basado en los criterios establecidos por el evaluador.

Aunque tienen limitaciones en su aplicabilidad, las metodologías cualitativas son bastante adaptables a diferentes contextos y situaciones donde la recopilación de datos es limitada y costosa. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos métodos también presentan desventajas, como la dependencia del juicio subjetivo del evaluador y la falta de precisión en áreas complejas.

2.3.2 Métodos cuantitativos (estadísticos)

Los enfoques cuantitativos se fundamentan en el análisis y la interpretación de datos reales que proporcionan una evaluación más precisa y objetiva. Estos métodos se clasifican en diferentes tipos: técnicas estadísticas, métodos de inteligencia artificial, redes neuronales entre otros, que han demostrados ser altamente efectivos y precisos para generar mapas de susceptibilidad detallados.

Los métodos estadísticos, según Suárez (2009), están basados análisis de datos históricos y la identificación de patrones y relaciones, permitiendo evaluar la estabilidad en unidades geomorfológicamente homogéneas. Este enfoque busca correlacionar eventos pasados de deslizamientos con condiciones similares, sugiriendo que es probable que estos eventos se repitan en áreas con características parecidas.

Por otro lado, un estudio realizado por (Bravo López et.al., 2022), muestra que los modelos de aprendizaje automático superan en términos de eficacia y predicción a los modelos tradicionales que se basan en criterios subjetivos, dado que pueden identificar patrones complejos mediante un análisis más detallado, proporcionando una evaluación más precisa de la susceptibilidad.

La principal ventaja de la aplicación de estos métodos cuantitativos es su capacidad para manejar grandes conjuntos de datos y variables complejas, proporcionando un alto grado de fiabilidad. No obstante, una desventaja común es el considerable gasto de tiempo y recursos necesarios para la recopilación de datos. Además, muchos de estos métodos pueden ser difíciles de entender e implementar si no se cuenta con los recursos adecuados, no solo de información, sino también de tecnología, los cuales no suelen ser fáciles de obtener en nuestro medio.

Para el caso de estudio del presente trabajo, se utilizará un enfoque cualitativo para determinar el mapa de susceptibilidad debido a su adaptabilidad y eficiencia en contextos con

información limitada. Por su parte, los métodos cuantitativos complementarán el estudio al identificar patrones recurrentes, permitiendo una evaluación más detallada de los eventos de deslizamiento registrados en los últimos años.

2.4 Metodología Mora – Vahrson

Esta metodología puede abordarse de manera cualitativa y cuantitativa. El presente trabajo aborda el problema desde lo cualitativo, tomando como base la metodología desarrollada en 1991 por Sergio Mora y Wilhelm Vahrson, quienes realizaron estudios de deslizamientos en taludes en Centroamérica y publicaron un método sencillo para su aplicación. Esta metodología ha sido aplicada en países como Colombia, Costa Rica y Ecuador, presentando buenos resultados y comprobando su efectividad.

La metodología se basa en la evaluación e integración de cinco factores principales, divididos en dos categorías: indicadores de susceptibilidad intrínseca y factores desencadenantes.

El índice de susceptibilidad intrínseca a deslizamientos según lo propuesto por Mora-Vahrson, se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$SUSC = S_r \times S_d \times S_h$$

Fuente: (Mora & Vahrson, 1991).

Donde:

- Sr: factor de pendiente.
- Sd: factor de litología.
- Sh: factor de humedad del suelo.

Los factores desencadenantes por otro lado se calculan sumando los factores de intensidad sísmica (Ts) y precipitación (Tp):

$$TRIG = Ts + Tp$$

Fuente: (Mora & Vahrson, 1991).

Si se combinan ambas categorías, susceptibilidad intrínseca (SUSC) y los factores desencadenantes (TRIG), se puede calcular el índice de susceptibilidad a deslizamientos (H) como se indica a continuación.

$$H = SUSC \times TRIG$$

Fuente: (Mora & Vahrson, 1991).

2.4.1 Aplicaciones de la metodología Mora-Vahrson en estudios previos

La metodología Mora-Vahrson ha sido ampliamente utilizada en América Latina, en diferentes países como Nicaragua, Guatemala, Colombia, Ecuador y Costa Rica. Los estudios realizados se destacan por su versatilidad y rapidez para obtener resultados sin la necesidad de información extremadamente detallada y de grandes recursos.

En Costa Rica, la metodología Mora-Vahrson fue aplicada en la subcuenca del Río Sarapiquí, donde el terremoto de Chinchona en 2009 causó varios deslizamientos. Este estudio presentó modificaciones a la metodología original, destacando la necesidad de ajustar las escalas de valores de los indicadores, a la realidad de cada área de estudio. Los resultados demostraron la efectividad de la metodología en condiciones de alta pendiente y actividad sísmica (Barrantes Castillo, Barrantes Sotela, & Nuñez Roman, 2011).

En el municipio de Manaure, ubicado en el Departamento del Cesar en Colombia, se evaluó la susceptibilidad utilizando esta metodología. El estudio presentó cambios en la ecuación original, pues se incluyeron los factores geomorfológicos y cobertura vegetal como nuevos factores condicionantes. Se destaca que es una metodología que asigna pesos para dar un porcentaje de importancia a cada uno de los parámetros (Lopez & Gomez, 2019).

La principal recomendación derivada de estos estudios es la necesidad de adaptar la metodología a las características específicas de cada región, y ajustar los valores de la escala propuesta a las condiciones del área de estudio. Adicionalmente, se recomienda realizar estudios detallados para optimizar la precisión de los mapas de susceptibilidad (López et al., 2020).

Los estudios previos destacan que la metodología Mora-Vahrson es especialmente beneficiosa para países subdesarrollados debido a su simplicidad y bajo costo. Aunque no reemplaza los estudios geotécnicos detallados necesarios para proyectos específicos, proporciona una herramienta efectiva para la zonificación de áreas de alto riesgo, permitiendo que se tomen medidas de planificación y gestión de riesgos.

2.4.2 Metodología Mora-Vahrson modificada

Según Guzzeti (1999), la metodología Mora-Vahrson puede ser modificada y adaptada a las condiciones específicas del estudio, siempre y cuando los parámetros utilizados reflejen los factores que causan inestabilidad del terreno. La incorporación de factores que no son considerados originalmente en la metodología Mora-Vahrson puede mejorar significativamente los resultados obtenidos y resultar en una mejor representación de la realidad geotécnica y ambiental del área de estudio.

A partir de esto, se presenta una metodología Mora-Vahrson Modificada (MVM), basada en los estudios de Mora (2004) y Barrantes (2011), en la que se incorpora un factor condicionante adicional: la cobertura vegetal.

Con esta modificación, la fórmula que se utilizará en el estudio es la siguiente:

$$S = F_C * F_d$$

Fuente: Modificado de (Mora & Vahrson, 1991).

Donde:

S: Índice de susceptibilidad.

Fc: Factores condicionantes.

Fd: Factores desencadenantes.

Los factores condicionantes incluyen los siguientes parámetros:

$$F_C = Geol * Hum * Cbve * Pen$$

Fuente: Modificado de (Mora & Vahrson, 1991)

Donde:

Geol: Factor geológico.

Hum: Factor de humedad del suelo.

Cbve: Factor de cobertura vegetal.

Pen: Factor de pendientes.

Los factores desencadenantes incluyen los siguientes parámetros:

$$F_d = (Sis + Pre)$$

Fuente: Modificado de (Mora & Vahrson, 1991).

Donde:

Sis: Factor de sismicidad.

Pre: Factor de precipitación.

2.4.3 Descripción de los parámetros de la metodología MVM

2.4.3.1 Factores condicionantes

Son características propias del terreno e incluyen parámetros como la pendiente, la litología, la humedad del suelo y la cobertura vegetal. Cada uno de estos parámetros se describen a continuación.

- **Parámetro de la Pendiente**

Chaverri (2016) menciona que el método Mora-Vahrson considera originalmente un parámetro denominado relieve relativo (Rr) para evaluar el factor pendiente. Sin embargo, diversos autores han relacionado este parámetro a pendientes en porcentaje o grados, ya que dicha modificación facilita la clasificación, por categorías, de las distintas pendientes encontradas en las zonas de estudio. El factor pendiente influye directamente en el grado de susceptibilidad debido a que a medida que la pendiente aumenta, también lo hace la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (CENAPRED, 2019)

- **Parámetro de la geología**

El factor geológico se refiere a las características y propiedades de las rocas y suelos en una zona de estudio que influyen en su comportamiento geotécnico y, por ende, en su susceptibilidad a deslizamientos. Considera factores como los espesores del material, el nivel de meteorización, la condición de las fracturas, la inclinación de buzamiento, el nivel freático y la resistencia al corte (Chaverri Molina, 2016). Mora y Vahrson (1991), en su publicación presentaron una clasificación litológica con sus correspondientes factores de susceptibilidad, sin embargo, recalcan que los parámetros no siempre representan la realidad del país o región y están sujetos a modificaciones.

- **Parámetro de Humedad del suelo**

Hace referencia al porcentaje de agua contenida en el suelo y su influencia en los deslizamientos. Los suelos húmedos reducen significativamente su resistencia al corte, aumentando las probabilidades de falla.

Chaverri (2016) menciona que la forma más adecuada de cuantificar la humedad del suelo es mediante muestreos en el sitio de interés y cálculos de balances hídricos. Cuando no es posible obtener este factor con los métodos antes mencionados, Mora & Vahrson (1991) recomiendan estimar el contenido de humedad restando la evapotranspiración potencial de los datos de precipitación mensual.

- **Parámetro de cobertura vegetal**

El impacto de la vegetación en la estabilidad de terrenos ha sido muy debatido, pues no se sabe a ciencia cierta como estimar los efectos estabilizadores de las plantas sobre el suelo. Sin embargo, a lo largo de los años se ha observado que las plantas ayudan a reducir los problemas relacionados con la erosión, reptación y fallas subsuperficiales (Suárez, 1998).

Según Suárez (1998), los coluviones se benefician significativamente del refuerzo proporcionado por los sistemas de raíces de plantas. La experiencia ha permitido observar que cuando por causa de la deforestación se deterioran las raíces, se producen deslizamiento de grandes extensiones.

En este sentido, como se mencionó anteriormente, se propuso una modificación a la metodología original planteada por Mora-Vahrson (1994), para lo cual se incorpora el parámetro de cobertura vegetal.

2.4.3.2 Indicadores de factores desencadenantes

Los factores desencadenantes son eventos externos que pueden provocar deslizamientos de tierra al interactuar con los factores condicionantes. Los principales detonantes según la metodología aplicada son los eventos sísmicos y las precipitaciones intensas.

- **Parámetro de intensidad sísmica**

El factor de intensidad sísmica mide la probabilidad y el impacto de eventos sísmicos como desencadenantes de deslizamientos. Para su cálculo se utiliza la escala de intensidad modificada de Mercalli considerando eventos sísmicos que posean un periodo de retorno de 100 años (Mora & Vahrson, 1991).

Los sismos pueden generar considerables fuerzas de inercia desestabilizadora de carácter cíclico en el terreno. El efecto de las cargas sísmicas junto con los cambios de resistencia al corte que provocan las cargas transitorias da como resultado una disminución general en la estabilidad de la pendiente afectada (CENAPRED, 2019).

- **Parámetro de Precipitación**

El factor de precipitación hace referencia al potencial de las lluvias como factores que provocan inestabilidad de los taludes y para su ponderación se consideran lluvias máximas en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años. (Mora & Vahrson, 1991).

Suárez (1998) señala que la intensidad de las lluvias y la probabilidad de que un deslizamiento ocurra, están relacionados estrechamente. Vilca Hernández (2018) indica que

en un deslizamiento no solamente interviene la cantidad de lluvia sino también su duración e intensidad, ya que estos factores son los que provocan la saturación del suelo.

2.4.4 Clasificación de la susceptibilidad a deslizamientos

Para una correcta clasificación de la susceptibilidad es necesario ajustar el rango de valores obtenidos a las condiciones del área de estudio, como se indica anteriormente. Haciendo uso de un histograma de frecuencia, se divide el rango de valores en cinco grados o clases de susceptibilidad. La tabla 2 muestra la clasificación sugerida:

Tabla 2. Clasificación de susceptibilidad a deslizamientos

Clase	Potencial de deslizamiento	Características
I	Muy baja	Áreas relativamente estables que no necesitan medidas correctivas.
II	Baja	Áreas estables que necesitan medidas correctivas únicamente para grandes estructuras.
III	Moderada	Áreas en donde no se permite construcción sin estudios geotécnicos y mejoras del sitio.
IV	Alta	Alta probabilidad de deslizamientos en sismos y lluvias intensas. Requiere estudios detallados y medidas correctivas para su uso, si no, mantener como áreas de protección.
V	Muy alta	Áreas con alta posibilidad de deslizamientos en sismos y lluvias intensas (>50%). Prohibido para usos urbanos, recomendable como áreas de protección.

Fuente: Modificado de (Barrantes Castillo, Barrantes Sotela, & Nuñez Roman, 2011)

2.5 Inventarios de deslizamientos

Un inventario de deslizamientos, según Suárez (2009), consiste en la recopilación y estudio de información sobre deslizamientos de tierra ocurridos en el pasado dentro de un área específica. Este proceso incluye la recopilación de información mediante exploraciones en campo, evaluación de fotografías y análisis de las formas del paisaje. Se utilizan herramientas como el mapeo geomorfológico, la interpretación de imágenes satelitales (Google Earth), y el análisis de modelos digitales de elevación. Los datos obtenidos se digitalizan y organizan en bases de datos que incluyen detalles sobre la actividad, el espesor y las unidades geológicas de los deslizamientos registrados.

La fiabilidad de un inventario de deslizamientos depende en gran medida de la calidad y cantidad de la información recopilada. Un inventario incompleto o de baja calidad puede llevar a una evaluación incorrecta de la susceptibilidad, la amenaza o el riesgo (Suárez, 2009). Es crucial que el inventario incluya datos adicionales, como el tipo de movimiento, la superficie del deslizamiento, la actividad humana observada y la composición del material.

Para una recopilación de información más adecuada, varios autores recomiendan utilizar una ficha de deslizamiento, que es un documento detallado y sistemático que contiene información específica sobre cada deslizamiento en cada una de las zonas críticas. Según Suárez (2009), esta ficha debe incluir datos sobre la ubicación, el tipo, el tamaño, la fecha de ocurrencia, y las condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas asociadas a cada evento.

2.6 Importancia del SIG en evaluaciones geotécnicas

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas que sirven para analizar y visualizar datos espaciales. Estos ayudan a manejar grandes volúmenes de información y permiten superponer varias capas de información en un solo marco de referencia. Suárez (2009) destaca que el análisis de la amenaza de deslizamientos requiere modelar interacciones complejas entre numerosos factores que están parcialmente interrelacionados, así como evaluar las relaciones entre diversas características del terreno y la probabilidad de deslizamientos.

Para el presente caso de estudio, se utilizará el SIG conocido como ArcGIS, que facilitará la combinación de los diferentes parámetros. Esta herramienta proporciona una visión integrada de las áreas, siendo además capaz de adaptarse a nueva información o condiciones cambiantes. La facilidad de comunicar los resultados la convierte en una herramienta

fundamental que permite tener una visión global de la importancia de los factores y su relación.

2.6.1 Método Semi automático para delimitación de cuencas

La aplicación del método semiautomático de delimitación de cuencas surge de la necesidad de dividir la Cuenca del estudio en un área más pequeña, para lo cual se utiliza herramientas de análisis espacial de ArcGIS. Este enfoque se basa en el uso de modelos digitales de elevación (MDE) y algoritmos de análisis de terreno para identificar y delinear automáticamente las áreas de drenaje de un sistema fluvial.

Por lo general este método sigue los siguientes pasos: obtención de información de elevaciones, corrección de errores y cálculo de la dirección y acumulación del flujo. Este proceso divide automáticamente las cuencas hidrográficas. Para asegurar una buena precisión es necesario intervenir manualmente después de realizar los pasos mencionados anteriormente (Bajjali, 2023).

3. METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se presenta la metodología empleada para elaborar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en el tramo final de la conducción Chanlud-Tuñi. Se detallan las técnicas y procedimientos utilizados, desde la delimitación del área de estudio y la recopilación de información, hasta la aplicación de la metodología Mora-Vahrson Modificada y el uso de herramientas SIG para la generación de los mapas temáticos. Además, se describe la metodología empleada para la caracterización de las muestras de suelo y el procedimiento usado para la realización de un inventario de deslizamientos.

3.1 Delimitación del área de estudio

Este estudio, como se mencionó en la introducción, se enfocará únicamente en el tramo final de la conducción Chanlud-Tuñi. Para delimitar el área de estudio, se utilizarán herramientas de Sistemas de Información Geográfica.

El primer paso es definir el área del tramo final de la conducción Chanlud – Tuñi, para lo cual se empleará un enfoque basado en la división de la cuenca alta del río Machángara en microcuencas. Este procedimiento tiene la finalidad de abarcar el área comprendida entre la corona de la montaña y el río, considerando que el drenaje y las pendientes pronunciadas convergen en factores desencadenantes para la inestabilidad de la zona. El proceso para la delimitación del área de estudio se realizó en el SIG ArcGIS, y se describe a continuación:

3.1.1 Recolección de datos topográficos

Para la delimitación de las microcuencas, utilizamos curvas de nivel con resoluciones de 5 metros y 25 metros. Las curvas de 5 metros, que cubren la cuenca alta del río Machángara, fueron obtenidas de un archivo en formato CAD proporcionado por ELECAUSTRO. Por otro lado, las curvas de nivel de 25 metros se obtuvieron del Instituto Geográfico Militar. Es importante aclarar que, las curvas de 5 metros no abarcaban toda el área de estudio, por lo que se complementaron con las curvas de 25 metros para cubrir la parte inferior del área.

3.1.2 Generación del Modelo digital de elevación (DEM)

Se importaron las capas de curvas de nivel a ArcGIS para generar un DEM (Modelo de elevación digital). Una vez creado el DEM se corrigieron las depresiones y áreas planas.

3.1.3 Generación de las Microcuencas

Con el DEM corregido, se utilizaron herramientas de análisis de flujo para determinar la dirección del flujo y los puntos de acumulación del agua, permitiendo identificar las posibles

rutas de drenaje del terreno. Los puntos de drenaje se colocaron en donde existía una mayor densidad de puntos, y a partir de esta información se generaron las microcuenca.

3.1.4 Delimitación del área

Para especificar el área de estudio se creó una nueva capa, y en el modo editar se fue delimitando el contorno de las microcuenca que están ubicadas en el tramo que va desde el inicio de la conducción hasta aproximadamente un tercio de la misma.

3.2 Recopilación de información digital

Una vez delimitada el área de estudio, se procedió a recopilar información específicamente de este tramo. La aplicación de la metodología utilizada incluye la recopilación de información topográfica, geológica, de precipitaciones, de cobertura vegetal y de sismicidad. Se consultaron fuentes tanto gubernamentales como privadas. Además, se contó con la ayuda de la Empresa ELECAUSTRO y la consultora Geo&Geo, quienes proporcionaron información relevante para el estudio.

A continuación, se detalla la información recolectada y la fuente de donde se obtuvo.

3.2.1 Información topográfica

Para este estudio, se utilizó información topográfica proporcionada por ELECAUSTRO S.A. El archivo en formato “CAD” contenía curvas de nivel con intervalos de 5 metros y, en ciertas zonas específicas, con intervalos de 1 metro.

Fuente: (ELECAUSTRO S.A.).

3.2.2 Información litológica

Para la recolección de información litológica y geológica de la zona de estudio, se consultaron las fuentes que se muestran a continuación:

- Carta geológica del cantón Cuenca a escala 1:100.000 en formato PDF

Fuente: (IIGE: Instituto de Investigación Geológico y Energético, 1980).

- Mapa geológico del tramo de la conducción Chanlud – Tuñi

Fuente: (ELECAUSTRO & UCUENCAEP, 2020)

3.2.3 Información de precipitaciones y evapotranspiración

La recolección de datos de precipitación se centró en obtener datos históricos representativos de las estaciones meteorológicas ubicadas en las proximidades de la zona de estudio. Se recolectaron datos de precipitaciones mensuales y precipitaciones máximas en 24 horas.

Para las precipitaciones mensuales, se consultó la información histórica de los anuarios meteorológicos publicados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). La información recolectada se describe a continuación:

- Precipitaciones mensuales de la estación Chanlud desde el año 2000 al 2017
- Precipitaciones mensuales de la estación Surucucho desde el año 1997 al 2017
- Precipitaciones mensuales de la estación El Labrado desde el año 1997 al 2017
- Precipitaciones mensuales de la estación Ingapirca desde el año 1997 al 2017
- Precipitaciones mensuales de la estación Biblián desde el año 1997 al 2017

Fuente: (INHAMI: Instituto Nacional de Meteorología a e Hidrología, 2017).

Para las precipitaciones máximas en un período de retorno (PR) de 100 años, se consultó el estudio de lluvias intensas realizado por el INAMHI en el 2015.

- Precipitación máxima en 24 horas para un PR de 100 años de la estación Chanlud
- Precipitación máxima en 24 horas para un PR de 100 años de la estación El Labrado
- Precipitación máxima en 24 horas para un PR de 100 años de la estación Surucucho
- Precipitación máxima en 24 horas para un PR de 100 años de la estación Ingapirca
- Precipitación máxima en 24 horas para un PR de 100 años de la estación Biblián

Fuente: (INHAMI: Instituto Nacional de Meteorología a e Hidrología, 2015)

3.2.4 Información de sismicidad

Para la obtención de datos de sismicidad, se utilizó el mapa de zonificación sísmica del Ecuador, el cual fue proporcionado en formato “ShapeFile” por el IGEPN.

Fuente: (IGEPN: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional).

3.2.5 Información de cobertura vegetal

Los datos de cobertura de suelo de la zona de estudio fueron descargados en formato “ShapeFile” del SIGTIERRAS. Además, se utilizó Google Earth Pro, con imágenes actualizadas hasta el 2023, para observar y analizar la cobertura vegetal en distintas áreas de estudio.

Fuente: (SIGTIERRAS: Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica).

3.2.6 Información previa de los problemas identificados en la zona

Con el objetivo de revisar y contrastar la información de los deslizamientos ocurridos en la zona, que posteriormente sirva para validar el mapa de susceptibilidad, se revisaron varios trabajos y estudios. Entre los documentos revisados se encuentran informes geológicos, estudios de estabilización de taludes y diagnósticos de la conducción Chanlud – Tuñi. Estos trabajos, proporcionados por ELECAUSTRO, aportan información valiosa sobre la geología local, las zonas críticas, y registros de muestreos realizados en campo.

3.3 Recopilación de información en campo

La recopilación de información en campo tuvo varios objetivos. En primer lugar, se buscó identificar los lugares exactos donde se han producido deslizamientos dentro de la zona de estudio para generar un inventario de deslizamientos. En segundo lugar, las visitas de campo sirvieron para tomar muestras de suelo en puntos representativos de las zonas críticas, con el objetivo de obtener información sobre el suelo. Finalmente, se aprovecharon las visitas para complementar la información previamente obtenida mediante observaciones directas en diversas áreas y la toma de fotos de la geología y la vegetación.

Durante esta etapa se realizaron en total cinco visitas de campo, y las actividades realizadas se describen a continuación:

- Identificación y georreferenciación del terreno del tramo comprendido entre las abscisas 8+850 y 6+000 de la conducción Chanlud - Tuñi.
- Captura de fotografías y apuntes de las inspecciones visuales en las zonas críticas identificadas en el área de estudio.
- Recorrido con personal técnico de la empresa encargada de realizar estudios y trabajos en la zona (ELECAUSTRO S.A.), los cuales supieron brindar a los autores una visión general de los problemas suscitados en la zona, así como también una descripción de los trabajos que se han realizado con la finalidad de mitigar los problemas.
- Recorrido por el área de estudio y elaboración de la ficha de deslizamientos en cada una de las zonas críticas.
- Recolección de muestras de suelo en zonas críticas.

3.4 Trabajo en oficina

En esta sección se describe la metodología empleada para la determinación de los parámetros de Mora-Vahrson Modificado, así como la elaboración de los mapas temáticos utilizando el software ArcGIS.

3.4.1 Aplicación de la metodología Mora-Vahrson modificada

En este apartado se describe la metodología para la asignación de valores de susceptibilidad a los parámetros utilizados en el método Mora-Vahrson modificado (MVM). Se presentan las tablas utilizadas para clasificar la pendiente, geología, cobertura vegetal, humedad, precipitaciones y sismos.

3.4.1.1 Determinación del parámetro pendiente

Para la determinación del factor pendiente se realizó una clasificación basada en la propuesta original de la metodología Mora-Vahrson (1991), considerando los rangos de porcentaje de pendiente encontrados en la zona de estudio.

La tabla 3 muestra los rangos considerados y su respectiva ponderación. Las pendientes más pronunciadas reciben valores más altos, indicando mayor susceptibilidad.

Tabla 3. Clasificación del factor pendiente

Rango de pendientes en grados	Clasificación	Condiciones del Terreno	Valor asignado
0° - 3°	Muy bajo	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1
4° - 15°	Bajo	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2
16° - 25°	Medio	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión	3
26° - 35°	Alto	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	4
>36°	Muy alto	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	5

Fuente: Modificado de (Mora & Vahrson, 1991)

3.4.1.2 Determinación del parámetro geológico

Para la evaluación de este parámetro se siguieron las sugerencias establecidas por la metodología Mora-Vahrson (1991), que clasifica las diferentes litologías en grados de susceptibilidad. Esta metodología asigna un determinado valor de factor litológico a cada tipo de roca o suelo, basado en sus propiedades mecánicas y físicas. A los materiales con condiciones físico-mecánicas más débiles se les asigna el valor más alto.

La tabla 4 muestra la clasificación propuesta por Mora-Vahrson y usada para el presente estudio.

Tabla 4. Clasificación del parámetro de litología

Litología	Características físico-mecánicas	Valor asignado
Aluviones, calizas duras, intrusivos, basaltos, andesitas, ignimbritas, rocas metamórficas	Sanos, permeables, poco fisurados, bajo nivel freático, alta resistencia al corte.	1
Rocas sedimentarias poco alteradas, intrusivas medianamente fisuradas, calizas elevadas, fracturas cisallables, duras, lava, ignimbritas, rocas metamórficas	Resistencia al corte media a nivel freático intermedio.	2
Rocas sedimentarias, intrusivas, calizas, lavas, ignimbritas, tobas, arenas, suelos regolíticos	Moderadamente alteradas, drenaje pobre, niveles freáticos altos, fracturación importante.	3
Aluviones fluvio-lacustres, piroclásticos, sectores de alteración hidrotermal	Fuertemente alteradas y fracturadas, rellenos arcillosos, niveles freáticos someros, moderada a baja resistencia al corte.	4
Materiales aluviales, coluviales, regolíticos de baja calidad mecánica. Materiales con estado de alteración avanzada, drenaje pobre,	Estado de alteración avanzada, drenaje pobre, niveles freáticos muy someros, resistencia al corte muy baja, materiales blandos con muchos finos.	5

Fuente: Modificado de (Mora & Vahrson, 1991).

3.4.1.3 Determinación del parámetro cobertura vegetal

Para la determinación del factor de cobertura vegetal se elaboró una clasificación que toma como referencia dos estudios. La primera referencia es una tabla de valores índice establecida por la Secretaría de Gestión de Riesgos en el año 2014, citada por Cabrera (2021). La segunda referencia proviene de la tesis de Vizca Hernández (2018), que divide el factor vegetal en cuatro categorías diferentes. A partir de estas referencias, se generó una clasificación que intenta representar adecuadamente los valores de cobertura vegetal y sus efectos en los deslizamientos.

En esta clasificación, se asigna el valor más alto a las áreas sin cobertura vegetal, indicando una mayor susceptibilidad a deslizamientos. La tabla 5 muestra la clasificación propuesta para el parámetro de cobertura vegetal.

Tabla 5. Clasificación del parámetro cobertura vegetal

Clasificación	Descripción	Valor Asignado
Muy bajo	Bosque Nativo	1
Bajo	Incluye vegetación arbustiva y herbácea muy alterada	2
Medio	Comprende vegetación arbustiva, herbácea menos alterada, y cultivos semipermanentes anuales	3
Alto	Plantación forestal, los cultivos anuales y permanentes.	4
Muy alto	Áreas sin cobertura vegetal, terrenos agrícolas sin cultivos, infraestructura, glaciares y zonas pobladas	5

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.4 Determinación del parámetro de humedad

La manera ideal para determinar la humedad del suelo es mediante la toma de muestras in situ. Sin embargo, dado que esto está fuera del alcance del presente trabajo, se propone una metodología basada en el balance hídrico del suelo, que solo requiere los valores promedio mensuales de precipitaciones y de la evapotranspiración.

Para la ponderación del factor de humedad del suelo, la metodología Mora-Vahrson presenta una tabla con distintos rangos de precipitación mediante los cuales se puede clasificar el factor de humedad. No obstante, dichos rangos están adaptados a la realidad de la zona

donde se desarrolló la metodología, Costa Rica. Por lo tanto, se propone una clasificación distinta basada en los datos recolectados en la zona de estudio.

ELECAUSTRO (2020), en su estudio hidrológico e hidráulico realizado en el complejo hidroeléctrico Machángara, sostiene que la evapotranspiración potencial en la cuenca alta del Río Machángara presenta rangos anuales entre 450 mm y 600 mm. Estos valores son similares a los obtenidos por Carchi (2015), quien reporta una evapotranspiración potencial de 650.54 mm/año para la cuenca del río Machángara. El propósito de revisar la evapotranspiración es adaptar los rangos propuestos por Mora-Vahrson a las condiciones locales y representar de mejor manera la susceptibilidad de la zona de estudio.

Los datos de precipitación y evapotranspiración se presentan en la tabla 6 y 7 respectivamente.

Tabla 6. Valores mensuales de la evapotranspiración en la cuenca alta del Río Machángara

Evapotranspiración Potencial media mensual (mm)												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
57.83	56.77	56.41	55.91	54.68	50.6	47.31	47.95	51.71	55.95	57.62	57.79	

Fuente: (Carchi, 2015)

Tabla 7. Valores mensuales de la precipitación de las estaciones cercanas a la zona

Precipitación media mensual (mm)													
Estación	Coords. (X y Y)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Chanlud	718863 9703939	115	110	152	158	155	146	124	94	79	101	108	111
El Labrado	721448 9697760	95	112	134	145	115	101	94	70	80	99	97	94
Ingapirca	736314 9719150	41	61	73	78	51	49	43	35	34	46	51	42
Surucucho	707684 9687460	98	263	163	223	111	96	73	31	34	36	32	40
Biblián	734397 9700380	65	89	112	111	76	53	49	36	39	77	92	83

Fuente: (INHAMI: Instituto Nacional de Meteorología a e Hidrología, 2017)

Para clasificar la humedad del suelo, se calculó la diferencia entre los valores de precipitación media mensual y los valores de evapotranspiración potencial de cada mes, utilizando datos de la estación más cercana. Posteriormente, se utilizó el valor máximo de estas diferencias para determinar el factor de humedad. En la Tabla 8 se muestra la clasificación propuesta para determinar la humedad considerando las condiciones locales.

Tabla 8. Clasificación del parámetro humedad

Humedad máx. anual	Clasificación	Valor asignado
<30	Muy bajo	1
30-60	Bajo	2
60-90	Medio	3
90-120	Alto	4
>120	Muy Alto	5

Fuente: Modificado de (Mora & Vahrson, 1991).

3.4.1.5 Determinación del parámetro de sismicidad

La ponderación del factor de sismicidad para el presente estudio se basó en los rangos sugeridos por la metodología Mora-Vahrson, que asigna valores de 1 a 10, considerando la intensidad del sismo y la aceleración pico en función de la gravedad. No obstante, para mantener la coherencia con los demás parámetros, se modificó el rango de valores asignados de 1 a 5, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 9. Clasificación del parámetro de sismicidad

Intensidades MM	Aceleraciones Pico (%g)	Cualificación	Valor asignado
III - IV	1-20	Leve	1
V- VI	21-37	Moderado	2
VII- VIII	38-55	Elevado	3
IX- X	56-73	Fuerte	4
XI- XII	>73	Muy Fuerte	5

Fuente: Modificado de (Mora & Vahrson, 1991).

3.4.1.6 Determinación del parámetro de precipitación

Para la determinación del factor de precipitación se tomará como referencia los datos de las estaciones meteorológicas presentados en la tabla 10.

Tabla 10. Clasificación del parámetro de precipitaciones

Estación	Coordenada en X	Coordenada en Y	Precipitación máxima en 24 horas (mm)
Chanlud	718863	9703939	51.88
El Labrado	721448	9697760	59.09
Ingapirca	736314	9719150	64.32
Surucucho	707684	9687460	59.52
Biblián	734397	9700380	78

Fuente: Elaboración propia.

Además de los datos de precipitación máxima de cada estación, se calcularon intensidades máximas para cada microcuenca usada para determinar la zona de estudio. Esto se realizó usando la ecuación de intensidad de la estación que más influencia tiene en la zona de estudio, Chanlud. La ecuación de intensidad máxima para un período de retorno de 100 años para la estación Chanlud fue obtenida de un estudio realizado por (Yanza Lituma & Verdugo González , 2023) y se presenta a continuación:

$$I = 744.6672 * (4.957395 + t)^{-0.7765667}$$

Donde:

I: Intensidad (mm/h)

t: duración (min)

Para la asignación de los valores se tomará como referencia el cuadro de valoración del parámetro de disparo por intensidad de la lluvia elaborado por Mora - Vahrson, el cual se puede observar en la tabla 11.

Tabla 11. Clasificación del parámetro de precipitaciones

Lluvia máxima en 24 horas, periodo de retorno 100 años	Descripción	Valor asignado
0-50	Muy bajo	1
50-100	Bajo	2
100-150	Medio	3
150-200	Alto	4
>200	Muy Alto	5

Fuente: Modificado de (Mora & Vahrson, 1991)

3.4.2 Generación de los mapas temáticos

En este apartado se describe el proceso de elaboración de los mapas temáticos necesarios para aplicar la metodología de evaluación de susceptibilidad a deslizamientos. Se utilizaron los datos de las fuentes descritas en la recopilación de información, y aplicando herramientas del Sistemas de Información Geográfica (SIG), se generaron mapas detallados de cada uno de los factores que intervienen en la susceptibilidad a deslizamientos de la zona de estudio.

La metodología de los mapas realizados se describe a continuación.

3.4.2.1 Elaboración del mapa de pendientes

Se importaron las capas con las curvas de nivel al software ArcGIS. Para la zona de estudio se optó por utilizar las curvas de nivel cada 5 metros, que abarcan la totalidad del área de estudio. A partir de estos datos se creó el Modelo de Elevación Digital, y utilizando las herramientas del ArcGIS se generó un mapa de pendientes que luego fue reclasificado según la tabla 3.

3.4.2.2 Elaboración del mapa geológico

En base a las observaciones realizadas en campo se realizó una modificación al mapa geológico del cantón Cuenca, en el cual se delimitaron las zonas donde presumiblemente existen depósitos coluviales. Para la delimitación de estas zonas se utilizaron además imágenes satelitales de la zona de estudio, obtenidas de Google Earth, y las curvas de nivel que se tenían de la zona.

Se sabe que los depósitos coluviales están formados por suelos que han sido transportados por gravedad y se acumulan en los pies de montañas y en las laderas con pendientes

moderadas. Además, en estas zonas la cobertura vegetal puede ser dispersa o menos densa, ya que la inestabilidad del suelo dificulta el establecimiento de una vegetación continua. Con estas consideraciones, se delimitaron las áreas con depósitos coluviales, las cuales se encontraban principalmente en zonas aledañas a la vía que conduce a la represa de Chanlud.

3.4.2.3 Elaboración del mapa de cobertura vegetal

El primer paso fue la revisión de la capa de datos del SIGTIERRAS, que contenía una clasificación previa del tipo de cobertura vegetal existente en la zona. A partir de esto, en el software ArcGIS, se montó la capa sobre las imágenes satelitales de Google Earth, actualizadas hasta el 2023, y se modificaron los vértices de los polígonos existentes identificando los cambios observados en las imágenes.

Posteriormente, se inspeccionaron las fotografías tomadas durante las visitas de campo, enfocándose en las zonas de deslizamiento. Esta información permitió verificar y ajustar los detalles del polígono, asegurando una representación más precisa de la cobertura vegetal, especialmente en las áreas sin cobertura vegetal. Finalmente, se reclasificó la capa según los valores asignados en la tabla 5 para generar el mapa de cobertura vegetal.

3.4.2.4 Elaboración del mapa de humedad del suelo

Los datos obtenidos se importaron al entorno de ArcGIS y se georreferenció la estación más representativa del área de estudio. Luego, utilizando las herramientas de análisis espacial, se generaron mapas para cada uno de los meses, asignando un valor según la clasificación de la tabla 8.

Aunque este mapa no se muestra debido a que solo se asigna un valor general y no se observa diferencia significativa entre las áreas, se utilizó el valor mensual más crítico para la superposición de capas y la creación del mapa de susceptibilidad

3.4.2.5 Elaboración del mapa de sismicidad

Para elaborar el mapa de sismicidad, se utilizó como referencia el Mapa de Zonificación Sísmica del Ecuador de la Norma Ecuatoriana de Construcción, que se indica en la figura 6.

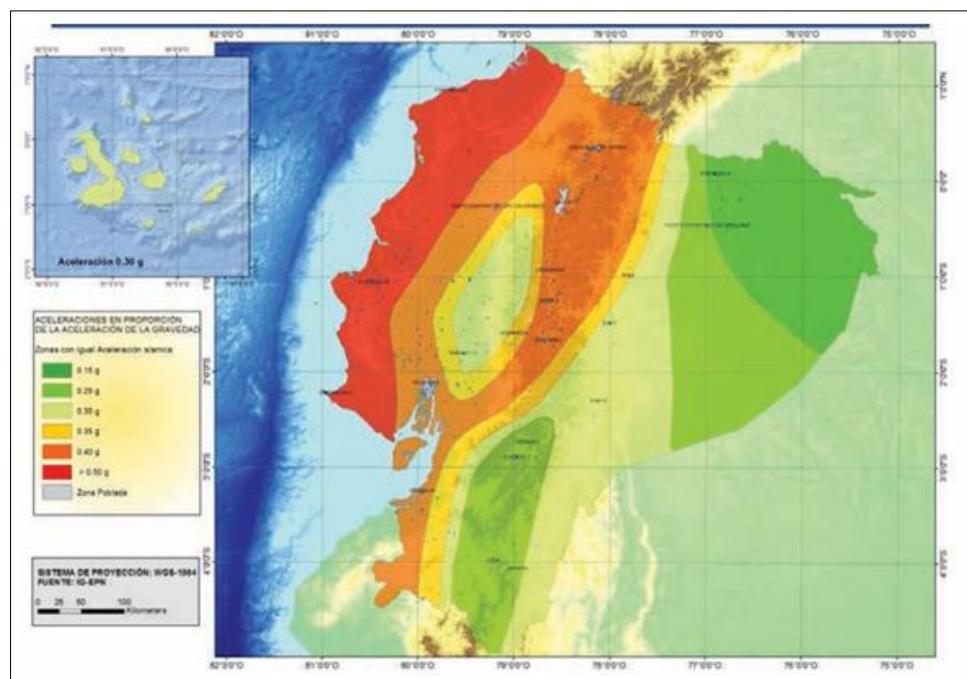


Figura 6. Mapa de diseño sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción

Fuente: (IGEPN: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional)

La capa con la información georreferenciada fue importada al software ArcGIS, y se extrajo la parte correspondiente a la zona de estudio para generar el mapa según la clasificación presentada en la tabla 9.

3.4.2.6 Elaboración del mapa de precipitaciones

Para elaborar el mapa de precipitaciones, se importaron los datos de precipitación máxima en 24 horas de cada estación meteorológica y de cada microcuenca a ArcGIS y se georreferenciaron. Luego, se utilizaron herramientas de análisis espacial para generar líneas de contorno que representan puntos con igual precipitación en una misma área, conocidas como isoyetas.

Con el mapa de isoyetas correspondiente al área de estudio, se reclasificaron los valores obtenidos, asignando los valores establecidos en la tabla 11. Este proceso permitió generar el mapa de lluvias máximas

3.4.2.7 Elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos

Una vez obtenidos todos los mapas necesarios, tales como litología, pendientes, cobertura vegetal, humedad del suelo, precipitación y sismicidad, se integraron para determinar la susceptibilidad aplicando la metodología Mora-Vahrson modificada. Cada uno de estos factores fue representado mediante capas de información geoespacial específicas en el software ArcGIS.

Para integrar los factores en el modelo y crear el mapa de susceptibilidad, se realizó una combinación de las distintas capas utilizando las herramientas de análisis espacial disponibles en ArcGIS. Las capas se combinaron de acuerdo con las fórmulas presentadas en la sección 2.4.2.

Por último, los valores obtenidos se reclasificaron de acuerdo con un histograma de distribución de frecuencia, que refleja mejor la clasificación de las distintas áreas según su grado de susceptibilidad.

3.4.3 Definición de las zonas críticas

Una vez obtenido el mapa de susceptibilidad, se realizó un primer análisis considerando toda la información recopilada y los resultados obtenidos. Este análisis permitió identificar las zonas más críticas con problemas de movimientos de masas. El propósito de este análisis fue detectar las zonas con deslizamientos y definir puntos para el muestreo del suelo, permitiendo así poder evaluar sus características físicas, como la granulometría y los límites de Atterberg.

3.4.3.1 Muestras de suelo

Para definir los puntos de muestreo, se consideraron factores como la variabilidad del terreno, la accesibilidad de las zonas y la representatividad de las muestras en relación con los diferentes tipos de suelo presentes en el área de estudio.

En total, se extrajeron 11 muestras en diferentes puntos, las cuales fueron colocadas en bolsas plásticas y etiquetadas para su análisis posterior en el laboratorio de la Universidad de Cuenca. El proceso de extracción se realizó de manera superficial, retirando primero la capa vegetal en los puntos de extracción para acceder al suelo subyacente.

3.4.4 Caracterización de suelos

Para la caracterización de suelos, se realizaron ensayos de granulometría de finos y gruesos, así como la determinación de los límites de Atterberg. Estos ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca, siguiendo las normativas ASTM D 422 para granulometría y ASTM D 4318 para límites de Atterberg.

Para la clasificación de los suelos se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) siguiendo la normativa ASTM D 2487. Este método categoriza los suelos en distintas clases según el tamaño de partículas y el índice de plasticidad, que se calcula a partir del límite líquido y límite plástico.

A continuación, se describe el proceso ejecutado para los ensayos en laboratorio.

3.4.4.1 Procedimiento para granulometría de gruesos

Se prepararon las muestras del material verificando que cumpla con el tamaño mínimo de muestra según lo establecido en la norma ASTM D422. La muestra de material se secó al horno durante 24 horas y posteriormente fue tamizada usando la serie de tamices para partículas gruesas. Por último, se pesó el material retenido en cada tamiz y se calculó el porcentaje de material que pasa por cada tamiz para elaborar la curva granulométrica.

3.4.4.2 Procedimiento para granulometría de finos

Del material retenido en el fondo del tamizado para gruesos, se extrajo una muestra de aproximadamente 500g a 1000g para el ensayo. Posteriormente, se llevó a cabo el lavado del material sobre el tamiz número 200 y se procedió a secarlo en el horno durante 24 horas. Después, se utilizó la serie de tamices para partículas finas y se pesó el material retenido en cada tamiz. Por último, se obtuvo el porcentaje de material que pasa por cada tamiz para elaborar la curva granulométrica.

3.4.4.3 Procedimiento para Límites de Atterberg

Para la obtención de los límites de Atterberg se utilizó la normativa ASTM D 4318. Para realizar los ensayos, se tomaron muestras de aproximadamente 500g del material y se secaron en el horno durante 24 horas. Una vez secado, el material fue disgregado hasta obtener una muestra de suelo que pasara por el tamiz número 40.

- **Procedimiento Límite Líquido**

Se mezcló la muestra de suelo hasta formar una pasta homogénea. Luego, se colocó y niveló la pasta en la cuchara de Casagrande. Después, se realizó una abertura en la muestra y se contó el número de golpes necesarios para cerrar la abertura 3 mm. Este proceso se repitió 3 veces, variando el contenido de humedad para obtener un número de golpes que oscilara entre 15 y 35. Finalmente, se tomaron muestras en una tara para determinar su humedad y elaborar una gráfica a partir del número de golpes y el contenido de humedad de la muestra.

- **Procedimiento Límite Plástico**

Se mezcló la muestra de suelo con agua y se procedió a formar un cilindro de aproximadamente 3.2 mm de diámetro sobre una placa de vidrio. Una vez alcanzado dicho diámetro, se rompió la hebra y se volvió a moldear la muestra hasta el diámetro deseado. Una vez que la muestra comenzó a agrietarse, esta fue recolectada en una tara para determinar la humedad. Este procedimiento se repitió dos veces.

3.4.5 Elaboración del inventario de deslizamientos

La elaboración del inventario se desarrolló en tres etapas:

En la primera etapa, se revisaron los mapas geológicos existentes y la información proporcionada por ELECAUSTRO S.A., lo que permitió obtener una visión inicial de los eventos de deslizamiento que se han producido en la zona.

En la segunda etapa, se realizaron inspecciones visuales en la zona de estudio para identificar las características de los deslizamientos. Durante estas visitas, se verificaron las áreas de interés y se utilizaron fichas de deslizamientos para documentar detalladamente cada zona crítica. Esta ficha, que se indica en la tabla 12, incluye información sobre la ubicación, tipo de deslizamiento, características del suelo, vegetación y otros factores relevantes.

En la tercera etapa, los datos recopilados se estructuraron y catalogaron adecuadamente, dividiéndolos en seis zonas críticas. A partir de esta información, se creó una capa en ArcGIS que contenía la forma de los deslizamientos para la elaboración del mapa de deslizamientos. Cabe destacar que la forma del deslizamiento presentada es una aproximación basada tanto en las fotografías tomadas en el sitio como en las imágenes satelitales de Google Earth.

Tabla 12. Ficha utilizada para la descripción de los deslizamientos

INVENTARIO DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA							
Código:	Fecha:						
Lugar:	Proyección:						
Abscisa de la vía:	Coordenadas: x y						
Altitud:							
TIPO DE MOVIMIENTO		MATERIAL					
		Observación en campo		Resultados Muestra			
		Caída	%				%
			Roca			Grava	
			Suelo			Arena	
			Detrito			Limo	
		Deslizamiento			Plasticidad		
			Clasificación SUCS:				
GEOLOGIA							
GENERAL							
Altura de deslizamiento:	Ancho del deslizamiento:						
Pendiente del deslizamiento:	Superficie de deslizamiento:						
EVIDENCIAS DE ACCION HUMANA							
OTRAS OBSERVACIONES							

Fuente: Elaboración propia

Cada ficha fue complementada con fotografías del sitio, y fotografías satelitales para poder representar y realizar un análisis más detallado de las zonas críticas. Esta información visual permitió comprender las características del movimiento y observar el impacto del deslizamiento a lo largo de los años.

Finalmente, con los datos obtenidos de los mapas temáticos y la información del inventario de deslizamientos, se realizó una correlación entre ambos para verificar la efectividad de la metodología y realizar un análisis de las posibles causas y factores que contribuyen a la susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio.

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo del estudio. Los resultados incluyen la delimitación y ubicación del área de estudio, así como la descripción de la zona, haciendo énfasis en sus características geológicas. También se presentan los mapas temáticos de cada parámetro, incluyendo el mapa de susceptibilidad y un análisis general. Finalmente, para contrastar la eficacia del método utilizado, se presenta un inventario de deslizamientos, que incluye la ficha de deslizamientos en cada zona crítica, los resultados obtenidos en laboratorio de las muestras recolectadas y un análisis de su evolución durante los últimos años, con la finalidad de identificar los factores más influyentes en cada zona.

4.1 Delimitación y ubicación del área de estudio

Siguiendo el proceso de subdivisión de la cuenca principal, se identificaron diversos puntos de drenaje en el río y se obtuvieron microcuenas que van desde la corona de la montaña hasta el río, como se puede observar en la figura 7.

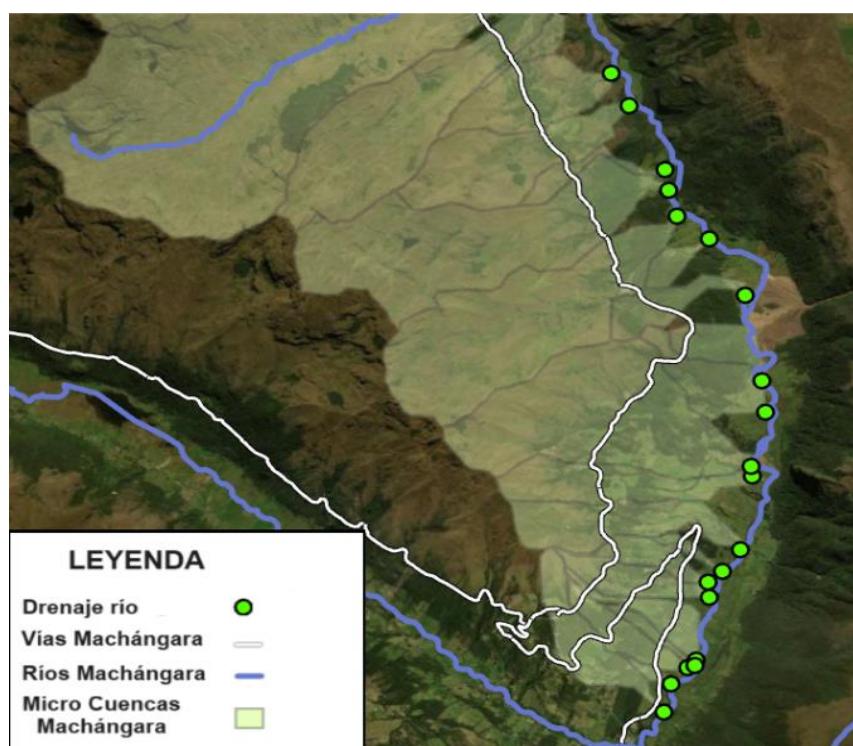


Figura 7. Microcuenas ubicadas en la conducción Chanlud - Tuñi

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta que el área propuesta abarca solo el tramo final de la conducción Chanlud-Tuñi, se delimitó el área de estudio considerando las microcuenas que están incluidas entre las abscisas 8+850 y 6+000, como se indica con una línea de color rojo en la figura 8. En total se identificaron 11 microcuenas dentro del área de estudio.



Figura 8. Delimitación del área de estudio en el tramo final de la conducción Chanlud - Tuñi

Fuente: Elaboración propia

El área delimitada abarca una longitud de la vía de 2.85 km, y comprende un área total de 476 hectáreas. Para contextualizar la ubicación, el estudio se realizó sobre el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (U.T.M) Zona 17, WGS84. Los puntos de referencia se muestran en la figura 9 y las coordenadas se indican en la tabla 13.

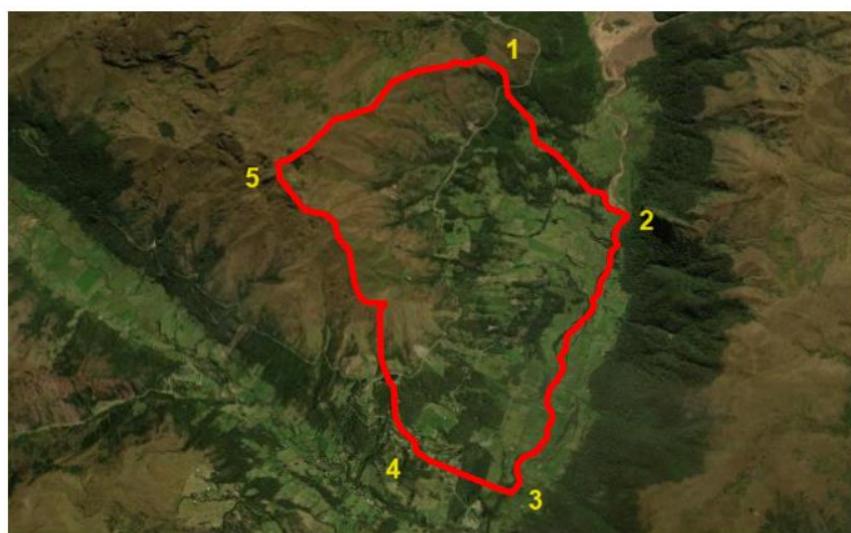


Figura 9. Ubicación del área de estudio

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Coordenadas y altitud de los puntos límites del área de estudio

SISTEMA: UTM DATUM: WGS84 ZONA. 17

PUNTO	ESTE	NORTE	ALTITUD
1	721005	9698838	3510
2	722072	9697622	3104
3	721163	9695528	2997
4	720361	9695824	3255
5	719324	9697969	3830

Fuente: Elaboración propia

4.2 Geología

En este apartado se presenta una descripción de las estructuras geológicas presentes en el área de estudio a nivel regional, y un análisis más detallado de las características geológicas a nivel local.

4.2.1 Geología Regional

La revisión de la carta geológica del cantón Cuenca a escala 1:100 000 permitió determinar que, el área de estudio está conformada por estructuras pertenecientes a la formación Chanlud y depósitos glaciares.

Formación Chanlud

La mayor parte del área de estudio se encuentra dentro de la formación Chanlud, compuesta principalmente por una variedad de rocas ígneas y metamórficas. Dunkley y Gaibor (1997) destacan que la formación está compuesta por capas casi horizontales de rocas volcánicas, específicamente lavas andesíticas, que tienen algunas zonas de rocas fracturadas y pequeñas cantidades de otros sedimentos volcánicos y cenizas compactadas.

Depósitos Glaciares

Los depósitos glaciares están presentes principalmente en el sureste del área de estudio. Estos son acumulaciones de sedimentos y rocas que han sido transportados por la acción de los glaciares. Los materiales que conforman estos depósitos varían desde pequeños fragmentos de roca hasta grandes bloques, formando una mezcla de materiales sueltos y consolidados.

4.2.2 Geología Local

Los diferentes recorridos realizados en campo han permitido identificar diversas estructuras geológicas y litológicas a lo largo de la conducción. Estas observaciones se detallan a continuación.

- **Tramo entre abscisas 8+850 – 6+000**

A lo largo del tramo se puede observar una heterogeneidad en los materiales, que incluyen desde depósitos de materiales finos hasta fragmentos de roca. Las observaciones del suelo en distintos puntos del tramo indican la presencia de materiales arcillosos, limosos y arenosos, así como la presencia de grava en algunas zonas. La geología local está compuesta por una mezcla de fragmentos de roca y suelo que se han acumulado debido a procesos de movimiento gravitacional

En la figura 10 se muestran fotografías de las abscisas 8+200 y 7+250 donde se observa la presencia de acumulaciones de material suelto y fragmentado, así como depósitos de tierra y rocas. Estos materiales se observaron de manera recurrente en las cercanías a la vía.



Figura 10. Depósitos coluviales en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia

La figura 11 muestra un talud expuesto en la abscisa 7+250, donde se observa una gran diversidad de tamaños de materiales, e incluso ciertas afloraciones de rocas.



Figura 11. Talud expuesto en la abscisa 7+250

Fuente: Elaboración propia

Se deduce entonces que las zonas aledañas a la vía se tratan de un coluvial que se ha asentado sobre el macizo rocoso perteneciente a la Formación Chanlud.

Por otro lado, en ciertas abscisas del recorrido también se puede observar cómo afloran las rocas volcánicas, las cuales, de acuerdo con el informe geológico realizado por ELECAUSTRO, se tratarían de andesitas y dacitas. En la figura 12 se puede observar un afloramiento de este macizo rocoso observado en las abscisas 6+030 y 6+600.

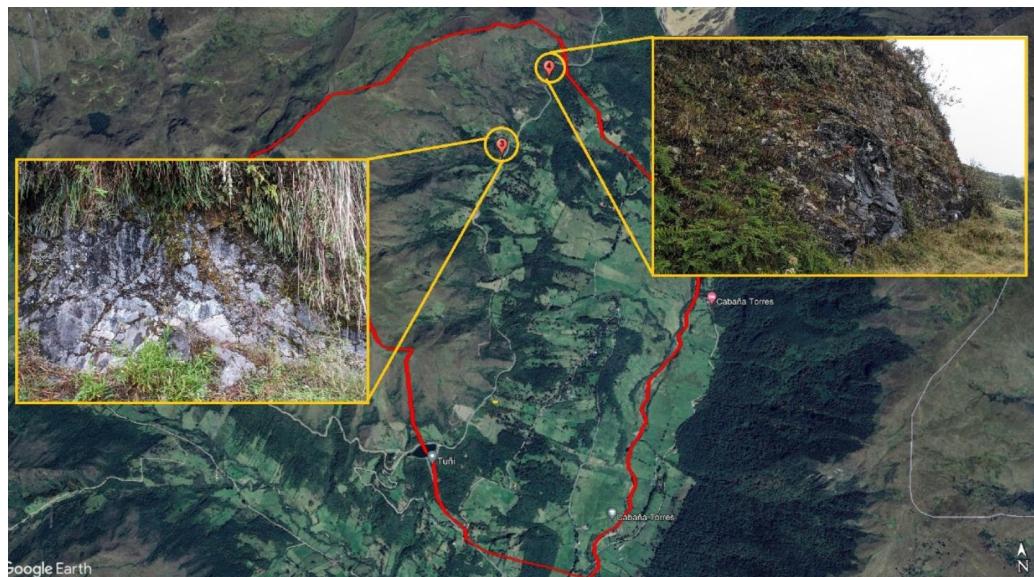


Figura 12. Afloramientos de roca volcánica

Fuente: Elaboración propia

4.3 Mapas temáticos aplicando la metodología Mora Vahrson modificada

En esta sección se presentan los mapas temáticos de los parámetros utilizados en la metodología propuesta para la evaluación de susceptibilidad a deslizamientos. Estos mapas temáticos incluyen factores como la geología, pendientes, cobertura vegetal, humedad del suelo, precipitaciones y sismicidad que se presentan a continuación.

4.3.1 Mapa del parámetro geológico

En la Figura 13 se presenta un mapa de susceptibilidad litológica, que combina la información de la carta geológica regional y la geología local. Como se explicó en la sección 4.2, se utilizaron imágenes satelitales y fotografías in situ para identificar áreas con características geomorfológicas indicativas de depósitos coluviales.

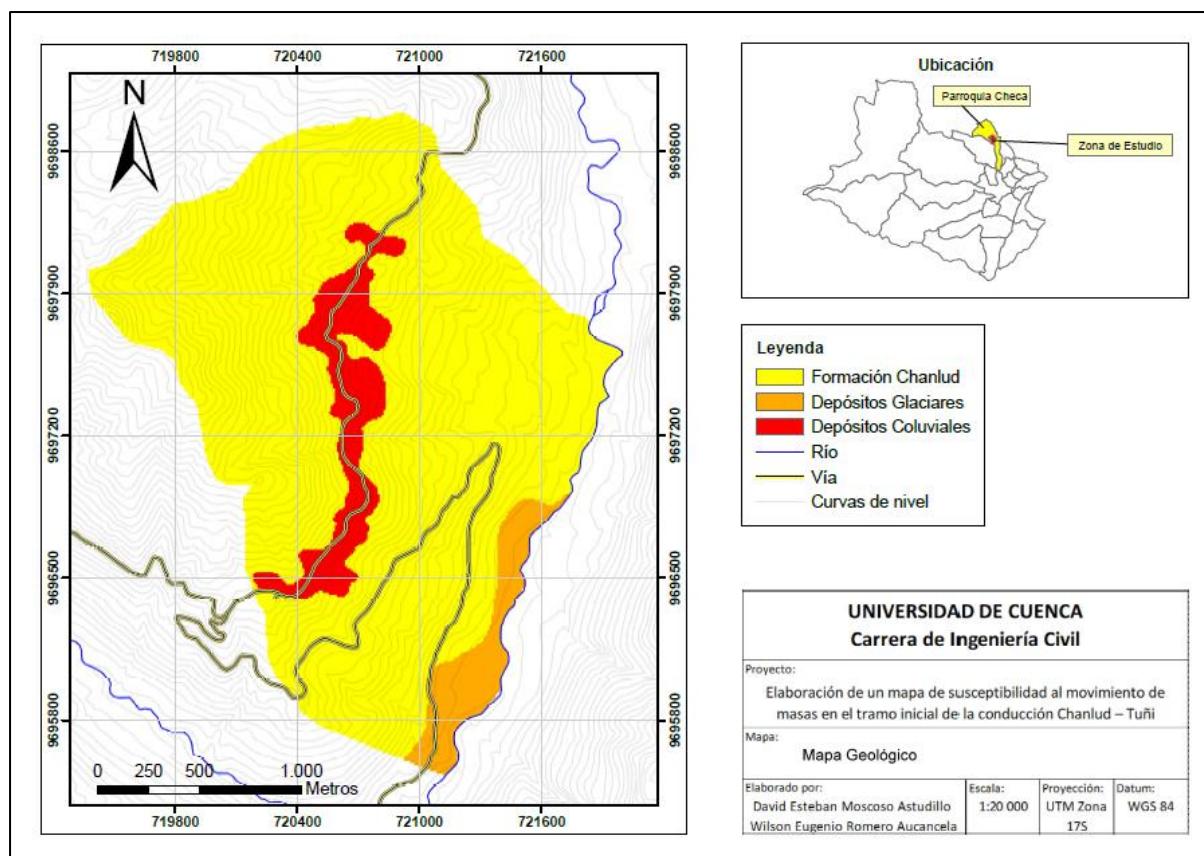


Figura 13. Mapa de susceptibilidad del parámetro geológico

Fuente: Elaboración propia

La tabla 14 muestra la distribución de los distintos valores del factor geológico clasificados en el área de estudio.

Tabla 14. Clasificación del parámetro geológico en el área de estudio

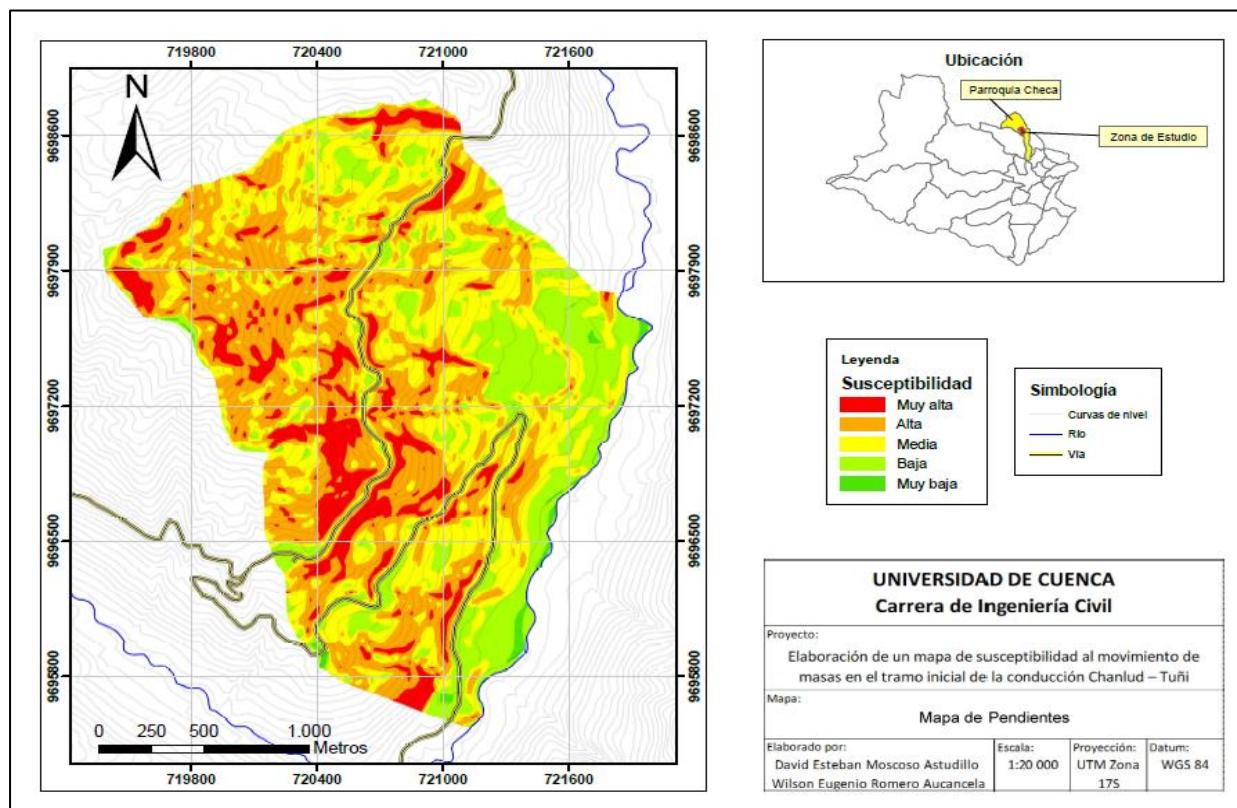
Formación	Factor Geológico	Susceptibilidad	Área (m ²)	Porcentaje
Formación Chanlud	3	Media	4079136.36	86.31%
Depósitos Coluviales	5	Muy alta	390791.64	8.27%
Depósitos Glaciares	4	Alta	256319.09	5.42%

Fuente: Elaboración propia.

La mayor parte del área de estudio (86.31%) corresponde a la Formación Chanlud, la cual tiene una susceptibilidad media a deslizamientos. Los Depósitos Coluviales, que cubren el 8.27% del área, presentan una susceptibilidad muy alta, mientras que los depósitos glaciares que representan el 5.42% tienen una susceptibilidad alta.

4.3.2 Mapa del parámetro de pendientes

El mapa de pendientes se presenta en la figura 14.

**Figura 14.** Mapa de susceptibilidad del parámetro pendiente

Fuente: Elaboración propia

La clasificación del parámetro de pendiente se detalla en la tabla 15.

Tabla 15. Clasificación del parámetro pendiente en el área de estudio

Rango de pendientes en grados	Factor Pendiente	Susceptibilidad	Área (m ²)	Porcentaje
0° - 3°	1	Muy baja	1590510.26	0.82%
4° - 15°	2	Baja	905204.76	19.33%
16° - 25°	3	Media	1580438.07	33.75%
26° - 35°	4	Alta	568480.01	33.96%
>36°	5	Muy alta	38458.83	12.14%

Fuente: Elaboración propia.

La clasificación de pendientes en la zona de estudio revela que el 53.90% del área total de esta tiene una susceptibilidad muy baja a media a deslizamientos, con pendientes en grados que varían entre 0° y 25°, indicando una relativa estabilidad en estas zonas. Sin embargo, alrededor del 33.96% del área presenta pendientes más pronunciadas entre 26° y 35°, indicando una alta susceptibilidad y alrededor del 12.14% (pendientes mayores a los 35°) tiene muy alta susceptibilidad.

4.3.3 Mapa del parámetro cobertura vegetal

Durante las visitas a la zona de estudio, se observaron varias áreas sin cobertura vegetal, principalmente en zonas erosionadas o afectadas por deslizamientos. Por lo tanto, el mapa base fue ajustado para incluir estas áreas sin cobertura vegetal.

En la figura 15 se presenta el mapa de cobertura vegetal elaborado a partir de los datos del SIGTIERRAS, las observaciones de imágenes satelitales y las observaciones realizadas en campo.

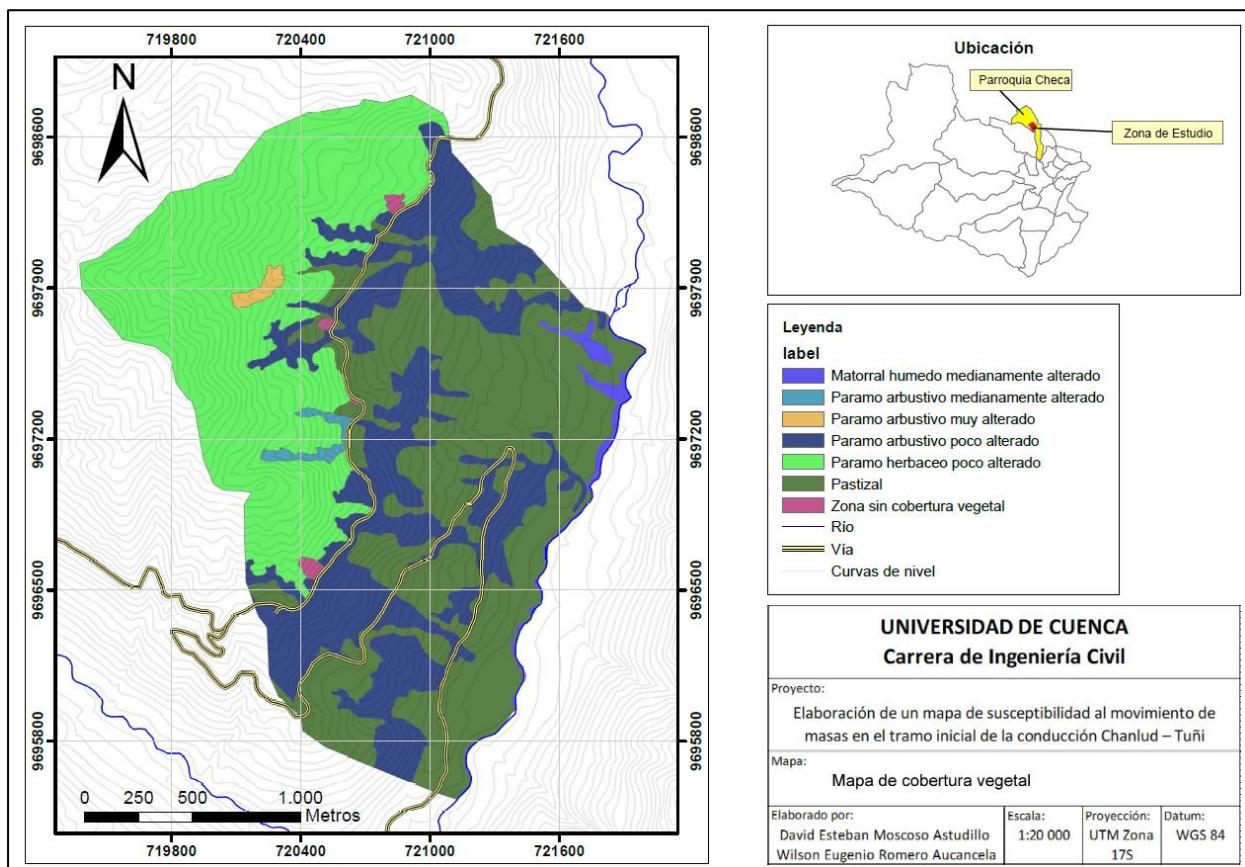


Figura 15. Mapa de cobertura vegetal en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia

La cobertura vegetal presente en la zona de estudio se clasificó en siete categorías principales, las cuales reflejan distintos grados de alteración y tipos de vegetación. Estas categorías son: matorral húmedo medianamente alterado, páramo arbustivo (con niveles de alteración poco, medianamente y muy alterado), páramo herbáceo poco alterado, pasto cultivado y zonas sin cobertura vegetal.

La tabla 16 muestra el detalle de la clasificación asignada al parámetro de cobertura vegetal

Tabla 16. Clasificación del parámetro cobertura vegetal en el área de estudio

Tipo de cobertura vegetal	Factor	Susceptibilidad	Área (m ²)	Porcentaje
Matorral húmedo medianamente alterado	3	Media	60959.93	1.29%
Páramo arbustivo muy alterado	5	Muy alta	20031.14	0.42%
Páramo arbustivo medianamente alterado	2	Baja	29774.7	0.63%
Páramo arbustivo poco alterado	3	Media	1267202.4	26.81%
Páramo herbáceo poco alterado	3	Media	1628882.6	34.46%
Pastizal	5	Media	1700057.8	35.97%
Zona sin cobertura vegetal	5	Muy alta	19368.53	0.41%

Fuente: Elaboración propia

A partir de esta información se presenta el mapa de susceptibilidad del parámetro de cobertura vegetal, en la figura 16.

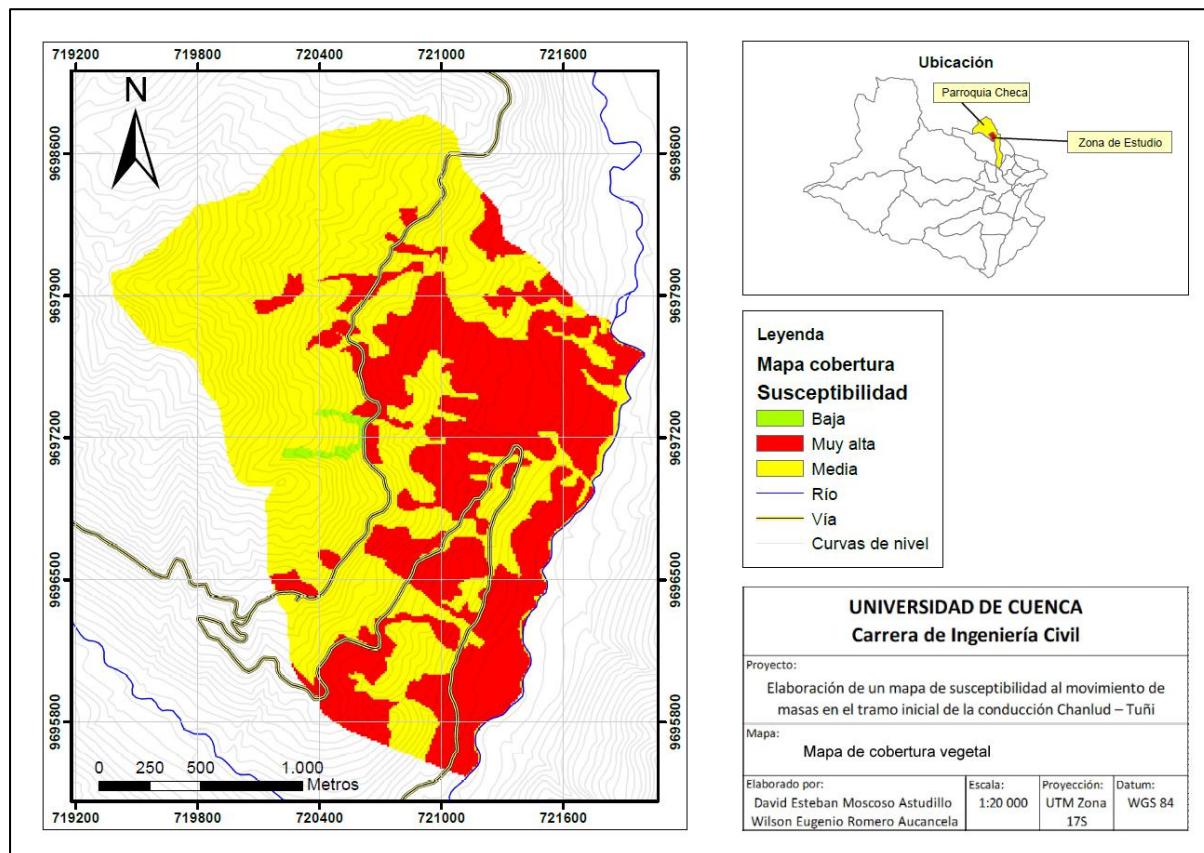


Figura 16. Mapa de susceptibilidad del parámetro de cobertura vegetal

Fuente: Elaboración propia

La categoría de mayor prevalencia en el área de estudio son los pastizales que cubre un 35.97% de la superficie. Este tipo de cobertura vegetal indica una significativa intervención humana, probablemente asociada a actividades agropecuarias. Le sigue en extensión el páramo herbáceo poco alterado, que ocupa un 34.46% del área, y en menor medida el páramo arbustivo muy alterado. Por otro lado, la zona sin cobertura vegetal ocupa 19,368.53 m², equivalentes al 0.41% del área total. La ausencia de vegetación en estas áreas podría ser natural o resultado de actividades antropogénicas que han eliminado la vegetación.

4.3.4 Clasificación del parámetro humedad del suelo

Los resultados de la humedad del suelo, obtenidos al restar el valor de la evapotranspiración potencial de las precipitaciones mensuales, se presentan en la tabla 17. Para este análisis, se consideró la estación Chanlud como la estación representativa de la zona.

Tabla 17. Humedades obtenidas para la zona de estudio

Estación	Humedades (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Chanlud	57.2	53.2	95.6	102.1	100.3	95.4	76.7	46.1	27.3	45.1	50.4	53.2

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos resultados, se consideró los valores más críticos de humedad que se da entre los meses de abril y mayo, alcanzando valores superiores a los 100 mm. En la Tabla 18 se muestra la clasificación para la humedad.

Tabla 18. Clasificación del parámetro humedad del suelo en el área de estudio

Humedad máx. anual	Clasificación	Valor asignado
102.1	Alto	4

Fuente: Elaboración propia

El parámetro de humedad arrojó un valor de 4, indicando una alta susceptibilidad según la clasificación establecida. Esta clasificación asigna un valor único para toda la zona de estudio debido a que se basa en datos de la estación Labrado, la única en el área. Sin embargo, durante las visitas de campo se observó una significativa humedad en la zona, con varios cuerpos de agua descendiendo por la montaña y saturando el suelo en distintos puntos. Para estudios más detallados, sería necesario realizar ensayos específicos para determinar el contenido de humedad en las rocas. No obstante, esta situación se cubre en parte con la información litológica, ya que los suelos tienen una mayor capacidad de retención de agua en comparación con las rocas.

4.3.5 Clasificación del parámetro de sismicidad

La zona de estudio se encuentra ubicada en el austro del Ecuador, que se caracteriza por tener sismos de magnitudes bajas, por lo cual la norma ecuatoriana lo clasifica con una aceleración pico de 0.25g, bajo como se indica en la tabla 19.

Tabla 19. Clasificación del parámetro de sismicidad en el área de estudio

Intensidad MM	Aceleraciones Pico (%g)	Grado de Susceptibilidad	Factor de sismicidad
V-VI	25	Bajo	2

Fuente: Elaboración propia

El resultado del valor asignado fue de 2, correspondiente a un grado de susceptibilidad bajo, lo cual tiene sentido dado que no se han registrado sismos de mayor magnitud en la zona. Según los registros históricos y la información sísmica disponible del Instituto Geofísico, esta región no ha experimentado eventos sísmicos significativos en los últimos años.

4.3.6 Mapa del parámetro de precipitaciones

Con las precipitaciones máximas en 24 horas para cada estación, presentadas en la tabla 10, y las precipitaciones de cada microcuenca, obtenidas de acuerdo con lo descrito en la sección 3.4.1.6 y presentadas en la tabla 20, se creó un mapa de isoyetas que se observa en la figura 17.

Tabla 20. Precipitaciones máximas en 24 horas para cada microcuenca

Microcuenca	Área (km ²)	I (mm/h)
1	1.773	109.67
2	0.539	63.40
3	0.570	72.66
4	0.050	32.28
5	0.173	56.27
6	0.265	65.13
7	0.208	55.32
8	0.065	26.56
9	0.230	54.66
10	0.032	23.38
11	0.391	63.83

Fuente: Elaboración Propia

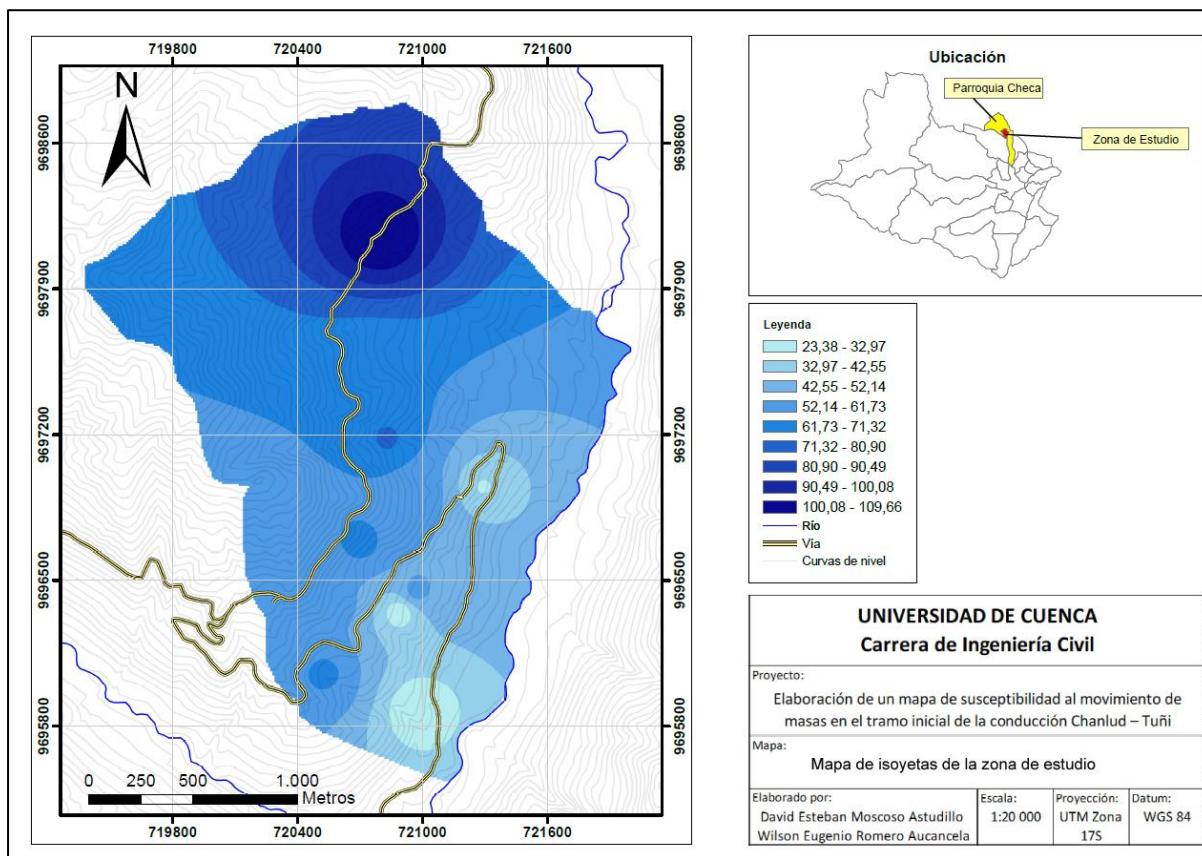


Figura 17. Mapa de Isoyetas de la zona de estudio

Fuente: Elaboración Propia

Haciendo uso de la tabla 11 se clasificaron las distintas zonas de precipitaciones máximas en 24 horas encontradas en la zona de estudio. Los factores de precipitación asignados a la zona de estudio se presentan en la tabla 21.

Tabla 21. Clasificación del parámetro de precipitaciones en el área de estudio

Lluvia máxima en el tiempo de concentración (mm)	Grado de susceptibilidad	Factor de precipitación
23.37-50	Muy Bajo	1
50-100	Bajo	2
100-109.66	Medio	3

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Mapa de Susceptibilidad

Una vez que se han obtenido cada uno de los mapas temáticos, se procedió según la metodología descrita en el apartado 3.4.2.7 para elaborar el mapa de susceptibilidad, el cual se presenta en la figura 18.

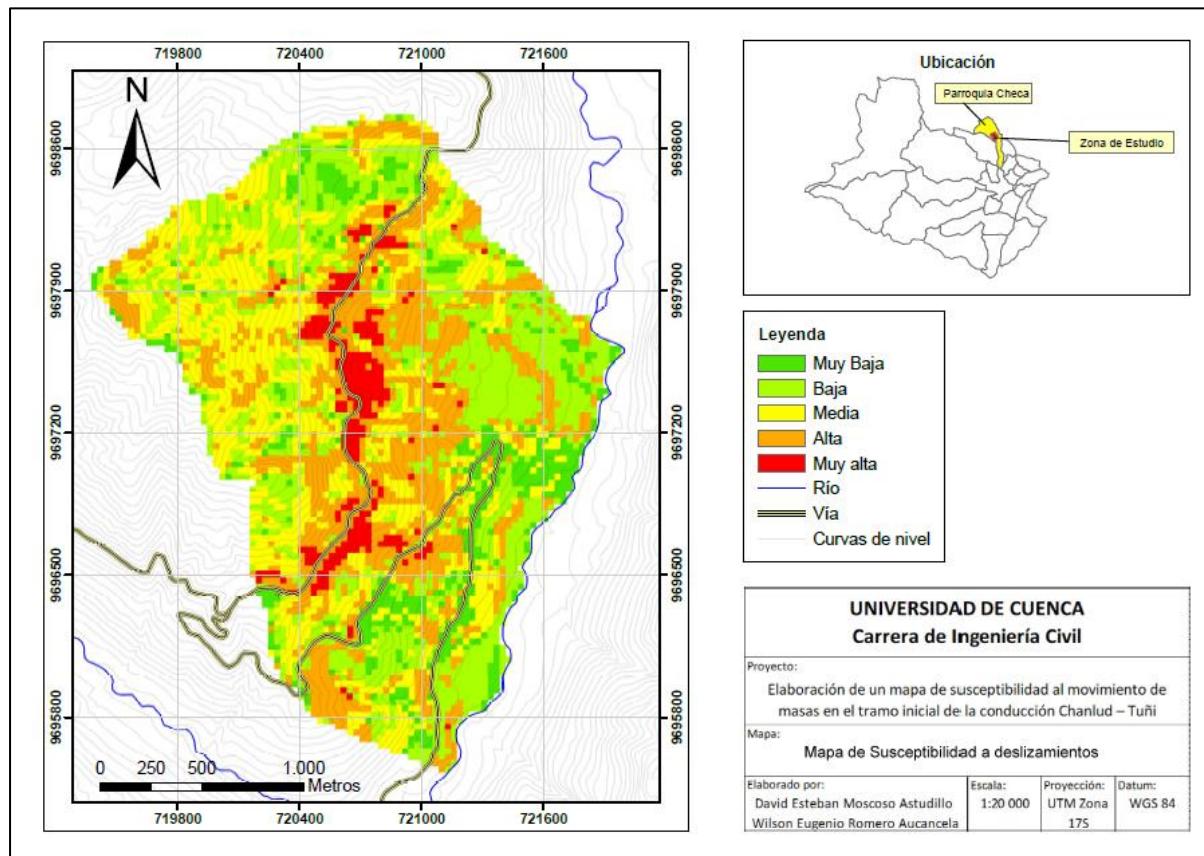


Figura 18. Mapa de susceptibilidad el tramo final de la conducción Chanlud - Tuñi

Fuente: Elaboración propia.

4.4.1 Análisis de la susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio

La figura 18 muestra el mapa de susceptibilidad obtenido luego de aplicar la metodología planteada por los autores. En dicho mapa se puede apreciar que la zona de estudio se encuentra clasificada en cinco grados de susceptibilidad a deslizamientos: muy baja, baja, media, alta y muy alta. Las proporciones de cada uno de los grados de susceptibilidad encontrados se presentan en la tabla 22.

Tabla 22. Grados de susceptibilidad a deslizamientos de la zona de estudio

Grado de Susceptibilidad	Área (m ²)	Área (ha)	Porcentaje
Muy alta	244942.49	24.49	5.27%
Alta	1266183.55	126.61	27.23%
Media	1269198.64	126.92	27.29%
Baja	1400285.03	140.02	30.11%
Muy baja	469983.53	46.99	10.11%

Fuente: Elaboración propia

Para una mejor compresión de los distintos grados de susceptibilidad encontrados, se describe cada uno de ellos a continuación.

4.4.1.1 Susceptibilidad muy baja

La susceptibilidad muy baja abarca un área de 10.11% dentro de la zona de estudio. Esta clasificación se encuentra en puntos dispersos del terreno, donde la pendiente es muy baja y la cobertura vegetal es densa, lo que reduce significativamente el riesgo de deslizamientos.

4.4.1.2 Susceptibilidad baja

La susceptibilidad baja constituye el 30.11% de la totalidad del área de la zona de estudio, equivalente a 140.02 ha. Se encuentra en las partes altas de la montaña y en las cercanías al río Machángara, caracterizadas por la presencia de vegetación de páramo (arbustiva y herbácea) poco alterada. A nivel de factores geológicos, estas zonas corresponden a formaciones con menor predisposición a los deslizamientos debido a la naturaleza consolidada de los materiales presentes, correspondientes a la formación Chanlud que tiene más presencia de rocas.

4.4.1.3 Susceptibilidad media

Constituye el 27.29% de la zona de estudio y representa la segunda categoría con mayor extensión, con un área equivalente a 126.92 ha. Se encuentra distribuido en toda la extensión de la zona de estudio, generalmente rodeando las zonas de alta susceptibilidad. Estos sectores presentan una combinación de pendientes moderadas y una cobertura vegetal variada. La geología de estas zonas incluye formaciones que, aunque estables en condiciones normales, pueden presentar riesgo bajo ciertas condiciones ambientales, como lluvias intensas, terremotos o cambios en el uso del suelo que alteren la cohesión y estructura del terreno.

4.4.1.4 Susceptibilidad alta

La susceptibilidad alta ocupa el 27.23% del área total de la zona de estudio, distribuida mayoritariamente en las cercanías de la vía que conduce a la represa de Chanlud. Esta clasificación presenta pendientes moderadas. Según la tabla 15, las pendientes en estas áreas varían entre 26 y 35 grados, lo cual se clasifica con un alto grado de susceptibilidad a deslizamientos. No existe un patrón claro de la influencia de la litología, ya que las zonas están distribuidas tanto en la formación Chanlud como en los depósitos coluviales. Sin embargo, se sabe que la cobertura vegetal en estas áreas ha sido alterada. Si bien no hay ausencia total de vegetación en estas zonas, la mayor parte corresponde a páramos alterados y pasto cultivado.

4.4.1.1 Susceptibilidad muy alta

Las zonas con susceptibilidad muy alta, aunque ocupan una pequeña proporción del área total (5.27%), presentan características críticas y están propensas a deslizamientos. Estas áreas están influenciadas por varios factores. Las pendientes en estas zonas, producto principalmente de las infraestructuras realizadas, llegan hasta los 55 grados, lo que se clasifica como muy alta susceptibilidad a deslizamientos debido a la pronunciada inclinación del terreno.

Además, la geología desfavorable contribuye significativamente a esta clasificación. Las zonas en este rango están principalmente compuestas por depósitos coluviales en las cercanías a la vía, y en menor medida, por depósitos glaciares, los cuales tienen una susceptibilidad alta a muy alta debido a su composición y estado de consolidación. Otro factor importante es la alteración de la cobertura vegetal, llegando incluso a la ausencia total de vegetación en ciertas zonas críticas.

En resumen, las zonas con alta y muy alta susceptibilidad en la zona de estudio están influenciadas principalmente por factores geológicos y geomorfológicos. No obstante, se ha observado que en la zona existe un nivel importante de humedad, producto de las lluvias y del agua que desciende por las quebradas desde lo alto de la montaña, lo que satura el suelo y lo vuelve más propenso a deslizamientos. Esta observación sugiere que, aunque estos factores se han evaluado con un valor general y no específico para cada punto, pueden jugar un papel significativo en la inestabilidad del terreno y deben ser considerados en futuras evaluaciones y planes de mitigación.

4.5 Inventario de deslizamientos

En esta sección se presentará un inventario de las zonas críticas, que incluye las fichas de los deslizamientos identificados en el área de estudio de manera individual. Además, se incluyen fotografías e imágenes, así como la caracterización de las muestras de suelo recolectadas, proporcionando información sobre sus propiedades físicas y mecánicas. Finalmente, se realizará un análisis de los deslizamientos ocurridos a lo largo de los años, evaluando los factores desencadenantes y las tendencias observadas, con el objetivo de entender mejor los procesos que afectan la estabilidad del terreno y evaluar las medidas de mitigación en las zonas ya intervenidas.

Se presenta un inventario que consta de 6 zonas críticas donde se han identificado movimientos de masa, distribuidas a lo largo del tramo como se muestra en la figura 19. Estas zonas críticas se identificaron a partir del mapa de susceptibilidad obtenido y de los recorridos de campo, que permitieron validar y precisar las áreas de alta susceptibilidad.

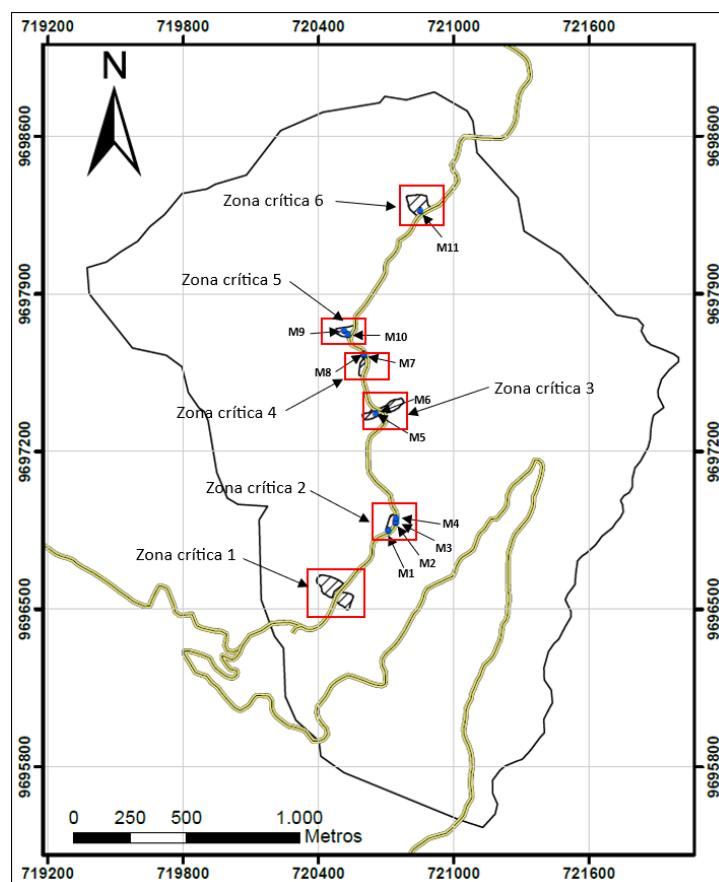


Figura 19. Ubicación de las zonas críticas identificadas en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia

En la figura 19 también se presenta la ubicación de las muestras recolectadas. En total, se extrajeron 11 muestras distribuidas en las 6 zonas críticas. Los resultados de los ensayos realizados en laboratorio se presentan en el Anexo A.

En la tabla 23 se presenta el detalle de la recolección de las muestras.

Tabla 23. Resumen de la información de las muestras de suelo recolectadas, UTM WGS84

Muestra	Sector	Abscisa	Coordinada en X	Coordinada en Y	Profundidad
M1	Zona crítica 2	8+200	720710	9696849	Superficial
M2	Zona crítica 2	8+150	720742	9696883	Superficial
M3	Zona crítica 2	8+150	720742	9696883	Superficial
M4	Zona crítica 2	8+130	720744	9696902	Superficial
M5	Zona crítica 3	7+520	720653	9697368	Superficial
M6	Zona crítica 3	7+510	720640	9697376	Superficial
M7	Zona crítica 4	7+320	720602	9697628	Superficial
M8	Zona crítica 4	7+330	720600	9697633	Superficial
M9	Zona crítica 5	7+100	720530	9697719	Superficial
M10	Zona crítica 5	7+100	720514	9697737	Superficial
M11	Zona crítica 6	6+540	720851	9698267	Superficial

Fuente: Elaboración propia

En 4 de estas zonas críticas (Zonas 1, 3, 4 y 5), ya se ha realizado algún tipo de intervención por parte de ELECAUSTRO S.A. para mitigar daños y contener los deslizamientos, mientras que en las zonas 2 y 6 no hay registro de intervenciones. Por lo tanto, el inventario se dividirá en zonas críticas intervenidas y zonas críticas no intervenidas. Esto permitirá comparar la efectividad de las intervenciones realizadas y evaluar las condiciones actuales en las zonas sin intervención

4.5.1 Zonas críticas intervenidas

En esta sección se presentan las zonas con deslizamientos existentes que han sido ya intervenidas. Las fichas elaboradas en campo se presentan en los anexos.

4.5.1.1 Zona crítica 1 (Abscisa vía 8+850)

Caracterización de suelos

Debido a la alta presencia de material rocoso en la zona del deslizamiento, no fue posible tomar muestras de suelo directamente. Sin embargo, durante la etapa inicial del deslizamiento, se ha realizado el trabajo: "Estudios de estabilización del talud ubicado entre las abscisas 9+140 – 9+240 de la vía Chanlud – Tuñi" (ELECAUSTRO, 2017), reportando la presencia de suelos superficiales friccionantes con compacidad y saturación variables.

Análisis

La figura 20 muestra dos imágenes satelitales de la zona del deslizamiento, a la izquierda una imagen del año 2015 y a la derecha una imagen del año 2017.

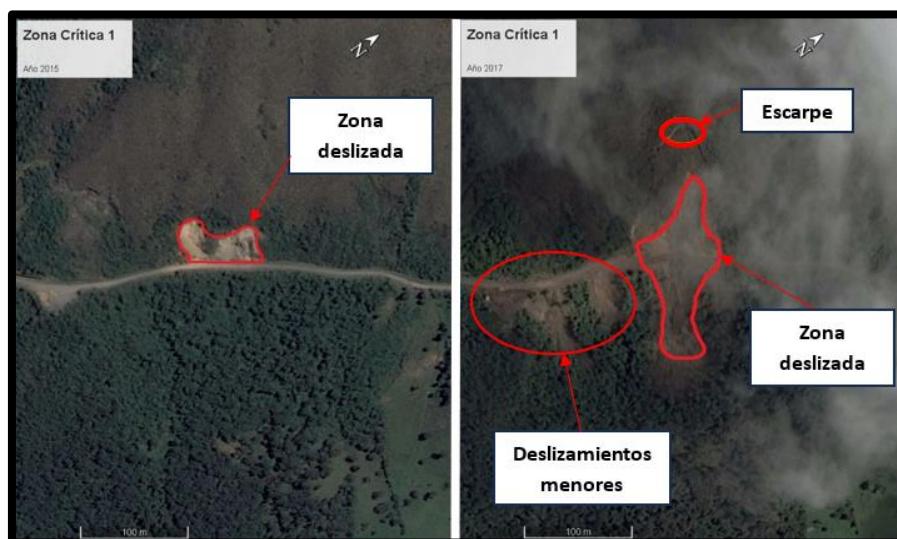


Figura 20. Imágenes satelitales de la zona crítica 1 en los años 2015 y 2017

Fuente: Elaboración propia

En 2015, el deslizamiento estaba en sus etapas iniciales, abarcando aproximadamente 1497 m². Para 2017, el área del deslizamiento aumentó en un 68%, afectando la zona debajo de la vía y reduciendo la cobertura vegetal. Además, se formó un escarpe en la parte superior y hubo deslizamientos menores en áreas aledañas



Figura 21. Imagen satelital de la zona crítica 1 en el año 2022

Fuente: Elaboración propia

En 2022, como se observa en la figura 21, la zona deslizada aumentó significativamente a aproximadamente $11,407 \text{ m}^2$ desplazando una extensa área de vegetación debajo de la vía, mientras que los deslizamientos menores se cubrieron de vegetación nuevamente. También se iniciaron trabajos de estabilización, como la construcción de un sistema bermas y una cuneta de coronación.

En la actualidad, el talud ha sido estabilizado de manera satisfactoria con la construcción de bermas y muros de contención en su base, además de una cuneta de coronación en la parte superior. Además, es posible notar que la vegetación empieza a crecer nuevamente en la zona y la exposición de material suelto es mucho menor que en años anteriores. En la figura 22 se observan fotografías del lugar, y en la tabla 24 se presenta la ficha de deslizamiento elaborada en campo.

Tabla 24. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 1

INVENTARIO DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA								
Código:	MT1	Fecha:	21 de junio de 2024					
Lugar:	Vía Chanlud - Tuñi	Proyección:	UTM WGS84 - Zona 17					
Abscisa de la vía:	8+850	Coordenadas:		x	y			
Altitud:	3425 msnm			720483	9696582			
TIPO DE MOVIMIENTO	MATERIAL							
	Observación en campo		Resultados Muestra					
Caída	X	Roca Suelo Detrito	%		%			
Deslizamiento			85%	Grava	-			
Reptación			5%	Arena	-			
Flujos			10%	Limo	-			
Volcamiento			Plasticidad		-			
Propagación Lateral			Clasificación SUCS:		-			
Complejo								
GEOLOGIA								
El talud muestra un afloramiento de una matriz de roca de color gris, posiblemente una andesita.								
GENERAL								
Altura de deslizamiento:	100m	Ancho del deslizamiento:	80m					
Pendiente del deslizamiento:	30°	Superficie de deslizamiento:	11407m ²					
EVIDENCIAS DE ACCION HUMANA								
La zona ha sido intervenida y se han construido bermas para estabilizar el talud. Además, se observa la presencia de rocas a pie del talud como protección para los materiales que se desprenden desde arriba.								
OTRAS OBSERVACIONES								
Hay una ligera cobertura vegetal de color blanquecino en ciertas partes del talud, posiblemente líquenes o musgos, pero en general predomina la ausencia de una capa vegetal.								

Fuente: Elaboración propia

**Figura 22.** Fotografías de la zona crítica 1

4.5.1.1 Zona crítica 3 (Abscisa vía 7+550)

Clasificación de suelos

En esta zona crítica se tomaron dos muestras en dos abscisas, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 3

Muestra	Abscisa	SUCS	Contenido			Límites de Atterberg		
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M5	7+550	SM	52.0	26.3	21.7	37.6	24.8	12.7
M6	7+540	SP	10.2	88.3	1.6	NP	NP	NP

Fuente: Elaboración propia

Debido a la alta cantidad de suelo grueso no se pudo determinar los límites de Atterberg para la muestra M6, ya que se trataba de un suelo no plástico. Los resultados indican la presencia de suelos friccionantes con buenas propiedades de drenaje, pero que también pueden ser susceptibles a la erosión y pérdida de resistencia en condiciones de alta humedad. La arena limosa encontrada sugiere que este suelo puede deformarse lentamente y mantener cierto grado de cohesión, favoreciendo la reptación en el sitio.

Análisis



Figura 23. Imágenes satelitales de la zona crítica 3 en los años 2021 y 2023

Fuente: Elaboración propia

La figura 23 muestra dos imágenes satelitales de la zona del deslizamiento, a la izquierda una imagen del año 2021 no muestra signos de deslizamientos en el terreno. Por otro lado, en el 2023, se puede notar que la zona muestra claros signos de alteración. Tanto en la parte superior de la vía como en la parte inferior de esta, se puede observar un corrugamiento de la superficie del terreno. Se deduce que este deslizamiento puede tratarse de una reptación ocasionada por la presencia de numerosas vertientes en esta zona, lo cual hizo que este suelo se sature, pierda resistencia y se deslice lentamente.

En este año, como una medida de prevención, se realizó una zanja en la parcela de la parte inferior de la vía, posiblemente para drenar el exceso de agua en la zona. La cobertura vegetal, principalmente pasto natural, no ha cambiado con el tiempo.

Actualmente, se están realizando trabajos de mantenimiento en el canal de conducción y, como se puede observar en la figura 24, se ha construido una cuneta que desemboca en un pozo de hormigón para controlar la infiltración de agua. Aunque estos esfuerzos son positivos, se necesitan medidas adicionales, como la instalación de subdrenes, para mejorar el control del agua en la zona.



Figura 24. Fotografías del pozo de hormigón en la zona crítica 3

En la tabla 26 se muestra la ficha de la zona crítica 3, y en la figura 25 una fotografía del sitio.

Tabla 26. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 3

INVENTARIO DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA					
Código:	MT3	Fecha:	21 de junio de 2024		
Lugar:	Vía Chanlud - Tuñi	Proyección:	UTM WGS84 - Zona 17		
Abscisa de la vía:	7+550	Coordenadas:		x	y
Altitud:	3410msnm			720649	9697379
TIPO DE MOVIMIENTO	MATERIAL				
	Observación en campo		Resultados Muestra		
Caída		%		%	
Deslizamiento	X	Roca	0%	Grava	31.1
Reptación	X	Suelo	90%	Arena	57.3
Flujos		Detritos	10%	Limo	11.6
Volcamiento				Plasticidad	12.7 %
Propagación Lateral				Clasificación SUCS:	SM, SP
Complejo					
GEOLOGIA					
Se pueden observar la presencia de pequeñas rocas fragmentadas (detritos). En los alrededores se puede observar afloramientos de una roca de color gris oscuro, probablemente andesita.					
GENERAL					
Altura de deslizamiento:	50m	Ancho del deslizamiento:		40m	
Pendiente del deslizamiento:	24°	Superficie de deslizamiento:			617m ²
EVIDENCIAS DE ACCION HUMANA					
En la zona se han realizado trabajos de mantenimiento y reparación del canal.					
OTRAS OBSERVACIONES					
Por la forma del deslizamiento se puede deducir que se trata de una reptación. Al parecer este movimiento llegó a afectar al canal por ello se realizaron las distintas intervenciones. Se puede observar que en la zanja realizada en el margen derecho del deslizamiento corre gran cantidad de agua.					

Fuente: Elaboración propia



Figura 25. Fotografía de la zona crítica 3 en la actualidad

4.5.1.1 Zona crítica 4 (Abscisa vía 7+320)

En esta zona crítica se tomaron 2 muestras de suelo en los taludes de la parte superior de la vía. Los resultados de los ensayos se muestran en la tabla 27:

Tabla 27. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 3.

Muestra	Abscisa	SUCS	Contenido			Límites de Atterberg		
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M7	7+320	GM	40.7	37.0	22.4	NP	NP	NP
M8	7+330	SC	38.8	42.2	19.1	38.2	10.5	27.7

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos de laboratorio revelan la presencia de suelos en los cuales predominan las partículas gruesas (grava y arena), esta característica confiere cierta estabilidad a los suelos en condiciones secas. Sin embargo, la presencia de un porcentaje significativo de finos puede reducir la permeabilidad del suelo y aumentar su susceptibilidad a la saturación, haciendo que pierdan resistencia y aumentando las probabilidades de que ocurran deslizamientos.

Análisis



Figura 26. Imágenes satelitales de la zona crítica 4 en los años 2017 y 2021

Fuente: Elaboración propia

La figura 26 muestra que en el año 2017 no se observan signos de problemas en la zona. Sin embargo, en el 2021 se puede notar un deslizamiento pequeño en la parte superior de la vía, el cual tiene una extensión de aproximadamente 219 m².



Figura 27. Imagen satelital de la zona crítica 4 en el año 2023

Fuente: Elaboración propia

En el año 2023, como se puede ver en la figura 27, se pueden notar varias zonas con signos de alteración y el problema abarca una longitud de aproximadamente 70 metros a lo largo de la vía y un área de 705 m². De acuerdo con información proporcionada por ELECAUSTRO se trata de un deslizamiento con desprendimiento de material y caída de bloques, provocado por la abundante presencia agua y pendiente muy pronunciadas.

En la actualidad, se puede observar en la figura 28 que se han realizado trabajos para estabilizar esta zona. Básicamente se ha realizado una limpieza del talud y se ha tratado de disminuir la pendiente de este. Estos trabajos sugieren que se están implementando medidas para mitigar el deslizamiento, aunque el éxito de estas medidas aún está por determinarse.

La tabla 28 muestra la ficha del deslizamiento presente en la zona crítica 4

Tabla 28. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 4.

INVENTARIO DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA								
Código:	MT4	Fecha:	21 de junio de 2024					
Lugar:	Vía Chanlud - Tuñi	Proyección:	UTM WGS84 - Zona 17					
Abscisa de la vía:	7+320	Coordenadas:	x y					
Altitud:	3400msnm		720602		9697631			
TIPO DE MOVIMIENTO		MATERIAL						
		Observación en campo		Resultados Muestra				
Caída	X	%		%				
Deslizamiento	X	Roca	0	Grava	39.8			
Reptación		Suelo	90	Arena	39.6			
Flujos		Detritos	10	Limo	20.8			
Volcamiento				Plasticidad	27.7 %			
Propagación Lateral				Clasificación SUCS:	GM, SC			
Complejo								
GEOLOGIA								
La superficie del talud muestra signos de erosión y desprendimiento de materiales que han sido arrastrados.								
La heterogeneidad de los materiales encontrados indica la presencia de un depósito coluvial.								
GENERAL								
Altura de deslizamiento:	70m	Ancho del deslizamiento:	25m					
Pendiente del deslizamiento:	40°	Superficie de deslizamiento:	705 m ²					
EVIDENCIAS DE ACCION HUMANA								
Se observa que se han realizado obras de mantenimiento de la tubería de conducción en la zona, además, se ha reducido la pendiente del talud.								
OTRAS OBSERVACIONES								
En la corona se puede observar vegetación herbácea no tan densa.								

Fuente: Elaboración propia



Figura 28. Fotografía de la zona crítica 4

4.5.1.2 Zona crítica 5 (Abscisa vía 7+140)

Caracterización de suelos

En esta zona se extrajeron 2 muestras de suelo, una en el cuerpo del deslizamiento (M10) y otra en el escarpe (M9). Los resultados de los ensayos muestran en la tabla 29.

Tabla 29. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 5.

Muestra	Abscisa	SUCS	Contenido			Límites de Atterberg		
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M9	7+100	SM	6.7	44.1	49.2	40.0	29.9	10.1
M10	7+100	SM	19.4	47.1	33.5	36.9	27.7	9.2

Fuente: Elaboración propia

En este caso ambas muestras se clasifican como arenas limosas. La presencia de este tipo de suelos indica que este terreno puede ser propenso a la infiltración y movimiento de agua mediante flujos subterráneos. Además, el alto porcentaje de finos implica que el suelo puede ser susceptible a la saturación y a la pérdida de estabilidad bajo condiciones de alta humedad.

Análisis



Figura 29. Imágenes satelitales de la zona crítica 5 en los años 2015 y 2021

Fuente: Elaboración propia

La figura 29 muestra el contraste de la zona afectada en un lapso de 6 años. En 2015, no se observan signos de deslizamiento ni perturbaciones en el terreno. Para 2021, el deslizamiento abarca aproximadamente 1750 m², con la capa vegetal casi totalmente removida y material desplazado acumulado en la vía, además de una fractura en la parte superior.

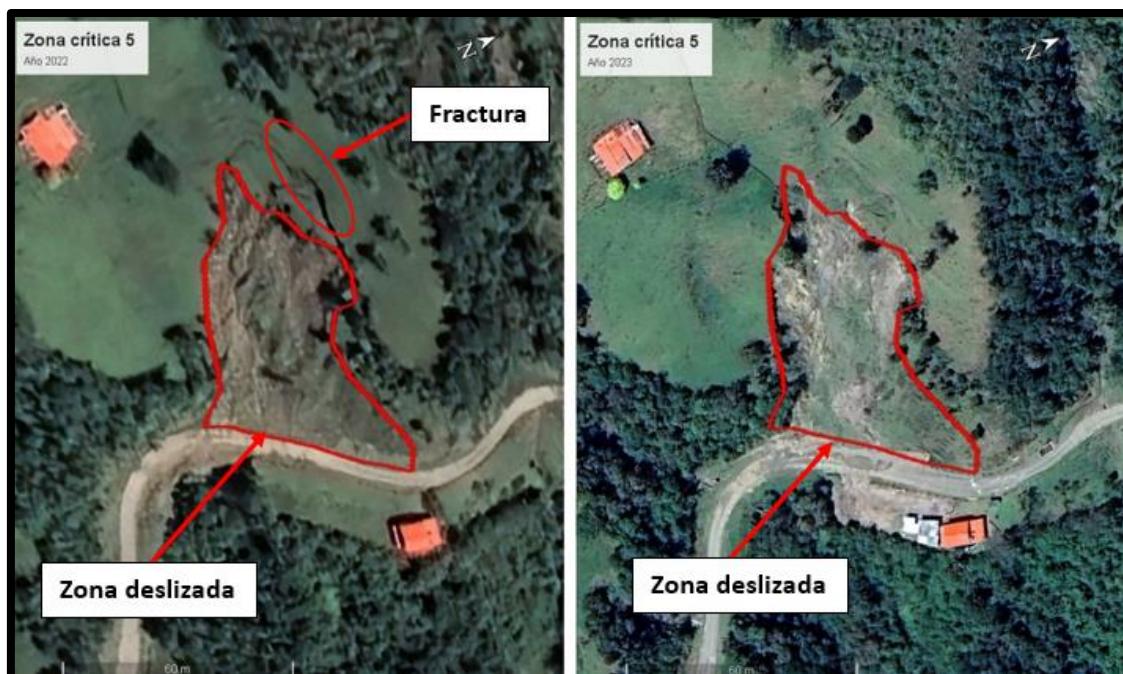


Figura 30. Imágenes satelitales de la zona crítica 5 en los años 2015 y 2022

Fuente: Elaboración propia

En la figura 30 se puede observar a la derecha una imagen satelital del año 2022. En este año el área deslizada ha aumentado un 28%, aunque la fractura en la parte superior del deslizamiento no se ha desplazado. Además, la zona del deslizamiento continúa sin tener cobertura vegetal. A la izquierda se observa una imagen del año 2023. En este año el deslizamiento mantiene la misma proporción que en 2022, indicando cierto grado de estabilización. Se puede observar vegetación creciendo en el área deslizada y la desaparición de la fractura observada en años anteriores.

Actualmente se han realizado trabajos de estabilización como terrazas, colocación de subdrenes y, además, según información de ELECAUSTRO, inyecciones de lechada de cemento para mejorar las propiedades geomecánicas del suelo en esta zona. En las visitas de campo se pudo ver que, a pesar de estos esfuerzos, persiste la presencia de agua en la zona como se muestra en la figura 31.

En la tabla 30 se presenta la ficha del deslizamiento de la zona crítica 5.

Tabla 30. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 5

INVENTARIO DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA					
Código:	MT5	Fecha:	21 de junio de 2024		
Lugar:	Vía Chanlud - Tuñi	Proyección:	UTM WGS84 - Zona 17		
Abscisa de la vía:	7+140	Coordenadas:	x	y	
Altitud:	3420msnm		720540	9697714	
TIPO DE MOVIMIENTO	MATERIAL				
	Observación en campo		Resultados Muestra		
Caída		%			%
Deslizamiento	X	Roca	0	Grava	13.1
Reptación		Suelo	90	Arena	45.6
Flujos		Detritos	10	Limo	41.4
Volcamiento				Plasticidad	9.7 %
Propagación Lateral				Clasificación SUCS:	SM
Complejo					
GEOLOGIA					
Se observa un deslizamiento de gran extensión, el material presente es un material fino con fragmentos pequeños de roca. El material no está consolidado, por lo que se deduce que se trata de un coluvial.					
GENERAL					
Altura de deslizamiento:	75m	Ancho del deslizamiento:	30m		
Pendiente del deslizamiento:	25°	Superficie de deslizamiento:	2464m ²		
EVIDENCIAS DE ACCION HUMANA					
En la zona deslizada se ha realizado un terraceo y, además, se han colocado drenes por toda el área.					
OTRAS OBSERVACIONES					
Se observa afloramientos de agua en todo el deslizamiento.					

Fuente: Elaboración propia

**Figura 31.** Fotografía de la zona crítica 6

4.5.2 Zonas críticas no intervenidas

En esta sección se presentan los deslizamientos observados en los que no se ha registrado ningún trabajo para la estabilización de los taludes.

4.5.2.1 Zona crítica 2 (Abscisa vía 8+110)

Caracterización de suelos

En esta zona se extrajeron 4 muestras de suelo, una de ellas en el área del deslizamiento y las demás en sitios adyacentes al deslizamiento, los resultados obtenidos de cada muestra se muestran en la tabla 31.

Tabla 31. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 2

Muestra	Abscisa	SUS	Contenido			Límites de Atterberg		
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M1	8+200	SC	27.2	33.4	39.43	40.8	21.7	19.1
M2	8+150	GM	60.6	25.1	14.3	37.5	28.2	9.3
M3	8+150	SC	24.7	36.8	38.6	33.4	11.9	21.4
M4	8+130	SM	30.7	47.7	21.6	39.6	NP	NP

Fuente: Elaboración propia

La zona crítica presenta suelos con variada capacidad de retención y drenaje de agua. La presencia de arcilla en ciertas muestras hace que este suelo sea propenso a retener agua y, por lo tanto, a expandirse y contraerse en condiciones de humedad. Por otro lado, los suelos limosos, a pesar de tener un drenaje bueno, pueden tender a perder resistencia cuando se saturan y, por ende, contribuir a la inestabilidad de la zona.

Análisis

La figura 32 presenta dos imágenes satelitales de la zona del deslizamiento, a la izquierda una del año 2015 y a la derecha una imagen del año 2022.



Figura 32. Imágenes satelitales de la zona crítica 2 en los años 2015 y 2022

Fuente: Elaboración propia

En 2015, el deslizamiento abarcaba aproximadamente 537 m² y no mostró variaciones significativas en los años posteriores. En ambas imágenes se observa un escarpe notable y material expuesto, sin vegetación ni intervención para estabilización.

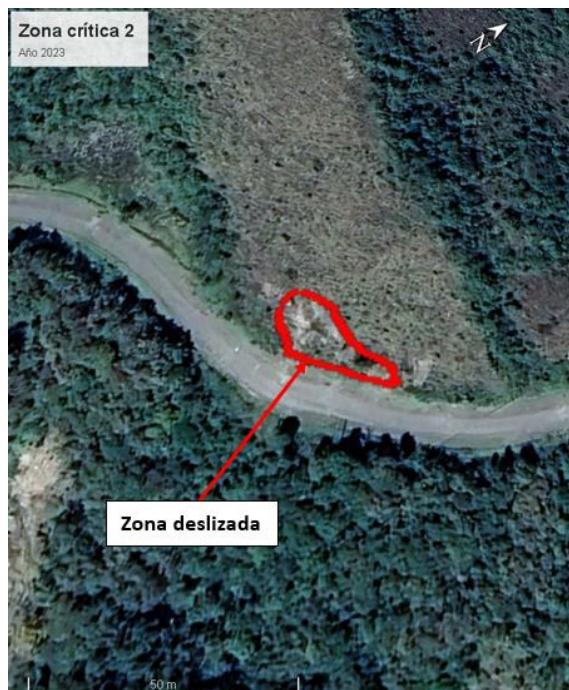


Figura 33. Imagen satelital de la zona crítica 2 en el año 2023

Fuente: Elaboración propia

En 2023, como se observa en la figura 33, el área afectada disminuyó a 225 m², con escarpes menos pronunciados y vegetación dispersa.

Actualmente, la parte superior del talud muestra material suelto, raíces expuestas y un escarpe de aproximadamente 2 m de altura. La vegetación sigue siendo dispersa y la base del talud muestra signos de erosión activa con material acumulado. Se han observado trabajos de mantenimiento en el canal, pero no se ha realizado ninguna estabilización en la zona deslizada. La tabla 32 presenta la ficha de deslizamiento que fue llenada en campo.

Tabla 32. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 2

INVENTARIO DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA					
Código:	MT2	Fecha:	21 de junio de 2024		
Lugar:	Vía Chanlud - Tuñí	Proyección:	UTM WGS84 - Zona 17		
Abscisa de la vía:	8+110	Coordenadas:	x	y	
Altitud:	3396msnm		720719		9696849
TIPO DE MOVIMIENTO	MATERIAL				
	Observación en campo		Resultados Muestra		
Caída		%			%
Deslizamiento	X	Roca	0	Grava	27.2
Reptación		Suelo	80	Arena	33.4
Flujos		Detritos	20	Limo	39.4
Volcamiento					
Propagación Lateral			Plasticidad		19.1%
Complejo			Clasificación SUCS:		SC
GEOLOGIA					
Se observa un material suelto con presencia de pequeñas rocas fragmentadas y una capa inferior de material menos consolidado.					
GENERAL					
Altura de deslizamiento:	30m	Ancho del deslizamiento:	40m		
Pendiente del deslizamiento:	22°	Superficie de deslizamiento:	1277m ²		
EVIDENCIAS DE ACCION HUMANA					
No se observa ninguna acción humana en la estabilización del talud. Si se observa trabajos en el canal.					
OTRAS OBSERVACIONES					
Se observan raíces expuestas y áreas donde el suelo ha sido socavado. En la parte de la corona hay una capa de cobertura vegetal bastante marcada, lo que sugiere reptación en la parte de arriba. En el cuerpo principal del deslizamiento también se observa presencia de una capa vegetal. El tipo de deslizamiento se asemeja a un deslizamiento translacional según lo observado.					

Fuente: Elaboración propia

La figura 34 muestra una fotografía del deslizamiento ocurrido en la zona crítica 2.



Figura 34. Fotografía de la zona crítica 2

4.5.2.1 Zona crítica 6 (Abscisa vía 6+470)

Caracterización de suelos

En esta zona se extrajo únicamente una muestra de suelo y los resultados de los ensayos de laboratorio se muestran en la tabla 33.

Tabla 33. Clasificación de las muestras de suelo de la zona crítica 2

Muestra	Abscisa	SUCS	Contenido			Límites de Atterberg		
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M11	6+540	SM	25.9	61.2	12.94	NP	NP	NP

Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que en la zona existe un tipo de suelo friccionante, con moderada capacidad de drenaje. La nula plasticidad de la muestra sugiere que este tipo de suelo no se deforma antes de fracturarse y en condiciones de saturación podría ser propenso a producir deslizamientos.

Análisis

La figura 35 muestra dos imágenes satelitales de la zona del deslizamiento: la de la izquierda del año 2015 y la de la derecha del año 2021.



Figura 35. Imágenes satelitales de la zona crítica 6 en los años 2015 y 2021

Fuente: Elaboración propia

En 2015, el deslizamiento abarcaba 4030 m² y prácticamente no se observa vegetación en la zona afectada. Para 2021, el deslizamiento ha aumentado en un 25%, se puede ver una topografía notablemente más irregular y abrupta, especialmente en la parte superior de la corona. Sin embargo, se observa también vegetación dispersa en el pie del talud.



Figura 36. Imagen satelital de la zona crítica 6 en el año 2023

Fuente: Elaboración propia

En 2023, como se observa en la figura 36, la morfología del deslizamiento no ha cambiado significativamente respecto a 2021, y aunque la mayor parte del terreno sigue expuesto y erosionado, pequeñas áreas han comenzado a mostrar recuperación de vegetación. En este año, se observa también la construcción de una cuneta de coronación en la parte alta como medida de estabilización.

La tabla 34 muestra la ficha del deslizamiento registrado en la zona crítica 6.

Tabla 34. Ficha de deslizamiento de la zona crítica 6

Código:	MT2	Fecha:	21 de junio de 2024
Lugar:	Vía Chanlud - Tuñi	Proyección:	UTM WGS84 - Zona 17
Abscisa de la vía:	6+470	Coordenadas:	x y
Altitud:	3420msnm		720855 9698256
TIPO DE MOVIMIENTO		MATERIAL	
		Observación en campo	Resultados Muestra
Caída		%	%
Deslizamiento	X	Roca 50	Grava 25.9
Reptación		Suelo 10	Arena 61.2
Flujos		Detritos 40	Limo 12.9
Volcamiento			
Propagación Lateral		Humedad -	Plasticidad NP
Complejo			Clasificación SUCS: SM
GEOLOGIA			
Se observó gran cantidad de material grueso, en el escarpe del deslizamiento se observó afloramientos de roca, probablemente andesita.			
GENERAL			
Altura de deslizamiento:	100m	Ancho del deslizamiento:	50m
Pendiente del deslizamiento:	70°	Superficie de deslizamiento:	5398m ²
EVIDENCIAS DE ACCION HUMANA			
En la parte superior del deslizamiento se ha realizado una cuneta de coronación. Al pie del talud se ha realizado una zanja.			
OTRAS OBSERVACIONES			
Se observa afloramientos de agua en todo el deslizamiento. Existe presencia de vegetación, aunque en algunos lugares existen zonas sin cobertura vegetal.			

Fuente: Elaboración propia

Actualmente, el deslizamiento no ha cambiado significativamente en comparación con 2023, la vegetación se ha vuelto más densa y no hay signos de movimientos recientes, a pesar de la presencia de agua, que puede ser observado en la figura 37. No se han observado más trabajos de estabilización además de la cuneta de coronación.



Figura 37. Fotografía de la zona crítica 6

4.6 Correlación entre el mapa de susceptibilidad y el inventario de deslizamientos

Para validar los resultados, se creó un mapa con la ubicación y extensión aproximada de los deslizamientos registrados en el inventario. Este mapa se superpuso al mapa de susceptibilidad presentado anteriormente para identificar semejanzas, como se muestra en la figura 38. Se observa que los deslizamientos se encuentran en las zonas rojas, clasificadas como de alta y muy alta susceptibilidad.

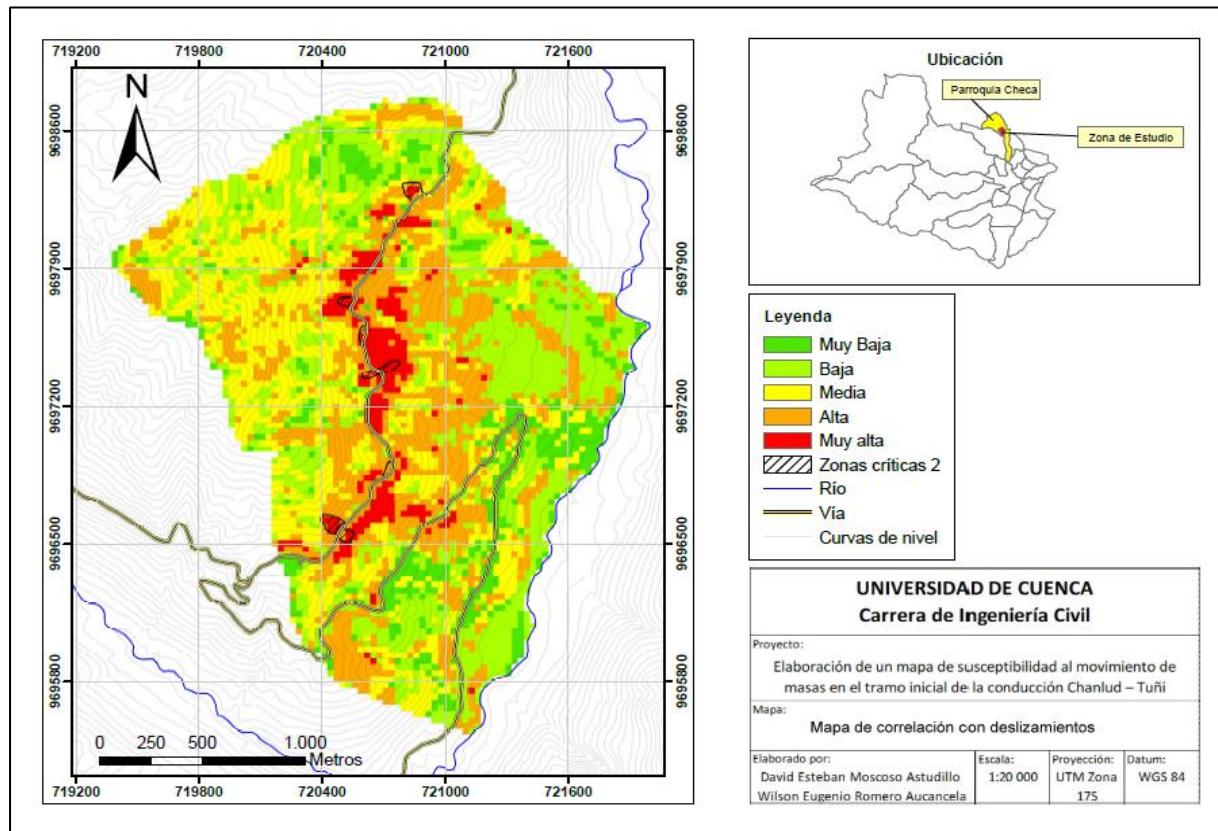


Figura 38. Mapa de correlación entre los deslizamientos y la susceptibilidad determinada

Fuente: Elaboración Propia.

5. CONCLUSIONES

A partir de la información recolectada digitalmente y en campo, se elaboraron mapas de índice de susceptibilidad para litología, pendientes, cobertura vegetal y precipitaciones. El mapa litológico resalta zonas con materiales menos estables, como depósitos coluviales, que son más susceptibles por su menor resistencia y estabilidad. Estos materiales, analizados posteriormente en laboratorio, mostraron una composición significativa de arena y finos, con menos gravas y niveles moderados a altos de plasticidad. Esto confirmó que los suelos en las zonas de alta susceptibilidad tienen capacidad limitada de drenaje, incrementando la probabilidad de saturación y, por tanto, de inestabilidad del talud.

El mapa de pendientes muestra que las áreas con inclinaciones mayores se encuentran en las zonas aledañas a la vía y alcanzan pendientes de hasta 55 grados, lo que afecta significativamente la estabilidad del terreno. Por otro lado, el mapa de precipitaciones permitió identificar que las zonas ubicadas en la parte bajan de la montaña poseen menores intensidades de lluvia, lo que se refleja en una menor susceptibilidad a deslizamientos. A medida que se asciende hacia las partes altas, las intensidades de precipitación aumentan, incrementando también el grado de susceptibilidad de estas zonas.

La cobertura vegetal, aunque inicialmente podría parecer un factor de menor relevancia comparado con la pendiente, la litología o la humedad, ha mostrado tener un impacto significativo en la estabilidad del terreno. Áreas con vegetación densa presentaron una menor susceptibilidad a deslizamientos, evidenciando la capacidad de la vegetación para reducir la erosión y mejorar la cohesión del suelo. Sin embargo, en zonas donde la cobertura vegetal es escasa o inexistente, la susceptibilidad a deslizamientos aumenta. Por otro lado, cabe destacar que los mapas de sismicidad y de humedad asignan un solo valor, lo que limita su capacidad para representar variaciones locales en estos factores críticos.

El mapa final de susceptibilidad, elaborado mediante la integración de los factores condicionantes y desencadenantes, indica que las zonas con alta y muy alta susceptibilidad ocupan un 32.50% del área total y se caracterizan principalmente por la presencia de pendientes pronunciadas y materiales coluviales. Sin embargo, un aspecto crítico que no se pudo representar adecuadamente es la variabilidad de la humedad del suelo. Aunque el factor de humedad se asignó utilizando datos críticos de una estación representativa, las observaciones de campo indican que la humedad varía en distintos puntos. Para abordar esta limitación, se intentó representar parcialmente mediante la litología, asignando un factor menor a los lugares con más presencia de roca, ya que estas áreas absorben menos agua en comparación con los depósitos coluviales.

El mapa de correlación entre el mapa de susceptibilidad final y el inventario de deslizamientos muestra que la metodología empleada fue efectiva para identificar las áreas con mayor riesgo. Los resultados muestran que las zonas de muy alta susceptibilidad coinciden con las áreas donde se han registrado deslizamientos históricamente. El inventario ha permitido rastrear cómo se han desarrollado y expandido los deslizamientos a lo largo del tiempo. Esto ha permitido determinar que la rapidez de avance de los deslizamientos analizados está entre 3 y 8 metros por año aproximadamente. Además, se ha notado que en los años 2017 y 2021 se han tenido mayores problemas en cuanto a estabilidad de estas zonas.

Se observó que el deslizamiento presente en la zona crítica 1 es el de mayor extensión, llegando a abarcar en la actualidad un área de 1.14 ha aproximadamente, afectando incluso a zonas que se encuentran en la parte inferior de la vía. Sin embargo, las medidas de estabilización realizadas en la zona han demostrado tener un impacto positivo ya que en la actualidad no se observan más índices de deslizamientos. Lo mismo se puede decir de la zona crítica 5, donde algunos de los trabajos de estabilización realizados han sido efectivos y han logrado estabilizar la zona, aunque, al igual que en todas las zonas críticas las afloraciones de agua aún siguen siendo un problema latente.

Finalmente, aunque los mapas de litología, pendientes, cobertura vegetal y precipitaciones proporcionan una base sólida para identificar áreas vulnerables, la ocurrencia final de un deslizamiento depende de factores adicionales que no siempre pueden ser mapeados con precisión. Entre estos factores se encuentran eventos desencadenantes como lluvias intensas y repentinas, sismos, y cambios en el uso del suelo que alteren las condiciones iniciales del terreno. Estos factores, que pueden no ser capturados en los mapas de susceptibilidad, juegan un papel crucial en la generación de deslizamientos, subrayando la importancia de una vigilancia continua y la actualización periódica de los datos para una evaluación más precisa y oportuna de los riesgos.

6. RECOMENDACIONES

La principal recomendación de este estudio es mejorar el mecanismo para capturar información relacionada con la humedad del suelo y las precipitaciones. Se sugiere instalar estaciones de monitoreo adicionales y sensores de humedad en distintos puntos del área de estudio para obtener datos más detallados y específicos. Estos datos permitirán una representación más precisa de la variabilidad de la humedad en el mapa de susceptibilidad, mejorando así la precisión del modelo y la identificación de zonas críticas.

Además, se recomienda realizar un análisis más a profundidad del efecto de los sismos en los deslizamientos, especialmente en materiales rocosos con discontinuidades y en taludes. Es crucial entender cómo los eventos sísmicos influyen en la estabilidad de los taludes y en la propagación de deslizamientos. Para ello, se podría seleccionar un talud representativo con susceptibilidad muy alta e incorporar simulaciones de sismos utilizando software especializado. Este análisis ayudará a prever los efectos de los sismos y a diseñar estrategias de mitigación más efectivas.

Basado en los datos obtenidos y el análisis de susceptibilidad, se recomienda desarrollar e implementar medidas de mitigación adecuadas en las zonas de alto riesgo. Estas medidas pueden incluir la estabilización de taludes, la mejora de la infraestructura de drenaje y la reforestación de áreas vulnerables. Finalmente, es fundamental la implementación de un programa de monitoreo continuo del área de estudio. La recopilación constante de datos geotécnicos, hidrológicos y climáticos permitirá la actualización regular del mapa de susceptibilidad y la identificación temprana de cambios en las condiciones del terreno.

7. Referencias

Ayala Caicedo, & Corominas. (2002). Mapas de suceptibilidad a los movimientos de ladera con tecnicas SIG. *Mapas de suceptibilidad a los movimientos de ladera con tecnicas SIG*. Madrid, España: Instituto Geologico y Minero de España.

Bajjali, W. (2023). *Watershed Delineation*. In: *ArcGIS Pro and ArcGIS Online*. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-42227-0_12

Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O., & Nuñez Roman, O. (2011). EFECTIVIDAD DE LA METODO LOGÍA MORAVAHRSN MODIFICADA EN EL CASO DE LOS DESLIZAMIENTOS PROVOCADOS POR EL TERREMOTO DE CINCHONA, COSTA RICA. *Revista Geografica de America Central*, 141-162.

Bravo Lopez, E., Fernandez del Castillo, T., Sellers, C., & Delgado Garcia, J. (2022). Landslide Susceptibility Mapping of Landslides with Artificial Neural Networks: Multi-Approach Analysis of Backpropagation Algorithm Applying the Neuralnet Package in Cuenca, Ecuador. *remote sensing*.

Cabrera, E. M. (2021). SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS MEDIANTE EL USO DE SIG, A ESCALA 1: 10 000, DEL TRAMO VIAL COMPRENDIDO DESDE: EL REDONDEL DEL BARRIO EL PLATEADO HASTA EL ANTIGUO PEAJE DEL CANTÓN CATAMAYO, PROVINCIA DE LOJA. Loja: Universidad Nacional de Loja.

Carchi, E. (2015). *Elaboracion de un balance hidrico en la cuenca del rio machangara*. Cuenca: Universidad de Cuenca.

CENAPRED. (2019). Análisis de deslizamiento de laderas por sismo.

Chaverri Molina, I. F. (2016). *Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica*. Cartago, Costa Rica.

Chaverri Molina, I. F. (2016). Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Coello, C. (2020). *ESTUDIO HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO EN EL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO MACHÁNGARA*. Cuenca.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides investigation and mitigation. *Research Board Special Report 247*, 36-75.

ELECAUSTRO & UCUENCAEP. (2020). *Evaluacion y diagnostico de la conducción Chanlud - Tuñi - Informe Geologico*. Cuenca.

ELECAUSTRO. (2017). *Estudios de estabilizacion del talud, abscisas 9+140-9+240*. Cuenca.

ELECAUSTRO. (2020). *Diagnóstico de la conducción Chanlud Tuñi, Zona Crítica 7+100 – 7+540, 7+790*.

ELECAUSTRO. (2020). *ESTUDIO HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO EN EL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO MACHÁNGARA.*

ELECAUSTRO S.A. (s.f.). TopografiaChanlud.cad. 2020. Cuenca, Azuay.

GEMMA. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: una guia para la evaluacion de amenazas.* Servicio Nacional de Geologia y Mineria, Publicacion Geologica Multinacional.

GEO&GEO. (2017). *Prospeccion geofisica para la inestabilidad en la via a la presa Chanlud.* Cuenca.

Gonzalez de Vallejo, L. (2006). Deslizamientos y otros movimientos de terreno. Madrid, España: Pearson Educacion.

Guamán, G. (2012). Aplicacion de SIG para el manejo de riesgos naturales en el area urbana de la Ciudad de Loja. Quito: Universidad San Francisco.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichebanch, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology.*

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes.* Virginia: USGS.

IGEPN: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (s.f.). *Mapa de Sismicidad.* Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/ccn-mapa-de-sismicidad>

IIGE: Instituto de Investigación Geológico y Energético. (1980). *Mapas Tematicos 1: 100.000.* Cuenca: Instituto de Investigación Geológico y Energético.

INHAMI: Instituto Nacional de Meteorología a e Hidrología. (2017). *INHAMI.GOB.* Obtenido de <https://www.inamhi.gob.ec/>

INHAMI: Instituto Nacional de Meteorología a e Hidrología. (2015). *Inhami.gob.* Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inamhi.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/ESTUDIO_DE_INTENSIDADES_V_FINAL.pdf

Instituto Geografico Militar. (2013). *GeoportalIGM.* Obtenido de <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>

INSTITUTO GEOGRAFICO MILITIAR . (2013). *GeoportalIGM.* Obtenido de <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>

Lopez, R., & Gomez, F. (2019). APLICACIÓN DEL MÉTODO MORA-VAHRSON PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE MANAURE, CESAR, COLOMBIA. *REDER.*

Mora, R. (Junio de 2004). EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO DEL CANTÓN DE SAN JOSÉ, PROVINCIA DE SAN JOSÉ, COSTA RICA. Costa Rica: Fundación de la Universidad de Costa Rica para la Investigación .

Mora, S., & Vahrson, W. G. (1991). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Asociation of Engineering Geologists*, 49-58.

Mora, S., & Vahrson, W. G. (1991). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Asociation of Engineering Geologists*, 49-58.

Moral Fernandez, L. (Julio de 2014). Calculo de la suceptibilidad de deslizamiento en lorca mediante un sistema de informacion geografica. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.

Nantes, E. A. (2019). El metodo Analytic Hierarchy process para la toma de decisiones. Repaso de la metodologia y aplicaciones. . *Investigacion Operativa*, 54-73.

Osorio Marin , L. F. (2019). Zonificacion de la suceptibilidad del terreno a deslizamientos. Colombia.

Remondo, J. T. (2011). Tesis doctoral. *Elaboracion y validacion de mapas de suceptibilidad de deslizamientos mediante tecnicas de analisis espacial*. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.

Rittrer, M. E. (2024). *El Entorno Físico*. University of Wisconsin-Stevens Point.

Saaty, T. (1987). THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS-WHAT IT IS AND HOW IT IS USED. *Math Modelling*, 161-176.

Shano, Raghuvanshi, & Meten. (2020). Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review. *Geoenvironmental Disasters*.

SIGTIERRAS: Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica. (s.f.). *Geoportal Agricultura Gob.* Obtenido de <http://geoportal.agricultura.gob.ec/index.php/visor-geo>

Simon, A., & Collison, A. J. (2002). QUANTIFYING THE MECHANICAL AND HYDROLOGIC EFFECTS OF RIPARIAN VEGETATION ON STREAMBANK STABILITY. *Earth Surface Processes and Landforms*, 527–546.

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

Suarez, J. (2009). Cap. 13: Zonificacion de Suceptibilidad. En J. Suarez, *Deslizamientos: Análisis Geotecnico*.

Suarez, J. (2009). *Deslizamientos: Análisis Geotecnico. Cap. 1: Nomenclatura y clasificación*.

USGS. (2008). Landslide Types and Processes. *USGS science for a changing world*, 1-4.

USGS. (s.f.). *USGS Science for a changing world*. Obtenido de USGS : <https://www.usgs.gov/faqs/what-a-landslide-and-what-causes->

one#:~:text=Landslides%20can%20be%20initiated%20in,any%20combination%20of%20these%20factors.

Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. *in Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences*,.

Vilca Hernandez, S. P. (s.f.). UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA ESTABLECER ZONAS DE AFECTACIÓN POR AMENAZAS DE DESLIZAMIENTO EN EL CANTÓN ANTONIO ANTE. 2018. Ibarra, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Vizca Hernandez, S. P. (2018). UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA ESTABLECER ZONAS DE AFECTACIÓN POR AMENAZAS DE DESLIZAMIENTO EN EL CANTÓN ANTONIO ANTE. Ibarra: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

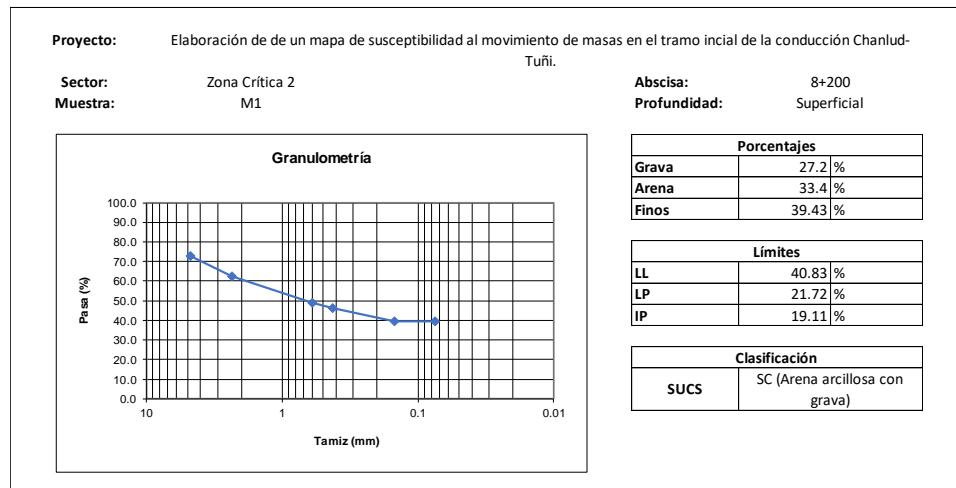
Yanza Lituma, L. D., & Verdugo González , J. S. (2023). *Uso de E-Learning para generar curvas IDF en la cuenca alta de Río Paute*. Cuenca.

Zeng & Yan. (2024). Factors Affecting the Stability of Loess Landslides: A Review. *MPDI*, 21.

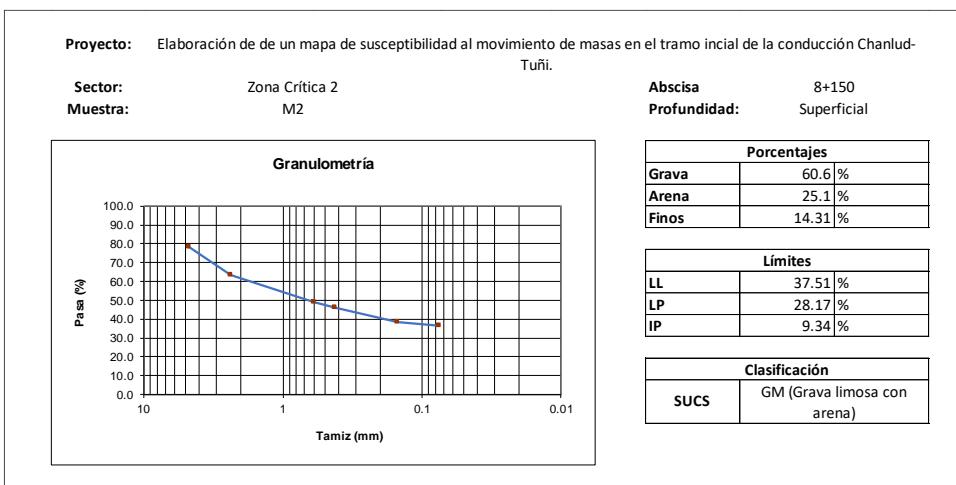
8. Anexos

Anexo A. Resumen de los resultados de la clasificación de suelos

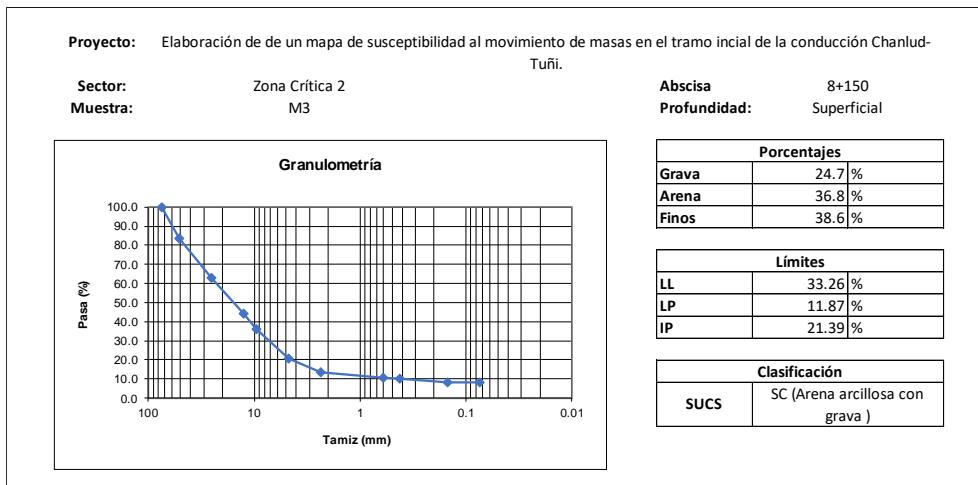
Muestra M1.



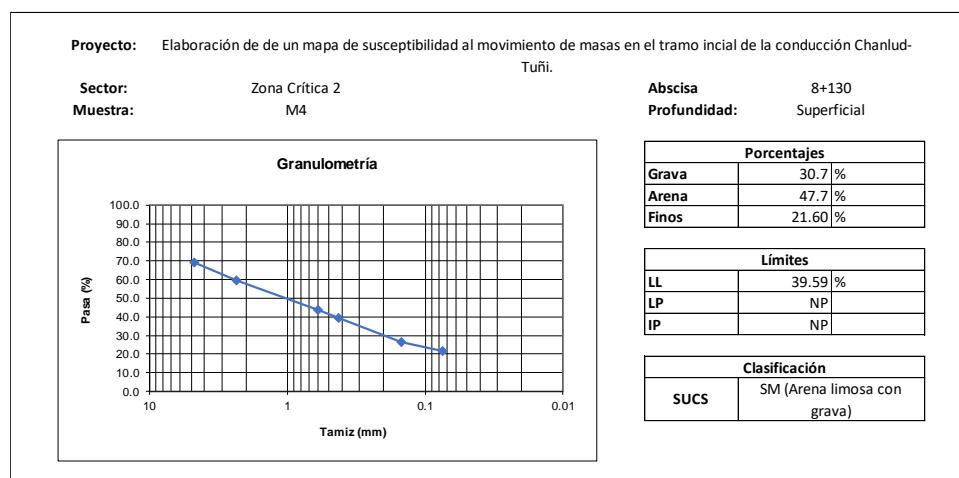
Muestra M2



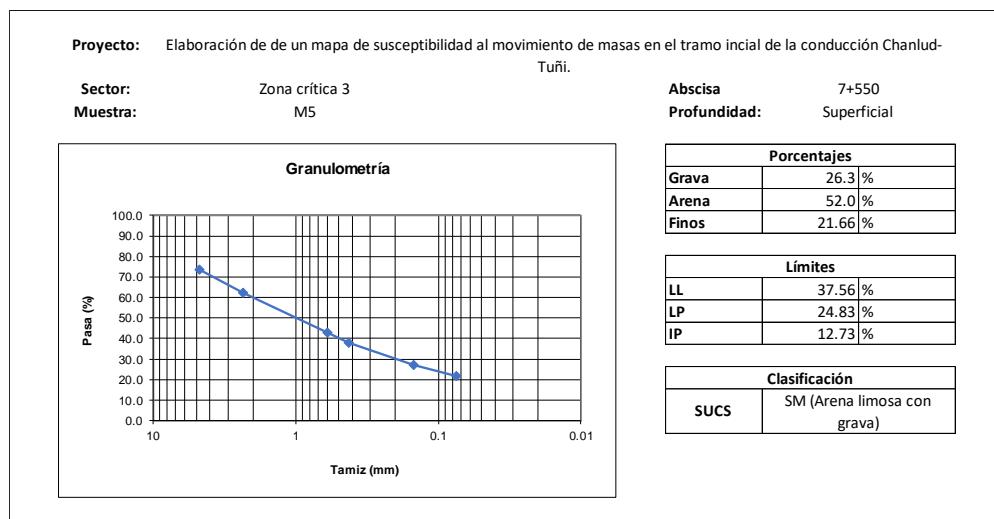
Muestra M3



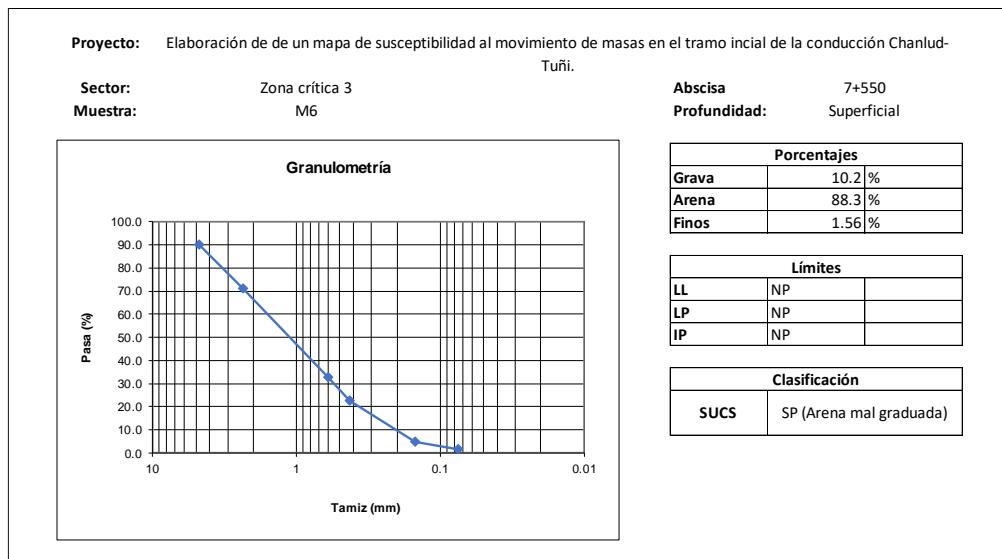
Muestra M4



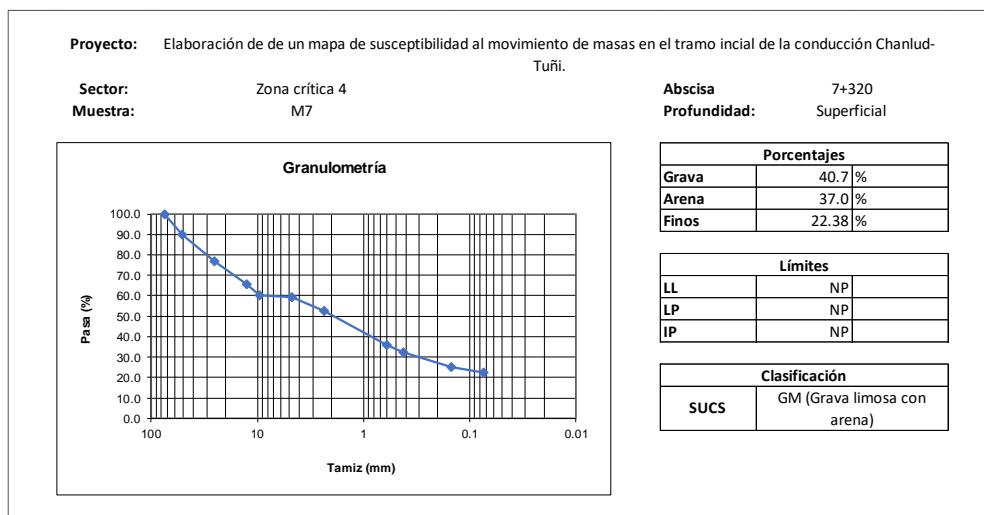
Muestra M5



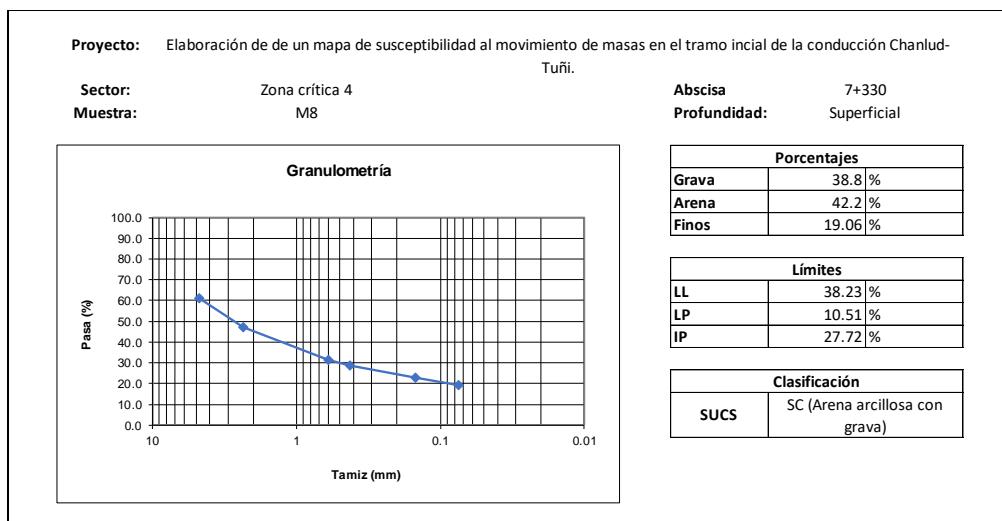
Muestra M6



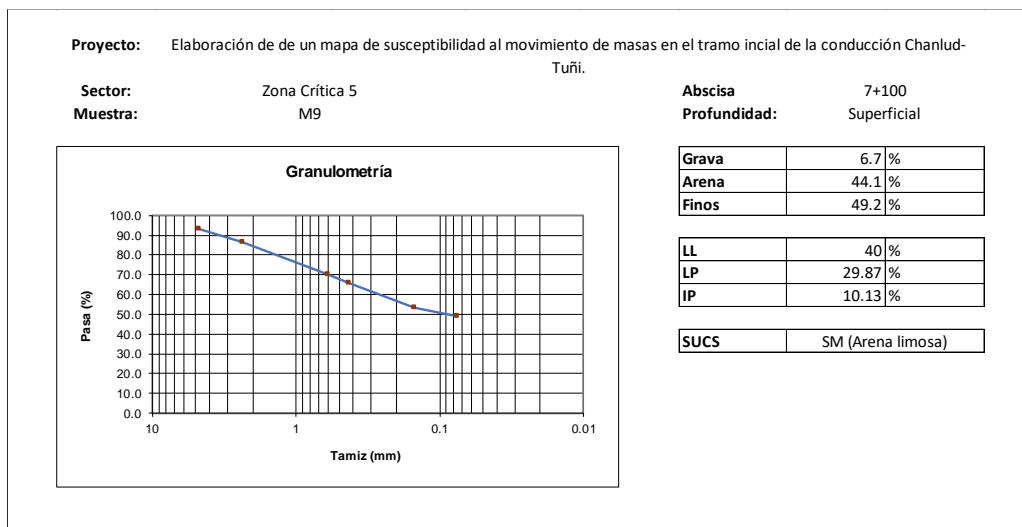
Muestra M7



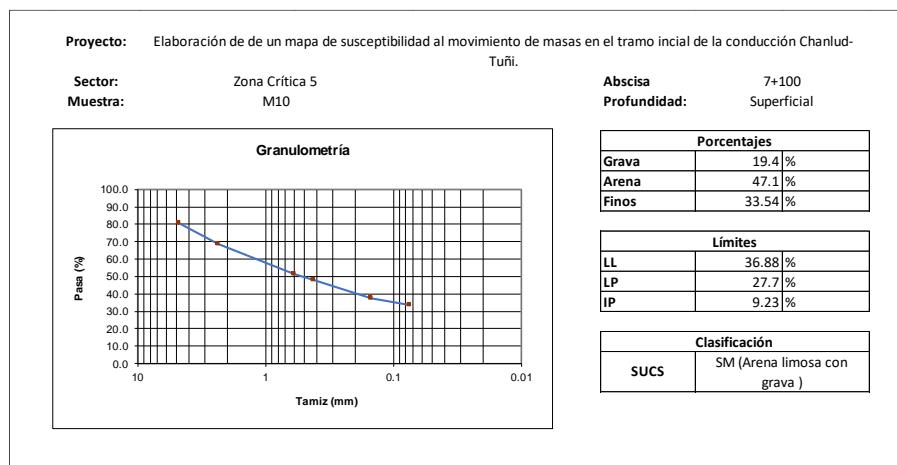
Muestra M8.



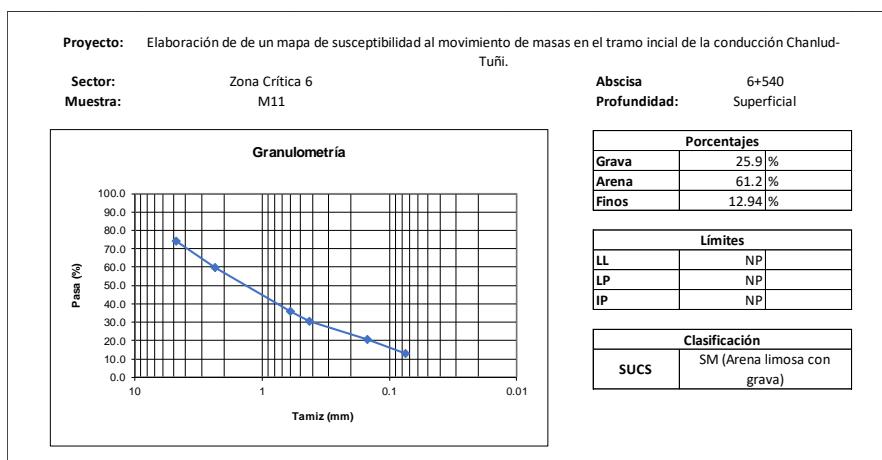
Muestra M9.



Muestra M10.



Muestra M11



Anexo B. Fotografías tomadas en la zona de extracción de la muestra M11 en la abscisa 6+540.



Anexo C. Medición de la extensión del pie del deslizamiento, en la abscisa 7+100, para estimar sus dimensiones.



Anexo D. Preparación de muestras para realización de ensayos de clasificación de suelos.

