

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

**Análisis de susceptibilidad a movimiento de tierras, tramo inicial de la
conducción Labrado-Tuñi**

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

Autores:

Joaquín Eduardo Maldonado Salcedo

Kevin Sebastián Peña Neira

Director:

Karla Johanna Santacruz Reyes

ORCID:  0009-0000-8192-7948

Codirector:

Daniel Salvador Vélez Parra

Cuenca, Ecuador

2024-09-17

Resumen

El canal Labrado-Tuñi transporta agua para la generación eléctrica en el complejo hidroeléctrico Machángara, propiedad de ELECAUSTRO. Históricamente, se han registrado episodios de inestabilidad de los taludes cercanos, los cuales han reducido el caudal transportado y disminuido la eficiencia en la producción energética. Este estudio tiene como objetivo elaborar mapas de susceptibilidad a movimientos de masa en el primer tramo de la conducción, entre las abscisas 0+000 y 3+000, aplicando la metodología Mora-Vahrson y la Jerarquización Analítica. La información, requerida por los métodos de análisis, se obtuvo de instituciones como SENAGUA y ELECAUSTRO, complementada con visitas de campo. Se realizó ensayos de caracterización de los suelos y macizos rocosos presentes. Llegando a suelos tipo SM y GM según la SUCS; para los afloramientos rocosos se determinó un RMR y un SMR clase III, es decir, roca de calidad media. Un análisis de Markland permitió identificar que no existe riesgo a falla plana ni Toppling en los mismos. Previo a la obtención de mapas, se realizó adaptaciones en la capa litológica, basadas en los resultados de los ensayos en suelos y macizos rocosos. Los mapas revelaron diferencias entre ambas metodologías, siendo la Jerarquización Analítica más precisa en la zonificación del área de estudio y en la distribución de los pesos de las variables según su relevancia. Se observó que la mayoría de la zona presenta una susceptibilidad alta y que la pendiente es el factor más influyente. Se comparó los niveles de susceptibilidad para diferentes periodos de lluvia.

Palabras clave: movimientos de masa, jerarquización analítica, Mora-Vahrson, macizos rocosos



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

The Labrado-Tuñi canal transports water for power generation at the Machángara hydroelectric complex, owned by ELECAUSTRO. Historically, there have been episodes of instability of the nearby slopes, which have reduced the flow transported and decreased the efficiency of energy production. The objective of this study is to elaborate maps of susceptibility to landslides in the first section of the canal, between abscissae 0+000 and 3+000, applying the Mora-Vahrson methodology and Analytical Hierarchy. The information required for the analysis methods was obtained from institutions such as SENAGUA and ELECAUSTRO, complemented with field visits. Characterization tests were carried out on the soils and rock massifs present. Soil types SM and GM were determined according to the SUCS; for the rocky outcrops, a RMR and a SMR class III were determined, i.e., medium quality rock. A Markland analysis identified that there is no risk of flat failure or Toppling in them. Prior to obtaining the maps, adaptations were made in the lithological layer, based on the results of the tests on soils and rock massifs. The maps revealed differences between both methodologies, being the Analytical Hierarchy more accurate in the zoning of the study area and in the distribution of the weights of the variables according to their relevance. It was observed that most of the area has high susceptibility and that slope is the most influential factor. The susceptibility levels were compared for different rainfall periods.

Keywords: landslides, analytical hierarchy, Mora-Vahrson, rock slopes



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

Capítulo I Introducción	10
1.1. Antecedentes.....	10
1.2. Planteamiento del problema	11
1.3. Justificación	11
1.4. Objetivo General.....	11
1.5. Objetivos Específicos	11
1.6. Alcance.....	12
Capítulo II Marco teórico	13
2.1. Movimientos de tierra y su clasificación	13
2.2. Caracterización geotécnica.....	17
2.2.1. Geofísica.....	17
2.2.2. Propiedades de los materiales	18
2.2.3. Clasificación de suelos.....	19
2.2.4. Macizos Rocosos	20
2.2.4.1. RQD:.....	21
2.2.4.2. RMR.....	21
2.2.4.3. SMR.....	22
2.2.4.4. Tipo de falla/Test de Markland	23
2.3. Sistemas de información geográfica	25
2.4. Metodología Mora-Vahrson	26
2.4.1. Factor litológico	27
2.4.2. Factor de relieve relativo	28
2.4.3. Factor de humedad	28
2.4.4. Factor de intensidad sísmica.....	29
2.4.5. Factor de lluvias.....	29
2.5. Estudio Hidrológico.....	30
2.5.1. Determinación de la evapotranspiración/Método de Thornthwaite	30
2.5.2. Determinación de lluvia máxima/Método de Gumbel.....	31
2.6. Jerarquización Analítica.....	32
Capítulo III Metodología	34
3.1. Recopilación de información digital.....	34
3.2. Definición del área de estudio.....	34
3.3. Trabajo en campo.....	34
3.3.1. Exploración y reconocimiento.....	34

3.3.2. Recolección de las muestras.....	35
3.3.3. Ensayo de refracción sísmica.....	35
3.3.4. Vuelos de drones	36
3.4. Levantamiento del macizo rocoso.....	36
3.4.1. Medición de la resistencia	37
3.4.2. Determinación del RQD	37
3.4.3. Análisis del RMR	38
3.4.4. Análisis de estabilidad de Markland	38
3.4.5. Cálculo del SMR	38
3.5. Ensayos de caracterización de suelos.....	38
3.5.1. Humedad natural.....	39
3.5.2. Granulometría	39
3.5.3. Límites de Atterberg	40
3.6. Elaboración de mapas base	40
3.6.1. Mapa de pendientes.....	40
3.6.2. Mapa litológico	41
3.6.3. Mapa de humedades	42
3.6.4. Mapa de cobertura vegetal.....	43
3.6.5 Mapa de intensidad sísmica.....	43
3.6.6. Intensidad de lluvia	44
3.7. Aplicación de la metodología Mora-Vahrson.....	44
3.8. Aplicación del método de Jerarquización Analítica (MJA)	44
Capítulo IV Resultados	45
4.1 Recopilación de la información	45
4.2. Definición del área de estudio.....	45
4.3. Ensayos de caracterización de suelos.....	46
4.4. Refracción sísmica	47
4.5. Levantamiento de macizo rocoso	48
4.5.1. Caracterización	48
4.5.2. Obtención del RQD	49
4.5.3. Resistencia a compresión simple	49
4.5.4. Obtención del RMR	49
4.5.5. Análisis de Markland	50
4.5.6. Cálculo del SMR	53
4.6. Vuelos de drones.....	54

4.7. Mapas base	55
4.7.1. Mapa de pendientes.....	55
4.7.2. Mapa litológico	55
4.7.3. Mapa de humedades	56
4.7.4. Mapa de cobertura vegetal.....	56
4.7.5. Factores detonantes	57
4.7.5.1 Intensidad sísmica	57
4.7.5.2. Intensidad de lluvias.....	57
4.8. Mapas por Mora-Vahrson	57
4.8.1. Mora-Vahrson original.....	57
4.8.2. Mora-Vahrson modificado, considerando cobertura vegetal.....	59
4.8.3. Comparación para periodos húmedos y secos Mora-Vahrson	60
4.9. Mapas por Jerarquización Analítica	62
4.9.1. Método de Jerarquización Analítica.....	63
4.9.2. Comparación para periodos húmedos y secos MJA.....	64
Capítulo V Conclusiones.....	67
Referencias.....	69

Índice de figuras

Figura 1. Caída de bloques (Corominas, 1997).....	14
Figura 2. Vuelcos (Corominas, 1997).....	15
Figura 3. Deslizamiento rotacional y traslacional (Corominas, 1997)	16
Figura 4. Expansiones laterales (Corominas, 1997)	16
Figura 5. Medición en el ensayo de refracción sísmica (US Army Corps of Engineers, 1995)	18
Figura 6. Carta de plasticidad (Casagrande, 1948)	20
Figura 7. Procedimiento de medición del RQD (Bieniawski, 1989).....	21
Figura 8. Falla plana, en cuña y Toppling (Duque, 2022)	24
Figura 9. Test de Markland para fallas planas (Goodman, 1989)	24
Figura 10. Test de Markland para Toppling (Goodman, 1989)	25
Figura 11. Escala propuesta por Saaty (SNGR, 2019)	32
Figura 12. Delimitación del área de estudio	34
Figura 13. Recuperación de muestras	35
Figura 14. Configuración de los geófonos en el punto realizado ilustrado en el mapa superior	36
Figura 15. Ensayo de refracción sísmica.....	36
Figura 16. Ensayo del esclerómetro	37
Figura 17. Macizo rocoso, obtención del RQD	38
Figura 18. Ensayo de humedad	39
Figura 19. Ensayos de granulometría	40
Figura 20. Límites de Atterberg	40
Figura 21. Mapa de pendientes sin clasificar, zona de estudio.....	41
Figura 22. Sitios de extracción de muestras alteradas	46
Figura 23. Resultados de la refracción sísmica	47
Figura 24. Taludes de roca levantados	48
Figura 25. Análisis de falla plana para el Talud 1	50
Figura 26. Análisis de falla plana para el Talud 2	51
Figura 27. Análisis de Toppling para el Talud 1.....	52
Figura 28. Análisis de Toppling para el Talud 2.....	52
Figura 29. Vuelos de drones	54
Figura 30. Mapa de pendientes.....	55
Figura 31. Mapa litológico	56
Figura 32. Mapa de cobertura vegetal.....	57
Figura 33. Mapa Mora-Vahrson original	58
Figura 34. Mapa de Mora-Vahrson tomando en cuenta la cobertura vegetal.....	59
Figura 35. Mapa de Mora-Vahrson para un periodo seco	60
Figura 36. Mapa de Mora-Vahrson para un periodo húmedo	61
Figura 37. Mapa de susceptibilidad MJA.....	63
Figura 38. Mapa de susceptibilidad MJA periodo seco.....	65
Figura 39. Mapa de susceptibilidad MJA periodo húmedo	66

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de deslizamientos. Versión abreviada de clasificación a deslizamientos (Varnes, 1978).	13
Tabla 2. Requerimientos granulométricos (Das, 2015).	19
Tabla 3. RMR condiciones generales (Bieniawski, 1989).	22
Tabla 4. Condiciones de discontinuidades (Bieniawski, 1989).	22
Tabla 5. Caracterización del macizo en función de SMR (Romana, 1985).	23
Tabla 6. Factor litológico (Mora & Vahrson, 1992).	27
Tabla 7. Factor de la pendiente (Zuidam, 1986).	28
Tabla 8. Categorización de promedios mensuales de lluvia (Mora & Vahrson, 1992).	28
Tabla 9. Factor de humedad (Mora & Vahrson, 1992).	29
Tabla 10. Factor de intensidad sísmica (Mora & Vahrson, 1992).	29
Tabla 11. Factor de precipitaciones (Mora & Vahrson, 1992).	30
Tabla 12. Consistencia Aleatoria (Sánchez, 2003).	33
Tabla 13. Cantidades de material usadas en tamizado grueso.	39
Tabla 14. Cantidades de material usadas en tamizado fino.	39
Tabla 15. Valoración para la capa litológica.	42
Tabla 16. Evapotranspiración mensual obtenida con la ecuación 24.	42
Tabla 17. Rangos para la valoración de la humedad.	42
Tabla 18. Valoración mensual de precipitaciones.	42
Tabla 19. Valoración de la cobertura vegetal.	43
Tabla 20. Valoración de la intensidad sísmica (NEC-SE-DS, 2015).	43
Tabla 21. Pesos respectivos para MJA.	44
Tabla 22. Fuentes de la información recopilada.	45
Tabla 23. Coordenadas de los puntos de muestreo.	46
Tabla 24. Ensayos de humedad del suelo.	46
Tabla 25. Clasificación de las muestras.	46
Tabla 26. Tipo de suelo en base a V_p (m/s) (Das, 2015).	47
Tabla 27. Coordenadas de los taludes levantados.	48
Tabla 28. Características de los macizos rocosos.	48
Tabla 29. Familias de discontinuidades presentes.	48
Tabla 30. Valores del ensayo del esclerómetro.	49
Tabla 31. RMR obtenidos de los macizos.	49
Tabla 32. Ángulos de discontinuidades para el cálculo de SMR.	53
Tabla 33. Variables para el cálculo de factores de corrección del SMR.	53
Tabla 34. Cálculo del SMR.	53
Tabla 35. Áreas y su nivel de susceptibilidad Mora-Vahrson.	58
Tabla 36. Áreas y su nivel de susceptibilidad Mora-Vahrson modificado.	59
Tabla 37. Áreas y su nivel de susceptibilidad Mora-Vahrson periodo seco.	61
Tabla 38. Áreas y su nivel de susceptibilidad Mora-Vahrson periodo húmedo.	61
Tabla 39. Pesos de cada una de las variables MJA.	62
Tabla 40. Áreas y su susceptibilidad, MJA.	63
Tabla 41. Áreas y su susceptibilidad, MJA periodo seco.	64
Tabla 42. Áreas y su susceptibilidad, MJA periodo húmedo.	65

Agradecimientos

La Gratitude es la reacción que se genera a una acción de igual intensidad, en nuestro caso será decir gracias por los conocimientos recibidos, por el camino recorrido junto a nuestros amigos y por los logros alcanzados.

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a la Ingeniera Karla Santacruz, directora de nuestro trabajo de titulación, y al Ingeniero Daniel Vélez, codirector; la orientación acertada y su incansable apoyo han sido fundamentales para nuestro aprendizaje y el desarrollo de nuestra investigación.

Extendemos también, nuestro agradecimiento a nuestros revisores, al Ingeniero Jaime Bojorque y el Ingeniero Esteban Pacheco, cuya constante retroalimentación ha sido crucial para la mejora de nuestro trabajo.

Es preciso anotar el apoyo recibido de la empresa ELECAUSTRO, así como la valiosa información proporcionada y las facilidades brindadas que fueron esenciales para el cumplimiento de los objetivos planteados en el trabajo, en particular a la Ingeniera Martha Aguilar y al Ingeniero Pedro Vintimilla un agradecimiento especial por su colaboración.

Asimismo, expresamos nuestra gratitud a SENAGUA y a la Economista Elizabeth Escandón, por su ayuda en la obtención de los datos necesarios para la realización del estudio hidrológico.

Queremos agradecer a la Red Sísmica del Austro, al Ingeniero Juan Carrión, Ing. José Miguel Calderón e Ing. Remigio Guevara, por su apertura y apoyo tanto en el suministro de equipos como en el procesamiento de información para el estudio geofísico.

De igual manera, agradecemos al laboratorio de suelos y geotecnia de la Universidad de Cuenca, por las facilidades brindadas para la realización de los ensayos y el acceso a los equipos.

Finalmente, a nuestros queridos amigos, César, Santiago, Felipe, Mateo, David, Rafaela, Dayana, Diego, Emilia y a muchos más, con los que tuvimos el placer de compartir este camino. Gracias por su apoyo, risas compartidas y momentos inolvidables.

Capítulo I Introducción

1.1. Antecedentes

Dentro de los convenios de cooperación que mantiene la Universidad de Cuenca, existe uno con la empresa ELECAUSTRO; parte de ese convenio involucra el estudio de la cuenca alta del río Machángara. El presente trabajo aborda el estudio de susceptibilidad a movimientos de masa de la conducción Labrado – Tuñi, entre las abscisas 0+000 y 3+000.

ELEAUSTRO es una empresa dedicada a la generación de energía eléctrica del país, empleando dos tipos de tecnologías: una planta térmica de combustible y cuatro plantas hidroeléctricas, entre las cuales se destacan la central Saucay y la central Saymirín ubicadas en el complejo hidroeléctrico Machángara, dentro de la cuenca hidrográfica del río Machángara.

Dicho complejo hidroeléctrico es de gran relevancia y trascendencia para la ciudad de Cuenca que se abastece, no solo de la energía producida en las centrales, sino también del agua que es captada y conducida por diversos canales hasta plantas de potabilización.

Para satisfacer la demanda energética, se requiere captar y transportar el recurso hídrico hacia las centrales hidroeléctricas. Dentro de la infraestructura, usada para este propósito, se encuentra un canal que conduce agua desde la represa El Labrado hacia el reservorio Tuñi, y una conducción proveniente de la represa Chanlud hacia el mismo reservorio, las dos conducciones abastecen a la central hidroeléctrica Saucay. Al estar ubicados en una zona con alta probabilidad de eventos como fuertes inviernos o sismos, sus taludes son más propensos a movimientos de masa que pueden provocar el taponamiento o destrucción del canal, así como afecciones a la conducción, lo que generaría una reducción de la eficiencia de la central aguas abajo y en la producción de energía.

Históricamente varios episodios de inestabilidad han sido identificados. Tal es el caso de un colapso del talud y parte de la ladera en la conducción y vía Chanlud – Tuñi, entre las abscisas 9+140 a la 9+240, debido al fuerte periodo invernal presente en la zona (Alvarez, S/F). Otro caso se registró en la abscisa 5+500 del canal Labrado – Tuñi, en marzo del 2023, como consecuencia de un sismo (Elecaustro, 2023).

Diversos autores proponen valoraciones referenciales sobre las condiciones particulares y los niveles de riesgo asociados a la susceptibilidad a movimiento de tierras, que pueden ser evaluados, de una manera accesible, mediante el uso de herramientas de geoprosesamiento (SIG).

1.2. Planteamiento del problema

El personal de la empresa Elecaustro está continuamente revisando la situación de los diferentes tramos de las conducciones de agua en la cuenca alta del río Machángara; sin embargo, un registro específico de la condición actual de los mismos y su evolución en el tiempo es necesario.

La inestabilidad de los taludes y los deslizamientos en el complejo hidroeléctrico afectan tanto a las vías de acceso, utilizadas para mantenimiento y control de las conducciones, como a las conducciones que llevan el agua hacia la central Saucay. Esto resulta en la llegada de un menor caudal, una reducción de la eficiencia en la producción energética y una pérdida económica.

1.3. Justificación

El constante riesgo a movimientos de masa implica la necesidad de un análisis que permita identificar los parámetros causantes de inestabilidad. Además, mediante la creación de mapas de susceptibilidad, el estudio brinda la posibilidad de realizar una zonificación del área, identificando los lugares con mayores niveles de riesgo.

Autores como Mora & Vahrson proponen metodologías para este propósito, adicionalmente, métodos como la Jerarquización Analítica permiten la adaptación a las condiciones locales. La información requerida es de fácil obtención gracias al convenio existente con la empresa ELECAUSTRO y su procesamiento sencillo usando los sistemas de información geográfica (SIG).

1.4. Objetivo General

Generar mapas de susceptibilidad a movimientos de masa para la zona comprendida entre las abscisas 0+000 y 3+000 del canal Labrado – Tuñi, para caracterizar zonas de mayor susceptibilidad e identificar las variables de mayor incidencia en dichos lugares.

1.5. Objetivos Específicos

Recopilar la información correspondiente a topografía, geología, hidrología, geotecnia y cobertura del suelo, mediante ensayos en campo o en laboratorio y mediante consulta en fuentes externas como estudios o informes previos.

Identificar el grado de influencia de los parámetros que intervienen en la inestabilidad y su correlación, mediante la aplicación de metodologías como Mora-Vahrson y Jerarquización Analítica, tomando en consideración variables locales.

Identificar zonas con características especiales y realizar un análisis de los posibles tipos de movimientos de masa en ellas.

1.6. Alcance

En principio, el estudio se enfocará en la delimitación del área de influencia para la conducción Labrado-Tuñi entre las abscisas 0+000 y 3+000. Posteriormente se trabajará en indagar y recopilar la información necesaria en las diferentes capas como geología, geotecnia, hidrología, topografía, entre otros, mediante visitas de campo y consulta a instituciones que posean información.

Se realizarán ensayos de laboratorio para identificar propiedades características de los suelos encontrados, así como ensayos geofísicos para validar la información recopilada.

Se analizará, según el modelo Mora-Vahrson y según la Jerarquización Analítica, los diferentes parámetros del terreno obtenidos. Se elaborará los mapas de susceptibilidades mediante software de información geográfica (SIG).

Un estudio hidrológico en base a las teorías de Gumbel y de Thornthwaite permitirá la obtención de características propias de la zona como la precipitación máxima y la evapotranspiración potencial.

Al identificarse afloramientos de macizos rocosos en el tramo de análisis, un estudio de la estabilidad de los mismos será requerido, autores como Bieniawski y Markland proponen indicadores para evaluar su condición.

Se compararán las metodologías de Mora-Vahrson y la Jerarquización Analítica con el objetivo de identificar cual es la que mejor refleja la realidad del tramo de estudio. Así como, se estudiará la variación a lo largo del año, causada por un cambio en la humedad del suelo.

El estudio llegará a una caracterización y zonificación de la zona de estudio en base a la susceptibilidad, tomando en cuenta parámetros locales.

Capítulo II Marco teórico

La presente sección está enfocada en tratar las principales definiciones y teorías aplicadas en el estudio, se inicia con una descripción de los movimientos de masa, se continúa con una descripción de la exploración en campo y los ensayos de laboratorio, se introduce las herramientas usadas en el SIG y finalmente, se explican ambas metodologías usadas:

2.1. Movimientos de tierra y su clasificación

Un movimiento de tierra se describe como una variedad de procesos que involucran materiales como roca, suelo o rellenos artificiales y que a través de una serie de factores son desplazados o transportados (USGS, 2004). Los términos en los que se fundamenta la clasificación de los mismos son el material existente y el tipo de movimiento, identificando cinco principales: caídas, vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales y flujos (Varnes, 1978). En la tabla 1 se indican los tipos de deslizamientos.

Tabla 1. Tipos de deslizamientos. Versión abreviada de clasificación a deslizamientos (Varnes, 1978).

Tipo de movimiento		Tipo de material	
		Suelos	
		Predominantemente Grueso	Predominantemente Fino
Caídas (Falls)		Caída de roca	Caída de detritos
Vuelcos (Topples)		Vuelco de roca	Vuelco de detritos
Deslizamientos	Rotacional	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de Detritos
	Traslacional	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de Tierra
Expansiones laterales		Extensión de Roca	Propagación de Detritos
Flujos		Flujo de rocas	Flujo de detritos
Complejos		Combinación de dos o más tipos principales de movimiento	

Caída (Fall)

Se trata del desprendimiento de bloques de suelo o roca en donde no existe deslizamiento por corte, pues el material desprendido cae, rueda o rebota de manera abrupta. Se produce típicamente en suelos cohesivos o en rocas a pie de acantilados donde existe ataque de agua (Varnes, 1978). La figura 1 muestra el caso de caída de rocas.

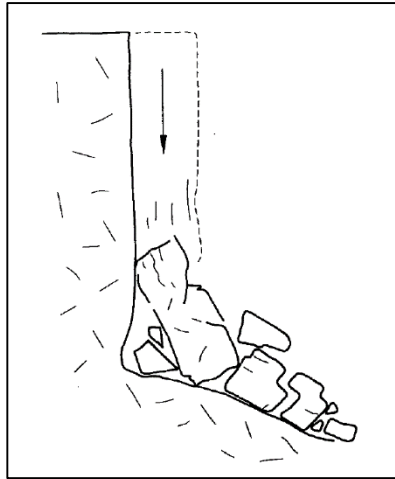


Figura 1. Caída de bloques (Corominas, 1997)

Vuelcos (Topples)

Corresponde a la rotación de material hacia adelante. Generalmente es producto de la gravedad ejercida, sin embargo, puede ser causada por otros agentes como la presencia de agua en las grietas, empuje ejercido por el terreno adyacente y disposición de las discontinuidades (Varnes, 1978). Acorde al mecanismo de vuelco se pueden distinguir los procesos por flexión y por desplome (Corominas, 1997). En la figura 2 se observan ambos procesos.

Vuelco por flexión: Sucede en rocas y es el producto de un conjunto de discontinuidades que forman vigas del material en voladizo (Goodman & Bray, 1997), las cuales, al curvarse por flexión, colapsan hacia adelante. Es común evidenciar este mecanismo de vuelco en materiales como filitas o pizarras (Corominas, 1997).

Desplome: El material se desploma de manera brusca con un movimiento de giro sobre su base exterior. Por lo general, se producen en materiales areno-arcillosos. En el caso de los macizos rocosos no es frecuente (Corominas, 1997).

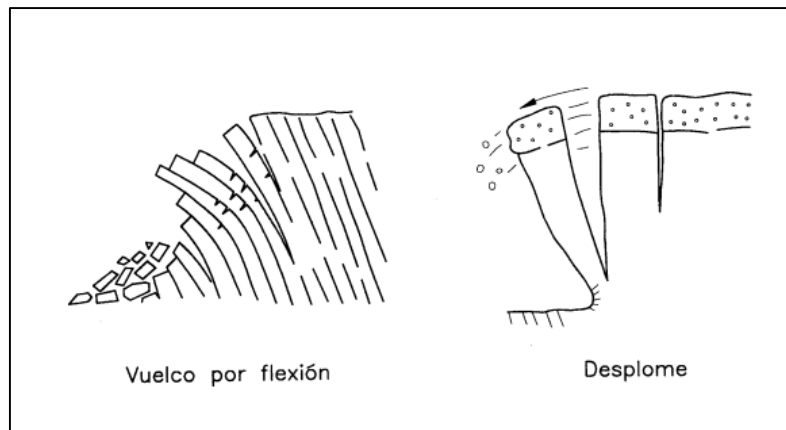


Figura 2. Vuelcos (Corominas, 1997)

Deslizamientos (Slides)

Corresponde al desplazamiento ladera abajo de una masa de material, sobre superficies de rotura expuestas a esfuerzos de corte o zonas delgadas. (Corominas, 1997). El movimiento no se produce de manera simultánea a lo largo de la superficie de falla, sino que el material desplazado se incrementa a partir de una falla local. (Varnes, 1978).

Se puede distinguir principalmente los deslizamientos de tipo rotacional y traslacional, los cuales según Corominas (1997) son caracterizados de la siguiente manera:

Deslizamientos rotacionales: En este tipo de deslizamientos la falla de corte se produce en una superficie curva. El suelo ubicado en la cabecera queda a contrapendiente originando una zona de acumulación de agua, lo que puede inducir nuevos eventos de deslizamiento o reactivaciones (Corominas, 1997). Su presencia es común para materiales homogéneos, por lo que se debe tener en consideración para terraplenes y rellanos (Varnes, 1978).

Deslizamientos Traslacionales: En este tipo de deslizamientos la falla se produce a lo largo de una superficie plana u ondulada, donde los componentes desplazados se trasladan paralelamente y con igual velocidad (Corominas, 1997).

En la figura 3 se observan ambos casos de deslizamiento.

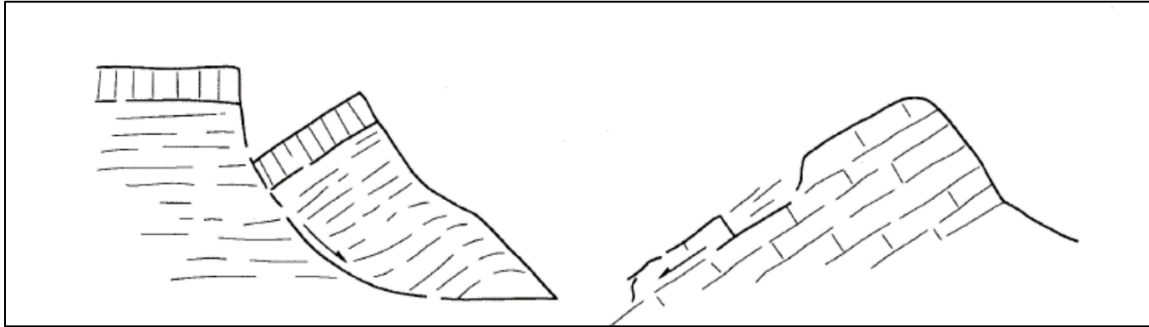


Figura 3. Deslizamiento rotacional y traslacional (Corominas, 1997)

Expansiones laterales (lateral spreads)

Su ocurrencia normalmente se da en pendientes suaves o cuando el terreno es plano, se presenta en materiales subyacentes saturados, sueltos y sin cohesión como arenas o limos. (USGS, 2004).

Existen dos mecanismos de expansión, en el primer caso, la expansión afecta a todo el material y no se identifica una zona de falla por corte, generalmente evidenciado en masas rocosas, en ocasiones, las capas de recubrimiento experimentan separación en bloques de considerable tamaño, entre los cuales puede penetrar arcilla. En el segundo caso, existe una licuefacción o un flujo plástico del material subyacente que provoca la fracturación y extensión de material compacto, el movimiento es extremadamente lento (Corominas, 1997; Varnes, 1978). En la figura 4 se observa las expansiones laterales.

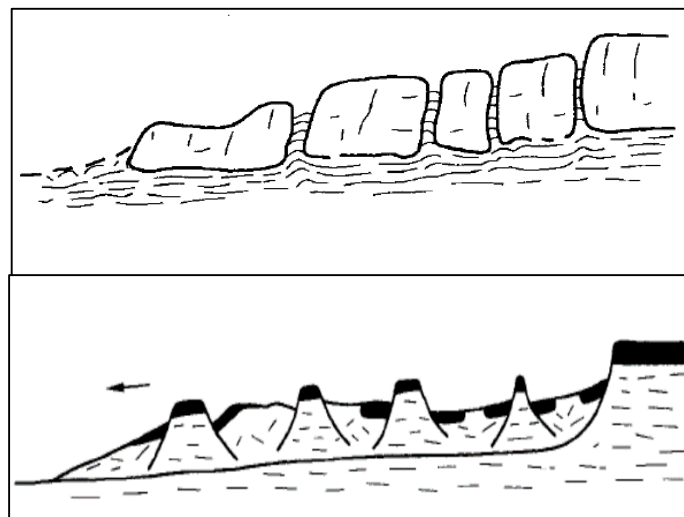


Figura 4. Expansiones laterales (Corominas, 1997)

Flujos (flows)

Se definen como movimientos continuos espacialmente en donde la superficie de corte no perdura y las velocidades de los componentes se asemejan a las de un fluido viscoso, razón por la que, el material descendente no mantiene su forma, y se desparrama en las laderas

formando conos de deyección cuando se trata de materiales granulares y creando formas lobuladas cuando se trata de materiales cohesivos (Corominas, 1997).

Se identifica diferentes tipos de flujos principales:

Flujo de detritos: Movimiento rápido en el que suelo suelto, roca, materia orgánica, aire y agua se movilizan en conjunto ladera abajo, causado por un flujo de agua superficial (USGS, 2004).

Avalanchas: Flujo de grandes masas de material a altas velocidades, mayores a los 50 m/s, debido a una alta cantidad de agua el conjunto se puede licuefactar y precipitar hacia abajo decenas de kilómetros (Corominas, 1997).

Flujo de tierra: El material del talud se licua y se escurre creando un cuenco en la cabecera con una forma característica, similar a un reloj de arena. El flujo es alargado y suele producirse en materiales finos o rocas blandas que se encuentran saturados (USGS, 2004).

Reptación (Creep): Movimientos lentos e imperceptibles, en largos periodos de tiempo, gracias a la acción de la gravedad, el material se desplaza en el sentido de la pendiente (Corominas, 1997).

2.2. Caracterización geotécnica

La revisión geotécnica de cualquier sitio de estudio se puede realizar mediante varios procesos, unos superficiales y otros ya de análisis a profundidad. Dentro de la revisión superficial del sitio se encuentra el levantamiento de información por medio de visitas a campo, y ensayos de geofísica.

2.2.1. Geofísica

La geofísica se entiende como la rama de la geología que analiza las características físicas del suelo. Entre los objetivos de dicha disciplina se encuentra: la identificación y medición de características geológicas como fallas, estratos rocosos, vacíos o niveles freáticos, y la determinación indirecta de propiedades ingenieriles (US Army Corps of Engineers, 1995). Existen varios procesos de geofísica, entre ellos la refracción sísmica.

Refracción sísmica: Cuando se da energía sísmica al suelo, esta viaja en una línea recta, hasta encontrarse con un límite o un cambio de propiedades sísmicas, en este punto, la dirección de la energía cambia su sentido, El principio del método consiste en grabar el tiempo de llegada de los impulsos a una serie de detectores conocidos como geófonos colocados en el terreno en una configuración específica (US Army Corps of Engineers, 1995).

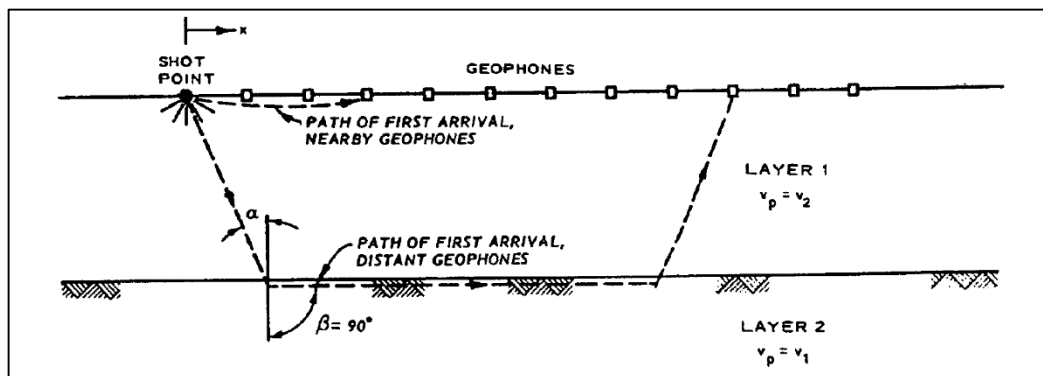


Figura 5. Medición en el ensayo de refracción sísmica (US Army Corps of Engineers, 1995)

En la figura 5 se observa la medición del tiempo de llegada de los impulsos a los diferentes geófonos. Dependiendo de la ubicación de cada geófono, los impulsos toman diferentes caminos a profundidades variadas, los datos recopilados de tiempo permiten aproximar velocidades de onda P, en función de las cuales se puede aproximar una estratigrafía mediante correlaciones entre tipo de suelo y la velocidad de onda (US Army Corps of Engineers, 1995).

2.2.2. Propiedades de los materiales

Los distintos materiales que forman el suelo, poseen variaciones en sus propiedades, determinar dichas características facilitará el entendimiento de su comportamiento. Das (2015), define a las principales características estudiadas en este trabajo como:

Granulometría: Distribución de los tamaños de partículas sólidas presentes en una muestra de suelo, los mismos que se encuentran representados como porcentajes del peso total de muestra, obtenido luego de un proceso de secado. Puede realizarse mediante tamizado mecánico y mediante el ensayo del hidrómetro.

Un material es más resistente, mientras mejor graduado sea, dicha propiedad se encuentra representada por los coeficientes calculados con las ecuaciones 1 y 2:

$$CU \text{ (Uniformidad)} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$Cc \text{ (Curvatura)} = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \quad (2)$$

D#: Representa el diámetro que deja pasar el #% de material

Para suelos gruesos, en la tabla 2 se indica los requerimientos para que el material sea bien graduado:

Tabla 2. Requerimientos granulométricos (Das, 2015)

Material	Cu	CC
Arena	Mayor a 6	Entre 1 y 3
Grava	Mayor a 4	Entre 1 y 3

Humedad: Contenido de agua presente en la muestra caracterizada como la relación entre el peso del líquido al peso de los sólidos.

Consistencia del suelo: El contenido de humedad de una muestra de suelo definirá la consistencia en la que se encuentra, pudiendo estar entre sólida a líquida. Existen humedades que representan las transiciones:

Límite líquido: Cambio de la consistencia de plástica a líquida.

Límite plástico: Cambio de la consistencia de semisólida a plástica.

Límite de contracción: Cambio de la consistencia de sólida a semisólida.

Índice de plasticidad: Representa el rango de humedades en comportamiento plástico, calculado con la ecuación 3.

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Las propiedades previamente mencionadas se determinan utilizando normativas ASTM.

2.2.3. Clasificación de suelos

Las propiedades de los suelos mencionadas permiten clasificar al suelo siguiendo las pautas propuestas por Casagrande (1948). Se identifican 2 tipos de suelos dependiendo del porcentaje retenido en el Tamiz #200:

$$\% > 50\% \text{ Suelo Grueso}$$

$$\% \leq 50\% \text{ Suelo Fino}$$

Para el caso de suelos **finos**, se requiere analizar la Carta de Plasticidad propuesta por el mismo autor, representada en la figura 6.

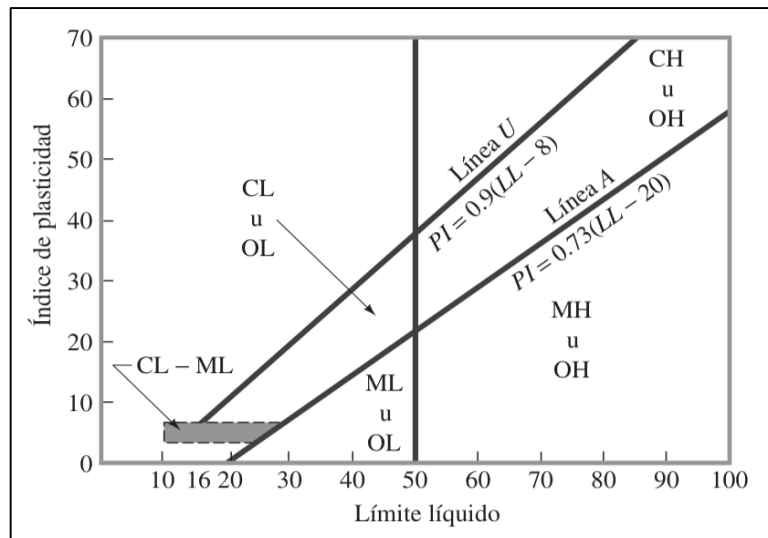


Figura 6. Carta de plasticidad (Casagrande, 1948)

Para suelos **gruesos**, R# hace referencia al porcentaje retenido en el tamiz #:

$$R_4 \geq \frac{R_{200}}{2} \quad \text{Grava}$$

$$R_4 < \frac{R_{200}}{2} \quad \text{Arena}$$

En adición, se requiere revisar el porcentaje que pasa el tamiz 200: Si es menor al 5% se debe verificar si es bien graduado el material (W-Bien graduado o P-Pobremente graduado). Para porcentajes entre 5% y 12% se requiere verificar tanto la condición de graduación como la de plasticidad. Finalmente, para porcentajes mayores a 12% de finos solo se requiere verificar la plasticidad (Casagrande, 1948).

2.2.4. Macizos Rocosos

La roca se diferencia de los otros materiales presentes en el terreno por sus propiedades. En la naturaleza se la encuentra como el conjunto de bloques rocosos separados por varios tipos de discontinuidades como juntas o fallas. Sus propiedades como la resistencia se ven afacetadas por las características tanto de la matriz rocosa como de las discontinuidades (Bieniawski, 1989).

Dentro de la caracterización del macizo es necesario identificar 3 conceptos. El primero es la dirección o rumbo, el ángulo entre el norte y la línea de corte entre el plano de discontinuidad y un plano horizontal. El segundo es el buzamiento, ángulo entre el plano horizontal y la línea de mayor pendiente. Finalmente, la dirección de buzamiento, ángulo entre el norte y la proyección horizontal del vector buzamiento.

2.2.4.1. RQD:

Existen varios índices para la caracterización del macizo rocoso, el primero conocido como RQD (Rock Quality Designation) fue desarrollado por Deere et al. (1966) y se entiende como el porcentaje de recuperación de los pedazos de roca que midan más de 100 mm en el eje de la perforación (Bieniawski, 1989), su cálculo se lo realiza según la ecuación 4. En la figura 7 se ejemplifica:

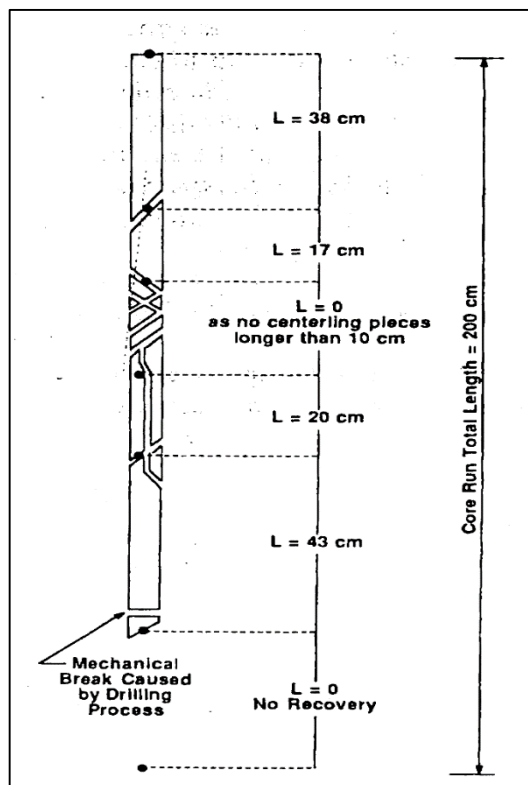


Figura 7. Procedimiento de medición del RQD (Bieniawski, 1989)

$$RQD = 100 * \frac{\sum x_i}{L_o} \quad (4)$$

L_o : Longitud de la perforación

x_i : Distancia en eje de cada pedazo mayor a 100 mm

2.2.4.2. RMR

Bieniawski (1989) desarrolló el RMR (Rock Mass Rating System), en función de propiedades del macizo: resistencia a compresión uniaxial de la matriz, RQD, espaciamiento de las discontinuidades, condiciones de las discontinuidades, condiciones del flujo de agua y la orientación de las discontinuidades. Cada una de las caracterizaciones se indican en la tabla 3.

Tabla 3. RMR condiciones generales (Bieniawski, 1989)

Parámetro			Rango de valores						
1	Resistencia de matriz	Carga puntual (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Realizar uniaxial		
		Compresión Uniaxial (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Puntaje		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puntaje		20	17	13	8	3		
3	Espaciamiento discontinuidad		>2m	0.6-2m	20-60cm	6-20cm		<6cm	
	Puntaje		20	15	10	8		5	
4	Condiciones discontinuidad		Basarse en la Tabla 4						
5	Agua		Seco	Húmedo	Mojado	Goteando	Flujo		
	Puntaje		15	10	7	4	0		

El numeral 4 para las condiciones de discontinuidades puede ser desglosado en la tabla 4:

Tabla 4. Condiciones de discontinuidades (Bieniawski, 1989)

Parámetros	Característica (Puntaje)				
Longitud	<1m (6)	1-3m (4)	3-10m (2)	10-20m (2)	>20m (0)
Abertura	Sin (6)	<0.1mm (5)	0.1-1mm (4)	1-5mm (1)	>5mm (0)
Rugosidad	Muy rugoso (6)	Rugoso (5)	Poco rugoso (3)	Liso (1)	Resbaladizo (0)
Relleno	Sin (6)	Duro <5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (2)	Suave >5mm (0)
Meteorización	Sin (6)	Poca (5)	Media (3)	Alta (1)	Descompuesta (0)

2.2.4.3. SMR

La sexta categoría trata de castigar al RMR en función de la orientación de las discontinuidades, Bieniawski (1989), recomienda que para el caso de taludes seguir las recomendaciones propuestas por Romana (1985) en la obtención de un nuevo indicador conocido como SMR (Slope Mass Rating) en la ecuación 5:

$$SMR = RMR + (F1 * F2 * F3) + F4 \quad (5)$$

RMR: Obtenido del estudio de (Bieniawski, 1989)

F1: Factor que depende del paralelismo entre la dirección del buzamiento de la discontinuidad α_j y la del talud α_s .

F2: Factor que depende del buzamiento de la discontinuidad β_j .

F3: Factor que depende de la relación entre el buzamiento de la discontinuidad y el del talud β_s .

F4: Factor de corrección que depende del método de excavación (+10 para perforaciones a presión, 0 en el caso mecánico, +15 si es pendiente natural).

Estudios posteriores identificaron nuevas ecuaciones para los factores de corrección, como es el caso de Tomas et al. (2007) en las ecuaciones 6, 7, 8, 9 y 10:

$$F1 = \frac{16}{25} - \frac{3}{500} * \operatorname{atan}\left(\frac{1}{10}(|A| - 17)\right) \quad (6)$$

$$F2 = \frac{9}{16} - \frac{1}{195} * \operatorname{atan}\left(\frac{17}{100}B - 5\right) \text{ Fallas planas} \quad (7)$$

$$F2 = 1 \text{ Toppling} \quad (8)$$

$$F3 = -30 + \frac{1}{3} * \operatorname{atan}(C) \text{ Fallas planas} \quad (9)$$

$$F3 = -13 + \frac{1}{7} * \operatorname{atan}(C - 120) \text{ Toppling} \quad (10)$$

Las variables A, B y C provienen de Romana (1985) de las ecuaciones 11, 12, 13, 14 y 15:

$$A = |\alpha_j - \alpha_s| \text{ Falla plana} \quad (11)$$

$$A = |\alpha_j - \alpha_s - 180| \text{ Toppling} \quad (12)$$

$$B = \beta_j \quad (13)$$

$$C = \beta_j - \beta_s \text{ Falla plana} \quad (14)$$

$$C = \beta_j + \beta_s \text{ Toppling} \quad (15)$$

En base a estos parámetros, Romana (1985) clasifica los macizos según la Tabla 5:

Tabla 5. Caracterización del macizo en función de SMR (Romana, 1985)

Clases	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Descripción	Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Probabilidad de falla	0.9	0.6	0.4	0.2	0

2.2.4.4. Tipo de falla/Test de Markland

En los taludes de roca, diferentes tipos de fallas pueden ocurrir: **Plana**, cuando las discontinuidades buzan en el mismo sentido del talud, existe deslizamiento en un plano; **Cuña**, causada por las intersecciones de dos familias de discontinuidades y **Toppling**, donde un bloque se voltea por rotación. Para la obtención de SMR de Romana (1985) es necesario identificar cual puede llegar a presentarse. La figura 8 obtenida de Duque (2022) indica las fallas Plana, de Cuña y Toppling:

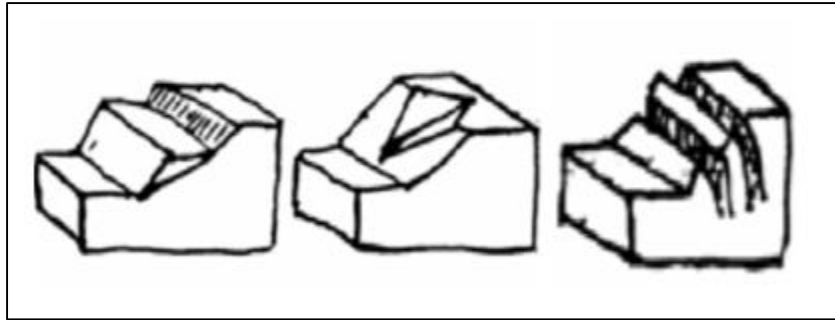


Figura 8. Falla plana, en cuña y Toppling (Duque, 2022)

Tomando en consideración las orientaciones de las discontinuidades, el plano del talud y el ángulo de fricción de las discontinuidades, Markland (1972), diseñó un método gráfico para identificar posibles fallas usando estereogramas.

En la figura 9, se observa la prueba de Markland para fallas planas, en función de los vectores buzamientos de las discontinuidades, y para falla de cuña, en función de las intersecciones de las discontinuidades. Si dichos vectores afloran al talud, por ejemplo, si para el macizo ilustrado en la red estereográfica de Schmidt de la figura 8, los vectores se grafican en el área mostrada, existe espacio para el movimiento. Adicionalmente, si el buzamiento de la discontinuidad δ es mayor al ángulo de fricción de las discontinuidades φ , se cumplen los requerimientos cinemáticos para deslizamiento. (Goodman, 1989). En la figura el vector $\hat{D}$ representa los vectores buzamientos, en el caso que se trabaje con intersecciones se usará el vector $\hat{I}$.

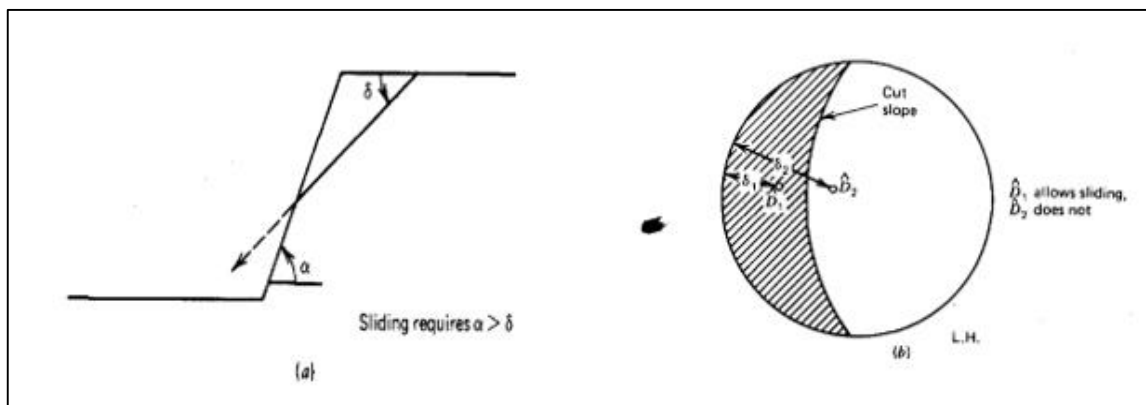


Figura 9. Test de Markland para fallas planas (Goodman, 1989)

En el caso de falla por Toppling, como se observa en la figura 10, una condición para el movimiento es que los vectores normales $\hat{N}$ estén menos inclinados que una línea con inclinación igual al ángulo de fricción medido desde el plano del talud. En términos de vector buzamiento δ , existe falla por desprendimiento si $(90 - \delta) + \varphi_j < \alpha$ (Goodman, 1989). Para la red estereográfica de tipo Schmidt, la figura 10 muestra el cumplimiento de esta condición.

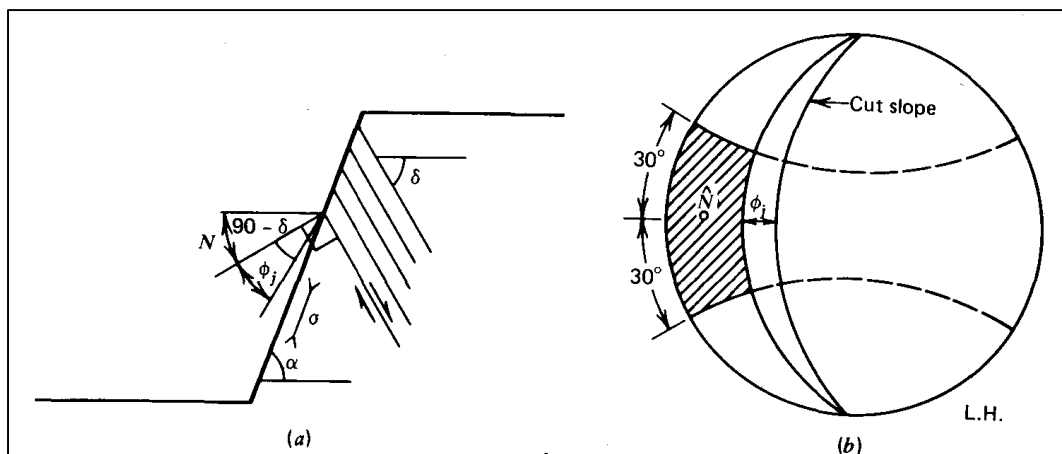


Figura 10. Test de Markland para Toppling (Goodman, 1989)

2.3. Sistemas de información geográfica

Se trata de un instrumento que permite el manejo de información georreferenciada mediante un sistema de coordenadas estandarizado en formato digital y herramientas informáticas que permiten el análisis específico con una serie de componentes, periféricos y bases de datos (Saria, s/f). Por las características que poseen los SIG, resultan adecuados para el tratamiento y procesamiento de datos espaciales brindando la posibilidad de obtener cartografía base, desarrollo de modelos empíricos, análisis automático de datos y actualización de datos e información.

Existen diferentes softwares con enfoque SIG, generalmente, procesamiento de información se lo realiza en formato “Ráster”, que se trata de una matriz de celdas o píxeles que se organizan en filas y columnas cada una con información referente a un campo en específico. Otra opción es en formato “Shape” que almacena información geográfica mediante puntos líneas o polígonos (ESRI, 2021). Dentro de las herramientas usadas en el proceso de análisis se encuentran:

Conversion: Usa capas de información en un formato específico y las transforma a otro requerido, shape o ráster. Utilizada para obtener, mediante datos topográficos, un modelo digital de elevaciones (DEM) en formato ráster.

Flow Direction: Usando información en formato ráster permite identificar, en base a las pendientes de terreno, las direcciones del flujo de agua clasificándolas en: norte, sur, este, oeste y sus intermedias.

Flow accumulation: Mediante información en formato ráster de las direcciones de flujo de agua, permite acumularlas en un objeto tipo línea, identificando cuencas hidrográficas y sus correspondientes ríos y quebradas.

Union: Permite la unión de entidades geométricas en formato shape en una capa única de información.

Slope: Mediante un modelo digital de elevaciones, permite encontrar las pendientes de terreno en ángulo de inclinación o en porcentaje.

Reclassify: Permite clasificar una capa de información, en formato ráster, en una capa con rangos personalizados.

Map algebra: Usa capas de información en formato ráster, en las cuales permite aplicar ecuaciones y modelos.

2.4. Metodología Mora-Vahrson

La base del presente estudio recae en el uso de la metodología propuesta por Sergio Mora y Wilhelm-Günther Vahrson, que tiene como propósito el análisis de la susceptibilidad a movimientos de masa, en función de parámetros morfodinámicos de la zona. Originalmente el modelo identifica dos tipos de factores que inciden en dicha susceptibilidad. En primer lugar, están los parámetros condicionantes o factores intrínsecos que actúan de manera pasiva: condiciones litológicas, pendientes del terreno y la humedad natural, en segundo lugar, están los factores desencadenantes o de disparo que corresponden a parámetros externos: intensidades sísmicas y lluvias (Mora & Vahrson, 1992).

Los parámetros mencionados se combinan con un peso específico ponderado con el que se obtiene un valor relativo respecto a la amenaza existente. La combinación de los factores ponderados según su grado de influencia se realiza con la ecuación 16 propuesta por Mora & Vahrson (1992):

$$A_d = Susc * Disp \quad (16)$$

A_d : Amenaza de deslizamientos

$Susc$: Parámetros de susceptibilidad (litología, relieve, humedad)

$Disp$: Parámetros de disparo: intensidad sísmica y pluviométrica

Los factores condicionantes indicados en la ecuación 17:

$$Susc = Rr * L * H \quad (17)$$

R_r : Índice de influencia del relieve relativo, depende de la topografía del terreno

L : Índice de influencia de la litología

H : Índice de influencia de la humedad usual del suelo

Por otra parte, los parámetros de disparo son una combinación de los índices de lluvia y sismicidad, como se indica en la ecuación 18:

$$Disp = S + Ll \quad (18)$$

S: Índice de influencia de la intensidad sísmica máxima

Ll: Índice de influencia de la intensidad de las lluvias

Con lo que la amenaza de deslizamientos se calcula con la ecuación 19:

$$A_d = (R_r * L * H) * (S + Ll) \quad (19)$$

2.4.1. Factor litológico

El factor más importante y más difícil de disponer información, trata acerca de la composición de los materiales presentes en la zona. En el caso de que no se disponga de datos geotécnicos se recomienda basarse en la tabla 6, adaptando los valores a las condiciones locales y regionales (Mora & Vahrson, 1992).

Tabla 6. Factor litológico (Mora & Vahrson, 1992)

Litología	Calificación a susceptibilidad	Factor L
Aluvión grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo; calizas duras, permeables; rocas intrusivas poco fisuradas, bajo nivel freático; basaltos, andesitas, ignimbritas y otras rocas efusivas, sanas, permeables y poco fisurados; rocas metamórficas, sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo. Características físico mecánicas: materiales sanos con poca o ninguna meteorización, elevada resistencia al corte, fisuras sanas, sin relleno.	Bajo	1
Rocas sedimentarias no alteradas o muy poco, estratificación maciza (decimétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo; Rocas intrusivas, calizas duras, lavas, ignimbritas, rocas metamórficas medianamente alteradas y fisuradas; aluviones con compactaciones leves, con proporciones considerables de finos, drenaje moderado, nivel freático a profundidades intermedias. Características físico mecánicas: resistencia al corte media o elevada, fracturas cizallables.	Moderado	2
Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas mediana a fuertemente alteradas, coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados, drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos. Características físico mecánicas: resistencia moderada a media al corte, fracturación importante.	Medio	3
Aluviones fluvio lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente y con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros. Características físico mecánicas: Resistencia moderada a baja al corte, presencia frecuente de arcillas.	Alto	4
Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen los casos 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos elevados. Características físico mecánicas: resistencia al corte muy baja, materiales blandos con muchos finos.	Muy Alto	5

2.4.2. Factor de relieve relativo

Se puede explicar como una traducción de la rugosidad natural del terreno, caracterizada por el relieve relativo identificado como el cociente entre la máxima diferencia de elevaciones y el área total de estudio (Mora & Vahrson, 1992).

Gracias a la disponibilidad de sistemas de información geográfica en la actualidad, se recomienda hacer uso de clasificaciones como la de Zuidam (1986) en función de las pendientes de la zona. La tabla 7 indica los rangos y clasificación de las pendientes.

Tabla 7. Factor de la pendiente (Zuidam, 1986)

Clase de pendiente		Condición del terreno	Color sugerido	Valor asignado
Grados [°]	Porcentaje [%]			
0-2	0-2	Planicie, sin denudación apreciable.	Verde oscuro	0
2-4	2-7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	Verde Claro	1
4-8	7-15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	Amarillo	2
8-16	15-30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro de erosión severo	Naranja	3
16-35	30-70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos.	Rojo claro	4
35-55	70-140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible.	Rojo oscuro	5
>55	>140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada.	Morado	6

2.4.3. Factor de humedad

Se entiende como humedad a la cantidad de agua presente en el suelo o roca que, al encontrarse en los materiales, genera ciertos efectos: en conjunto con altas temperaturas y actividad orgánica apresura la meteorización de los materiales y aumenta la presión de poros reduciendo significativamente la resistencia mecánica (Mora & Vahrson, 1992).

Idealmente se debe realizar un estudio detallado mediante mediciones in situ, seguidas de un balance hídrico; si no existe esta información, se aplica un balance agua-suelo en el que únicamente se considera la precipitación media mensual (Mora & Vahrson, 1992).

Mora & Vahrson (1992) proponen que se categoricen los promedios mensuales de lluvia acorde a la tabla 8.

Tabla 8. Categorización de promedios mensuales de lluvia (Mora & Vahrson, 1992)

Precipitación promedio (mm/mes)	Valor asignado de factor humedad
<125	0
125-250	1
>250	2

El valor de 125 es una tasa generalizada de evapotranspiración en Centroamérica, las precipitaciones mensuales inferiores a 125 mm no conducen a un aumento de la humedad en el terreno (Mora & Vahrson, 1992). De ser el caso que la teoría no se aplique en Centroamérica, es necesario un estudio hidrológico acorde a la zona en análisis.

Los valores mensuales asignados de la tabla 8 para todo el año se suman, obteniéndose el valor acumulado de índice de precipitación, y se asigna un peso según la tabla 9.

Tabla 9. Factor de humedad (Mora & Vahrson, 1992)

Valor acumulado de índice de precipitación	Calificación a susceptibilidad	Factor H
0-4	Muy baja	1
5-9	Baja	2
10-14	Media	3
15-19	Alta	4
20-24	Muy alta	5

2.4.4. Factor de intensidad sísmica

La actividad sísmica posee una influencia considerable en la generación de movimientos de masa. En la tabla 10 se indican los valores de correlación entre las intensidades y los índices de influencia de la actividad sísmica, se definen 10 clases. Se recomienda utilizar mapas de aceleración sísmica máximos históricos realizando una corrección de la intensidad para un periodo de ocurrencia de 100 años (Mora & Vahrson, 1992).

Tabla 10. Factor de intensidad sísmica (Mora & Vahrson, 1992)

Intensidad Mercalli modificado Tr=100 años	Calificación a susceptibilidad	Factor S
III	Leve	1
IV	Muy bajo	2
V	Bajo	3
VI	Moderado	4
VII	Medio	5
VIII	Considerable	6
IX	Importante	7
X	Alto	8
XI	Muy alto	9
XII	Extremadamente alto	10

2.4.5. Factor de lluvias

Lluvias de alta intensidad producen el disparo de los deslizamientos, ya sean de larga duración produciendo deslizamientos más profundos, traslacionales o de corta duración que generan flujos regolíticos. Con el objetivo de cubrir todas las posibilidades, se usa información de las lluvias máximas en 24 horas. Para conocer la lluvia máxima histórica en 24 horas, es necesario determinar la serie de los valores máximos diarios anuales y dependiendo de si el número de registros es menor a 10 años calcular el promedio aritmético, caso contrario utilizar el método de Gumbel (1945), para un periodo de retorno de 100 años (Mora & Vahrson, 1992). La tabla 11 indica los pesos a asignar para el factor de lluvias.

Tabla 11. Factor de precipitaciones (Mora & Vahrson, 1992)

Lluvia máxima n>10 años, Tr=100	Lluvia n<10 años, promedio	Calificación a susceptibilidad	Factor LI
<100 mm	<50 mm	Muy baja	1
101-200 mm	51-90 mm	Baja	2
201-300 mm	91-130 mm	Medio	3
301-400 mm	131-175 mm	Alto	4
>400 mm	>175 mm	Muy alto	5

2.5. Estudio Hidrológico

Ciertos parámetros, necesarios para la metodología propuesta por Mora & Vahrson (1992), requieren adaptarse a las condiciones específicas de cada zona de estudio. Es el caso del factor de humedad, indicado en la Tabla 9, para regiones con características diferentes a Costa Rica (Donde se propuso el método) los autores recomiendan reemplazar el valor de la precipitación promedio por la evapotranspiración promedio mensual de la nueva zona de estudio.

2.5.1. Determinación de la evapotranspiración/Método de Thornthwaite

La evapotranspiración se define como la transformación del agua de estado líquido a gaseoso que, por acción de las plantas, regresa a la atmosfera (Custodio & Llamas, 1996). En su estudio Mora & Vahrson (1992), toman como referencia la ecuación propuesta por Vahrson et al. (1990) para el cálculo de la evapotranspiración potencial; sin embargo, se encuentra limitada a Costa Rica.

La evapotranspiración potencial es aquella que tendría lugar si una mayor cantidad de agua estuviera disponible en la zona. La determinación de dicho parámetro posee un mayor grado de dificultad debido a que no puede ser medido de manera directa (Thornthwaite, 1948).

Entre los métodos empíricos para la obtención de la evapotranspiración potencial, encontramos el de Thornthwaite (1948), este método toma como datos iniciales las temperaturas medias diarias del aire y el número máximo de horas de sol y se especifica en el libro “Hidrología Subterránea” de Custodio & Llamas (1996).

Thornthwaite (1948), obtiene un índice de calor anual “I” con la ecuación 20

$$I = \sum \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (20)$$

Una evapotranspiración potencial media para condiciones estándares: 30 días al mes y 12 horas de luz solar diarias, con las ecuaciones 21, y 22.

$$\epsilon = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (21)$$

$$a = 675 * 10^{-9} I^3 - 771 * 10^{-7} I^2 + 1972 * 10^{-5} I + 0.49239 \quad (22)$$

t: Temperatura media diaria del mes en centígrados

ε: Evapotranspiración potencial media en mm/día

Para adaptar a condiciones variadas de horas de exposición a luz solar, Custodio & Llamas (1996) obtienen el factor K en función de la latitud del lugar de estudio y mediante la ecuación 23.

$$K = \frac{N}{12} * \frac{d}{30} * d \quad (23)$$

Con la ecuación 24 se obtiene una nueva evapotranspiración potencial.

$$ETP = K * \epsilon \quad (24)$$

ETP: Evapotranspiración potencial en mm/mes.

N: Número máximo de horas de sol, en función de la latitud, obtenidas en la Tabla 3 de Custodio & Llamas (1996).

d: número de días del mes.

Adicionalmente, Mora & Vahrson (1992) para el análisis del factor de lluvias recomienda usar la metodología de Gumbel (1941).

2.5.2. Determinación de lluvia máxima/Método de Gumbel

Una inundación puede entenderse como la máxima descarga promedio diaria, medida en unidades de volumen por unidades de tiempo, esta definición se puede expresar en términos de la probabilidad que un evento supere a un valor máximo “x” en un periodo de tiempo (Gumbel, 1945). Un retro análisis permitirá encontrar dicho valor de precipitación máxima.

El periodo de retorno puede ser entendido para un evento de lluvias como el intervalo de tiempo en el que dicho evento será excedido. Gumbel (1941), plantea la ecuación 25 del periodo de retorno:

$$T(x) = \frac{1}{1 - e^{-e^{-y}}} \quad (25)$$

Donde $e^{-e^{-y}}$ es la probabilidad de que una descarga igual o menor a un valor “x” suceda

De igual manera Gumbel (1945) plantea la siguiente ecuación 26:

$$y = a(x - u) \quad (26)$$

Vahrson & Dercksen (1990) obtienen la ecuación 27:

$$X = \bar{x} + \frac{(y - \mu_y) * Sx}{\sigma_y} \quad (27)$$

$\bar{x}$: Media de la serie de eventos máximos anuales

Sx : Desviación estándar de la serie de eventos máximos anuales

μ_y, σ_y : Parámetros en función de la cantidad de mediciones

2.6. Jerarquización Analítica

Estudios como el del INIGEMM (2013), consideran capas de información adicionales a las propuestas por Mora & Vahrson (1992). Su inclusión implica una nueva ponderación de los pesos asignados a las variables, para la cual se aplica el método de Saaty (1981) conocido como Método de Jerarquización Analítica (MJA) que se encuentra explicado en Sánchez (2003):

Mediante una matriz, representada en la ecuación 28, se comparan las variables que quieren ser jerarquizadas, de esa manera se logra obtener la importancia de cada una de ellas.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad a_{ii} = 1 \quad (28)$$

Cada una de las comparaciones recibe una calificación desde un valor de 1/9 hasta 9 dependiendo de la importancia relativa entre variables (SNGR, 2019). La figura 11 indica dicha escala, así como las relaciones entre variables correspondientes

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema	Fuerte Menos importante	Moderada	Igual	Moderada	Fuerte Más importante	Extrema		

Figura 11. Escala propuesta por Saaty (SNGR, 2019)

Un eigenvector es aquel que, al ser aplicado una transformación lineal, no cambia su dirección y resulta paralelo al inicial. Para nuestro caso la matriz A es dicha transformación lineal. Este vector (W) representa los pesos de cada variable. Para su obtención se normaliza la matriz como se indica en la ecuación 29:

$$A' = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum ai1} & \frac{a_{12}}{\sum ai2} & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum ain} \\ \frac{a_{21}}{\sum ai1} & \frac{a_{22}}{\sum ai2} & \dots & \frac{a_{2n}}{\sum ain} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{n1}}{\sum ai1} & \frac{a_{n2}}{\sum ai2} & \dots & \frac{a_{nn}}{\sum ain} \end{bmatrix} \quad (29)$$

El vector de los pesos relativos W se calcula siguiendo la ecuación 30:

$$W = \begin{bmatrix} w1 \\ w2 \\ w3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_{11} + A'_{12} + \dots + A'_{1n} \\ A'_{21} + A'_{22} + \dots + A'_{2n} \\ A'_{n1} + A'_{n2} + \dots + A'_{nn} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Se normaliza los valores $w1$, $w2$ y w_n dividiéndolos para el total de columnas de la matriz A' .

Es necesario chequear la consistencia de la asignación de las calificaciones, por lo que, el método plantea la obtención de la razón de inconsistencia (RI), la cual debe ser menor a un 10% (Sánchez, 2003). Obtenida en la ecuación 31:

$$RI = \frac{IC}{CA} \quad (31)$$

IC es el índice de consistencia calculado en la ecuación 32:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (32)$$

n : Tamaño de la matriz

λ_{max} : Valor característico promedio, haciéndose cumplir la ecuación 33:

$$A * W = \lambda_{max} * W \quad (33)$$

λ_{max} corresponde a un vector del cual se promedian sus valores para obtener el valor característico.

CA es la consistencia aleatoria, proveniente de la tabla 12:

Tabla 12. Consistencia Aleatoria (Sánchez, 2003)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CA	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Capítulo III Metodología

3.1. Recopilación de información digital

Para la elaboración de los mapas correspondientes a las variables usadas en la modelación fue necesario obtener datos de partida respecto a la geología, topografía, registros de lluvia en las estaciones cercanas, peligrosidad sísmica y la cartografía base. La información requerida fue proporcionada por la empresa ELECAUSTRO y entidades públicas como SENAGUA, SIGTIERRAS y el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

3.2. Definición del área de estudio

A partir las curvas de nivel recopiladas, se elaboró un modelo digital de elevaciones en formato ráster con ayuda del software ArcGIS. A este modelo se aplicó la herramienta “Flow Direction”, obteniendo un mapa con ocho direcciones (Norte, Sur, etc) en las que puede correr el flujo de agua. Se aplicó la herramienta “Flow Accumulation”, trazando los caminos por donde se acumula, es decir cauces de ríos y quebradas. Con esto, se identificó, mediante un modelo ráster, las áreas de aporte de cada quebrada.

El modelo obtenido se convirtió a formato shape con la herramienta “Conversion” con el objetivo de tener una zona delimitada. Las áreas resultantes fueron unidas empleando la herramienta “Union”, abarcando desde la abscisa 0+000 hasta la 3+000 y desde la corona del talud hasta el río. En la figura 12 se indica, con línea de color rojo,

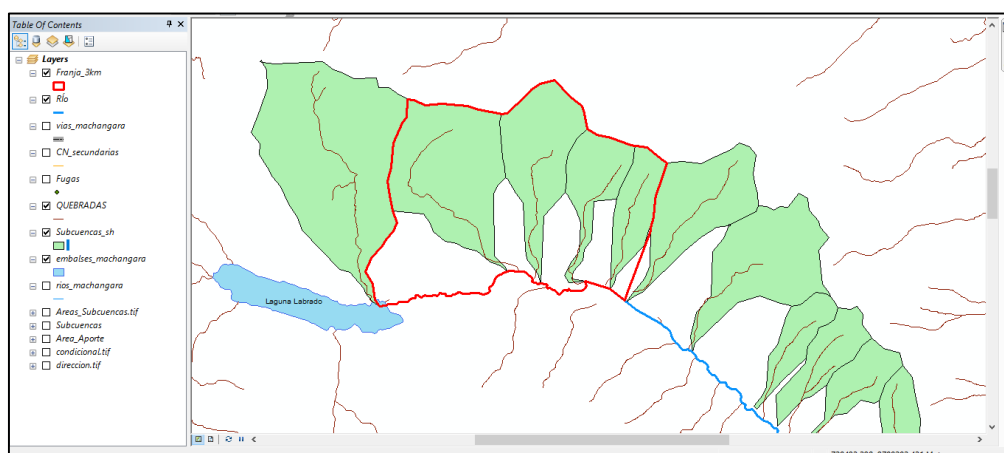


Figura 12. Delimitación del área de estudio

3.3. Trabajo en campo

3.3.1. Exploración y reconocimiento

La primera visita de reconocimiento se realizó en colaboración con personal técnico de ELECAUSTRO. El recorrido inició desde el reservorio Tuñi hacia la represa El Labrado, identificándose los puntos críticos donde se han presentado problemas asociados a deslizamiento de tierra.

Durante el recorrido, se definió el tramo de análisis y se realizó un levantamiento preliminar de los puntos revisados mediante fotografías y GPS. Con el objetivo de contrastar las observaciones con los resultados de los mapas de susceptibilidad se identificó ciertas zonas que presentan problemas.

3.3.2. Recolección de las muestras

De los sitios que presentaron problemas se procedió con la recolección de muestras alteradas.

La recuperación del material se llevó a cabo retirando la capa vegetal y la capa más superficial de tierra oscura, como se indica en la figura 13. Posteriormente se colocó las muestras en bolsas plásticas selladas para evitar la pérdida de humedad durante el transporte y almacenamiento.



Figura 13. Recuperación de muestras

3.3.3. Ensayo de refracción sísmica

Se realizó en campo con el equipo necesario (Geófonos, sismográfico ES-3000, martillo y placa, etc) y el software Geometrics, el cual fue configurado para mediciones con 12 geófonos en línea recta, separados cada 4 metros. El ensayo corresponde a la configuración MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) usando como fuente de energía un martillo y una placa metálica movida a 7 ubicaciones, como se indica en la figura 14, generando un número de 5 golpes en la placa por cada ubicación, el sismógrafo graba los datos y generó 7 archivos que fueron procesados gracias a la Red Sísmica del Austro. La figura 14 muestra la configuración de los geófonos en el lugar realizado:

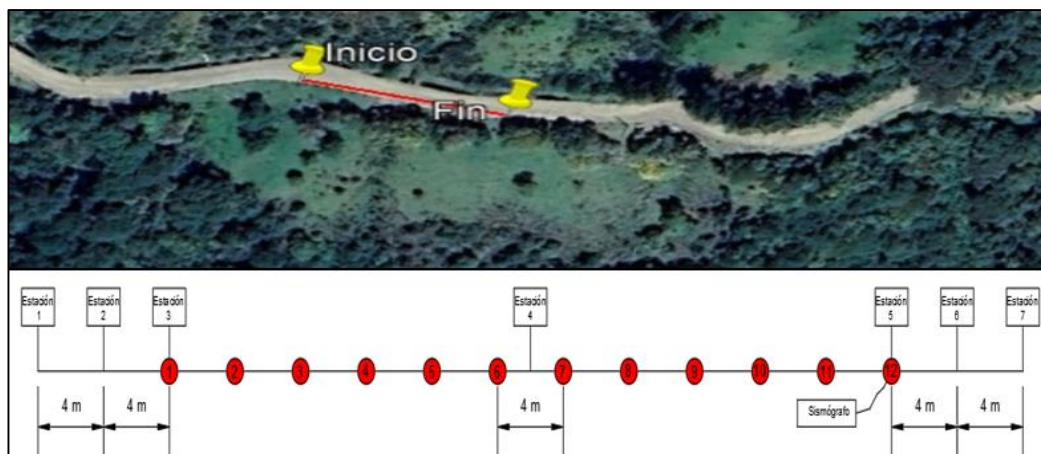


Figura 14. Configuración de los geófonos en el punto realizado ilustrado en el mapa superior

La figura 15 muestra la realización del ensayo, en la parte izquierda la colocación de los geófonos, y en la parte derecha los golpes dados en la placa metálica:



Figura 15. Ensayo de refracción sísmica

3.3.4. Vuelos de drones

Se obtuvo fotografías de la zona de estudio mediante un dron DJI mavic mini pro 3. La información recopilada fue utilizada para chequear las condiciones litológicas y de cobertura vegetal, además de revisar las condiciones de la superficie del terreno en las cuencas de aporte para las quebradas.

3.4. Levantamiento del macizo rocoso

Se identificó el afloramiento de un talud de roca entre las abscisas 0+000 y 1+273. Para la correcta evaluación y revisión de los parámetros de estabilidad se realizó un levantamiento en campo en el que se obtuvo las características de sus discontinuidades como: espaciamiento, orientación, rumbo, abertura, relleno y su resistencia a la compresión simple. Se buscó taludes accesibles que sean representativos de los macizos rocosos presentes.

3.4.1. Medición de la resistencia

Se realizó una aproximación de la medición en sitio mediante el esclerómetro según la norma ASTM-D 5873 (D18 Committee ASTM, 2014) colocando el instrumento lo más perpendicular posible a la superficie de prueba. Al entrar en contacto con el vástago del instrumento, el martillo se comprime y se registra la medición del rebote, misma que mediante tablas puede ser traducida a la resistencia de la roca. La figura 16 ilustra el ensayo del esclerómetro:



Figura 16. Ensayo del esclerómetro

3.4.2. Determinación del RQD

Para la determinación del parámetro RQD se trabajó con fotografías tomadas con vuelos de dron, asemejando una perforación vertical que atravesase las discontinuidades identificadas siguiendo los criterios expuestos por Bieniawski (1989). Se observa en la figura 17 dicho análisis:

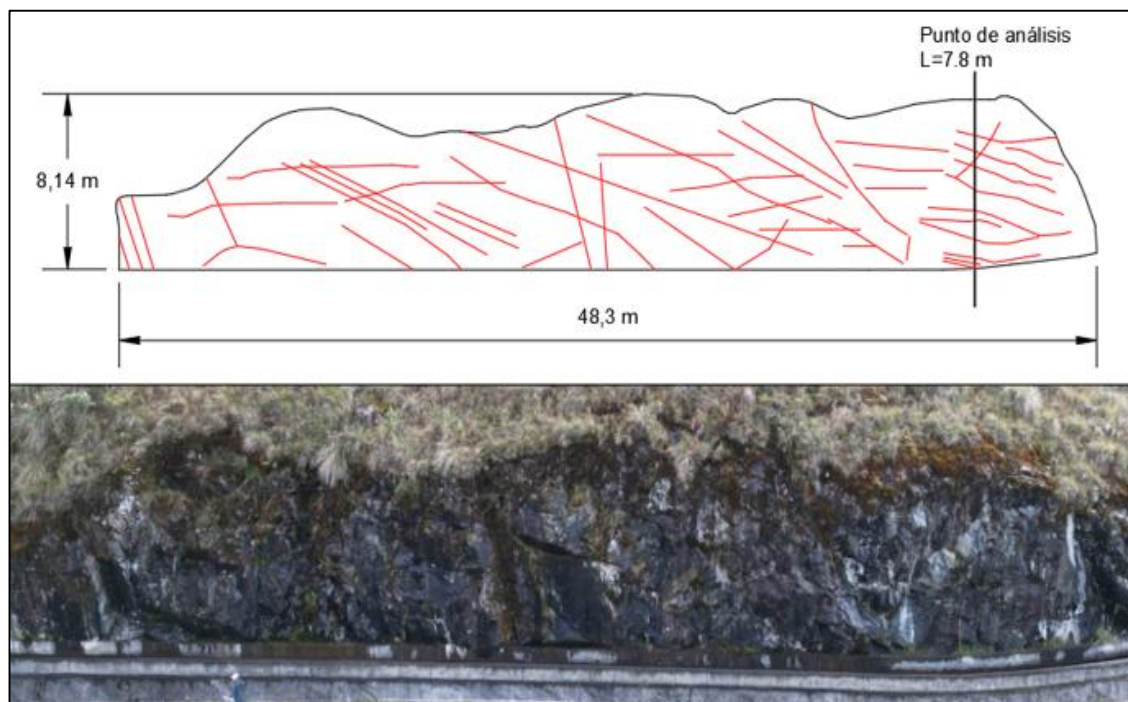


Figura 17. Macizo rocoso, obtención del RQD

La Norma Ecuatoriana de la construcción NEC-SE-GC (2015), indica que para la clasificación de macizos rocosos se puede utilizar RMR, el parámetro Q de Barton (1974) y GSI de Hoek y Brown (1980), en el presente estudio se optó por el RMR debido a la disponibilidad de datos.

3.4.3. Análisis del RMR

La resistencia a compresión simple y el RQD fueron obtenidos previamente, para las valoraciones restantes se utilizó las Tablas 3 y 4 propuestas por Bieniawski (1989).

3.4.4. Análisis de estabilidad de Markland

Siguiendo las pautas de Markland (1972), y mediante redes estereográficas, se graficó las proyecciones de los taludes, así como sus discontinuidades, y se identificó si se cumplen los requerimientos indicados anteriormente para la posibilidad de fallas en los macizos.

3.4.5. Cálculo del SMR

Con los datos obtenidos en campo del levantamiento de los macizos, se procesó la información y se ingresó en la expresión 5 propuesta por Romana (1985), tomando en consideración las modificaciones a los factores propuestas por Tomás et al. (2007), para finalmente determinar el Slope Mass Rating de los macizos.

3.5. Ensayos de caracterización de suelos

Se realizó ensayos de caracterización de suelos para contrastar la información digital disponible con lo encontrado en campo y, de esta manera, validar y de ser necesario

actualizar, las capas de información como la litológica. La ejecución de los ensayos se llevó a cabo en el laboratorio de geotecnia y materiales de la Universidad de Cuenca.

3.5.1. Humedad natural

El proceso se realizó acorde a la normativa ASTM-D-2216-19 (D18 Committee ASTM, 2019), se utilizó 2 taras para cada muestra, obteniendo el promedio de ambas. La figura 18 ilustra las muestras previas al proceso de secado y la toma de su peso.



Figura 18. Ensayo de humedad

3.5.2. Granulometría

Las muestras recolectadas fueron secadas al ambiente. Se realizó el ensayo acorde a la normativa ASTM D 422-63 (D18 Committee ASTM, 2017). El tamizado fue de forma mecánica con las muestras secas, utilizando las cantidades indicadas en la tabla 13. En la serie gruesa se usó los tamices: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 3/8" y #4.

Tabla 13. Cantidades de material usadas en tamizado grueso

Serie gruesa	
Muestra	Cantidad (gr)
S3	4000
S5	3000
S6	3500

El material que pasó el tamiz #4 fue cuarteado y reservado para la ejecución de la granulometría fina, se trabajó con los tamices: #4, #10, #40 y #200. El material fue lavado sobre el tamiz #200 y secado. La tabla 14 indica las cantidades usadas en el ensayo:

Tabla 14. Cantidades de material usadas en tamizado fino

Serie fina		
Muestra	Cantidad sin lavar (gr)	Cantidad lavada y seca (gr)
S3	640	570
S5	630	458
S6	600	420

La figura 19 muestra el proceso de granulometría:



Figura 19. Ensayos de granulometría

3.5.3. Límites de Atterberg

Se realizó los ensayos de Casagrande para la determinación del límite líquido y el ensayo manual de cilindros para la determinación del límite plástico acorde a la normativa ASTM D-4318 (D18 Committee ASTM, 2018). La figura 20 muestra el ensayo del límite líquido realizado en la cuchara de Casagrande:



Figura 20. Límites de Atterberg

3.6. Elaboración de mapas base

A partir de la información digital recopilada, los ensayos y el trabajo en campo, se realizó los mapas base correspondientes a cada una de las variables especificadas en Mora-Vahrson.

3.6.1. Mapa de pendientes

A partir de las curvas de nivel proporcionadas se realizó un modelo digital de elevaciones en el software ArcGIS. Con dicho modelo en formato ráster se aplicó la herramienta “Slope”, obteniendo un mapa de pendientes expresadas en porcentaje ilustrado en la figura 21.

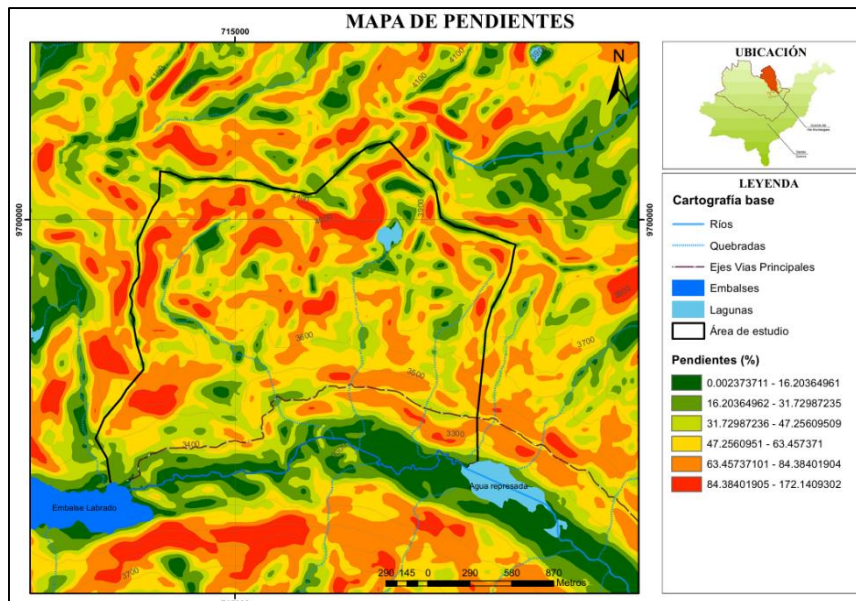


Figura 21. Mapa de pendientes sin clasificar, zona de estudio

Para obtener las ponderaciones acordes a la metodología Mora-Vahrson se usó la herramienta "Reclassify". Se ingresó el modelo ráster con el mapa de pendientes y se organizó los rangos según la tabla 7, valorando cada uno desde 0 a 6.

3.6.2. Mapa litológico

Con el mapa geológico proporcionado por ELECAUSTRO, proveniente de un estudio reciente, se identificó las formaciones que se encuentran la zona y los materiales que componen cada una de ellas. Se realizó el contraste y corrección de información considerando capas geológicas y ortofotos proporcionadas por SIGTIERRAS, que fueron superpuestas mediante el programa ARCGIS.

Se identificó que la formación Tarqui abarca áreas donde se evidencia afloramientos de macizos rocosos y áreas donde existe suelo. Por lo tanto, para dicha formación, las ponderaciones litológicas fueron realizadas diferenciando las condiciones en las que se presenta el material.

Para la formación Célica, al ser más antigua que la formación Tarqui, se asignó una ponderación menor dentro del mapa, representando menor susceptibilidad a movimientos de tierra. En cambio, para los depósitos glaciares, se asignó una ponderación mayor debido a que se trata de material que generalmente queda suelto.

Las valoraciones de cada unidad litológica se realizaron como se indica en la tabla 15:

Tabla 15. Valoración para la capa litológica

Formación	Valoración
Formación Tarqui-PT	2
Formación Célica-Kc	2
Tillitas-qt	3
Afloramiento rocoso	1

3.6.3. Mapa de humedades

Para la adaptación del parámetro de humedad a la zona de estudio, se realizó una estimación de la evapotranspiración potencial mensual con los registros de precipitación obtenidos y los datos de temperatura media mensual recuperadas de la página oficial de INAMHI y mediante la ecuación 24, correspondiente al método de Thornthwaite (1948). La tabla 16 indica la evapotranspiración mensual obtenida:

Tabla 16. Evapotranspiración mensual obtenida con la ecuación 24

Mes	Temperatura media (°C)	ETP (mm/mes)
Enero	8.25	54.89
Febrero	9.00	49.40
Marzo	9.25	53.48
Abril	8.50	51.99
Mayo	8.57	53.53
Junio	8.00	46.57
Julio	7.18	46.05
Agosto	7.50	45.44
Septiembre	8.00	47.98
Octubre	9.14	54.56
Noviembre	9.38	54.34
Diciembre	9.00	56.13

Con valor medio de la evapotranspiración potencial mensual se construyó los rangos para la valoración del parámetro de humedad como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Rangos para la valoración de la humedad

Precipitación promedio (mm/mes)	Valoración
<50	0
50-100	1
>100	2

Se comparó con los registros de precipitación mensual y se obtuvo su valoración correspondiente como se indica en la tabla 18. Su sumatoria se comparó con los rangos presentados en la tabla 9.

Tabla 18. Valoración mensual de precipitaciones

Mes	Precipitación (mm)	Valoración
Enero	94.89	1
Febrero	115.31	2
Marzo	133.27	2
Abril	147.46	2
Mayo	116.71	2
Junio	101.21	2
Julio	95.40	1
Agosto	72.49	1
Septiembre	80.70	1

Octubre	99.43	1
Noviembre	100.09	2
Diciembre	96.61	1
Total		18

3.6.4. Mapa de cobertura vegetal

La influencia de la cobertura vegetal es un factor importante en los procesos de deslizamientos. Originalmente, la metodología de Mora & Vahrson (1992) no la incluye; sin embargo, resulta crucial modificar los rangos de calificación a susceptibilidad para incluir este parámetro.

Se obtuvo una capa de información, en formato shape, proveniente del IGM (2024), se contrastó la información con ortofotos de la zona y vuelos de drones realizados, actualizando la capa de cobertura. La valoración del parámetro se realizó en base a la vegetación presente en la zona como se indica en la tabla 19, identificando su grado de susceptibilidad y contrastándola con trabajos previos como el realizado por el SNGR (2019) y el INIGEMM (2013).

Tabla 19. Valoración de la cobertura vegetal

Cobertura	Valoración
Cobertura muy superficial-Afloramiento rocoso	1
Páramo arbustivo poco alterado	2
Páramo arbustivo medianamente alterado	2
Pino	2
Páramo arbustivo muy alterado	3
Pasto cultivado	3
Páramo herbáceo medianamente alterado	3
Páramo herbáceo poco alterado	3
Vegetación herbácea de humedal poco alterada	3
Área erosionada	3

3.6.5 Mapa de intensidad sísmica

A partir del mapa de aceleraciones sísmicas registradas proporcionado por el IGEPN (2024), y por la caracterización del peligro sísmico obtenida de la NEC-SE-DS (2015), se clasificó según Mora & Vahrson (1992), con las valoraciones de la tabla 20:

Tabla 20. Valoración de la intensidad sísmica (NEC-SE-DS, 2015)

% de la gravedad	Calificativo	Valoración
<0.15	Medio	5
0.15-0.25	Elevado	6
0.25-0.35	Fuerte	7
0.35-0.5	Bastante fuerte	8
>0.5	Muy fuerte	9

3.6.6. Intensidad de lluvia

Según lo indicado por Mora & Vahrson (1992) al disponer datos de precipitación para más de 10 años, proporcionados por SENAGUA, se calculó la precipitación máxima para un periodo de retorno de 100 años mediante el método de Gumbel (1941) con las ecuaciones 25, 26 y 27. Se clasificó dicho valor acorde a la tabla 11.

3.7. Aplicación de la metodología Mora-Vahrson

Con los mapas obtenidos de los factores intrínsecos y desencadenantes, se aplicó la ecuación 19 en el software ArcGIS. Mediante la herramienta “Map Algebra” se obtuvo el mapa de susceptibilidad en formato ráster. Adicionalmente, para mejorar el análisis se incluyó el parámetro de cobertura vegetal (C) tal como se indica en la ecuación 34:

$$Susc = (R_r * L * H * C) * (S + Ll) \quad (34)$$

Con el fin de estudiar el efecto de la humedad del suelo se analizó la variación temporal del parámetro de humedad, mediante la realización de mapas para un rango bajo (Meses con menores precipitaciones) y un rango alto (Meses con mayores precipitaciones) de humedad.

3.8. Aplicación del método de Jerarquización Analítica (MJA)

Se trabajó con las seis capas de información procesadas previamente, sin necesidad de diferenciar entre parámetros desencadenantes e intrínsecos, únicamente fue requerida la determinación de los parámetros más influyentes en los procesos de deslizamientos. Para lo cual, se revisó la aplicación de la metodología en trabajos previos como los indicados por SNGR (2019) e INIGEMM (2013) y en las condiciones locales del sitio de estudio. La tabla 21 indica los pesos respectivos para cada parámetro:

Tabla 21. Pesos respectivos para MJA

A	Humedad	Litología	Cobertura	Pendiente	Lluvia	Sismo
Humedad	1	0.333	2	0.2	0.5	0.5
Litología	3	1	3	0.5	0.5	0.5
Cobertura	0.5	0.333	1	0.5	0.5	0.5
Pendiente	5	2	2	1	3	2
Lluvia	2	2	2	0.333	1	2
Sismo	2	2	2	0.5	0.5	1

Se obtuvo los pesos de cada una de las capas de información, así como el índice de consistencia y la nueva ecuación ponderada.

Capítulo IV Resultados

4.1 Recopilación de la información

Se logró recopilar información digital de la cartografía, topografía, geología, registros de las precipitaciones, mapa de cobertura vegetal, ortofotos y mapa de peligro sísmico, tal como se indica en la tabla 22.

Tabla 22. Fuentes de la información recopilada

Información	Formato	Fuente
Curvas de nivel	Archivo Shape	ELECAUSTRO SA
Cartografía base (vías, lagunas, límites, etc.)	Archivo Shape	
Mapa geológico	Archivo Shape	
Registros de precipitación- Estación Labrado M0141	Hoja de cálculo (.xlsx)	SENAGUA
Mapa de cobertura vegetal	Archivo Shape	Instituto Geográfico Militar
Ortofotos-Cuenca	Imágenes JP2 (7746 x7702 pixeles)	SIGTIERRAS
Mapa de peligro sísmico	Archivo Shape	Instituto geofísico de la Escuela Politécnica Nacional

Adicionalmente, dado que la zona de estudio es administrada por ELECAUSTRO, se pudo acceder a trabajos previos que incluyen exploraciones y estudios específicos de los sitios que han presentado problemas relacionados con deslizamientos de material y daños en el canal Labrado-Tuñi.

4.2. Definición del área de estudio

Se identificó 4 quebradas con cuencas de aporte dentro del área estudiada, abarcando un total de 487.5 hectáreas, adicionalmente, se encontró afloramientos de macizos rocosos en gran parte de la zona de estudio, alrededor de 1.3 km de la conducción Labrado – Tuñi. Se observó sitios con problemas geotécnicos, cuyo identificador fue el siguiente:

S3: Alta presencia de humedad en el suelo y cercanía a quebradas. En este punto también se realizó la geofísica.

S5: Alta presencia de humedad y color diferente al resto, más amarillento.

S6: Pequeño deslizamiento en un talud.

Dichos sitios se encuentran ilustrados en la figura 22 y sus coordenadas especificadas en la tabla 23:

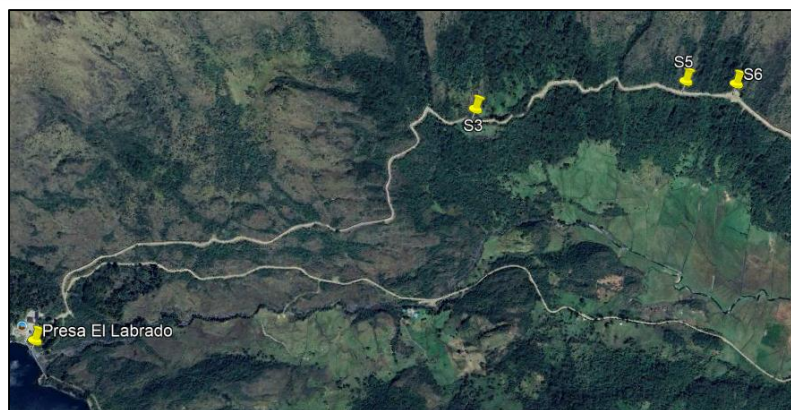


Figura 22. Sitios de extracción de muestras alteradas

Tabla 23. Coordenadas de los puntos de muestreo

Punto	UTM-Zona 17S	
	Este (m)	Sur (m)
S3	715413.00	9698751.00
S5	715990.00	9698831.00
S6	716124.00	9698819.00

Para los puntos específicos se realizaron ensayos obteniéndose los siguientes resultados:

4.3. Ensayos de caracterización de suelos

Los resultados de la humedad de las muestras se indican en la tabla 24:

Tabla 24. Ensayos de humedad del suelo

Muestra	Tara+ suelo húmedo (gr)	Tara + suelo seco (gr)	Humedad en cada tara (%)	Humedad de la muestra (%)
S3	97.7	84.2	35.90	34.90
	121.6	103.7	33.90	
S5	114.5	107.0	11.38	11.11
	124.7	117.0	10.84	
S6	110.9	99.5	20.17	19.58
	103.3	93.1	18.99	

Se observó que en el punto S3 existe una mayor humedad, hecho que fue corroborado en el campo. En dicho punto se apreciaba material saturado con una consistencia similar a un lodo.

En el caso de los límites de Atterberg, al no ser posible realizar los ensayos debido al material, se lo caracterizó como no plástico, para todas las muestras.

Los ensayos de granulometría permitieron clasificar las muestras obtenidas en base a la SUCS como se observa en la tabla 25:

Tabla 25. Clasificación de las muestras

Parámetro	Muestra		
	S3	S5	S6
% de Grava	48.4	62.4	54.6
% de Arena	45.3	27.2	30.8
% de Finos	6.3	10.4	14.7
Clasificación	Arena limosa mal graduada (SP-SM)	Grava limosa mal graduada (GP-GM)	Grava limosa (GM)

Respecto a los puntos S5 y S6, en base a la geología se encuentran ubicados en la formación Célica, un estudio reciente de la Empresa ELECAUSTRO realizó calicatas en sitios cercanos a los identificados, las exploraciones encontraron en su mayoría gravas (Bojorque & Villavicencio, 2023).

Respecto al punto S3, se analizó el informe del proyecto PRECUPA, en el cual, se indica que para la formación Tarqui los materiales son arenosos y limosos (Basabe, 1998).

4.4. Refracción sísmica

El ensayo se realizó en el punto identificado como S3, para una longitud de 44 metros, con la ayuda de 12 geófonos separados 4 metros cada uno. Gracias al apoyo de la Red Sísmica del Austro para el procesamiento de los datos, recopilados mediante el sismógrafo, se obtuvo el perfil indicado en la figura 23, en donde se observa el cambio de la velocidad de onda P, con relación a la profundidad y distancia horizontal:

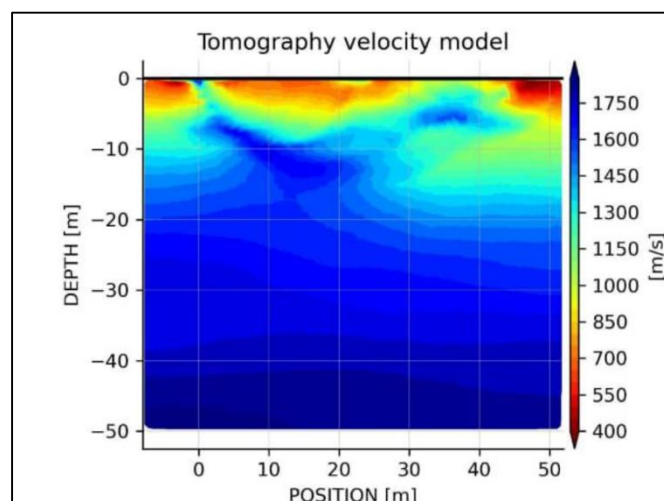


Figura 23. Resultados de la refracción sísmica

Como se observa en la figura, el perfil indica un aumento de la velocidad de onda P, a medida que se incrementa la profundidad, al correlacionar con literatura como la tabla 26 tomada de Das (2015), podríamos inferir el tipo de material presente:

Tabla 26. Tipo de suelo en base a V_p (m/s) (Das, 2015)

Tipo de suelo	V_p (m/s)
Arena y suelo superficial de grano fino	200-1000
Aluvión	500-2000
Arcillas compactadas, gravas arcillosas y arena arcillosa	1000-2500
Loess	250-750

Para nuestro caso se puede observar en la tabla que los valores del ensayo de refracción sísmica corresponden a arena y suelo superficial de grano fino para los primeros estratos,

hecho concordante con los resultados del análisis granulométrico para el punto S3. Bajo este estrato y según lo que muestra el perfil se podría inferir que los materiales pertenecen al grupo de arcillas compactadas, gravas arcillosas o arenas arcillosas.

4.5. Levantamiento de macizo rocoso

Según se explicó en la definición del área de estudio, se identificó macizos rocosos. Debido a la accesibilidad en el terreno, se realizó el levantamiento de los taludes 1 y 2 como se indica en la figura 24, las coordenadas de dichos puntos se indican en la tabla 27:



Figura 24. Taludes de roca levantados

Tabla 27. Coordenadas de los taludes levantados

Talud	UTM-Zona 17M	
	Este (m)	Sur (m)
1	714327.00	9698333.00
2	715136.00	9698484.00

Luego de varias visitas del sitio y levantamiento de información ambos taludes se llegó a:

4.5.1. Caracterización

Para los macizos rocosos analizados se identificó las características indicadas en la tabla 28:

Tabla 28. Características de los macizos rocosos

Característica	Talud 1	Talud 2
Dirección	N 19° E	N 78° E
Buzamiento	74° SE	80° NO
Abertura	1 cm	2 cm
Espaciamiento	40 cm	100 cm
Relleno	Restos vegetales, musgo	Sin relleno
Coloración	Gris claro	Gris oscuro
Meteorización	Media	Media
Presencia de agua	Goteo de agua	Superficie húmeda

De igual manera se identificaron las familias de discontinuidades indicadas en la tabla 29:

Tabla 29. Familias de discontinuidades presentes

	Talud 1		Talud 2	
Orientación	Familia 1	Familia 2	Familia 1	Familia 2
Dirección	N 30° O	N 19° E	N 30° O	N 78° E
Buzamiento	79° NE	3° SE	76° NE	26° SE

Para macizos rocosos de la familia Tarqui, el proyecto PRECUPA propone ángulos de fricción de la discontinuidad entre 25 – 35 grados, por lo que se optó por 30 grados para el estudio (Basabe, 1998).

4.5.2. Obtención del RQD

El RQD encontrado, simulando una perforación vertical en fotografías tomadas por dron como se ilustró en la figura 17 y siguiendo los criterios expuestos por Bieniawski (1989) indicados previamente en el marco teórico fue de:

$$RQD = \frac{7.7}{7.84} = 98\%$$

4.5.3. Resistencia a compresión simple

Mediante el ensayo del esclerómetro, se obtuvo los valores mostrados en la tabla 30 para un ángulo de medición de 0°, al ser superiores al valor máximo de rebote de 55, propuesto por el fabricante, se tomó el valor máximo correspondiente a 58.8 N/mm².

Tabla 30. Valores del ensayo del esclerómetro

N de medición	Medición de rebote (N/mm ²)
1	63
2	62
3	67

El informe del proyecto PRECUPA indica que para un macizo rocoso de la formación Tarqui la resistencia se encuentra en un rango de 40 a 100 mega pascales, misma que, según la Tabla 3 corresponde a una valoración de 7 para la obtención del RMR. (Basabe, 1998).

La resistencia aproximada encontrada fue de:

$$R = 58.8 \text{ MPa}$$

4.5.4. Obtención del RMR

Aplicando las tablas 3 y 4 de Bieniawski (1989), se obtuvo el RMR para cada macizo, especificados en la tabla 31:

Tabla 31. RMR obtenidos de los macizos

Parámetro	Talud 1		Talud 2	
	Medición/Identificación	Puntaje	Medición/Identificación	Puntaje
Resistencia a compresión	58.8 MPa	7	58.8 MPa	7
RQD	98 %	20	98 %	20
Espaciamiento discontinuidad	100 cm	15	40 cm	10
Longitud	17 m	2	8 m	2
Abertura	2 cm	0	1 cm	0
Rugosidad	Poco rugoso	3	Poco rugoso	3
Relleno	Sin relleno	6	Materia vegetal	0

Meteorización	Medianamente	3	Medianamente	3
Agua	Goteando	4	Húmedo	10
RMR		60		55

Los macizos rocosos se clasifican como clase III, en función del RMR. Si se revisa el proyecto PRECUPA (Basabe, 1998) para la formación Tarqui indica que los afloramientos rocosos pertenecen a la clase IV, la diferencia radica en la necesidad de incorporar la variabilidad de las formaciones y los efectos de las discontinuidades en nuestro estudio. Por lo que se realizó el siguiente análisis:

4.5.5. Análisis de Markland

Mediante el uso de stereonets se aplicó la teoría de Markland para determinar si existe algún tipo de falla en los taludes.

Para el caso de falla plana, en la figura 25 se puede ver que ninguno de los vectores buzamiento de las discontinuidades, ni el vector de su intersección cumple los requisitos para que exista movimiento. Se puede concluir que para el caso del Talud 1 no existe peligro y que la familia 1 es la más propensa a causarla

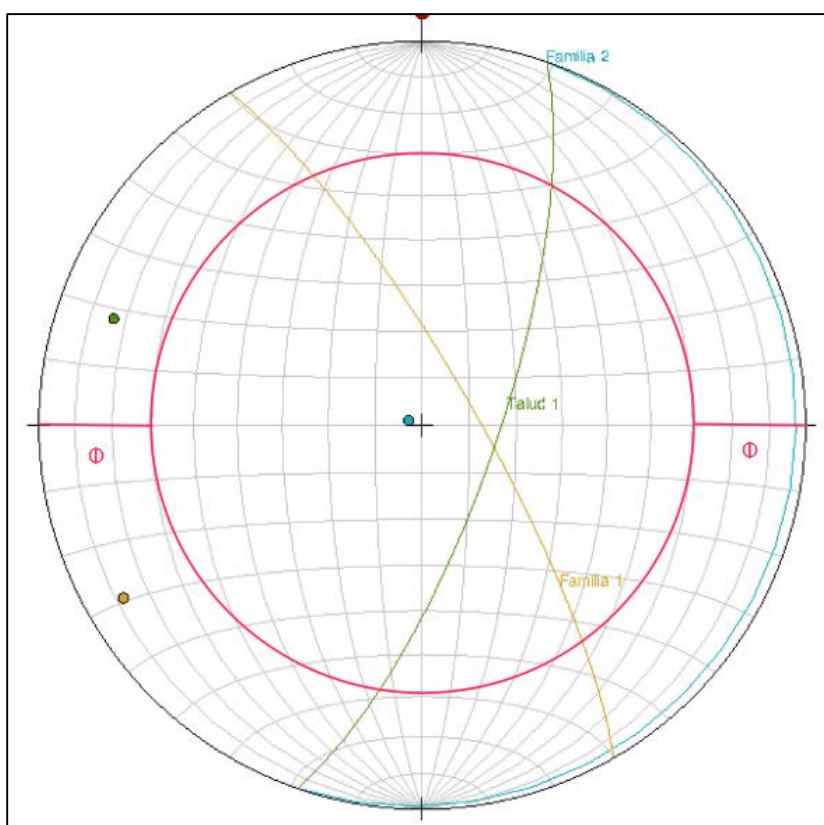


Figura 25. Análisis de falla plana para el Talud 1

Para el caso de falla plana, en la figura 26 se puede ver que ninguno de los vectores buzamiento de las discontinuidades, ni el vector de su intersección cumple los requisitos para que exista movimiento. Se puede concluir que para el caso del Talud 2 no existe peligro y que la familia 1 es la más propensa a causarla.

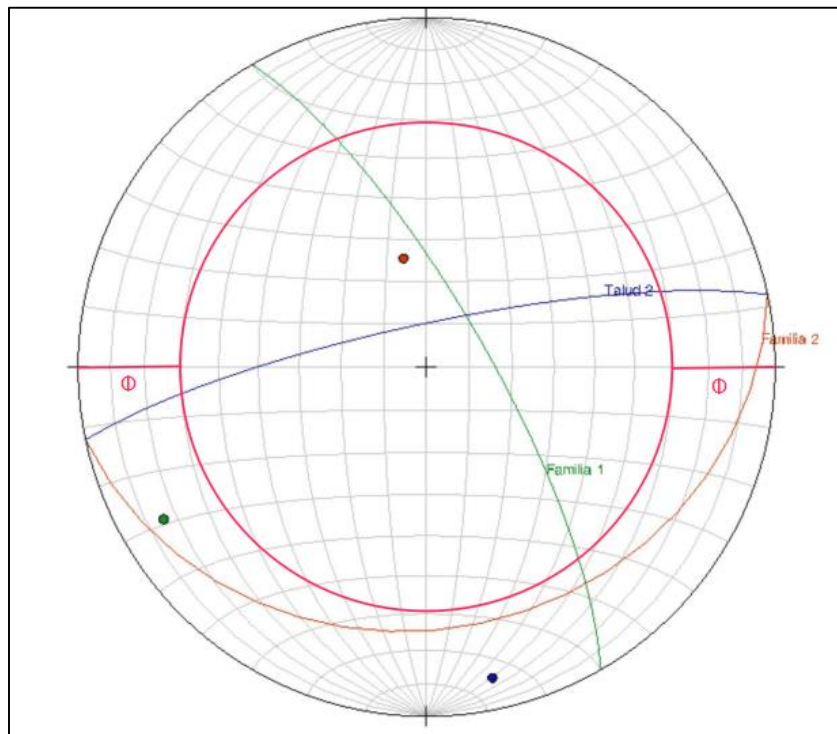


Figura 26. Análisis de falla plana para el Talud 2

Para el caso de Toppling, en la figura 27 se puede ver que ninguno de los vectores normales cumple los requisitos para que exista movimiento. Se puede concluir que para el caso del Talud 1 no existe peligro.

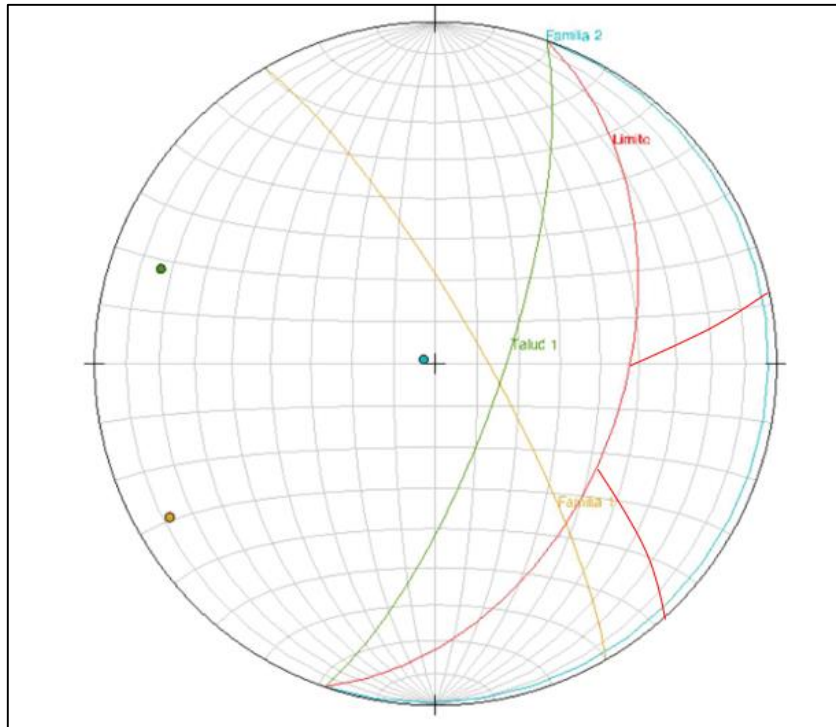


Figura 27. Análisis de Toppling para el Talud 1

Para el caso de Toppling, en la figura 28 se puede ver que ninguno de los vectores normales cumple los requisitos para que exista movimiento. Se puede concluir que para el caso del Talud 2 no existe peligro y que la familia 2 es la más propensa a causarlo.

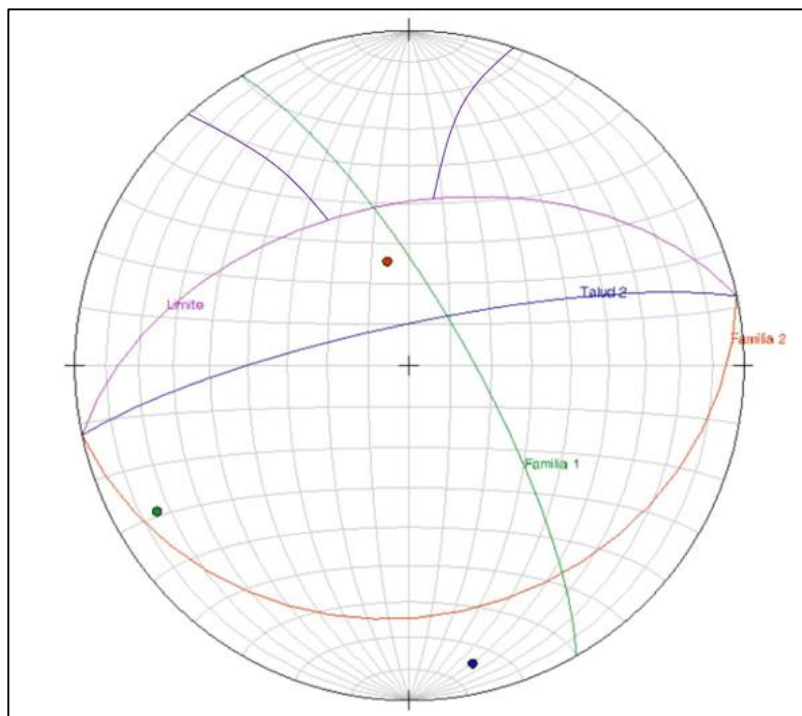


Figura 28. Análisis de Toppling para el Talud 2

4.5.6. Cálculo del SMR

Si bien mediante Markland se probó que no existe riesgo actual a fallas, se realizó un análisis de cómo la presencia de falla plana o Toppling afecta a la condición del macizo. Se calculó los SMR para los casos más probables de falla como se indica en la tabla 32:

Tabla 32. Ángulos de discontinuidades para el cálculo de SMR

Ángulos	Talud 1	Talud 2
α_s (°)	109	348
β_s (°)	74	80
Falla Plana		
Familia	1	1
α_j (°)	60	60
β_j (°)	79	76
Toppling		
Familia	2	2
α_j (°)	109	168
β_j (°)	3	26

Aplicando las ecuaciones 11 – 15 para la obtención de las variables A, B y C, usadas en el cálculo de los factores para castigar al macizo en función de las discontinuidades se encuentran las variables como se indica en la tabla 33:

Tabla 33. Variables para el cálculo de factores de corrección del SMR

Factor	Talud 1		Talud 2	
	Plana	Toppling	Plana	Toppling
A (°)	49	180	288	360
B (°)	79	3	76	26
C (°)	5	77	-4	106

El factor $F_4 = 0$ ya que no se realizó excavación

Los factores restantes fueron calculados como se indica en la tabla 34, en función de las ecuaciones 6 - 10:

Tabla 34. Cálculo del SMR

Factor	Talud 1		Talud 2	
	Plana	Toppling	Plana	Toppling
F1	0.204	0.121	0.112	0.110
F2	0.136	1	0.138	1
F3	-3.76	-25.66	-55	-25.27
F corrección	-0.104	-3.105	-0.85	-2.78
SMR	59.9	57	54.15	52

En función de la tabla 5, se concluye que, los macizos corresponden a una clase III, parcialmente estables y con una posibilidad de falla de 0.4. Esto está en concordancia con lo obtenido en el análisis RMR.

Se concluye del análisis que los taludes de roca no son susceptibles a ningún tipo de falla (Plana o Toppling), hecho que se ha reflejado en la realidad al no existir movimientos de masa ni caídas de bloques en este tramo. Adicionalmente, esto permite modificar la valoración de la información litológica, reduciendo la susceptibilidad en las zonas de los afloramientos.

4.6. Vuelos de drones

Se realizaron 2 vuelos en las abscisas 2+641 y 2+080 hacia la corona de la montaña siguiendo las quebradas. El objetivo principal fue verificar las condiciones de las quebradas, así como, verificar condiciones litológicas. En la figura 29 se observan los vuelos realizados en dichas abscisas.



Figura 29. Vuelos de drones

Se observó que, respecto a la cobertura vegetal, no existe una variación significativa con la información recopilada. Se observó afloramientos rocosos en las partes altas, lo que permitió modificar la información litológica, diferenciando entre macizo rocoso y suelo, para cada formación.

En las quebradas, no se observó erosión ni material que sea susceptible a movimiento en periodos de crecida, su cobertura se encontró inalterada. En base a lo anotado, no se identificó susceptibilidad debido al arrastre de material en las quebradas.

4.7. Mapas base

4.7.1. Mapa de pendientes

En la figura 30 se observa el mapa de pendientes reclasificado según los rangos propuestos por Mora-Vahrson en la Tabla 7.

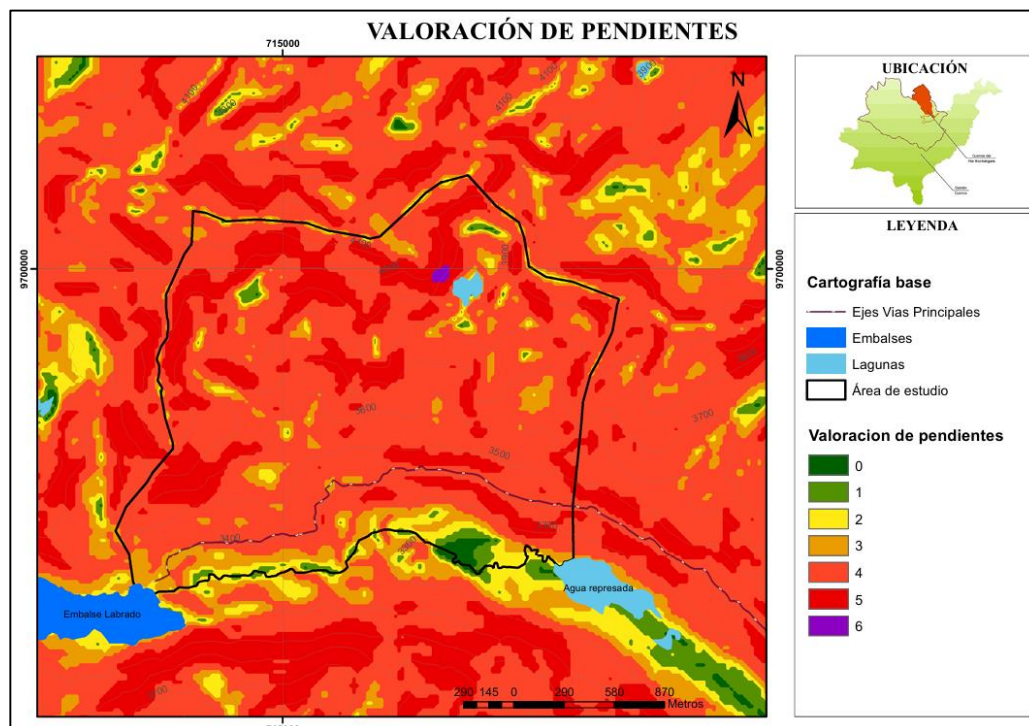


Figura 30. Mapa de pendientes

En su mayoría las pendientes se encuentran dentro del rango 4, es decir, pendientes fuertes con porcentajes de 30 – 70%. En ciertas zonas del kilómetro final del tramo de estudio, la pendiente alcanza un nivel de 5 (70 – 140%), mientras que, solo una pequeña área presenta una pendiente sumamente alta con una valoración de 6 (> 140%), situada en la parte superior de las montañas. En cuanto al valle, ubicado alrededor del río, se observa un cambio de color que indica un descenso de la pendiente, hasta llegar a zonas planas de color verde.

4.7.2. Mapa litológico

Basado en los resultados de la exploración en campo y a los vuelos realizados, se identificó presencia de afloramientos rocosos, con esta información se modificó el mapa litológico tomando en cuenta las características de los macizos, los mismos que resultaron ser competentes.

En la figura 31 se ilustra el mapa litológico, donde se identificó dos formaciones, la formación Célica y la formación Tarqui, ambas con presencia de afloramientos rocosos. Adicionalmente, se observó la presencia de tilitas en el valle cercano al río. Las ponderaciones de cada uno fueron expuestas en la Tabla 15.

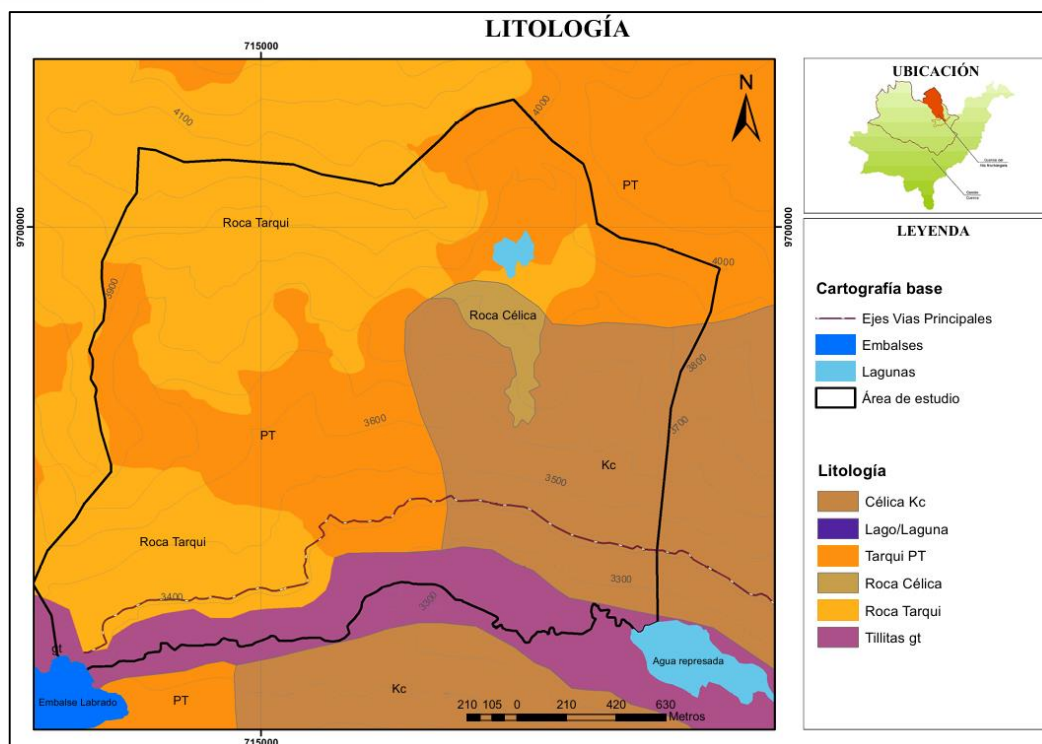


Figura 31. Mapa litológico

4.7.3. Mapa de humedades

Se adaptó la metodología Mora-Vahrson a las condiciones locales utilizando el método de Thornthwaite (1948) para estimar la evapotranspiración potencial mensual, tal como se indicó en la metodología. El resultado fue un valor acumulado de índice de precipitación de 18, con una clasificación de susceptibilidad alta según Mora-Vahrson, la valoración correspondiente es 4 para toda la zona de estudio, ya que todo el sitio se encuentra dentro del área de influencia de la estación pluviométrica El Labrado.

4.7.4. Mapa de cobertura vegetal

En la figura 32 se observa que, en su mayoría, la zona de estudio está cubierta por páramo herbáceo y páramo arbustivo con diferentes grados de alteración. Los vuelos de dron y las ortofotos provenientes del SIGTIERRAS permitieron actualizar información digital para ciertas zonas en donde se encontró macizos rocosos. En el valle cercano al río, se observa presencia de pasto cultivado. Las valoraciones de las diferentes coberturas fueron especificadas en la Tabla 19.

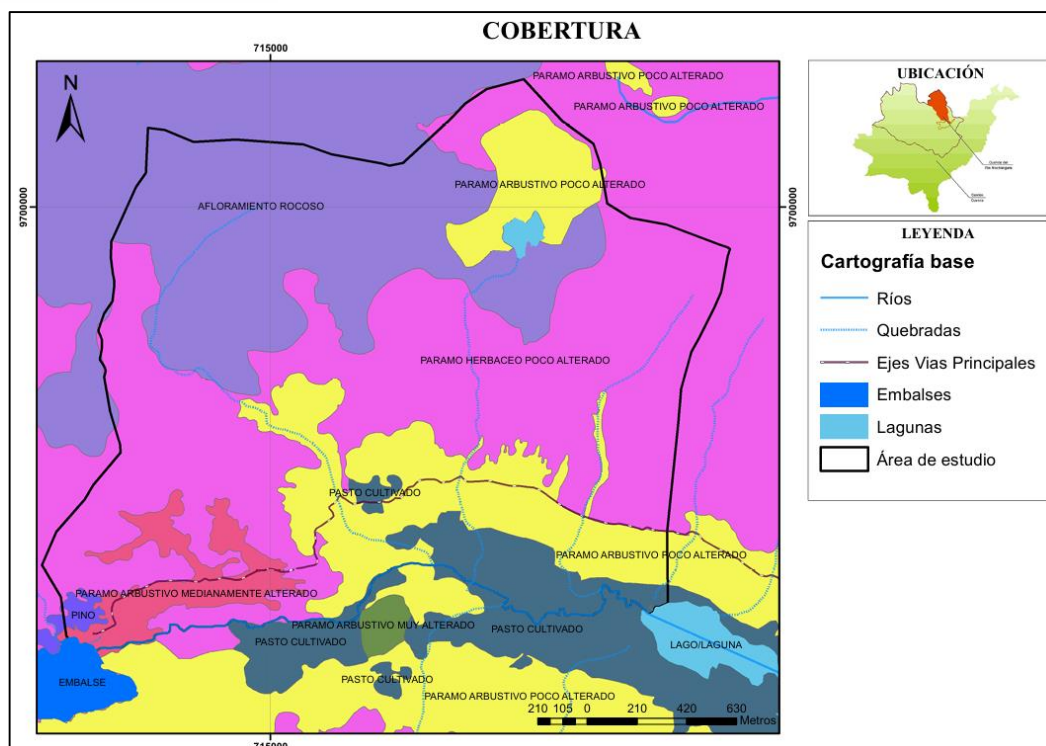


Figura 32. Mapa de cobertura vegetal

4.7.5. Factores detonantes

4.7.5.1 Intensidad sísmica

Para la intensidad sísmica, toda el área de estudio se encuentra ubicada en una zona de igual sismicidad según el mapa de aceleraciones sísmicas del IGEPN, con un porcentaje de la gravedad entre 0.25 y 0.35. La NEC-SE-DS clasifica esta aceleración como fuerte y Mora-Vahrson le da una valoración de 7 según la Tabla 20.

4.7.5.2. Intensidad de lluvias

Para la intensidad de lluvia, al igual que el mapa de humedades, adquiere una sola valoración debido a que todo el sitio de estudio se encuentra dentro del área de influencia de la estación pluviométrica El Labrado. Mediante la teoría de Gumbel (1945) se obtuvo una precipitación máxima de 61.62 mm, caracterizando la susceptibilidad como baja, el valor asignado a toda el área de estudio fue de 1, según la Tabla 11.

4.8. Mapas por Mora-Vahrson

4.8.1. Mora-Vahrson original

Se obtuvo el mapa de susceptibilidad utilizando la metodología Mora-Vahrson original, indicado en la figura 33. En su mayoría la zona que abarca desde la carretera hacia la corona de las montañas y hacia el río se categoriza como susceptibilidad mediana, lo cual es correcto considerando las altas pendientes y la humedad general del terreno. Sin embargo, en la zona de valle donde se encuentra el cauce del río Chulco, se obtiene una calificación de

susceptibilidad mediana, hecho que es incorrecto tomando en cuenta que las pendientes son bajas y en campo no se evidencia problemas relacionados al arrastre de material. La zona identificada como moderada, tiene una menor susceptibilidad, debido a la presencia de afloramientos rocosos.

En la tabla 35 se indican las áreas correspondientes a cada rango de susceptibilidad.

Tabla 35. Áreas y su nivel de susceptibilidad Mora-Vahrson

Nivel de susceptibilidad	Área (Ha)
Muy bajo	2.99
Bajo	1.67
Moderado	190.60
Mediano	289.42
Alto	0.57
Muy alto	0.00

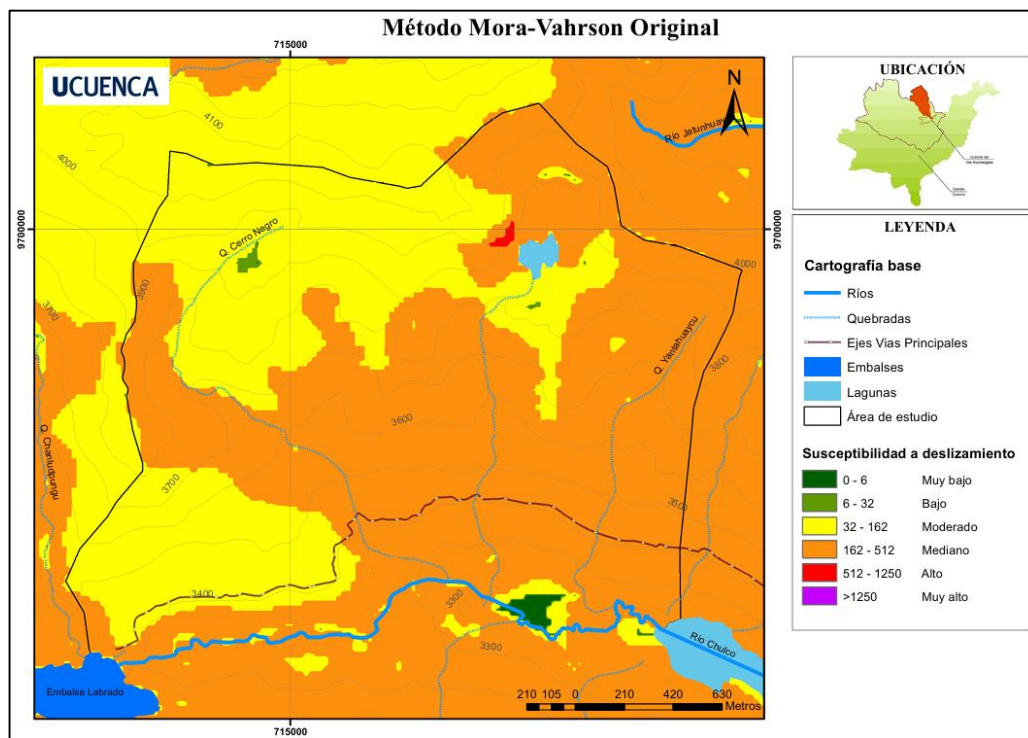


Figura 33. Mapa Mora-Vahrson original

Adicionalmente, al identificar la mayor parte del área de estudio en una misma categoría la metodología no proporciona mayor información, por lo tanto, se considera que un estudio utilizando el efecto de nuevas variables es necesario.

4.8.2. Mora-Vahrson modificado, considerando cobertura vegetal

Con el objetivo de incorporar el efecto de la cobertura vegetal, se incluyó la capa de cobertura obteniéndose un mapa como se ilustra en la figura 34. Los rangos fueron elaborados en base a la ecuación 34 que indica la nueva ponderación del método Mora-Vahrson incluyendo la capa adicional.

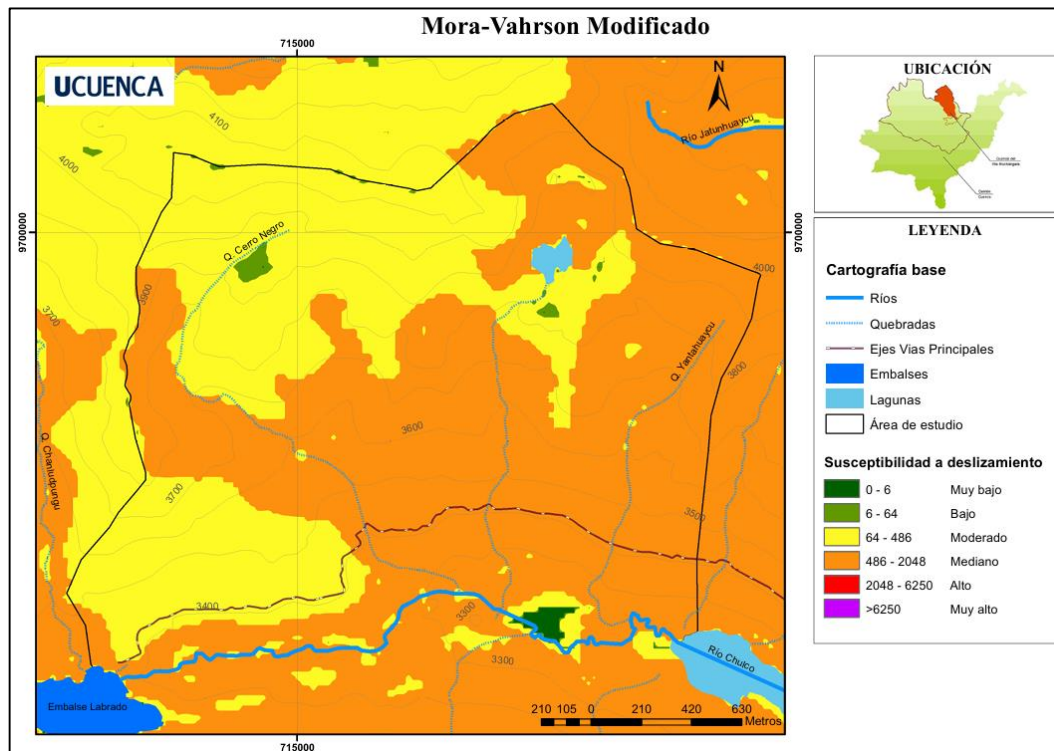


Figura 34. Mapa de Mora-Vahrson tomando en cuenta la cobertura vegetal

No se identifica una gran influencia de la cobertura vegetal en la reducción de la susceptibilidad en comparación con la metodología original. Con los nuevos rangos obtenidos, tomando en cuenta la metodología Mora-Vahrson, se observa que solo pequeñas áreas cambian su coloración, es decir, que bajan su nivel de susceptibilidad. En el valle se sigue evidenciando un nivel de susceptibilidad moderado que no corresponde con lo observado en campo. En la tabla 36 se indican las áreas correspondientes a cada rango de susceptibilidad.

Tabla 36. Áreas y su nivel de susceptibilidad Mora-Vahrson modificado

Nivel de susceptibilidad	Área (Ha)
Muy bajo	2.99
Bajo	3.57
Moderado	190.29
Mediano	288.41
Alto	0
Muy alto	0

Si bien la cobertura vegetal puede ayudar a mantener estable una porción de terreno, no es un parámetro fundamental al momento de analizar la susceptibilidad en nuestra zona de estudio, ya que gran en gran parte de la misma, se identificó afloramientos rocosos. Además, la metodología considera dentro del mismo rango a todos los parámetros intrínsecos del terreno, y la susceptibilidad está más influenciada por parámetros como la pendiente y los materiales presentes en el terreno.

4.8.3. Comparación para periodos húmedos y secos Mora-Vahrson

Se realizó un análisis de la variabilidad en la humedad natural del terreno, la figura 35 ilustra el mapa realizado por el método Mora-Vahrson modificado para una humedad del periodo seco, las áreas correspondientes a cada rango se muestran en la tabla 37. Para el rango alto, el valor acumulado del índice de precipitación estuvo entre 20-24, calificándolo como una susceptibilidad muy alta, según la tabla 9, la valoración correspondiente es de 5, mientras que, para el rango bajo el valor acumulado del índice de precipitación estuvo entre 10-14, adoptando una valoración de 3.

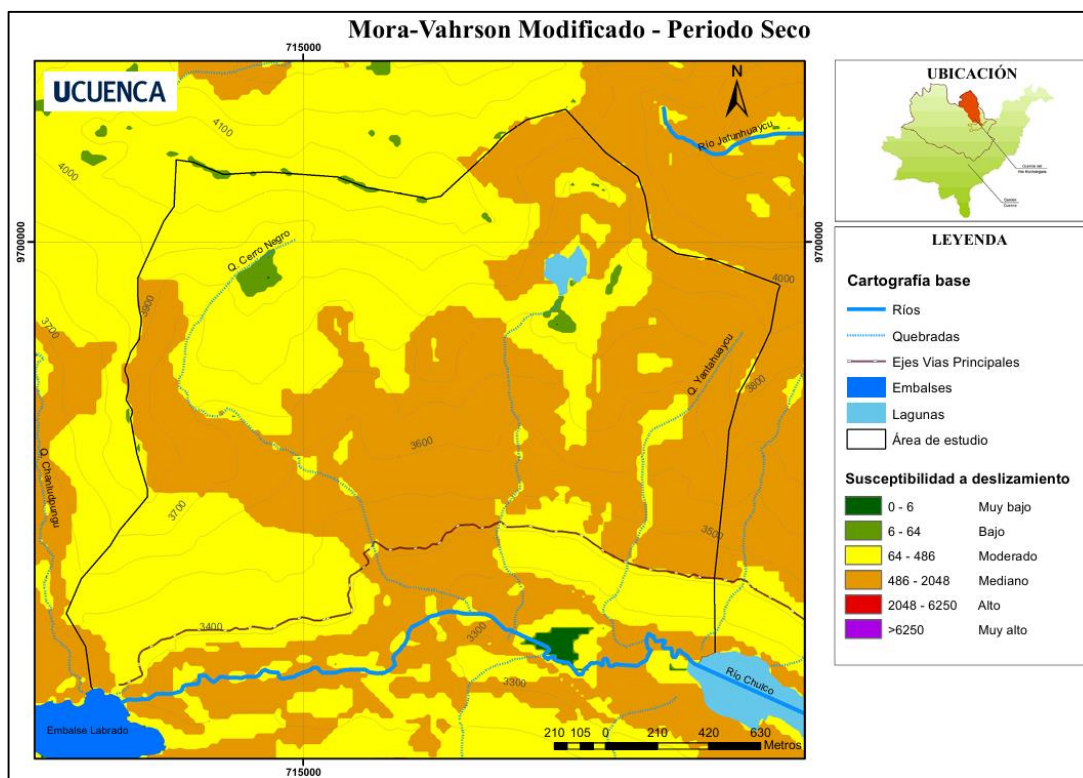


Figura 35. Mapa de Mora-Vahrson para un periodo seco

Tabla 37. Áreas y su nivel de susceptibilidad Mora-Vahrson periodo seco

Nivel de susceptibilidad	Área (Ha)
Muy bajo	2.99
Bajo	3.57
Moderado	230.20
Mediano	248.50
Alto	0
Muy alto	0

La figura 36 ilustra el mapa realizado por el método Mora-Vahrson modificado para un periodo húmedo, las áreas correspondientes a cada rango se muestran en la tabla 38.

Tabla 38. Áreas y su nivel de susceptibilidad Mora-Vahrson periodo húmedo

Nivel de susceptibilidad	Área (Ha)
Muy bajo	2.99
Bajo	1.67
Moderado	181.20
Mediano	299.39
Alto	0
Muy alto	0

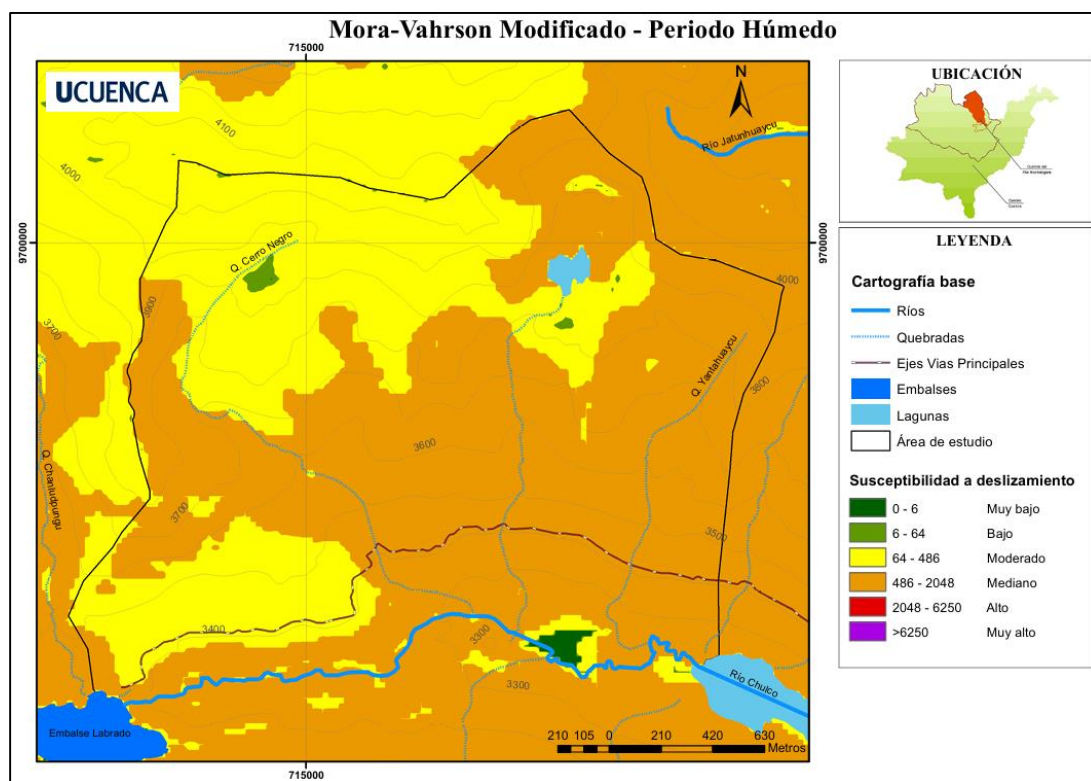


Figura 36. Mapa de Mora-Vahrson para un periodo húmedo

Para un periodo seco, se observa una reducción en la susceptibilidad en gran parte del área de estudio. Mientras que, para un periodo húmedo el mapa se mantiene igual.

4.9. Mapas por Jerarquización Analítica

Se obtuvo la nueva ponderación propuesta por el método de Jerarquización Analítica. Según las ecuaciones 29 y 30 se encuentra la matriz A' y el vector de pesos correspondiente en la tabla 39:

Tabla 39. Pesos de cada una de las variables MJA

A'							W	$A*W$	λ_{max}
	Humedad	Litología	Cobertura	Pendiente	Lluvia	Sismo			
Humedad	0.074	0.043	0.167	0.066	0.083	0.077	0.09	0.54	6.37
Litología	0.222	0.130	0.250	0.165	0.083	0.077	0.15	0.99	6.43
Cobertura	0.037	0.043	0.083	0.165	0.083	0.077	0.08	0.51	6.32
Pendiente	0.370	0.261	0.167	0.330	0.500	0.308	0.32	2.13	6.59
Lluvia	0.148	0.261	0.167	0.110	0.167	0.308	0.19	1.27	6.56
Sismo	0.148	0.261	0.167	0.165	0.083	0.154	0.16	1.06	6.53

$$\lambda_{max} = 6.47$$

Se calculó el índice de consistencia (IC) según la ecuación 32 y la razón de inconsistencia (RI) según la ecuación 31, con un valor de CA de 1.24 según la Tabla 12. Se obtuvo un valor menor a 10%, por lo tanto, se concluye que la matriz es consistente con los pesos asignados a cada variable.

$$IC = \frac{6.47 - 6}{6 - 1} = 0.0934$$

$$IR = \frac{0.0934}{1.24} = 0.075$$

Los valores obtenidos en el vector W corresponden a los porcentajes por los que se debe multiplicar cada capa, por lo que en el software ArcGIS se ingresó la ecuación 35:

$$Susc = 0.09 * H + 0.15 * L + 0.08 * Cv + 0.32 * Rr + 0.19 * Ll + 0.16 * S \quad (35)$$

4.9.1. Método de Jerarquización Analítica

Con la ayuda del método de Jerarquización Analítica, se obtuvo nuevos pesos para cada una de las capas y se generó un nuevo mapa, como se ilustra en la figura 37. Los rangos para la susceptibilidad fueron puestos en concordancia con los otros tramos de análisis, con el objetivo de tener una referencia general.

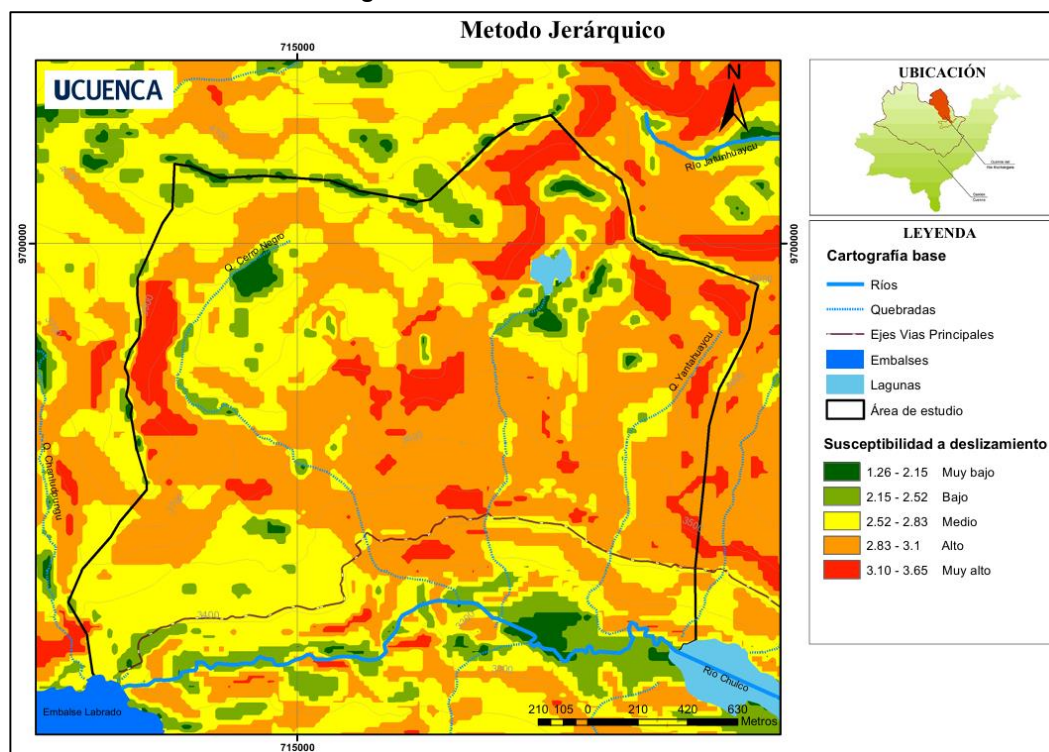


Figura 37. Mapa de susceptibilidad MJA

La metodología permitió identificar que parámetros son más influyentes con respecto a otros; en este caso, el factor de pendientes resultó el más importante. Las áreas correspondientes a cada rango de susceptibilidad se indican en la tabla 40.

Tabla 40. Áreas y su susceptibilidad, MJA

Nivel de susceptibilidad	Área (Ha)
Muy bajo	8.68
Bajo	32.28
Medio	155.85
Alto	244.13
Muy alto	44.32

En su mayoría, la zona se caracteriza como una alta susceptibilidad de color tomate, especialmente en las zonas donde existe suelo y altas pendientes. Por otro lado, la zona amarilla, caracterizada como susceptibilidad media, se debe al cambio de la litología. En estos sitios afloramientos rocosos fueron identificados, dando un mayor grado de estabilidad al terreno.

En la zona de valle la susceptibilidad es de baja a muy baja, lo cual es adecuado considerando lo revisado en campo: se trata de una zona plana y no han ocurrido movimientos de material previos.

Se identifica rangos muy altos de susceptibilidad en las partes altas de las montañas, debido a las pendientes casi verticales correspondiente a los macizos rocosos que afloran, mismos que como se determinó con el análisis de SMR son rocas competentes. Esto, sumado al hecho de que están rodeadas de zonas más estables, no generan un peligro inminente para la conducción. En el caso de un evento sísmico, se debería ahondar en un estudio tomando en cuenta fuerzas de empuje lateral sobre el macizo rocoso.

Finalmente, existe una zona alrededor del canal y de la vía, ubicada en el tramo entre los puntos muestreados, que se caracteriza de color rojo o susceptibilidad muy alta debido a las pendientes del terreno entre un rango de 70% a 140%. En el punto S6 se observó, durante la visita en campo, la existencia de un deslizamiento pequeño; sin embargo, en ninguna parte de dicho tramo, han existido problemas significativos de movimiento de masa.

4.9.2. Comparación para periodos húmedos y secos MJA

Para analizar el efecto de la humedad dentro de esta metodología, se realizó un análisis similar al de Mora-Vahrson. A continuación, en la tabla 41 se indica las áreas de los niveles de susceptibilidad para el periodo seco, mismas que se ilustran en la figura 38.

Tabla 41. Áreas y su susceptibilidad, MJA periodo seco

Nivel de susceptibilidad	Área (Ha)
Muy bajo	22.18
Bajo	97.68
Medio	227.95
Alto	103.63
Muy alto	33.82

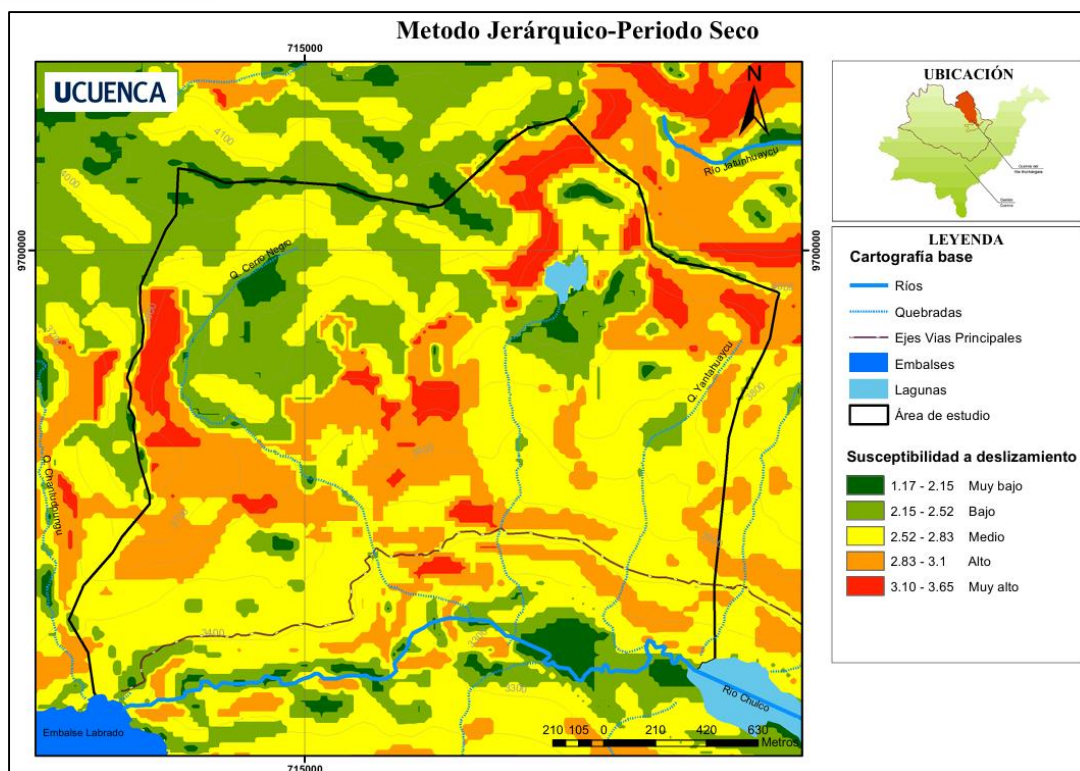


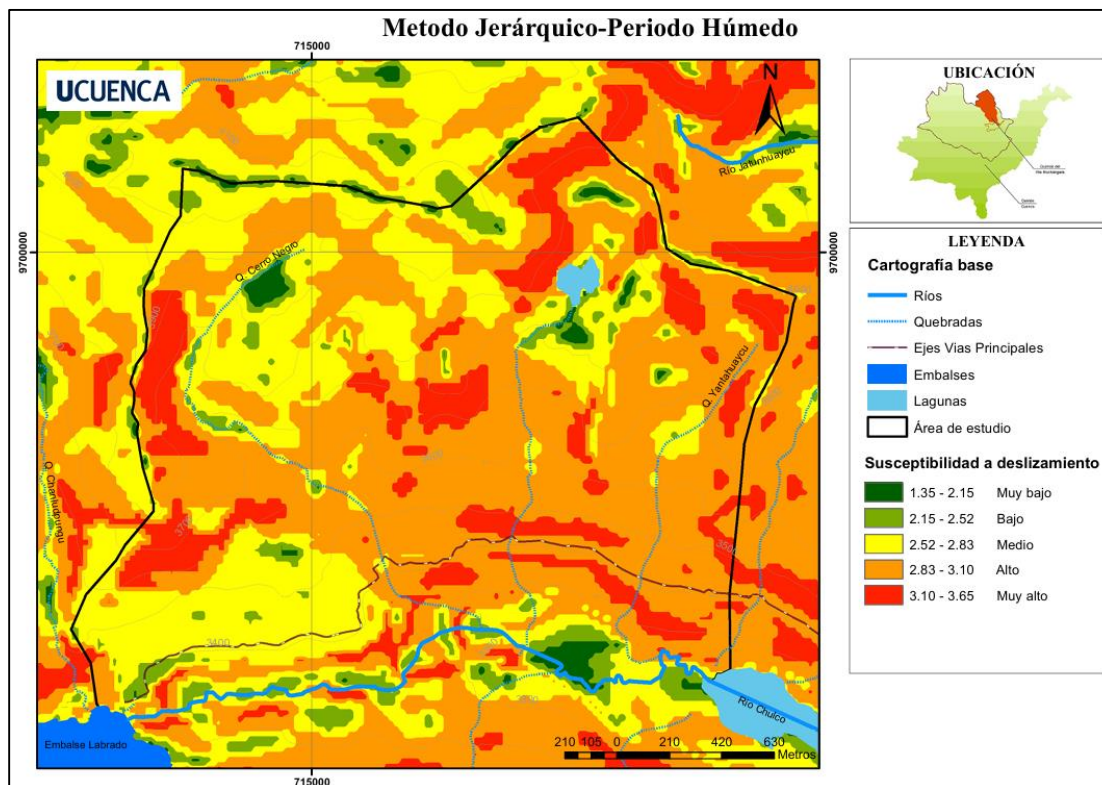
Figura 38. Mapa de susceptibilidad MJA periodo seco

Se observa que la humedad influencia considerablemente. En el caso del periodo seco, existe un descenso de susceptibilidad en la mayoría de zonas bajando un nivel de peligro respecto a los resultados obtenidos para una humedad media.

Por otro lado, en la tabla 42 se indica las áreas de los niveles de susceptibilidad para el periodo húmedo, que se ilustran en la figura 39. Se observa que algunas zonas, especialmente en cercanía a la conducción, aumentan su susceptibilidad, en relación a los resultados obtenidos para una humedad media.

Tabla 42. Áreas y su susceptibilidad, MJA periodo húmedo

Nivel de susceptibilidad	Área (Ha)
Muy bajo	7.58
Bajo	24.03
Medio	140.10
Alto	244.44
Muy alto	69.10



En los mapas obtenidos con ambas metodologías, se observa una notoria diferencia. En el caso de Mora-Vahrson, al ser un método aplicado en áreas más grandes, no se puede apreciar una clara zonificación del área de estudio, ya que todos los parámetros tienen la misma influencia dentro de la ponderación. Mientras que, mediante el método de Jerarquización Analítica y según literatura revisada, se pudo establecer pesos a las variables y, por ende, zonificar de mejor manera los niveles de susceptibilidad, generando mapas más próximos a la realidad, que captura detalles como la fuerte influencia de la variabilidad de las pendientes.

Capítulo V Conclusiones

La recopilación de la información se realizó de manera digital, gracias a instituciones como ELECAUSTRO, SENAGUA, entre otras, que proporcionaron datos en forma de capas de información geográfica y estudios previos. Además, se realizó visitas de campo para complementar y validar estos datos.

Durante la exploración en campo se identificaron dos secciones a lo largo de la conducción. El tramo final, que va desde la abscisa 1+300 hasta la abscisa 3+000 en donde aflora suelo, está compuesto principalmente por suelos que, la SUCS los caracteriza como SM y GM, resultados que concuerdan con la literatura revisada.

Se llevó a cabo una exploración geofísica utilizando el ensayo de refracción sísmica en el punto S3, revelando capas superficiales de arena y materiales finos hasta los 8 metros de profundidad, seguidas de capas de gravas o arenas arcillosas.

En el tramo inicial, comprendido entre las abscisas 0+000 y 1+300, se identificó la presencia de afloramientos rocosos. Se utilizó el índice RMR para caracterizar dos macizos: el talud 1, indicado en la figura 24, obtuvo un valor de 60 y el talud 2 de 55, ambos clasificados dentro de la clase III como roca de calidad media. Según el análisis por la teoría de Markland se determinó que ninguno de los dos macizos presenta probabilidad de falla plana o Toppling. Además, el SMR analizado, para casos de que, si exista posibilidad de falla, estuvo entre 52-60, dentro de la clase III, caracterizándolos como roca de calidad media. Estos resultados llevaron a ajustar la valoración de la capa litológica disminuyendo la susceptibilidad en los afloramientos rocosos.

Los vuelos de drones facilitaron la identificación de afloramientos rocosos en la zona alta, lo cual, permitió ajustar la capa de información litológica, delimitando las zonas donde se los encontró y reduciendo su influencia en el parámetro litológico. Además, en base a los mismos, se concluyó que no existe una variación significativa en la cobertura vegetal en comparación con la información digital recopilada.

En cuanto a las quebradas, en base a las ortofotos y a los vuelos realizados con la ayuda de drones, se determinó que no existe erosión o posibilidad de arrastre de material.

Dado que la metodología Mora-Vahrson está diseñada para aplicarse en áreas extensas, los mapas generados clasifican de manera muy general la zona de estudio. Los niveles de susceptibilidad encontrados se agrupan en solo dos rangos: mediano y moderado, lo que dificulta realizar una zonificación más precisa y valora de manera errónea zonas como el valle

cercano al río Chulco, que, si bien, no posee pendientes altas se encuentran clasificado como susceptibilidad mediana.

Con el objetivo de mejorar la aproximación a las condiciones reales, se decidió incluir información sobre la cobertura vegetal. Sin embargo, la zonificación resultante fue similar a la obtenida con la metodología original, lo que sugiere que en este caso la cobertura no influye de manera considerable en la susceptibilidad.

Un análisis más detallado, mediante el método de Jerarquización Analítica, permitió identificar el grado de influencia de las variables en la susceptibilidad, destacando que las pendientes fueron la variable con mayor peso (32%) seguida por la intensidad de lluvia (19%), sismo (16%), litología (15%), humedad (9%) y cobertura vegetal (8%).

El nuevo mapa, elaborado con las ponderaciones actualizadas de las variables y considerando los rangos de referencia en concordancia con otros tramos analizados, indica que la mayoría de la zona de estudio presenta media o alta susceptibilidad.

En zonas como el valle del río Chulco se aprecia susceptibilidad baja, acorde con lo observado en campo: es una zona plana y no han existido movimientos de masa previos. Adicionalmente, en los alrededores del canal se observan entre zonas con susceptibilidad media, alta y muy alta. En campo, en cercanía a las zonas de muy alta susceptibilidad, se encontró un pequeño deslizamiento de material. Las áreas de susceptibilidad media corresponden a los afloramientos rocosos caracterizados como estables. Por lo que, se concluye que el método de Jerarquización Analítica representa una mejor aproximación a la realidad que la metodología Mora-Vahrson.

Finalmente, se observó que la humedad tiene un efecto significativo en la susceptibilidad. La valoración promedio del mapa de humedades fue de 4 (Clasificación alta a susceptibilidad según el parámetro humedad), mientras que durante los meses secos fue de 3 (Media) y durante los meses húmedos de 5 (Muy alta). Se concluyó que durante el periodo seco los niveles de susceptibilidad de toda la zona disminuyen, mientras que para el periodo húmedo ciertas zonas aumentan sus niveles, como era de esperarse.

Aunque no se han registrado eventos de deslizamientos previos en el tramo de la conducción analizado, es recomendable mantener un control constante sobre la humedad del suelo. Adicionalmente, eventos sísmicos podrían generar fuerzas externas causando posibles fallas a Toppling, además, una mayor meteorización de la roca podría reducir su calidad, aumentando la probabilidad de fallas.

Referencias

- Alvarez, F. (S/F). *Estudios de estabilización del talud ubicado entre abscisas 9+140 – 9+240 de la vía Chanlud Tuñi* (p. 49). ELECAUSTRO.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique Des Roches*, 6(4), 189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
- Basabe, R. P. (1998). *Proyecto PRECUPA - Prevención de de Desastres Naturales en la Cuenca del Paute* (pp. 1–153) [Geología y Geotecnia].
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley.
- Bojorque, J., & Villavicencio, P. (2023). *Proyecto de consultoría: Diseño de muros de confinamiento en la vía Labrado-Tuñi* (p. 42). ELECAUSTRO.
- Casagrande, A. (1948). Classification and Identification of Soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113, 901–930.
- Corominas, J. (1997). *Tipos de rotura en laderas y taludes*.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología subterránea*. (Segunda). Ed. Omega.
- D18 Committee ASTM. (2014). *Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5873-13>
- D18 Committee ASTM. (2017). *Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R98>
- D18 Committee ASTM. (2018). *Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
- D18 Committee ASTM. (2019). *Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2216-19>
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4a ed.). CENGAGE Learning.
- Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., & Cording, E. J. (1966). *Design Of Surface And Near-Surface Construction In Rock*.
- Duque, G. (2022). *Manual de geología- Cap 12. Macizo Rocoso*. (pp. 446–478).
- Elecaustro. (2023). *Contrato de emergencia del procedimiento Nro. EM-EEGA-001-2023, para la "Estabilización emergente de la vía Labrado-Tuñi del km 5+500 al km 5+750*. ELECAUSTRO.
- ESRI. (2021). *¿Qué es un shapefile?*
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics* (2nd ed). Wiley.

- Goodman, R. E., & Bray, J. W. (1997). Toppling of Rock Slopes. *Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*, 2, 201–234.
- Gumbel, E. J. (1941). The Return Period of Flood Flows. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(2), 163–190. JSTOR.
- Gumbel, E. J. (1945). Floods estimated by the probability method. *Engineering News Record*, 134, 833–837.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(9), 1013–1035. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001029>
- IGM. (2024). *Mosaico geopedológico* [Map]. <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>
- INIGEMM. (2013). *Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Ecuador*.
- INSTITUTO GEOFÍSICO DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. (2024). *Mapa de peligro sísmico, periodo de retorno 475 años*. <https://www.igepn.edu.ec/>
- Markland, J. T. (1972). A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected: *Imperial College Rock Mechanics Research*.
- Mora, S., & Vahrson, W.-G. (1992). *Determinación “a priori” de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos*. PRIMER SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE SENSORES REMOTOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) PARA EL ESTUDIO DE RIESGOS NATURALES.
- NEC-SE-DS. (2015). *Peligro Sísmico, Diseño Sismo Resistente*.
- NEC-SE-GC. (2015). *Geotécnia y Cimentaciones*.
- Romana, M. (1985). New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. *International Symposium on the Role of Rock Mechanics*, 49–53.
- Saaty, T. L. (1981). *The Analytic Hierarchy Process*. McGrawHil.
- Sánchez, G. de la. (2003). Jerarquización Analítica. En *Técnicas participativas para la planeación: Procesos breves de intervención* (pp. 167–177). Fundación ICA.
- Saria, F. (s/f). *Sistemas de información geográfica*.
- SNGR. (2019). *Análisis de amenaza ante movimientos en masa*.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Tomás, R., Delgado, J., & Serón, J. B. (2007). Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(7), 1062–1069. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.02.004>

- US Army Corps of Engineers. (1995). *Geophysical exploration for engineering and environmental investigations*.
- USGS. (2004). Landslide Types and Processes. *Science for a changing world*.
<https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>
- Vahrson, W. G., & Dercksen, P. (1990). Intensidades críticas de lluvia para el diseño de obras de conservación de suelos en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 14(2), 141–150.
- Vahrson, W.-G., Cervantes, C., Arauz, I., Chacón, R., Alfaro, M., Palacios, G., & Hernando, L. (1990). Aspectos climatológicos relacionados con la morfodinámica externa en la zona de Puriscal, Costa Rica. 1(2), 51–56.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. En *LANDSLIDES Analysis and Control* (pp. 12–33). National Academy of Sciences.
- Zuidam, R. A. van. (1986). *Aerial photo interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits.