



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA
VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR**

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

AUTORES: CRISTOPHER HERNAN LOJA LEON

LUIS ARMANDO CHIMBO AREVALO

TUTOR: ING. VICENTE MAURICIO IÑIGUEZ MORÁN, PhD.

Cuenca - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Christopher Hernan Loja Leon con documento de identificación N° 0107113078 y Luis Armando Chimbo Arevalo con documento de identificación N° 0302174750; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 30 de enero del 2024

Atentamente,



Cristopher Hernan Loja Leon

0107113078



Luis Armando Chimbo Arevalo

0302174750

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Cristopher Hernan Loja Leon con documento de identificación N° 0107113078 y Luis Armando Chimbo Arevalo con documento de identificación N° 0302174750, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Evaluación y mapeo de susceptibilidad a deslizamientos para una vía de segundo orden en los Andes del sur del Ecuador”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

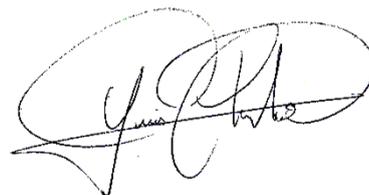
Cuenca, 30 de enero del 2024

Atentamente,



Cristopher Hernan Loja Leon

0107113078



Luis Armando Chimbo Arevalo

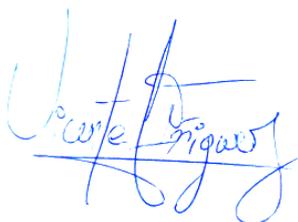
0302174750

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Vicente Mauricio Iñiguez Morán con documento de identificación N° 0102687191, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR realizado por Cristopher Hernan Loja Leon con documento de identificación N° 0107113078 y por Luis Armando Chimbo Arevalo con documento de identificación N° 0302174750, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 30 de enero del 2024

Atentamente,



Ing. Vicente Mauricio Iñiguez Morán, PhD.

0102687191

I. DEDICATORIA

Luis,

El presente trabajo de titulación resultado de grandes sacrificios y esfuerzos durante todos estos años, se la dedico en primer lugar a **Dios**, por haberme brindado todo el conocimiento y la sabiduría en cada paso de mi desarrollo profesional.

A mis padres **Sergio y Rosa** por todo el apoyo incondicional, que a pesar de momentos difíciles nunca rendirse y brindarme su amor y comprensión.

A mis hermanos **Carlos y Mateo** por apoyarme de todas las formas posibles, por ser más que hermanos, verdaderos amigos que han depositado su confianza y nunca han dejado de creer en mí.

A toda mi familia y demás personas que han estado en mis momentos difíciles y brindar su luz de esperanza.

Cristopher,

Quiero dedicar esta tesis a mis padres **Jorge y Soraida** que me han apoyado desde el principio en este camino largo, donde he pasado por muchos momentos complicados y ellos han sabido cómo ayudarme para no rendirme y poder cumplir esta meta que también es de ellos.

También a mis **abuelitos**, y al resto de mi familia, que siempre han confiado en mí y no me han dejado solo en este proceso.

Finalmente, a mi **Coddy**, mi gordito como le decía de cariño, que siempre me alegraba el día y fue un compañero fiel de largas madrugadas de deberes.

II. AGRADECIMIENTOS

Luis y Cristopher

Agradecemos infinitamente a **Dios** por darnos una familia que nos han apoyado con todas sus fuerzas y creer en nuestras capacidades para el logro de nuestros objetivos.

Nuestro agradecimiento sincero a nuestro Tutor **Ing. Vicente Iñiguez** por impulsar de manera activa el desarrollo de este trabajo y brindar su apoyo en todos los aspectos.

Finalmente, agradecemos a todos aquellos compañeros y profesores que han sido parte de esta etapa de nuestras vidas, por su amistad y apoyo.

III. RESUMEN

El presente estudio se enfoca en el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos en una microcuenca localizada en los Andes del sur del Ecuador. Con el fin de evaluar esta problemática, se plantearon tres objetivos específicos los mismos que se ejecutaron por medio de paquetes de trabajo. Estos fueron: recopilación de información de una cuenca hidrográfica en páramos afectada por una vía de segundo orden y, también, por ende, por actividades antrópicas. Posteriormente, se enfocó en la elaboración de un mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca de estudio, utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Por último, se realizó la caracterización mecánica de los suelos existentes en la zona de estudio y el modelamiento de taludes en distintos escenarios.

Mediante el procedimiento de análisis se seleccionó un segmento de vía de segundo orden para evaluar algunos parámetros, identificando factores críticos como la cobertura vegetal, la topografía escarpada y la influencia de actividades antrópicas. Posteriormente, se realizó un proceso de jerarquización para identificar las variables clave dentro del estudio, lo que permitió la reclasificación de las capas ráster y la creación del "Mapa de susceptibilidad a deslizamientos". La susceptibilidad cuya categoría calificada como "Muy alta" representa el 0.67 % del área de la microcuenca y corresponde principalmente a la zona de influencia de la vía de segundo orden. Por otro lado, se realizó el modelamiento de taludes con diferentes escenarios. Con la evaluación del factor de seguridad se determinó un factor de 1.21 (ángulo de 80°) antes del deslizamiento confirmando la inestabilidad del talud; en otro escenario, se realizó la estabilización que se debía ejecutar, modificando su geometría, y se obtuvo un factor de seguridad de 1.5 (ángulo de 60°) cumpliendo con el valor mínimo establecido en las normas.

El estudio concluye que el alterar el uso de suelo en zonas de recarga hídrica, como son los páramos, tiene un efecto desencadenante, que juntamente con los demás factores, provocan zonas susceptibles e incluso eventos de deslizamientos de tierra.

PALABRAS CLAVE:

Susceptibilidad a deslizamientos, Andes del Sur del Ecuador, Microcuenca hidrográfica, Actividades antrópicas, Mapa de susceptibilidad, Proceso Analítico Jerárquico (AHP), Sistema de Información Geográfica (SIG), Caracterización mecánica de suelos, Modelamiento de taludes y Factor de seguridad.

ABSTRACT

The present study focuses on the analysis of landslide susceptibility in a micro-watershed located in the Andes of southern Ecuador. In order to evaluate this problem, three specific objectives were proposed and implemented by means of work packages. These were: gathering information from a watershed in moorlands affected by a second order road and, therefore, also by anthropogenic activities. Subsequently, we focused on the elaboration of a landslide susceptibility map of the micro-watershed under study, using the Analytical Hierarchical Process (AHP) in a Geographic Information System (GIS). Finally, the mechanical characterization of the existing soils in the study area and the modeling of slopes in different scenarios were carried out.

Through the analysis procedure, a second-order road segment was selected to evaluate some parameters, identifying critical factors such as vegetation cover, steep topography, and the influence of anthropic activities. Subsequently, a hierarchical ranking process was carried out to identify the key variables within the study, which allowed the reclassification of the raster layers and the creation of the "Landslide susceptibility map". The susceptibility whose category qualified as "Very high" represents 0.67% of the micro-watershed area and corresponds mainly to the zone of influence of the second order road. On the other hand, slope modeling was carried out with different scenarios. With the evaluation of the safety factor, a factor of 1.21 (angle of 80°) was determined before the landslide, confirming the instability of the slope; in another scenario, the stabilization to be performed was carried out, modifying its geometry, and a safety factor of 1.5 (angle of 60°) was obtained, complying with the minimum value established in the standards.

The study concludes that altering the use of soil in water recharge areas, such as moorlands, has a triggering effect, which together with the other factors, causes susceptible areas and even landslide events.

KEYWORDS:

Landslide susceptibility, Southern Ecuadorian Andes, Micro watershed, Anthropic activities, Susceptibility map, Analytical Hierarchical Process (AHP), Geographic Information System (GIS), Soil mechanical characterization, Slope modeling and Factor of safety.

IV. ÍNDICE DE CONTENIDOS

I.	CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	1
II.	CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	2
III.	CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	3
IV.	DEDICATORIA	4
V.	AGRADECIMIENTOS	5
VI.	RESUMEN	5
1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	PROBLEMA	14
2.1.	ANTECEDENTES	15
2.1.1.	Deslizamiento de tierra en Gualaceo (1993)	16
2.1.2.	Deslizamiento de tierra en Cuenca (2008)	17
2.1.3.	Deslizamiento de tierra en Girón (2012)	17
2.1.4.	Deslizamiento de tierra en Paute, “La Josefina (1993)”	17
2.2.	IMPORTANCIA Y ALCANCE	18
2.3.	REVISIÓN DE LITERATURA	20
2.3.1.	Susceptibilidad A Deslizamientos	20
2.3.2.	Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	25
2.3.3.	Caracterización De Suelos	26
2.3.4.	Método de Bishop Simplificado.	28
3.	OBJETIVOS	31
3.1.	OBJETIVO GENERAL	31
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
4.	MARCO METODOLÓGICO	32
4.1.	DELIMITACIÓN Y UBICACIÓN	32
4.1.1.	Zona De Estudio	33
4.2.	PAQUETE DE TRABAJO 1	34
4.2.1.	Recopilación De Información Y Selección De La Vía De Segundo Orden.	34
4.2.2.	Recopilación De Información De Parámetros Morfológicos.	39
4.2.3.	Recopilación De Información In Situ	45
4.3.	PAQUETE DE TRABAJO 2	48
4.4.	PAQUETE DE TRABAJO 3	52
4.4.1.	Caracterización De Parámetros Mecánicos	52
4.4.2.	Modelamiento De Estabilidad De Taludes.	67
5.	RESULTADOS	73
5.1.	RESULTADOS: PAQUETE DE TRABAJO 1	73
5.1.1.	Selección de la vía de segundo orden enfocado en parámetros relevantes.	73
5.1.2.	Recopilación De Información Secundaria De Parámetros Morfológicos En La Cuenca	

De Estudio	75
5.1.3. Levantamiento de información relacionada con la caracterización física y mecánica de los suelos.	80
5.2. RESULTADOS: PAQUETE DE TRABAJO 2	82
5.2.1. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca Yutujapina	82
5.3. RESULTADOS: PAQUETE DE TRABAJO 3	89
5.3.1. Caracterización Mecánica De Suelos.	89
5.3.2. Ensayo De Penetración Estándar “SPT” Y Ensayo Triaxial No Consolidado No Drenado “UU”.	91
5.3.3. Modelamiento De La Estabilidad De Taludes De La Vía En Estudio.	95
6. CONCLUSIONES	102
7. RECOMENDACIONES	105
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
9. ANEXOS	117

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Zonas de páramo alteradas. Parte alta de la subcuenca Yutujapina que a su vez es parte de la cuenca del río Cumbe.	14
Ilustración 2. (a) Método de dovelas de Bishop; (b) Esquema de fuerzas actuantes en una de las dovelas.	29
Ilustración 3. Mapa de localización. Parroquia de Cumbe.	32
Ilustración 4. Zona de estudio. Cuenca Yutujapina.	33
Ilustración 5. Mapa de áreas de desarrollo.	35
Ilustración 6. (a) Cuenca alta que describe zonas de páramo y zonas inalteradas de suelo; (b) Topografía escarpada de la cuenca.	36
Ilustración 7. Deslizamiento en la cuenca alta del río Cumbe; (a) 15/04/2009; (b) 11/05/2010	37
Ilustración 8.(a) Eliminación de cobertura vegetal; (b) Creación de canales de riego; (c) Creación de cultivos	38
Ilustración 9. (a) Maquina hidráulica para "SPT"; (b) Ejecución del ensayo "SPT" en la zona de estudio.	46
Ilustración 10. (a) Tubo bipartido; (b) Tubo Shelby.	47
Ilustración 11. (a) Levantamiento del Talud de falla y sus zonas de vía adyacentes; (b) Levantamiento de punto topográfico referencial.	48
Ilustración 12. Diagrama de flujo susceptibilidad a deslizamientos.	50
Ilustración 13. Extracción de los estratos de suelo en laboratorio.	53
Ilustración 14. (a) Muestra con humedad natural; (b) Muestra luego de secada al horno.	55
Ilustración 15. Registro de mediciones de peso y longitudes de las caras.	56
Ilustración 16. Tamices usados para el ensayo y muestra ensayada.	58
Ilustración 17. Curva granulométrica obtenida del 1er estrato.	59
Ilustración 18. (a) Procedimiento de ensayo en la cuchara de Casagrande; (b) Peso de la porción donde se juntaron los canales.	61
Ilustración 19. (a) Procedimiento de rolado de la muestra de suelo; (b) Colocación de la muestra en envase para pesaje.	62
Ilustración 20. (a) Maquina para ensayo "UU"; (b) Extracción de muestra luego del ensayo.	66
Ilustración 21. Talud reconstruido (antes del deslizamiento).	68
Ilustración 22. Talud con las condiciones que sucedieron en el deslizamiento.	68
Ilustración 23. Talud actual (Luego del deslizamiento).	69
Ilustración 24. Talud teórico estabilizado (Modelamiento).	69
Ilustración 25. Designación de caracteres generales para el modelamiento.	70

Ilustración 26. Parámetros mecánicos del suelo.	71
Ilustración 27. Geometría del talud.	71
Ilustración 28. Asignación de nivel freático.	72
Ilustración 29. Modelamiento en ejecución del programa GeoStudio.	72
Ilustración 30. Zona de estudio por la cual atraviesa una vía de segundo orden.	74
Ilustración 31. Mapa de pendientes Yutujapina.	76
Ilustración 32. Mapa Uso de suelo Yutujapina.	77
Ilustración 33. Mapa distancia a los ríos de la red hídrica Yutujapina.	78
Ilustración 34. Mapa raster de precipitaciones anuales estimadas para la microcuenca de Yutujapina.	79
Ilustración 35. Estratos de suelo extraídos en la caja porta-testigos.	80
Ilustración 36. Modelo de elevación digital (Parte alta de la cuenca Yutujapina).	81
Ilustración 37. Descripción de las zonas existentes en el área de estudio.	82
Ilustración 38. Reclasificación de capa ráster "Pendientes".	84
Ilustración 39. Reclasificación de capa ráster "Uso de suelo".	85
Ilustración 40. Reclasificación de capa ráster "Distancia a los ríos".	86
Ilustración 41. Reclasificación de capa ráster "Mapa temático de precipitaciones".	87
Ilustración 42. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de la cuenca Yutujapina.	88
Ilustración 43. Curva granulométrica de los 6 estratos.	90
Ilustración 44. Envolvente de Morh y valores de Cohesión y Angulo de fricción.	93
Ilustración 45. Mapa de susceptibilidad de la vía de segundo orden.	95
Ilustración 46. Talud antes del deslizamiento.	96
Ilustración 47. Talud (antes del deslizamiento) modelado.	97
Ilustración 48. Talud actual (luego de deslizamiento).	98
Ilustración 49. Talud (después del deslizamiento) modelado.	99
Ilustración 50. Talud estabilizado (Modelado).	100
Ilustración 51. Talud (estabilizado antes del deslizamiento) modelado.	100

Índice de Tablas

Tabla 1. Criterios para el análisis del nivel de susceptibilidad a deslizamientos.	24
Tabla 2. Descripción de clasificación SUCS.	27
Tabla 3. Fuente de Información Empleado en el Estudio.	40
Tabla 4. Clasificación de pendientes.	41
Tabla 5. Clasificación del Uso de suelo para la cuenca del río Cumbe.	42
Tabla 6. Clasificación de la distancia a la red de drenaje.	43
Tabla 7. Estaciones Meteorológicas cercanas a la zona de estudio.	44
Tabla 8. Precipitaciones utilizadas para el estudio de susceptibilidad.	44
Tabla 9. Escala fundamental de Saaty.	51
Tabla 10. Índice de consistencia Aleatorio de Saaty.	52
Tabla 11. Simbología para cálculos de contenido de humedad.	55
Tabla 12. Cálculo de contenido de humedad de los estratos 1 y 2.	55
Tabla 13. Determinación del peso unitario estrato 1.	57
Tabla 14. Cálculo de límites de consistencia en el estrato 4.	62
Tabla 15. Clasificación SUCS, según la ASTM 2009.	63
Tabla 16. Clasificación SUCS, Ejemplo: Estrato 1.	64
Tabla 17. Clasificación AASHTO, según la ASTM 2009.	64
Tabla 18. Clasificación AASHTO. Ejemplo: Estrato 4.	65
Tabla 19. Factor de seguridad por corte mínimo.	73
Tabla 20. Matriz de jerarquización y comparación por pares de variables y subvariables.	83
Tabla 21. Matriz de comparación por pares y ponderación final de las variables.	83
Tabla 22. Superficies correspondientes a las clasificaciones del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.	88
Tabla 23. Resultados de "SPT" y parámetros de características de suelos.	91

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierras son eventos potencialmente peligrosos que han provocado numerosas pérdidas tanto económicas como humanas, este fenómeno geológico ha generado impactos significativos en las zonas montañosas del Ecuador, especialmente en los Andes del sur del país. La combinación de factores geológicos, hidrológicos y geomorfológicos contribuye a la inestabilidad de los taludes y a la generación de deslizamientos, lo que representa un riesgo latente para la infraestructura vial y las comunidades asentadas en estas áreas.

Según Varnes (1978a), a los deslizamientos de tierras se los define como "el movimiento descendente de una masa de suelo, roca o detritos a lo largo de una superficie de deslizamiento inclinada". Esta definición demuestra la importancia de comprender los factores que contribuyen a la ocurrencia de deslizamientos, así como la necesidad de desarrollar metodologías efectivas para evaluar la susceptibilidad a este fenómeno.

El mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en SIG se ha convertido en una herramienta fundamental para la gestión del riesgo en zonas vulnerables. De acuerdo con Guzzetti et al. (1999a), el enfoque (AHP) considera múltiples factores, como la pendiente del terreno, la precipitación y la vegetación, para evaluar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. Esta metodología proporciona una visión completa de los factores que influyen en la susceptibilidad a deslizamientos y permite identificar áreas críticas que requieren medidas preventivas.

En el contexto específico de vías de segundo orden en los Andes del sur del Ecuador, el modelamiento de taludes es fundamental para garantizar la estabilidad de las carreteras y reducir el riesgo de interrupciones causadas por deslizamientos. Como mencionan Crosta & Agliardi (2003), el modelamiento numérico de taludes permite simular el comportamiento de las pendientes bajo diferentes condiciones geotécnicas y climáticas, lo que facilita la

identificación de posibles riesgos y así, poder ofrecer las respectivas medidas de mitigación.

Lo que se busca realizar en este estudio es un enfoque integral para el mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos con el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en SIG y el modelamiento de taludes en una vía de segundo orden ubicada en los Andes del sur del Ecuador. Se busca integrar datos geospaciales, análisis geotécnicos y modelamiento numérico para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos a lo largo de la vía, con el fin último de promover la seguridad y resiliencia de las comunidades expuestas a este peligro geológico. La importancia de este estudio radica en su contribución al desarrollo de herramientas prácticas para la identificación temprana de áreas con alto riesgo de deslizamientos. Además, se espera que los resultados obtenidos puedan servir como base para futuras investigaciones.

2. PROBLEMA

El páramo es un ecosistema de alta montaña que se caracteriza por su importancia ecológica, hidrológica y como regulador del clima. Sin embargo, la intervención humana, como la construcción de vías, alterar el uso de suelo para sembríos y ganadería, generar canales de riego y diversos factores, puede desencadenar procesos de degradación del suelo y riesgos de deslizamientos que afectan la estabilidad del ecosistema.



Ilustración 1. Zonas de páramo alteradas. Parte alta de la subcuenca Yutujapina que a su vez es parte de la cuenca del río Cumbe.

Fuente: Autores.

La implementación de vías, alterar el uso de suelo con el fin de actividades agrícolas y ganaderas en regiones de páramo conlleva la responsabilidad de mantener el equilibrio entre el desarrollo humano y la conservación del ecosistema. Bajo el contexto de la estabilidad del suelo, es crucial realizar un mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos en las zonas de páramo, de tal manera que permita identificar las áreas con mayor riesgo de deslizamientos, lo que a su vez facilitará la toma de decisiones para la implementación de medidas preventivas y correctivas.

Además del mapeo de susceptibilidad a deslizamientos, es elemental llevar a cabo un modelamiento de taludes en las zonas críticas. El modelamiento permitirá corroborar los datos presentados por el mapa de susceptibilidad en el contraste de que el mapeo es un método heurístico y el modelamiento es un método determinístico. Para ello, se deben considerar aspectos geotécnicos, hidrológicos, geomorfológicos y geológicos.

En conclusión, el problema planteado requiere un enfoque integral que combine una evaluación entre el mapeo detallado de susceptibilidad a deslizamientos con un modelamiento de talud que sea representativo en la región de páramo afectada por la vía de segundo orden. Este enfoque permitirá no solo comprender los riesgos asociados a la estabilidad del terreno, sino también ofrecer a futuras investigaciones una orientación para desarrollar estrategias efectivas para la gestión sostenible del ecosistema de páramo en el contexto de actividades humanas como la construcción de vías y actividades que alteren el suelo.

2.1. ANTECEDENTES

En el campo de la geotecnia, los deslizamientos de tierra son un fenómeno de gran importancia debido a sus implicaciones en la estabilidad de los taludes. Los taludes críticos son aquellos que presentan una alta probabilidad de experimentar un deslizamiento debido a diferentes factores geotécnicos y ambientales.

La estabilidad de un talud está influenciada por múltiples factores, incluido el tipo de suelo presente (cohesión y ángulo de fricción interna), la geometría del talud, el uso del suelo y las condiciones ambientales. Los taludes críticos y zonas adyacentes a una vía pueden resultar de una combinación de suelos inadecuados, pendientes pronunciadas, erosión, infiltración de agua y cambios en el uso del suelo.

La detección y análisis de patrones de deslizamiento en geotecnia es un área de investigación en constante crecimiento y aplicación en diferentes campos de la ingeniería civil. El análisis de estos patrones es importante para comprender los procesos de deformación y falla en suelos y rocas, así como también para predecir la estabilidad de taludes y laderas.

Ecuador, debido a su ubicación geográfica y su topografía variada, es propenso a la ocurrencia de deslizamientos de tierra. Estos eventos naturales han tenido un impacto significativo en el país, tanto en términos de pérdidas humanas como económicas. La comprensión de los antecedentes de los deslizamientos de tierra en Ecuador es crucial para evaluar y prevenir futuros eventos.

La provincia del Azuay, situada en la región sur de Ecuador, no ha sido ajena a los deslizamientos de tierra. Su topografía montañosa y las características geotécnicas de los suelos presentes en la zona hacen que sea especialmente propensa a este tipo de fenómenos. A continuación, se mencionan algunos de los deslizamientos de tierra más importantes registrados en la provincia del Azuay:

2.1.1. Deslizamiento de tierra en Gualaceo (1993)

En 1993, Gualaceo, una ciudad ubicada en el cantón del mismo nombre en la provincia del Azuay, fue escenario de un deslizamiento de tierra masivo. Las intensas lluvias desencadenaron la inestabilidad de los taludes en las áreas circundantes, lo que resultó en la deformación y el deslizamiento de una gran masa de suelo. Este deslizamiento provocó la destrucción de viviendas y la pérdida de vidas humanas (DEMORAES & D'ERCOLE, 2021).

2.1.2. Deslizamiento de tierra en Cuenca (2008)

En el año 2008, la ciudad de Cuenca, capital de la provincia del Azuay, sufrió un importante deslizamiento de tierra en el sector de la parroquia de Baños. Este evento se produjo como consecuencia de las fuertes precipitaciones y afectó a varias viviendas y áreas de cultivo. La magnitud del deslizamiento causó la pérdida de vidas humanas y daños significativos a la infraestructura vial (DEMORAES & D'ERCOLE, 2021).

2.1.3. Deslizamiento de tierra en Girón (2012)

En la localidad de Girón, ubicada en la provincia del Azuay, se produjo un deslizamiento de tierra en 2012. Las lluvias intensas generaron una saturación del suelo y la subsiguiente falla de los taludes. Este evento provocó el bloqueo de vías de comunicación y afectó gravemente a la comunidad local, requiriendo esfuerzos considerables para la rehabilitación y recuperación posterior (DEMORAES & D'ERCOLE, 2021).

2.1.4. Deslizamiento de tierra en Paute, “La Josefina (1993)”

En el cantón Paute, en la vía (El Descanso – Paute) en el año 1993 el cerro de “La Josefina” que en ese entonces ya había tenido antecedentes de deslizamientos, ocurrió un macro deslizamiento mismo que produjo el represamiento de los Ríos Paute y Jadán, provocando la sumersión bajo el agua de extensas áreas en los valles de los Ríos Tomebamba, Burgay y Déleg, hasta las afueras de la ciudad de Cuenca y límites con la provincia de Cañar (Bermeo et al., 2010).

Con este motivo, el proyecto PRECUPA, que tuvo cooperación técnica y económica entre el Cuerpo Suizo de Socorro (CSS) e instituciones nacionales ecuatorianas, dentro de un convenio entre el Gobierno de la Republica del Ecuador y Suiza, realizó en el periodo de 1994 a 1996 estudios en seis campos de acción (Topografía/Geodesia, Geología/Geotecnia, Hidrometeorológica, Sismología, Limnología y Defensa Civil), con el propósito de prevenir eventos naturales destructivos, estudios que se realizaron en las cuencas alta y media del río

Paute (Basabe et al., 1996), los mejores hasta la actualidad que se han ejecutado en el área de monitoreo y prevención de deslizamientos en el Austro Ecuatoriano.

2.2. IMPORTANCIA Y ALCANCE

La susceptibilidad a deslizamientos en la parroquia Cumbe y generalmente en todo el Ecuador, es un problema de relevancia crítica para la seguridad y el desarrollo sostenible de la región. La combinación de una topografía compleja y eventos climáticos extremos ha generado deslizamientos que han impactado negativamente en la infraestructura, la economía y el bienestar de las comunidades locales. La gestión de riesgos de deslizamientos en Ecuador ha sido reconocida como una prioridad gubernamental, dada la frecuencia e impacto de estos eventos en el país (CEPAL, 1998). Los movimientos de tierra no solo representan un riesgo para la vida humana, sino que también afectan la conectividad vial, esencial para el desarrollo económico y social.

La importancia de los deslizamientos de tierra radica en su potencial para causar daños extensos. Pueden destruir carreteras, como se registra continuamente en medios de prensa escrita en la región, p.e.: “El Mercurio”, donde múltiples tramos de la vía Cuenca – Girón – Pasaje y Cuenca – Molleturo – El Empalme se vieron afectados por caídas de rocas y deslizamientos; esto no solo interrumpe el tráfico y el comercio, sino que causa el aislamiento de comunidades, lo que dificulta las operaciones de rescate y asistencia (Mercurio, 2023). Para mitigar estos problemas, es fundamental realizar evaluaciones de riesgo, mantener una infraestructura adecuada para el drenaje del agua y realizar una gestión efectiva del uso del suelo. Además, la monitorización constante y los sistemas de alerta temprana son esenciales para prevenir daños y pérdidas humanas. En respuesta a eventos, las autoridades suelen realizar operaciones de limpieza y estabilización de taludes para restaurar la seguridad en las carreteras afectadas.

Este trabajo de grado tiene entre sus finalidades, mejorar la gestión del riesgo de deslizamientos a través del desarrollo de un mapa de susceptibilidad utilizando un enfoque multicriterio y su validación con el modelamiento de un talud crítico representativo mediante el método de Bishop. La importancia radica en proporcionar herramientas cuantitativas para una mejor comprensión y prevención de futuros deslizamientos, favoreciendo directamente a las autoridades locales, planificadores urbanos, y comunidades de la región. Además, el estudio puede influir positivamente en las políticas públicas y estrategias de desarrollo local (Ecuador: Floods and Landslides, 2023).

Los documentos oficiales reflejan la importancia del problema en Ecuador. Por ejemplo, proyectos financiados por el Banco Mundial han hecho notorio la necesidad de fortalecer la resiliencia del país ante desastres naturales y han ofrecido fondos significativos para obras de mitigación de inundaciones y apoyo en emergencias relacionadas con deslizamientos (World Bank Group, 2022). Estos esfuerzos denotan la relevancia nacional e internacional de realizar estudios enfocados en la reducción del riesgo de desastres.

En la actualidad, los deslizamientos afectan diversos sectores económicos, empresariales e industriales en Ecuador. Las afecciones en las redes viales debido a deslizamientos tienen un efecto dominó en el comercio y los servicios, lo que repercute negativamente en la economía local y nacional. El sur del Ecuador no es ajeno a estos desafíos, donde los eventos pasados han demostrado la vulnerabilidad del área y la urgente necesidad de una planificación basada en evidencia científica para proteger las inversiones y promover un desarrollo seguro y sostenible (CEPAL, 1998).

El análisis mediante el mapeo de susceptibilidad a deslizamientos y el modelamiento de taludes son esenciales para anticipar y mitigar los riesgos asociados con los deslizamientos en los Andes del sur del Ecuador. Este trabajo no solo es esencial para la seguridad pública y la

planificación territorial, sino que también es un factor crucial para asegurar un futuro resiliente frente a los desastres naturales para las comunidades afectadas.

2.3. REVISIÓN DE LITERATURA

2.3.1. Susceptibilidad A Deslizamientos

Los deslizamientos de tierras representan una de las catástrofes geológicas más devastadoras, con un impacto significativo en la vida humana y la infraestructura, especialmente en regiones montañosas a nivel mundial. La cartografía de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierras (LSM) es un proceso esencial para identificar las áreas con mayor probabilidad de sufrir este tipo de eventos, y su aplicación puede desempeñar un papel crucial en la mitigación de los daños potenciales (Moharrami et al., 2020).

En el estudio de los patrones de deslizamiento en suelos, se ha utilizado una amplia gama de técnicas de análisis, como la fotografía aérea, la fotogrametría, la interferometría de radar, el LiDAR y la teledetección por satélite. Uno de los estudios más destacados es el de Van Den Eeckhaut et al. (2012), quienes aplicaron técnicas de teledetección por satélite para evaluar la evolución temporal de la inestabilidad de laderas. Asimismo, Parwata et al. (2020) utilizaron la fotogrametría y la interferometría de radar para analizar la deformación de una ladera en una mina a cielo abierto.

Para el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos que existe en las vías de montaña se emplean varias metodologías basándose en diferentes herramientas como (bosque aleatorio [RF], máquina de vectores de apoyo [SVM]), así como, las unidades cartográficas (unidades de cuadrícula y de pendiente) que son otra herramienta muy valiosa y que ayudará al estudio de diferentes zonas, las que serán examinadas en detalle (Sun et al., 2023).

Sun et al. (2023) realizó un estudio en Chengkou, aquí efectuó un muestreo de corrimientos de tierras utilizando investigaciones del terreno, imágenes satelitales y registros

históricos que se han ido dando a lo largo de la historia.

En el Himalaya, para ser más exacto en la ciudad de Garhwal se realizó un estudio probabilístico de la susceptibilidad de deslizamientos de tierra a lo largo de la autopista y a su vez realizar mapas de susceptibilidad. Pandey & Sharma (2017) realizó un inventario de los deslizamientos utilizando diferentes herramientas como: Imágenes de satélite Landsat 8 de 2009, imágenes de satélite IRS LISS-IV MX de 2011 e imágenes de Google Earth de 2014, esto con la finalidad de ubicar las zonas con mayor número de deslizamientos y posteriormente proceder a estudiarlos, se determinó que el mayor número de corrimientos de tierras se da en las épocas del monzón (julio a septiembre). Determinándose que los factores que causan los deslizamientos de tierras son: los relieves, diferentes pendientes, curvatura de pendiente, geología del suelo, disección de la superficie, el índice topográfico compuesto de humedad (CTI), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el uso de la tierra, la distancia al arroyo y la distancia a la carretera. Todo esto se realizó con el software ArcGIS 10.1.

En cuanto a los patrones de deslizamiento en rocas, se han utilizado técnicas de observación directa, como el análisis de grietas y fracturas, así como también técnicas de monitoreo continuo, como el uso de sensores de deformación y acelerómetros. Por ejemplo, Wang et al. (2019) utilizaron sensores de deformación para analizar la deformación de una ladera en una mina subterránea en China.

Por otra parte, la simulación numérica y la modelación computacional se han convertido en herramientas valiosas para el análisis de patrones de deslizamiento en geotecnia. Estas técnicas permiten la evaluación de la estabilidad de taludes y laderas en diferentes condiciones y escenarios, así como también la identificación de los factores que influyen en la inestabilidad de suelos y rocas. Por ejemplo, Fawaz et al. (2014) utilizaron un modelo numérico para analizar la estabilidad de una ladera en una zona sísmica, mientras que, Z. Wang & Lin (2021) utilizaron un modelo de elementos finitos para estudiar la influencia de la estructura del suelo en la

estabilidad de taludes.

Dentro de la mayoría de los sectores montañosos los deslizamientos de masas de tierra son un evento que comúnmente sucede. Estos eventos de deslizamiento son producidos por incidencia directa de áreas escarpadas y frecuentes eventos de precipitación que tienen prolongada duración (Bogner et al., 2014).

Los eventos catastróficos producidos por grandes deslizamientos de tierra tienen la viabilidad de provocar muertes humanas y afectar gravemente las infraestructuras, viviendas y transporte (Luu et al., 2023). La problemática que estos desastres conllevan, son consecuencias en cadena; la pérdida de vidas humanas, la pérdida de viviendas y en el caso de que estos deslizamientos ocurran sobre vías principales, generan una afección al sector turista, comercial y todos los posibles casos que tengan afección en la vialidad y transporte.

Estos eventos de amplia gravedad vienen determinados por varios factores, como la intensidad de precipitaciones, la variabilidad en la geografía, distintas condiciones topográficas, el impacto del clima, actividades antrópicas y las condiciones de uso de suelo (Luu et al., 2023).

La movilidad por las vías principales, generalmente las que atraviesan montañas y conectan zonas rurales con zonas urbanas son pilar fundamental para el crecimiento económico y la serviciabilidad nacional (Froude & Petley, 2018). Mientras tanto, las vías que atraviesan sectores montañosos a menudo sufren graves daños y destrucción por eventos normalmente impredecibles, como inundaciones repentinas y deslizamientos de tierra (Luu et al., 2023). Debido a la complejidad y la probabilidad variable de que pueda ocurrir los deslizamientos de tierra y las inundaciones repentinas, es necesario analizar y evaluar la influencia de estos riesgos naturales en las redes de carreteras (Alam et al., 2018).

En los Andes ecuatorianos ocurren deslizamientos superficiales de rotación, traslación y, a su vez deslizamientos de tierra intermitentes con flujo rápido de escombros y material del suelo. Como resultado, no solo incurren en costos económicos significativos, sino que también

plantean problemas ambientales y ecológicos significativos en un área geográfica más amplia. La generación de sedimentos debido al movimiento de laderas afecta directamente el transporte de sedimentos en ríos y acumulación de este material en represas aguas abajo, así como cambios morfológicos en las vías fluviales. El peligro de deslizamientos de tierra está aumentando en los países en desarrollo de todo el mundo. Las crecientes presiones demográficas y el desarrollo económico están obligando a más personas a migrar a áreas potencialmente peligrosas que no son aptas para la agricultura y el pastoreo, estas acciones a simple vista inofensivas, con la evolución del tiempo reflejan eventos que tienen niveles variables de peligrosidad (Vanacker et al., 2003).

Está claro que la rápida degradación de la tierra puede ocurrir en áreas montañosas a medida que el crecimiento de la población y la intensificación agrícola obligan a más personas a vivir en ecosistemas frágiles. Los flujos de sedimentos convencionales a menudo no brindan un punto de referencia que refleje las tasas de erosión natural, ya que a menudo están distorsionados por el cambio moderno en el uso de la tierra o pasan por alto eventos clave dentro del período de erosión. Las áreas de alta densidad de vegetación, ya sea autóctona o antropogénica, se están erosionando a un ritmo característicamente similar al de los puntos de referencia naturales (Vanacker et al., 2007).

(Vanacker et al., 2007) sugieren que incluso en áreas montañosas escarpadas, el movimiento de sedimentos puede reducirse más cerca de los niveles de referencia naturales a través de programas de vegetación apropiados.

Varios autores a nivel mundial han dado gran relevancia a este tema, ya que su importancia social, económica y ambiental es muy importante para el desarrollo. Según los datos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) realizaron intervenciones en el año 2022 debido a el que se cree es uno de los inviernos más fuertes en los últimos 30 años. La Dirección de comunicación social del MTO (2022) ha reportado intervenciones en la Zona 1

(Provincias de Carchi, Imbabura y Esmeraldas) con una inversión de 3.25 millones de dólares, en la Zona 2 (Provincias de Pichincha y Napo) se ha planificado la intervención por un monto de 25 millones de dólares, en la Zona 3 (Provincia de Manabí) con una intervención por un monto de 12 millones de dólares, estas son pocas intervenciones de las varias que se realizaron en consecuencia de las afecciones por los deslizamientos en varias zonas del país (Dirección de comunicación social del MTOP, 2022).

En la (Tabla 1), se indica la categorización de deslizamientos de tierras y los diferentes criterios para determinar el nivel de susceptibilidad (Sarkar & Kanungo, 2004).

Tabla 1. Criterios para el análisis del nivel de susceptibilidad a deslizamientos

Susceptibilidad	Criterio
Muy baja	Laderas sin meteorización, con discontinuidades favorables que no muestran ningún indicio de posibles deslizamientos.
Baja	Laderas que presentan algunas grietas, materiales parcialmente erosionados y no saturados, con discontinuidades favorables, donde no hay señales que permitan anticipar deslizamientos.
Media	Laderas que presentan ciertas áreas con fallas, erosión intensa o materiales parcialmente saturados, donde no se han registrado deslizamientos, pero no se puede garantizar por completo que no ocurran.
Alta	Laderas que presentan áreas con fallas, niveles de meteorización que van desde altos a moderados, y discontinuidades desfavorables donde se han registrado deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran.
Muy alta	Laderas que presentan áreas de falla, suelos altamente meteorizados y saturados, así como discontinuidades desfavorables donde se han registrado deslizamientos o existe una alta probabilidad de que ocurran.

Fuente: (Sarkar & Kanungo, 2004).

En los últimos años, se han desarrollado diversas técnicas de análisis para identificar y caracterizar los patrones de deslizamiento en suelos y rocas, como el análisis de imágenes digitales, la microscopía electrónica de barrido y la tomografía de rayos X. Además, la

simulación numérica y la modelación computacional también han sido ampliamente utilizadas en el estudio de patrones de deslizamiento.

El análisis de patrones de deslizamiento en geotecnia ha sido objeto de estudio en numerosas publicaciones científicas en las últimas décadas. Estos estudios se enfocan en la identificación, caracterización y análisis de los patrones de deslizamiento en diferentes tipos de suelos y rocas, y su aplicación en la evaluación de la estabilidad de taludes y laderas.

Para determinar áreas con alto nivel de susceptibilidad a deslizamientos, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una herramienta muy importante dentro del estudio y análisis de estos fenómenos naturales, ya que se puede trabajar con volúmenes altos y a su vez procesar esta información disminuyendo tiempos (Karlsson et al., 2017).

Sin embargo, cuando se trata de estudios de gran importancia como los deslizamientos de masas, diferentes factores influirán en la forma que se realice el análisis y la evaluación de las posibles alternativas de mitigación. Esto quiere decir que no siempre los modelos cuantitativos serán los factores decisivos, sino que se deberán tomar en cuenta juicios de expertos en el tema o a su vez investigaciones en los que se hayan realizado este tipo de estudios. Para este tipo de problemas de toma de decisiones, el uso del método multicriterio puede resultar de gran ayuda (Karlsson et al., 2017).

2.3.2. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico jerárquico (AHP) también conocido como método multicriterio es un método que consta de varios procedimientos donde el objetivo es analizar y tomar decisiones complejas. Al descomponer el problema de decisiones en partes manejables, es posible analizar los diferentes criterios y a su vez combinarlas de forma lógica para dar soluciones relevantes (Karlsson et al., 2017).

Si bien es cierto que la ayuda de expertos en la toma de decisiones es crucial dentro del análisis multicriterio, es importante tomar en cuenta que los expertos no siempre emitirán

evaluaciones coherentes sobre todo en los juicios de comparación por pares (Lin & Lu, 2012). A pesar del amplio uso de los SIG y el método multicriterio, persiste una brecha importante entre los datos geoespaciales disponibles y la facilidad para los responsables en la toma de decisiones (Beiler & Treat, 2014).

Considerado esto, y teniendo claro el objetivo de esta metodología donde se prevé evaluar el impacto de los diferentes factores dentro de los deslizamientos de tierras desde la perspectiva de datos geoespaciales. El método AHP se vuelve parte esencial del estudio ya que este proceso constituye un marco global, lógico y estructural, que ayuda al analista a tomar decisiones importantes para la comprensión del fenómeno, desglosándolo en una estructura jerárquica, la cual revela la relación que existe entre la meta, los objetivos, criterios y alternativas, y mediante la combinación lineal ponderada (WLC) que hace parte de una herramienta SIG se puede llegar a un posible resultado que deberá ser analizado para tener solidez en el estudio (Effat, 2014).

2.3.3. Caracterización De Suelos

La granulometría es una propiedad fundamental del suelo que afecta su comportamiento mecánico y en consecuencia a posibles riesgos de deslizamientos. Según Wentworth, (1922) la granulometría se refiere a la distribución del tamaño de las partículas sólidas. Esta distribución se determina comúnmente mediante análisis de tamizado y sedimentación, permitiendo clasificar los suelos en diferentes categorías como arcillas, limos, arenas y gravas. Skempton, (1953) enfatizó que la granulometría influye directamente en la permeabilidad y compresibilidad del suelo, factores que son vulnerables en la estabilidad de taludes.

Tabla 2. Descripción de clasificación SUCS

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN S.U.C.S		
SUELOS FINOS	CL	Son arcillas de baja plasticidad, es decir con límite líquido menor a 50 %, se caracterizan por tener de baja a media compresibilidad.
	ML	Son limos de baja plasticidad, es decir con límite líquido menor a 50 %, se caracterizan por tener de baja a media compresibilidad.
	OL	Son suelos orgánicos de baja plasticidad, es decir con límite líquido menor a 50 %, se caracterizan por tener de baja a media
	CH	Son arcillas de alta plasticidad, con límite líquido mayor a 50 %, y se caracterizan por ser muy compresibles.
	MH	Son limos de alta plasticidad, con límite líquido mayor a 50 %, y se caracterizan por ser muy compresibles.
	OH	Son suelos orgánicos de alta plasticidad, con límite líquido mayor a 50 %, y se caracterizan por ser muy compresibles.
SUELOS GRUESOS	GW	Son gravas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del
	SW	Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del
	GP	Son gravas mal graduadas con cantidades reducidas de partículas finas
	SP	Son arenas mal graduadas con cantidades reducidas de partículas finas
	GM	Son gravas limosas, es decir en donde las características del suelo se ven afectadas por la presencia de las partículas finas
	GC	Son gravas arcillosas, es decir en donde las características del suelo se ven afectadas por la presencia de las partículas finas
	SM	Son arenas limosas
	SC	Son arenas arcillosas

Fuente: ASTM. (2023)

Los límites de Atterberg son parámetros que describen el comportamiento de los suelos finos al variar su contenido de humedad. Casagrande, (1932) definió el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad como medidas para caracterizar la cohesión y la capacidad de deformación del suelo. Estos límites son muestras del potencial expansivo del suelo y su susceptibilidad a cambios volumétricos, aspectos relevantes en la evaluación de deslizamientos (Holtz et al., 1981).

La estratigrafía del suelo es el estudio de las capas o estratos que lo componen. Terzaghi, (1943), considerado el padre de la mecánica de suelos, enfatizó la importancia de entender la secuencia estratigráfica para predecir el comportamiento del suelo bajo cargas. La identificación de horizontes débiles o discontinuidades estratigráficas es esencial para evaluar la estabilidad de pendientes (Varnes, 1978b).

El ensayo de Penetración Estándar (SPT) es una técnica in situ ampliamente utilizada para la extracción de información sobre las propiedades mecánicas del suelo. Desarrollado en los años 1920 por el ingeniero Raymond (1948), el SPT mide la resistencia del suelo a la penetración, proporcionando datos para estimar la densidad relativa y la capacidad portante del terreno. Schmertmann, (1975) correlacionó los resultados del SPT con la resistencia al corte y la compresibilidad del suelo, herramientas clave en el análisis de deslizamientos.

La cohesión y el ángulo de fricción interna son parámetros indispensables en el análisis de estabilidad de taludes. Coulomb, (1773) fue pionero en conceptualizar estas propiedades como concluyentes en la resistencia al corte del suelo. La cohesión representa la capacidad de las partículas del suelo para adherirse entre sí, mientras que el ángulo de fricción interna representa la capacidad del suelo para resistir el deslizamiento debido a la fricción entre partículas. Bishop & Morgenstern, (1960) desarrollaron métodos para evaluar la estabilidad de taludes incorporando estos parámetros.

El análisis experimental de la cohesión y el ángulo de fricción interna se realiza mediante ensayos triaxiales y ensayos de corte directo. Roscoe et al. (1958) introdujeron el ensayo triaxial como un método para obtener estos parámetros bajo ciertas condiciones que simulan las tensiones in situ. Los resultados ofrecen una base sólida para el diseño geotécnico y el análisis de riesgo de deslizamientos (Lambe & Whitman, 1969).

2.3.4. Método de Bishop Simplificado.

El análisis de estabilidad de taludes es un campo de estudio importante en la geotecnia que permite evaluar la seguridad de estructuras de tierra y roca ante el riesgo de deslizamientos. Entre los métodos de análisis, el Método de Bishop Simplificado se enfatiza por su precisión y simplicidad. Bishop, (1955) expuso este método de círculos de deslizamiento, que considera el equilibrio de momentos alrededor del centro del círculo o plano de falla. A diferencia del Método de Fellenius, Bishop incorporó la fuerza normal en cada rebanada del talud,

permitiendo una mejor aproximación del factor de seguridad (Bishop, 1955);(Duncan et al., 2014).

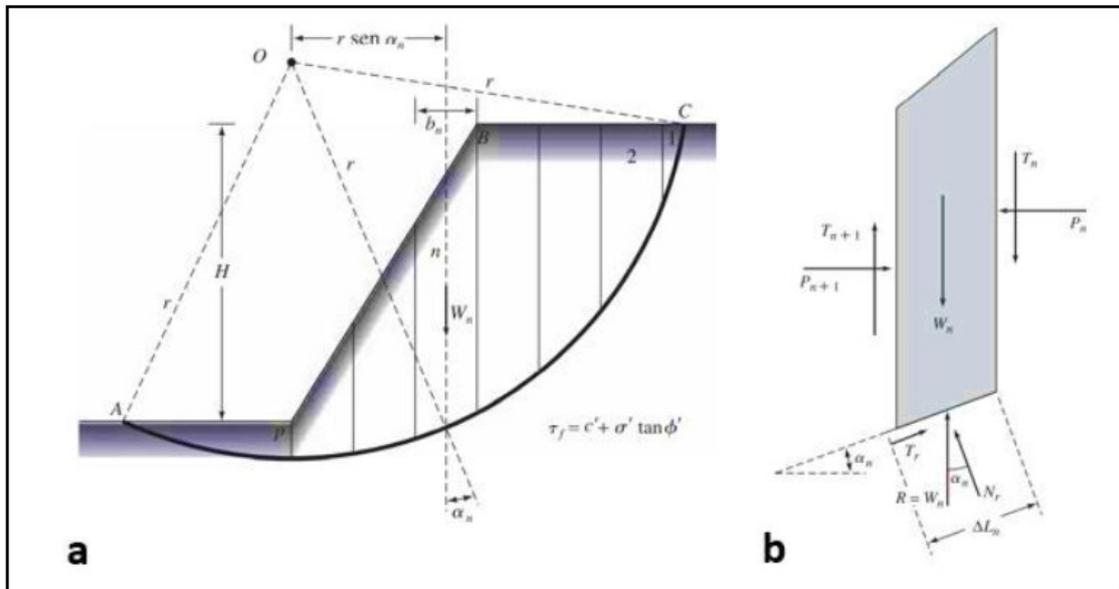


Ilustración 2. (a) Método de dovelas de Bishop; (b) Esquema de fuerzas actuantes en una de las dovelas.
Fuente: Das. (2013)

La aplicación del Método de Bishop Simplificado ha sido discutido ampliamente en la literatura científica. Por ejemplo, Stark & Eid, (1994) realizaron un estudio comparativo entre varios métodos, incluido el de Bishop, concluyendo que este análisis proporciona una estimación confiable del factor de seguridad para taludes homogéneos. Cheng et al., (2007) extendieron la implementación del método para taludes heterogéneos, demostrando su adaptabilidad y robustez.

Matemáticamente se puede realizar el cálculo de la estabilidad con el método de Bishop, calculamos el FS con la siguiente expresión:

$$FSs = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c' b_n + (W_n - u_n b_n) \tan \phi'] \frac{1}{m(\alpha)_n}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \text{sen } \alpha_n}$$

donde:

b_n = ancho de la dovela.

W = peso de cada dovela

c', ϕ' = parámetros de resistencia al suelo

u_n = presión de poro en la base de la dovela

α_n = ángulo entre el radio y la vertical en cada dovela

El software GeoStudio es una herramienta exhaustiva para el análisis geotécnico que incluye módulos como SLOPE/W para el análisis de estabilidad de taludes. Este software ofrece la simulación numérica de condiciones complejas del suelo y la evaluación de diferentes escenarios de falla (Manual, 2012).

El modelamiento mediante GeoStudio ha sido objeto de cuantiosos estudios que validan su eficacia. Nuñez Romero & Sanchez Llacta, (2016) utilizaron SLOPE/W para analizar la estabilidad de un talud en la Cordillera Andina, encontrando una excelente correlación con los datos observados en campo. Asimismo, Smith et al., (2013) recalcaron la capacidad del software para incorporar las propiedades hidráulicas del suelo en el análisis de estabilidad.

Según Craig & Augusto Filho. (2020) en el análisis de estabilidad a escala semirregional se puede hacer uso del método de pendiente infinita en (SIG) y una base topográfica a escala 1:10000 (intervalos de elevación de 5m). En el análisis de estabilidad de escala a detalle se puede implementar el método de Bishop simplificado (disponible en el módulo Slope/W del software GeoStudio) y secciones geológicas-geotécnicas levantadas en campo (escala 1:100 con intervalos de pendiente vertical de 0.5 m).

La combinación del Método de Bishop con herramientas de modelamiento avanzado como GeoStudio representa una metodología integral que puede aplicarse para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos en taludes críticos. Esta aproximación no solo permite una evaluación detallada de la estabilidad actual, sino que también facilita la exploración de medidas de mitigación y diseño de soluciones geotécnicas para garantizar la seguridad a largo plazo (Reichenbach et al., 2018).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra superficiales que una carretera de segundo orden podría generar en las zonas de recarga hídrica o cabecera de una cuenca hidrográfica localizada en los Andes del sur del Ecuador. Para esto se implementará una metodología que considere todas las características morfológicas de la cuenca y la principal variable climática, que es la precipitación. Adicionalmente, se tiene previsto caracterizar una sección de la vía desde el punto de vista de la mecánica de suelos con énfasis en el estudio de la estabilidad de taludes. Esto permitirá identificar áreas propensas a deslizamientos. Generando de esta manera información base para la toma de decisiones en la planificación del uso del suelo y la mitigación de riesgos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la recopilación de información cartográfica de una cuenca hidrográfica en los Andes de sur del Ecuador y seleccionar un área que tenga una vía de segundo orden y que se encuentre afectada por actividades antrópicas. Posteriormente, información secundaria será generada para establecer parámetros morfológicos de la cuenca hidrográfica, que principalmente se fundamentarán en el análisis detallado de un modelo de elevación digital que abarque el área de estudio. Adicionalmente, trabajos de campo permitirán realizar la caracterización mecánica de los suelos existentes en una sección transversal de la vía, complementando el levantamiento de información.
- Elaborar un mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca de estudio, basado en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en SIG, que revele el posible impacto de la vía de segundo orden.

- Realizar la caracterización mecánica de los suelos existentes en una sección transversal de la vía de segundo orden que tenga mayor susceptibilidad a deslizamientos (zona crítica establecida a partir del mapa de susceptibilidad a deslizamientos superficiales), cuyo enfoque será la estabilidad de taludes de dicha zona.

4. MARCO METODOLÓGICO

4.1. DELIMITACIÓN Y UBICACIÓN

El área de estudio indirecta corresponde a la parroquia San Luis de Cumbe que se sitúa al sur del Cantón Cuenca, provincia del Azuay en los Andes del sur del Ecuador, cubre una superficie de aproximadamente 71.4 km², además está situado a una altura de 2640 m.s.n.m. con una latitud de 3°4'5'' Sur y longitud de 79°0'46'' Oeste. Su delimitación se presenta de la siguiente manera: - Al Norte con la parroquia Tarqui, al Sur con la parroquia Jima y la periferia cantonal de Girón, al Este con las parroquias de Quingeo y San José de Raranga y al Oeste, con la parroquia Victoria del Portete. (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquia Cumbe, 2000).

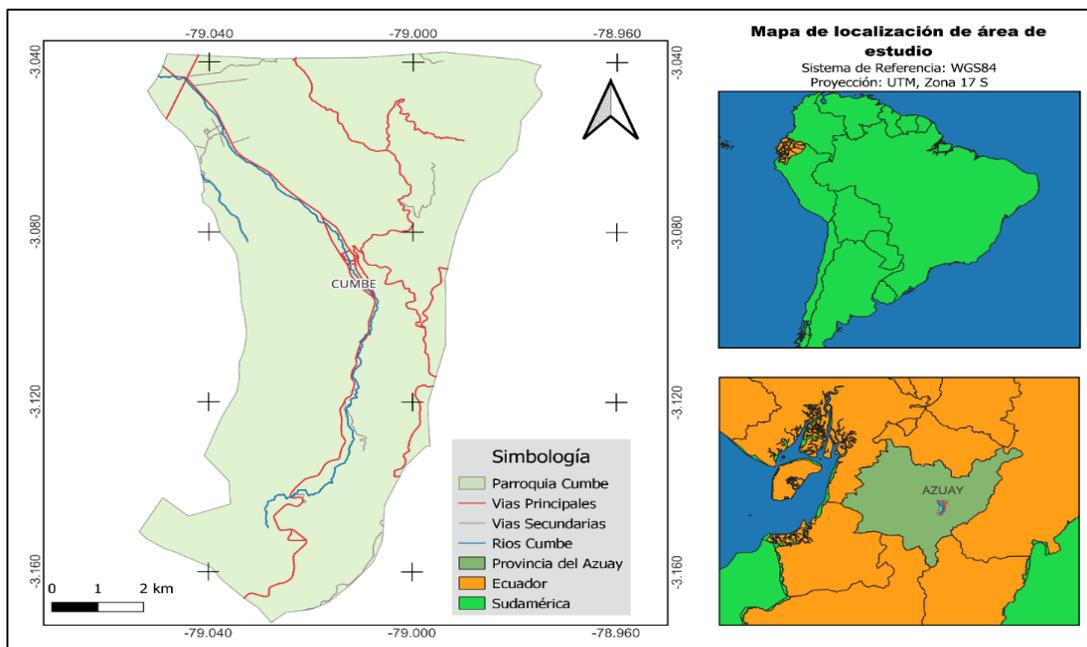


Ilustración 3. Mapa de localización. Parroquia de Cumbe.
 Fuente: Autores

4.1.1. Zona De Estudio

El área de estudio directa se enfoca en una vía de segundo orden que tiene una longitud aproximada de 1.5 Km, posterior a eso se realiza el análisis de un talud representativo de la vía con coordenadas (UTMX 717277- UTMY 9652570), las cuales se encuentran ubicadas dentro de la microcuenca Yutujapina entre las coordenadas planas (UTMX 717260.166 - UTMY 9652494.426) “Ilustración 4”. Esta microcuenca hidrográfica es una de las fuentes principales de agua superficial que capta el pueblo de Cumbe. La Yutujapina tiene una altitud que va desde los 3218 hasta los 3469 m s.n.m. y cubre una superficie aproximadamente de 1.4 km².

En la “Ilustración 4”. se observa claramente que una vía atraviesa la microcuenca. Se ha elegido esta vía para el estudio de susceptibilidad a deslizamientos, por su variabilidad en elementos físicos apreciables como: el uso de suelo en los distintos sectores, la variabilidad de pendientes que existe en la zona, la presencia de canales de agua que han sido creados por la población, entre otros. Esta diversidad de factores en esta zona hace que este sector sea ideal para el análisis, se pretende que los resultados sean demostrativos y representativos para toda el área de estudio.

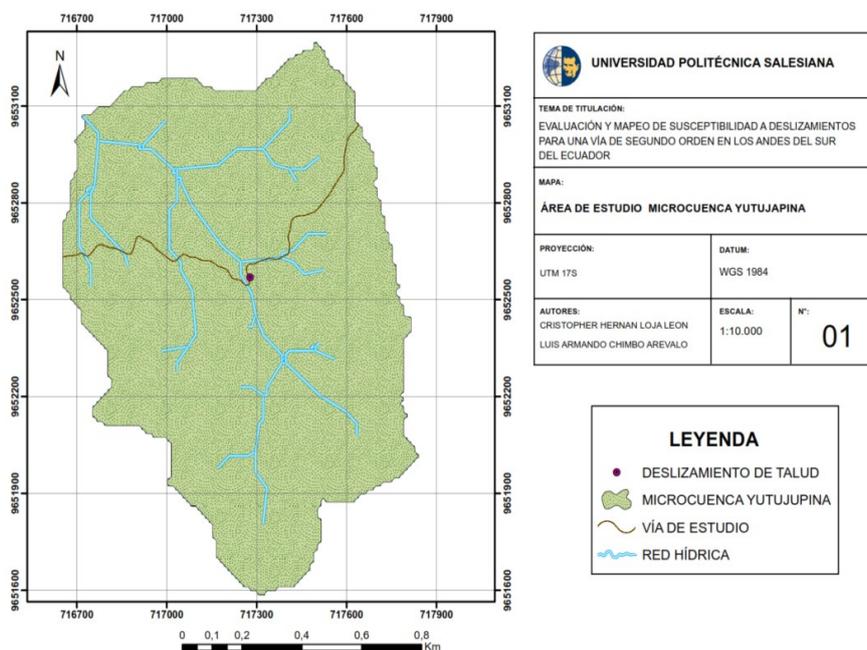


Ilustración 4. Zona de estudio. Cuenca Yutujapina.

Fuente: Autores

4.2. PAQUETE DE TRABAJO 1

Realizar la recopilación de información cartográfica de una cuenca hidrográfica en los Andes de sur del Ecuador y seleccionar un área que tenga una vía de segundo orden y que se encuentre afectada por actividades antrópicas. Posteriormente, información secundaria será generada para establecer parámetros morfológicos de la cuenca hidrográfica, que principalmente se fundamentarán en el análisis detallado de un modelo de elevación digital que abarque el área de estudio. Adicionalmente, trabajos de campo permitirán realizar la caracterización mecánica de los suelos existentes en una sección transversal de la vía, complementando el levantamiento de información.

4.2.1. Recopilación De Información Y Selección De La Vía De Segundo Orden.

Criterios De Selección.

La selección del área específica para el estudio se basará en criterios que incluyen la presencia de una vía de segundo orden y la afectación por actividades antrópicas. Según (Crozier, 1986), las vías de comunicación pueden alterar las condiciones naturales del terreno y aumentar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. Por ello, se priorizará un segmento de la red vial secundaria dentro de la parroquia Cumbe, en la cuenca hidrográfica Yutujapina, que presente evidencias de inestabilidad como grietas o desplazamientos en el terreno.

Con la cartografía de “áreas de desarrollo” realizadas por el PDOT de Cumbe, realizamos un análisis con enfoque en una zona que no tenga información ya estudiada, para que de tal forma nuestro proyecto también tenga un aporte significativo en proporcionar información.

De esta forma nos inclinamos hacia la zona que describe en la leyenda del mapa “Ilustración 5” como “área no definida”.

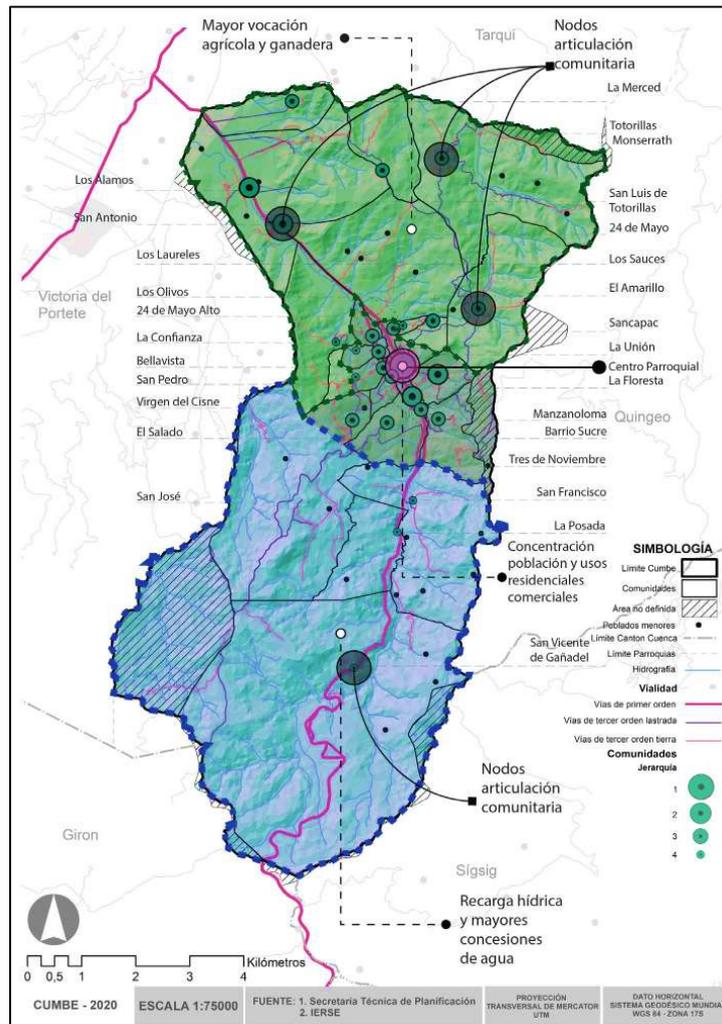


Ilustración 5. Mapa de áreas de desarrollo.
Fuente: PDOT Cumbe

1. Condiciones de Páramo: La región alta de la cuenca presenta condiciones de páramo, un ecosistema de montaña característico de los Andes tropicales. Estos páramos son esenciales para la regulación hídrica y el mantenimiento de la biodiversidad, sin embargo, su estructura frágil los hace susceptibles a deslizamientos cuando son alterados (Buytaert et al., 2006).

2. Terrenos Inalterados: La presencia de terrenos inalterados en la zona alta de la cuenca proporciona un escenario natural para el estudio de procesos geomorfológicos sin intervenciones antrópicas significativas. La alteración de estos terrenos por actividades antrópicas influye directamente en la vulnerabilidad a deslizamientos (Clague y Stead, 2012).

3. Topografía Escarpada: La topografía escarpada es un factor considerable en la ocurrencia de deslizamientos, ya que las pendientes pronunciadas inciden directamente en la inestabilidad del terreno (Guzzetti et al., 1999b). La parroquia Cumbe cuenta con zonas de relieve abrupto que justifican su elección para este estudio.



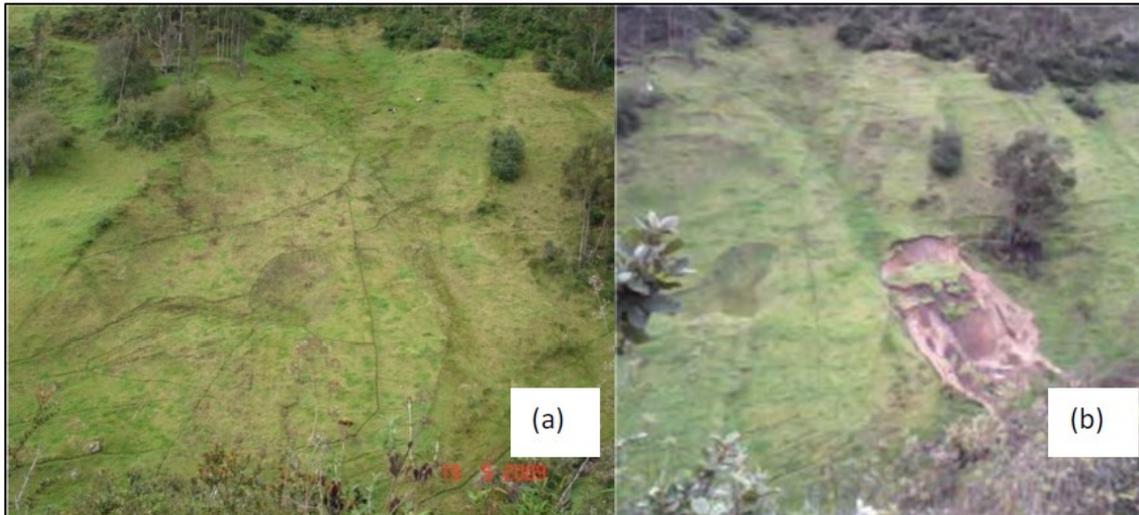
Ilustración 6. (a) Cuenca alta que describe zonas de páramo y zonas inalteradas de suelo; (b) Topografía escarpada de la cuenca.

Fuente: Autores

Evaluación Preliminar

Diversos investigadores han implementado metodologías innovadoras para la recolección de datos geográficos, tales como el uso de fotografías aéreas y la inspección in situ, junto con el análisis desarrollado de imágenes satelitales, incluyendo la interpretación de imágenes en tres dimensiones y la representación de terreno mediante modelos de elevación digital (DEM), para profundizar en el estudio del entorno (Rosero Mier, 2018).

1. Análisis Multitemporal: Se analizarán fotografías aéreas multitemporales para identificar cambios en la morfología del terreno y áreas previamente afectadas por deslizamientos (Metternicht et al., 2005).



*Ilustración 7. Deslizamiento en la cuenca alta del río Cumbe; (a) 15/04/2009; (b) 11/05/2010
Fuente: Iñiguez V. (2010)*

2. Análisis de Campo: Se realizarán inspecciones en campo con el fin de identificar signos visibles de inestabilidad y recoger información sobre las prácticas antrópicas que puedan estar contribuyendo a la susceptibilidad a deslizamientos. Estas prácticas incluyen la deforestación, agricultura en pendientes pronunciadas y construcción no regulada (Van Westen et al., 2006).

3. Eliminación de cubierta vegetal: La eliminación de la cubierta vegetal superficial acelera exponencialmente el flujo de sedimentos. La producción de sedimentos aumenta 100 veces cuando se reduce la vegetación superficial río arriba (Vanacker et al., 2007).

Vanacker et al., (2007) sugieren que es posible estabilizar y restaurar la tierra degradada aumentando la cubierta vegetal superficial. Un buen programa de re-cultivo puede reducir la producción de sedimentos más cerca de la línea de base natural.

4. Flujos de agua Subsuperficiales: Los flujos de residuos vegetales y los flujos de suelo se pueden distinguir de los deslizamientos de tierra de traslación y rotación porque están relacionados no solo con el cambio de uso del suelo y la topografía de la superficie, sino también con la ubicación de los canales de riego. Esto indica que los lixiviados de canales mal construidos y/o manejados pueden promover la saturación del suelo cuesta abajo. Este factor a menudo se pasa por alto en los estudios sobre el impacto del cambio de uso del suelo en la estabilidad de las pendientes.

La estrecha concordancia entre los patrones de movimiento de taludes pronosticados y observados demuestra que los modelos de estabilidad de taludes basados en procesos pueden predecir adecuadamente la probabilidad relativa de movimientos de taludes poco profundos inducidos por la convergencia de aguas subterráneas poco profundas (Vanacker et al., 2003).

5. Cambio de uso del suelo: Vanacker et al. (2003) recomienda, realizar una descripción detallada de series de aerofotografías en función de su calidad y escala, también establece que se debe realizar una clasificación de los suelos usando un estereoscopio para de esa forma observar que categorías de uso del suelo se compone y que pueden ser; suelos, bosques secundarios, pastizales, tierras de cultivo, etc.

Para el presente estudio se realiza una inspección técnica en campo con el fin de observar a detalle el uso de suelo y sus alteraciones actuales.



*Ilustración 8.(a) Eliminación de cobertura vegetal; (b) Creación de canales de riego; (c) Creación de cultivos
Fuente: Autores*

A continuación, se ofrece algunos aspectos relevantes que considera el GAD Parroquial de Cumbe en cuestión de riesgos que poseen:

- **Efecto de la lluvia en los suelos y la erosión:** Las precipitaciones juegan un papel crítico en los deslizamientos de tierra, especialmente en regiones como Cumbe, que experimentan condiciones climáticas variables. La lluvia puede saturar los suelos y disminuir su resistencia al corte, lo que aumenta la probabilidad de deslizamientos. Además, la erosión causada por el escurrimiento del agua puede debilitar los taludes y

provocar su colapso.

Es esencial comprender la relación entre las características del suelo en Cumbe, la intensidad de las lluvias y la incidencia de deslizamientos de tierra en la zona. Esto permitirá evaluar la susceptibilidad de los taludes a los deslizamientos y desarrollar medidas de mitigación adecuadas (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquia Cumbe, 2000).

- **Afección de abrir carreteras en la parroquia de Cumbe:** La construcción de carreteras en la parroquia de Cumbe puede tener impactos significativos en la estabilidad de los taludes y aumentar el riesgo de deslizamientos de tierra. La excavación del terreno, la alteración de la geometría natural del terreno y la generación de cambios en la distribución del agua pueden debilitar los taludes existentes y propiciar la ocurrencia de deslizamientos (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquia Cumbe, 2000) .

4.2.2. Recopilación De Información De Parámetros Morfológicos.

Para realizar el estudio de mapeo a la susceptibilidad a deslizamientos, se elaboró una base de datos basada en la selección de factores condicionantes y a su vez factores desencadenantes que son los principales causantes de la inestabilidad en los taludes. Para esto se usaron imágenes sombreadas en relieve con modelado de elevación digital (DEM), además técnicas tradicionales como la interpretación de fotografías y el reconocimiento directo del sitio (Hervas de Diego & Rosin, 2001).

4.2.2.1. Recolección de las Capas Temáticas para el estudio de deslizamiento.

La información que se utilizó para desarrollar el estudio se recolectó de diferentes fuentes (Tabla 3) donde para cada capa se analizó el grado de importancia dentro de los deslizamientos de tierras.

Tabla 3. Fuente de Información Empleado en el Estudio

Datos	Descripción	Fuente
Modelo de elevación digital DEM (Resolución 12.5m)	Descargado	IGM http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/
Pendiente	Extraído del DEM 12.5m	DEM 12.5m
Red de drenaje	Extraído del DEM 12.5m	DEM 12.5m
Precipitación	Extraído del DEM 12.5m	DEM 12.5m
Uso de suelo	Compartido	Broeckeaert (2012)

Fuente: (Autores)

4.2.2.2. Descripción de las Capas

4.2.2.2.1. Pendiente

El Ángulo de pendiente es uno de los factores que mayor peso tiene dentro del análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierras. La pendiente en gran parte depende de las características geológicas de la zona de estudio (Mallick et al., 2018).

Para la generación del Mapa de pendientes se trabajó con un modelo digital de elevación DEM con resolución de 12.5 m. Siguiendo a ello se realizó el modelo de pendientes que se determina como la tasa de cambio (delta) máxima de una celda respecto a la celda más cercana, se calcula en coordenadas planares cartesianas 2D donde la dirección horizontal será (dz/dx) y la dirección vertical (dz/dy) Eberly, (2000). Posterior a ello se clasificó el resultado obtenido mediante la herramienta Spatial Analyst Tools Reclassify donde las pendientes fueron clasificadas en 5 clases según (Zuidam et al., 1986) (Tabla 4). Cada categorización se eligió en función de su probabilidad de causar deslizamientos, ya que la probabilidad que ocurra un deslizamiento en un talud vertical es mucho más alta que para taludes semi horizontales.

Tabla 4. Clasificación de pendientes

Rangos	Clases
0°-2°	Planicie
2°-4°	Pendiente muy baja
4°-8°	Pendiente moderada
8°-16°	Pendiente fuerte
16°-35°	Pendiente muy fuerte

Fuente: Van Zuidam (1986)

4.2.2.2.2. Uso de suelo.

La alteración del suelo con respecto a la deforestación incrementa significativamente la tasa de erosión del suelo, lo que resulta en un aumento sustancial en el transporte de sedimentos. Estudios recientes sugieren que la remoción de la vegetación puede aumentar la erosión en más de un orden de magnitud, desestabilizando así las laderas y alterando los sistemas fluviales (Rodríguez-Pineda et al., 2017).

Este parámetro está relacionado con la interacción del ser humano donde se practica el mal uso de terrenos realizando una deforestación exhaustiva de bosques para convertirlos en pastizales, zonas de cultivo, zonas de urbanización, canales de riego, etc. Lo que hace que las laderas pierdan estabilidad y se susciten los deslizamientos de tierras (El Jazouli et al., 2019).

El Mapa de Uso de suelo se obtuvo de fuentes bibliográficas donde se realizó un estudio de cobertura vegetal para la cuenca del río de Paute, que es de donde se extrajo la información presentada aquí. Específicamente, y en relación a la cuenca del río Cumbe se menciona que el mapa temático se lo realizó, adicionalmente, comparando imágenes satelitales y fotografías aéreas, posteriormente las imágenes superpuestas se las convirtió en imágenes panorámicas con el software Arc Soft (Broeckert, 2012), dando como resultado las diferentes clases de uso de suelo (Tabla 5), posteriormente se realizó la clasificación basada en análisis de campo.

Tabla 5. Clasificación del Uso de suelo para la cuenca del río Cumbe

CLASE	ÁREA (m2)
Quemas	3618
Plantas nativas	18853
Urbano	11604
Bosque/Chaparro	42311
Páramo	1020418
Pasto verde	10535
Bosque intervenido con pastoreo	9160
Cultivos	25366
Pasto seco	77089
Degradado sin cobertura	113035
Páramo Intervenido	22478

Fuente: Broekaert. (2012)

4.2.2.2.3. Distancia a los ríos

Dentro del estudio, los ríos o quebradas que están cerca de la zona toman un gran peso dentro del análisis de deslizamientos de tierras por la posible falla de taludes debido a grandes caudales, también las modificaciones de terrenos provocados por creación de riachuelos o barrancos para la agricultura son otra de las causas que provocan este fenómeno (El Jazouli et al., 2019).

Para la generación del Mapa de distancia a los ríos se trabajó con un modelo digital de elevación DEM con resolución de 12.5 m realizando el cálculo de la distancia en línea recta o también conocida como distancia euclidiana la cual se calcula desde el centro de una celda de origen hasta el centro de cada una de las celdas adyacentes y para determinar la distancia verdadera se realiza el cálculo de la hipotenusa con respecto a los dos puntos el origen y el de una celda cercana, así es como se determinó la proximidad que existe respecto a los ríos que luego fueron clasificadas en 5 rangos (Tabla 6), cabe mencionar que para la clasificación se hizo una investigación exhaustiva de diferentes estudios similares, que derivaron en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de la distancia a la red de drenaje

Distancia Ríos (m)
0-50
50-100
100-150
150-200
>200

Fuente: (Autores)

4.2.2.2.4. Precipitaciones

En la ocurrencia de deslizamientos, las precipitaciones son un factor determinante tal como lo evidencian múltiples estudios científicos. Por ejemplo, una investigación realizada por Iverson (2000) indica que la infiltración de agua de lluvia aumenta la presión de poros en el suelo, lo que puede reducir la fricción interna y, por ende, la estabilidad del talud. Este fenómeno es especialmente crítico en regiones con suelos finos y porosos, donde la capacidad de absorción de agua es alta y la resistencia al corte es comparativamente baja. La saturación del suelo no incide solamente en el incremento de su peso, sino que también facilita la formación de una capa lubricante que favorece los desplazamientos en masa. La relación entre las precipitaciones y los deslizamientos es tan demostrativa que el monitoreo de las condiciones hidrológicas se ha convertido en un método estándar para la predicción y prevención de estos eventos (Iverson, 2000).

Por otro lado, estudios como el de Glade (2000) han demostrado que no solo la cantidad de lluvia es significativo, sino también la intensidad y duración de las precipitaciones. Los sucesos de lluvia intensa y prolongada pueden provocar una rápida saturación del suelo, excediendo su capacidad de drenaje y generando un aumento en la presión hidrostática que desestabiliza los taludes. Además, la erosión superficial resultada por el escurrimiento puede alterar significativamente la morfología del terreno, disminuyendo el ángulo de reposo natural

del material y llevando a eventos críticos de inestabilidad. La comprensión detallada de estas dinámicas es crucial para el diseño de sistemas de alerta temprana y la implementación de estrategias efectivas para la mitigación del riesgo de deslizamientos (Glade, 2000).

Para la creación del mapa de precipitaciones, se utilizó información meteorológica recolectada por tres estaciones pluviométricas cercanas a la microcuenca Yutujupina que presentan registros de un periodo de tres años (2009-2012) (Tabla 7).

Tabla 7. Estaciones Meteorológicas cercanas a la zona de estudio.

Código	Estación Meteorológica	UTMX (m)	UTMY (m)	COTA (m s.n.m.)	Precipitación anual (mm)
VLR-001-PG	Cumbe alto	718439,25	9649279,63	3421	1111,42
VLR-002-PG	Cumbe Medio	720247,24	9653044,59	3009	722,16
VLR-003-PG	Cumbe bajo	718933,27	9661122,52	2662	794,86

Fuente: (Iñiguez et al., 2016)

Para tener una mayor veracidad en el estudio se decidió realizar una reclasificación respecto a las altitudes para saber cuál podría ser el nivel de precipitación a dichas alturas, se clasifíco en 5 categorías las cuales fueron interpoladas linealmente respecto a las precipitaciones cercanas a la zona de estudio dando como resultado la siguiente clasificación (Tabla 8).

Tabla 8. Precipitaciones utilizadas para el estudio de susceptibilidad

ALTITUD (m s.n.m.)	Precipitación anual (mm)
3243	807
3293	878
3343	948
3393	1019
3443	1090

Fuente: (Autores)

4.2.3. Recopilación De Información In Situ

4.2.3.1. Ensayo SPT (Standard Penetration Test)

El Ensayo SPT es una técnica ampliamente utilizada para obtener información sobre las propiedades geotécnicas del suelo, especialmente en la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos. Este procedimiento está estandarizado y se describe detalladamente en normativas como la ASTM D1586-11 o en nuestra localidad la normativa INEN 689 (ASTM, 2018).

El método de ensayo de penetración estándar es una técnica valiosa y conveniente que permite determinar la resistencia del terreno, su clasificación y la capacidad de carga. Esta prueba es fundamental para el diseño de cimientos en estructuras. Incluye la toma de muestras, proporcionando muestras que son representativas del suelo en análisis.

Durante la realización de esta prueba, varios factores pueden influir en los resultados obtenidos; por lo tanto, es crucial comprender y destacar estas variables y limitaciones para interpretar adecuadamente los datos obtenidos. Aunque se le llama "estándar", existen muchas variantes del ensayo y diferencias, en particular la energía transmitida al dispositivo de muestreo, que varía según el equipo utilizado y requiere ajustes para normalizar los resultados basados en la energía aplicada a través del número de golpes requeridos para que el penetrómetro estándar se introduzca 30 cm (Naranjo Aguay, 2010).

El procedimiento consiste en clavar un testigo de perforación o cuchara partida de 45 cm (18 pulgadas) de largo en el extremo de una varilla de acero sólida que transmite la energía del impacto, utilizando un martillo de 63,5 kg (140 lb) que se deja caer desde una altura de 76 cm (30 pulgadas). Se registra el número de golpes necesarios para clavar la cuchara los primeros 15 cm, conocido como N entre 0 y 15 cm. Luego, se continúa con la prueba propiamente dicha, introduciendo la cuchara otros 30 cm y anotando el número de golpes para cada segmento de 15 cm de penetración (N entre 15 y 30 cm y N entre 30 y 45 cm) (INEN, 1982a).

El resultado se conoce como resistencia a la penetración estándar o golpeo SPT. Los golpes contados para los primeros 15 cm sirven como referencia, pero no se incluyen en el cálculo de N, ya que el suelo puede estar alterado por el proceso de sondeo. Si se requieren más de 50 golpes para avanzar cualquiera de estos intervalos de 15 cm, se considera que hay rechazo (R) y se debe registrar la profundidad alcanzada al llegar a los 50 golpes (INEN, 1982a).

La ubicación del punto del ensayo fue en las coordenadas 9652618,3 N y 717266,3 S y una elevación de 3303 msnm, en un talud crítico que se analizó que fuera representativo en la vía de segundo orden y que esté involucrado en una de las zonas susceptibles a deslizamiento en el mapeo de susceptibilidad.



*Ilustración 9. (a) Máquina hidráulica para "SPT"; (b) Ejecución del ensayo "SPT" en la zona de estudio.
Fuente: Autores*

4.2.3.1.1. Obtención De Muestras Alteradas Mediante Testigos De Perforación Con Cuchara Partida

Para la recolección de muestras alteradas se procederá con la perforación utilizando una cuchara partida. Este método consiste en la inserción de un tubo bipartido longitudinalmente en el suelo, el cual permite recuperar una muestra cuando se extrae de la perforación. La cuchara partida es eficaz para obtener muestras representativas en suelos granulares y cohesivos, aunque

las muestras pueden sufrir cierto grado de alteración durante la extracción (Kulhawy & Mayne, 1990).

4.2.3.1.2. Obtención De Muestras Inalteradas Mediante Testigo De Perforación Con El Tubo Shelby

Para obtener muestras inalteradas, se utilizará un tubo Shelby, que es un cilindro delgado de paredes finas que permite cortar y encapsular una columna de suelo con mínima alteración. La integridad de la muestra es crítica para determinar con precisión las propiedades del suelo, como la resistencia al corte y la compresibilidad, que son fundamentales en el análisis de estabilidad de taludes (Lunne et al., 2011). El uso del tubo Shelby es recomendado por su capacidad para preservar la estructura del suelo en su estado natural (ASTM D1587-15, 2015).



*Ilustración 10. (a) Tubo bipartido; (b) Tubo Shelby.
Fuente: Autores*

4.2.3.2. Levantamiento Topográfico

El levantamiento topográfico es esencial para entender la morfología del terreno y detectar zonas potencialmente susceptibles a deslizamientos. Este proceso implica la medición de distancias, ángulos y diferencias de elevación para obtener un mapa detallado del área de estudio.

Para el talud que ha experimentado un deslizamiento, se realizará un levantamiento topográfico detallado utilizando estaciones totales y GPS diferencial. Este enfoque permitirá obtener un modelo digital del terreno (DEM) que refleje las condiciones actuales del talud y las deformaciones ocurridas. El MDT es una herramienta clave para analizar la geometría del talud

y los patrones de movimiento del deslizamiento, así como para diseñar medidas correctivas o preventivas (McKean & Roering, 2004).

En cuanto a la sección de carretera adyacente al talud, se realizará un levantamiento similar para evaluar cómo las características topográficas pueden influir en la estabilidad del talud y en la integridad de la infraestructura vial. Se prestará especial atención a los drenajes y a la inclinación transversal de la carretera, ya que estos factores pueden afectar significativamente el comportamiento hidrológico y, por ende, la susceptibilidad a deslizamientos en el área (Turner & Schuster, 1996).



*Ilustración 11. (a) Levantamiento del Talud de falla y sus zonas de vía adyacentes; (b) Levantamiento de punto topográfico referencial.
Fuente: Autores*

4.3. PAQUETE DE TRABAJO 2

Elaborar un mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca de estudio, basado en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en SIG, que revele el posible impacto de la vía de segundo orden.

La recolección de información permitió definir las variables y subvariables las cuales fueron clasificados dependiendo como haya sido considerado la evaluación de importancia dentro del

estudio, esto basado en la recolección de archivos DEM de la zona de estudio los cuales fueron analizados mediante el software Arc Map 10.8 con una resolución de 12.5 m. Se definió 4 variables que son muy importantes y que tienen influencia directa en los movimientos de masas como: Pendientes, Uso de suelo, Precipitaciones y la Distancia a la red de drenaje.

Posteriormente se combinaron las diferentes capas de información geoespacial analizadas con el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y mediante el método de Combinación Lineal Ponderada (WLC) que hace parte de una herramienta del software Arc Map 10.8 permitiendo la rasterización de las cuatro capas y obteniendo como resultado una sola capa ráster con resolución de 12.5 m que representa mapa de susceptibilidad a deslizamientos donde la capa se la reclasifico en 5 categorías mediante el siguiente criterio: Muy baja, Baja, Media, Alta, y Muy alta (El Jazouli et al., 2019).

Los pasos utilizados se los describe de mejor manera a continuación:

- Se Desarrollo la estructura de jerarquización donde se identifica las variables y subvariables utilizadas para el estudio.

- Con la matriz de juicios de comparación por pares se ponderó las diferentes subvariables con la recomendación de Saaty, (1987) (Tabla 9). Posteriormente se determinó que subvariable es más importante respecto a otra subvariable.

- En este punto se realizó la síntesis de juicios de comparación donde se evalúa y se decide la prioridad final de acuerdo con la tabla (Saaty, 1987), determinando el peso de influencia de cada variable dentro del estudio de susceptibilidad a deslizamientos.

- Para corroborar la información que nos brinda la matriz normalizada se realizó la evaluación de consistencia como sugiere (Saaty, 1987). Y, así verificar si las diferentes ponderaciones tienen sentido.

- Todas las capas geoespaciales fueron reclasificadas y ponderadas en una escala del uno al cinco según sea su grado de influencia en el estudio de deslizamientos, siendo uno el grado

con menor susceptibilidad a deslizamientos y cinco el grado más alto de susceptibilidad.

-Con la Combinación Lineal Ponderada “Weighted Overlay” herramienta del software Arc Map 10.8 se realizó la combinación de todas las capas reclasificadas, permitiendo la rasterización y obtención de una sola capa raster de resolución 12.5 m dando como resultado el mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

El mapa de susceptibilidad obtenido se lo clasificó en 5 categorías (Muy baja, Baja, Media, Alta, y Muy alta) dependiendo los resultados de la rasterización de las capas reclasificadas (El Jazouli et al., 2019).

En la “Ilustración 12” se muestra el diagrama de flujo creado para el mapeo de susceptibilidad a deslizamientos.

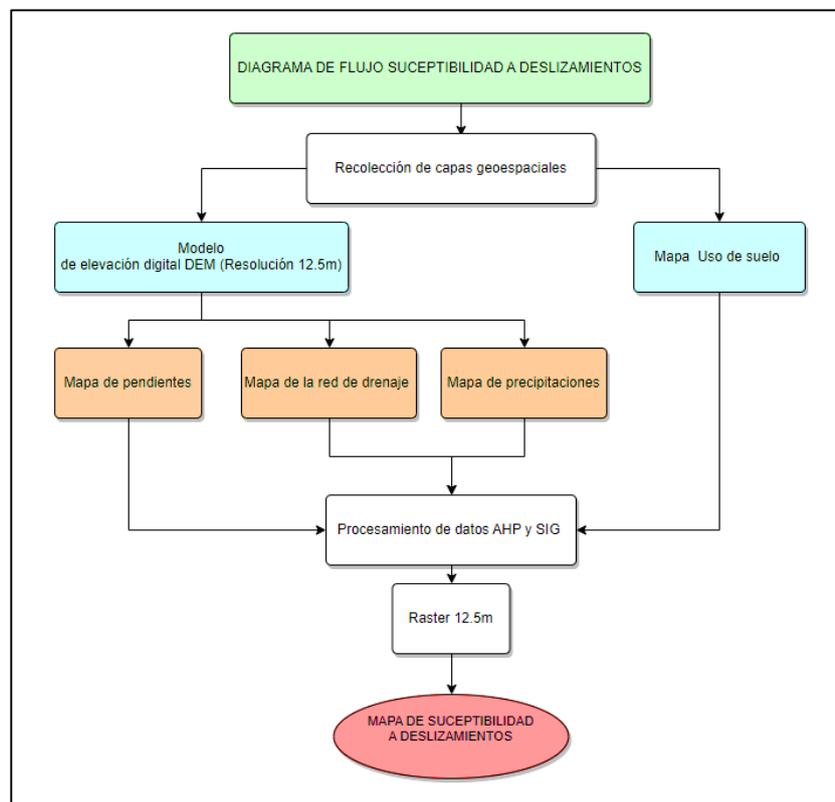


Ilustración 12. Diagrama de flujo susceptibilidad a deslizamientos.
Fuente: Autores

Tabla 9. Escala fundamental de Saaty.

Valor	Definición	Explicación
1	Igual de importancia	Dos elementos contribuyen por igual al objetivo
3	Moderadamente más importante	Un elemento de decisión es moderadamente más influyente que otro.
5	Mucho más importante	Un elemento de decisión tiene más influencia que otro
7	Muchísimo más importante	Un elemento de decisión tiene una influencia significativamente mayor que el otro.
9	Extremadamente más importante	Al comparar un elemento con otro el primero se considera muchísimo más importante que el segundo.
2,4,6,8	Valores juicios intermedios	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos

Fuente: Saaty (1987).

Luego, para corroborar la información que nos brinda la matriz normalizada es necesario realizar el cálculo de la razón de coherencia (CR) como sugiere (Saaty, 1987) con la siguiente ecuación (1):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

Donde:

CR = Radio de coherencia

CI = Índice de consistencia

RI = Índice de consistencia aleatorio, valor definido para el estudio AHP (Tabla 10)

Para el cálculo del índice de consistencia (CI) se utilizará la ecuación (2)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Donde:

n = Numero de factores

λ_{max} = Valor medio del vector de consistencia la cual se obtiene a partir de la matriz

Tabla 10. Índice de consistencia Aleatorio de Saaty

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Fuente: Saaty (1987).

Finalmente, se utiliza la suma ponderada para reclasificar los factores con su ponderación correcta y la suma da como resultado el mapa de susceptibilidad a deslizamientos, para esto utilizamos la ecuación (3) (Vojteková & Vojtek, 2020).

$$LS = \sum Wi * Xi \quad (3)$$

Donde:

LS= Susceptibilidad a deslizamientos

Wi = Ponderación de cada variable

Xi = Clasificación a de cada variable utilizada en el análisis de susceptibilidad a deslizamientos

4.4. PAQUETE DE TRABAJO 3

Realizar la caracterización mecánica de los suelos existentes en una sección transversal de la vía de segundo orden que tenga mayor susceptibilidad a deslizamientos (zona crítica establecida a partir del mapa de susceptibilidad a deslizamientos superficiales), cuyo enfoque será la estabilidad de taludes de dicha zona.

4.4.1. Caracterización De Parámetros Mecánicos

El presente marco metodológico describe los procedimientos y técnicas utilizados para la obtención de la caracterización mecánica del suelo existente en la zona donde se realizó el ensayo “SPT”. La investigación se fundamenta en ensayar las muestras del suelo extraído en sus diferentes estratos, cuyos resultados permitirán establecer parámetros críticos que influirán

en las medidas preventivas y correctivas de la gestión del riesgo de deslizamientos.

4.4.1.1. Recolección de Muestras

La recolección de muestras se llevó a cabo en una zona donde se evidencian condiciones propensas a deslizamientos, así como áreas con variabilidad en la composición del suelo (Varnes, 1984). De lo cual se obtuvieron seis estratos que se pretende sean geológicamente representativos de la zona de estudio. Se extrajeron muestras representativas a una profundidad de 3.7 m, siguiendo las normativas ASTM D1586-11 e INEN 689 (ASTM International, 2011).



*Ilustración 13. Extracción de los estratos de suelo en laboratorio.
Fuente: Autores*

4.4.1.2. Análisis de Contenido de Humedad

El contenido de humedad se determinó mediante la norma ASTM D2216-10 (ASTM International, 2010), que implica el secado de una muestra de suelo hasta alcanzar un peso constante, permitiendo calcular el porcentaje de agua respecto al peso seco del suelo (INEN, 1982b).

4.4.1.2.1. Procedimiento De Ensayo (INEN, 1982)

El equipo necesario para llevar a cabo la determinación del contenido de humedad del suelo es el siguiente:

- Horno de secado: recipiente con capacidad para mantener temperaturas constantes de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Recipientes de muestreo: los recipientes deben poseer características especiales como son: su material preferiblemente aluminio o porcelana, que soporte altas temperaturas y sea resistente a la corrosión por el contacto con la humedad de las muestras. Deben estar señalados con un código que facilite su identificación.
- Guantes resistentes a altas temperaturas
- Balanza de precisión: con precisión de 0,01 g, de preferencia, previamente calibradas.
- Herramientas menores: Como son espátulas, limpiones, entre otros.

Ejecución:

- Seleccionar un recipiente de masa conocida para la muestra.
- Una vez seleccionada la muestra a ensayar, colocar la misma dentro del recipiente y determinar la masa del conjunto (recipiente + muestra).
- Se procede a colocar el recipiente con la muestra dentro del horno, a una temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Se debe dejar en el horno el tiempo suficiente para que se alcance una masa uniforme.
- Una vez se haya secado el material se retira del horno y se deja secar a temperatura ambiente y constante para luego determinar su peso seco.



Ilustración 14. (a) Muestra con humedad natural; (b) Muestra luego de secada al horno.
Fuente: Autores

Cálculos:

Tabla 11. Simbología para cálculos de contenido de humedad.

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO		
Símbolo	Descripción	Unidades
Wr	Masa del Recipiente	Gramos (g)
Wh	Masa de Recipiente + Suelo Húmedo	Gramos (g)
Ws	Masa de Recipiente + Suelo Seco	Gramos (g)
Ww	Masa del agua	Gramos (g)
Wp	Masa de Partículas de Suelo	Gramos (g)

Fuente: Fuente: Autores

El contenido de humedad del suelo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W(\%) = \frac{Wh - Ws}{Ws - Wr} * 100$$

Tabla 12. Cálculo de contenido de humedad de los estratos 1 y 2

CONTENIDO NATURAL DE HUMEDAD :					
Observaciones :		Ubicación :	C - 1	Ubicación :	C - 1
		Estrato :	E1	Estrato :	E2
		Prof :	0,60 m	Prof :	1,20 m
Tara Número	Unidades	1	1		
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	607,10	1098,15		
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	393,10	668,15		
Peso de la Tara	Gr	154,10	154,15		
Peso de la Muestra Seca	Gr	239,00	514,00		
Peso del Agua	Gr	214,00	430,00		
Contenido de Humedad	%	89,54	83,66		
Promedio		89,54	83,66		

Fuente: Autores

4.4.1.3. Análisis de Peso Unitario

El análisis del peso unitario o peso específico se determinó mediante la norma ASTM D4914 (ASTM International, 2016), la determinación del peso unitario de los suelos se puede ejecutar tanto en laboratorio como en campo, y existen varios métodos para estas opciones.

Ejecución:

Método de labrado de figura geométrica regular (ASTM D4914, 2016)

- De la muestra en campo, que debe ser inalterada y extraída por el tubo Shelby, se procede a cortar el espécimen de suelo con una geometría de cubo aproximada de 3,5x3,5x3,5 (cm).
- Cuando se tenga la condición anterior, se lleva la muestra a realizar mediciones aleatorias de sus caras, para obtener medidas precisas de cada lado del cubo.
- Se realiza 3 mediciones de la longitud de sus caras y se realiza el cálculo promedio, para tener más precisión.
- Por último, se lleva la muestra a la balanza y se determina su peso.
- Si el material resultado del labrado es suficiente, se puede recoger para determinar contenido de humedad.



*Ilustración 15. Registro de mediciones de peso y longitudes de las caras.
Fuente: Autores.*

Cálculos:

Método de labrado de figura geométrica regular

$$\text{- Área: } \quad Ap = \frac{(As+4Ac+Ai)}{6}$$

Donde:

- As: área determinada con diámetro superior.
- Ac: área determinada con diámetro central.
- Ai: área determinada con diámetro inferior.
- Ap: área promedio.

$$\text{- Volumen: } \quad V = Ap * Hm$$

Donde:

- V: volumen de la muestra
- H: altura de la muestra
- Ap: área promedio
-

$$\text{- Peso Unitario húmedo: } \quad \gamma_{hum} = \frac{Wm}{V}$$

Donde:

- γ_{hum} : Peso Unitario húmedo
- Wm: Peso Húmedo
- V: Volumen de la muestra

Tabla 13. Determinación del peso unitario estrato 1.

PESO ESPECÍFICO :				
Observaciones :		Ubicación : C - 1		
		Estrato : E1		
		Potencia : 0,60 m		
Tara Número	Unidades	1	2	3
Peso del Suelo Seco	Gr	62,80	62,80	62,80
Medicion 1	cm	3,20	3,20	3,50
Medicion 2	cm	3,50	3,30	3,30
Medicion 3	cm	3,40	3,30	3,20
Volumen	Cm ³	38,08	34,85	36,96
Peso Especifico de Sólidos	Gr / Cm ³	1,65	1,80	1,70
Promedio	Gr / Cm ³	1,72		
	Kg/m ³	1716,80		
	KN/m ³	17,17		

Fuente: Autores

4.4.1.4. Granulometría

El análisis granulométrico se realizó conforme a la normativa ASTM D2487 (ASTM International, 2007), mediante tamizado, para clasificar las partículas del suelo según su tamaño y obtener la distribución porcentual de las mismas con la metodología SUCS.

Tamizado (ASTM D2487, 2007)

1. Se escoge una muestra representativa de cada estrato y se le procede a cuartear y mezclar, para homogenizar la muestra
2. La muestra de suelo preliminarmente secado se lo hace pasar por una serie de tamices, de arriba hacia abajo el número de tamices son: N°4, N°10, N°20, N°40 y N°200. Ubicar el suelo seco sobre el primer tamiz y tapanlo herméticamente, agitar la serie de tamices con movimientos bruscos de rotación horizontales y verticales por un período mínimo de al menos 10 minutos.
3. Se procede a retirar la tapa del tamiz superior y se recolectar en las cápsulas el material retenido por cada tamiz.
4. Se pesa las cápsulas que contienen el material resultante en el paso 3 y se anotan los datos en la hoja de control.
5. Se repite el procedimiento 3 y 4 para el resto de los tamices.



Ilustración 16. Tamices usados para el ensayo y muestra ensayada.

Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos se determina el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices, para poder realizar el trazo de la curva granulométrica. Las tablas de cada uno de los análisis granulométricos correspondientes a cada estrato se encuentran en la sección de anexos.

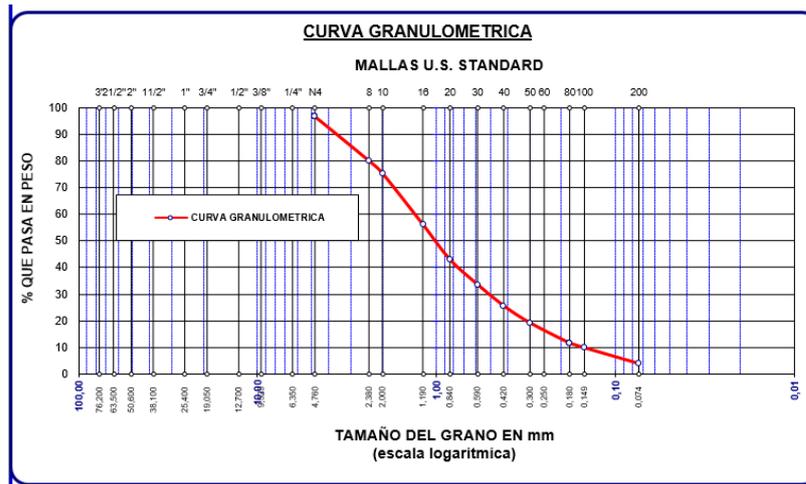


Ilustración 17. Curva granulométrica obtenida del 1er estrato.
Fuente: Autores.

Interpretación de las Curvas:

- Si la curva es más plana y se extiende a lo largo del eje horizontal, el suelo es bien graduado, lo que generalmente es deseable para la construcción, ya que tiende a ser más compacto y estable.
- Si la curva es empinada, el suelo es pobremente graduado, lo que puede indicar una menor estabilidad y una capacidad de drenaje reducida.
- Las curvas pueden mostrar también la presencia de 'gaps' o saltos en la gradación, donde hay una ausencia de ciertos tamaños de partículas.

4.4.1.5. Límites de Consistencia

Se determinaron los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) siguiendo los procedimientos establecidos en las normas ASTM D4318-10 (ASTM International, 2010). Estos parámetros son esenciales para clasificar el comportamiento mecánico del suelo ante cambios en el contenido de humedad (Holtz et al., 1981).

Preparación De Las Muestras (ASTM D4318, 2010)

Este ensayo permite conocer y caracterizar el comportamiento de los suelos finos.

- 1) La muestra de suelo se desagrega de manera tal que sean partículas sueltas.
- 2) Juntar en un recipiente todo el material que pasa por el tamiz N° 40.
- 3) Con la ayuda de una pipeta agregar agua y revolver hasta obtener una mezcla de consistencia homogénea.
- 4) Dejar reposar la muestra durante 24 horas en un recipiente con tapa hermética, esto se lo hace para que el agua se expanda de manera uniforme en la muestra.

4.4.1.5.1. Límite Líquido (ASTM D4318, 2010)

El ensayo de límite líquido se efectúa de la manera siguiente:

- 1) La muestra preparada con anterioridad se mezcla en una cápsula, ayudado de una espátula.
- 2) La mezcla se dispone en la copa Casagrande.
- 3) Con una espátula se debe enrasar la superficie de la muestra en la copa Casagrande, considerando que la zona más profunda de la copa tenga 1cm de espesor de muestra.
- 4) Con el acanalador se hace una división en un solo movimiento de arriba a abajo, de tal manera que exista una simetría entre el canal y la articulación de la copa Casagrande.
- 5) Se implementa el mecanismo de manivela de la copa a razón de 2 golpes por segundo, contabilizar el número de golpes necesarios hasta que las dos mitades se junten a lo largo de al menos 1.3 cm, por fluidez el suelo y no por el desmoronamiento del suelo.
- 6) El número de golpes del primer ensayo debe estar entre el intervalo de 26 y 30 golpes, de no ser el caso se debe añadir agua y repetir los pasos del 2 a 5, hasta que esta condición se cumpla.
- 7) En el lugar en donde se juntan los bordes en el canal, se toma una porción de muestra en una cápsula para determinar el contenido de humedad.
- 8) Repetir el procedimiento del 2 al 7 por lo menos 3 veces, se hace uso el mismo suelo variando

únicamente la cantidad de agua para cada repetición, la cual debe aumentarse de manera tal que los golpes para cerrar el canal para el segundo ensayo estén entre los intervalos de 21 y 25 golpes, para el tercer ensayo entre 15 y 20 golpes.

9) Realizar el análisis de los resultados, con lo que se extrae la curva de flujo, con ello se puede determinar el límite líquido de una muestra a 25 golpes.



Ilustración 18. (a) Procedimiento de ensayo en la cuchara de Casagrande; (b) Peso de la porción donde se juntaron los canales.

Fuente: Autores

4.4.1.5.2. Límite Plástico (ASTM D4318, 2010)

El procedimiento se describe a continuación:

- 1) Se adjunta en una cápsula aproximadamente 50 gramos de material previamente preparado.
- 2) Con la ayuda de una espátula se mezcla, hasta obtener una porción de masa homogénea que fácilmente puede ser moldeada con los dedos sin que la muestra se adhiera a estos.
- 3) Se extrae una porción de unos 10 gramos de muestra y se forma un pequeño ovoide de unos 2 centímetros de diámetro, rápidamente debe rolarlo sobre una superficie lisa con ayuda de la palama de la mano.
- 4) El procedimiento de rolado sobre una superficie lisa se repite las veces que sea

necesario, hasta la obtención de que los filamentos se agrieten o rompan una vez alcanzado los 3 milímetros de diámetro, los suelos que no es posible rolar con ningún contenido de humedad, se consideran suelos no plásticos.

- 5) La velocidad de rolado debe ser de unos 80 a 90 movimientos por minuto.
- 6) Los filamentos (masa alargada) obtenidos de 3 milímetros de diámetro, se recogen en una cápsula para determinar el contenido de humedad.
- 7) Se repite el ensayo 2 veces y se registran los resultados en la hoja de control.



Ilustración 19. (a) Procedimiento de rolado de la muestra de suelo; (b) Colocación de la muestra en envase para pesaje.
Fuente: Autores

Tabla 14. Cálculo de límites de consistencia en el estrato 4.

LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : Calicata C1			Prof : 2,35 m					
		Estrato : E4								
		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO			Límites de Consistencia		
Tara Número	Unidades	1	2	3	1	2	3			
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	29,50	29,20	30,20	18,40	18,20		Límite Líquido: LL =	44,44%	
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	25,90	25,40	26,20	18,30	18,00		Límite Plástico: LP =	21,67%	
Peso de la Tara	Gr	17,50	17,50	17,70	17,30	17,40		Índice de Plasticidad : IP =	22,78%	
Peso de la Muestra Seca	Gr	8,40	7,90	8,50	1,00	0,60		Contenido de Humedad : W _n =	89,86%	
Peso del Agua	Gr	3,60	3,80	4,00	0,10	0,20		Grado de Consistencia : K _w =	-1,99	
Contenido de Humedad	%	42,86	48,10	47,06	10,00	33,33		Grado de Consistencia : Consistencia Líquida		
Número de Golpes		25	12	22	Promedio :	21,67				

Fuente: Autores

4.4.1.6. Clasificación del Suelo

La clasificación del suelo se realizó utilizando los sistemas Unified Soil Classification System (SUCS) y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), basándose en los resultados obtenidos en los análisis anteriores (ASTM D2487-11 y AASHTO M 145-91, respectivamente).

Para la clasificación SUCS, se realizó el respectivo análisis de partículas y demás parámetros en base a la tabla que recomienda Das & León (2012).

Tabla 15. Clasificación SUCS, según la ASTM 2009

Tabla 1.8 Gráfica de la Unified Soil Classification (según la ASTM, 2009) (ASTM D2487-98; Práctica estándar para la clasificación de suelos para fines ingenieriles (Unified Soil Classification). Derechos de autor de la ASTM INTERNATIONAL. Reimpresa con permiso).

Criterios para asignar símbolos y nombres de grupo utilizando pruebas de laboratorio ^a			Clasificación del suelo		
			Símbolo de grupo	Nombre de grupo ^b	
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en la malla núm. 200	Gravas	Gravas limpias Menos de 5% finos ^c	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^e$ $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^e$	GW GP	Grava bien graduada ^f Grava mal graduada ^f
		Gravas con finos Más de 12% finos ^c	Los finos se clasifican como ML o MH	GM GC	Grava limosa ^{g,h} Grava arcillosa ^{g,h}
	Arenas	Arenas limpias Menos de 5% finos ^c	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^e$ $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^e$	SW SP	Arena bien graduada ⁱ Arena mal graduada ⁱ
		Arena con finos Más de 12% finos ^c	Los finos se clasifican como ML o MH	SM SC	Arena limosa ^{g,h,i} Arena arcillosa ^{g,h,i}
Suelos de grano fino 50% o más pasa la malla núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se encuentra en o arriba de la línea "A" ^j IP < 4 o se encuentra debajo de la línea "A" ^j	CL ML	Arcilla de baja compresibilidad ^{k,l,m} Limo de baja compresibilidad ^{k,l,m}
		Orgánicos	Límite líquido—secado en horno Límite líquido—no secado < 0.75	OL	Arcilla orgánica ^{k,l,m,n} Limo orgánico ^{k,l,m,o}
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o mayor	Inorgánicos	IP se encuentra en o arriba de la línea "A" ^j IP se encuentra debajo de la línea "A" ^j	CH MH	Arcilla de alta compresibilidad ^{k,l,m,n} Limo de alta compresibilidad ^{k,l,m,n}
		Orgánicos	Límite líquido—secado en horno Límite líquido—no secado < 0.75	OH	Arcilla orgánica ^{k,l,m,p} Limo orgánico ^{k,l,m,q}
Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica, de color oscuro y olor orgánico		PT	Turba	

^aCon base en el material que pasa la malla de 75 mm (3 in).
^bSi la muestra de campo contenía cantos rodados o piedra bola, o ambos, agregue "con cantos rodados o piedra bola, o ambos" al nombre de grupo.
^cGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: grava bien graduada con limo, GW-GM; grava bien graduada con arcilla, GW-GC; grava mal graduada con limo, GP-GM; grava mal graduada con arcilla, GP-GC.
^dArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: arena bien graduada con limo SW-SM; arena bien graduada con arcilla SW-SC; arena mal graduada con limo SP-SM; arena mal graduada con arcilla SP-SC.
^e $C_u = D_{60}/D_{10}$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$
^fSi el suelo contiene $\geq 15\%$ de arena, agregue "con arena" al nombre de grupo.
^gSi los finos se clasifican como CL-ML, utilice el símbolo doble GC-GM o SC-SM.
^hSi los finos son orgánicos, agregue "con finos orgánicos" al nombre de grupo.
ⁱSi el suelo contiene $\geq 15\%$ de grava, agregue "con grava" al nombre de grupo.
^jSi los límites de Atterberg se encuentran en el área sombreada, el suelo es una arcilla limosa, CL-ML.
^kSi el suelo contiene 15 a 29% más la malla núm. 200, agregue "con arena" o "con grava," lo que predomine.
^lSi el suelo contiene $\geq 30\%$ más la malla núm. 200, predominantemente arena, agregue "arenoso" al nombre de grupo.
^mSi el suelo contiene $\geq 30\%$ más la malla núm. 200, predominantemente grava, agregue "gravoso" al nombre de grupo.
ⁿSi IP ≥ 4 y se encuentra en o arriba de la línea "A."
^oSi IP < 4 o se encuentra debajo de la línea "A."
^pSi IP se encuentra en o arriba de la línea "A."
^qSi IP se encuentra debajo de la línea "A."

Fuente: Modificado de Das & León (2012).

Tabla 16. Clasificación SUCS, Ejemplo: Estrato 1

Proyecto : Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"	
Proyectistas : Luis A. Chimbo A Christopher H. Loja L	
Realizado por :	
CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN S.U.C.S	
Ubicación :	C - 1 Prof : 0,60 m
Estrato :	E - 1
% Que Pasa la Malla N° 200	3,83
% Que Pasa la Malla N° 4	96,60
Límite Líquido LL =	D60 = 1,2000 Cu = 8,000
Límite Plástico LP =	D30 = 0,50 Cc = 1,389
Índice de Plasticidad IP =	D10 = 0,15 Suelo Bien Graduado
Tipo de Suelo Según su Granulometría : Suelo Grueso Arena	
Tipo de Simbología : Simbología Normal	
Tipo de Suelo : SW , SP	
Suelo : SW Orgánico	
Caractrísticas del Suelo : SW Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporcions muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo	

Fuente: Autores

Para la clasificación AASHTO, se realizó el respectivo análisis de partículas y demás parámetros en base a la tabla que recomienda Das & León (2012).

Tabla 17. Clasificación AASHTO, según la ASTM 2009

Tabla 1.7 Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO							
Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
	A-1			A-2			
	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10	50 máx						
Malla núm. 40	30 máx	50 máx	51 mín				
Malla núm. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Para la fracción que pasa Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (IP)	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Clasificación de la capa	Excelente a buena						
Clasificación general	Materiales de limo y arcilla (más de 35% de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
	A-4	A-5	A-6	A-7			
				A-7-5 ^a	A-7-6 ^b		
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10							
Malla núm. 40							
Malla núm. 200	36 mín	36 mín		36 mín			36 mín
Para la fracción que pasa Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)	40 máx	41 mín		40 máx			41 mín
Índice de plasticidad (IP)	10 máx	10 máx		11 mín			11 mín
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos			Principalmente suelos arcillosos			
Calificación subrasante	Regular a malo						

^aSi IP ≤ LL - 30, la clasificación es A-7-5.

^bSi IP > LL - 30, la clasificación es A-7-6.

Fuente: Modificado de Das & León (2012).

Tabla 18. Clasificación AASHTO. Ejemplo: Estrato 4

Proyecto : Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"	
Proyectistas : Luis A. Chimbo A Christopher H. Loja L	
CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN A.A.S.H.T.O.	
Realizado por :	
CLASIFICACIÓN AASHTO	
Parámetros Usados	Ubicación : C - 1 Prof: 2,35 m
% Que Pasa la Malla N° 200 1,12	Estrato : E - 4
% Que Pasa la Malla N° 40 25,96	Determinación del Índice de Grupo IG
% Que Pasa la Malla N° 10 77,40	a = 0,00 IG = 0,00
Límite Líquido LL = 44,44 %	b = 0,00
Límite Plástico LP = 21,67 %	c = 4,44
Índice de Plasticidad : IP = 22,77 %	d = 12,77
Tipo de Suelo : Material Granular	
Clasificación de Suelos : A - 2	
Suelo : A - 2 - 7 (0)	
Tipode Material : Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas	
Terreno de Fundación : Regular	

Fuente: Autores

4.4.1.7. Ensayo Triaxial No Consolidado No Drenado (UU)

Se efectuó el ensayo triaxial tipo UU (No Consolidado No Drenado) según la normativa ASTM D2850-03 (ASTM International, 2003). Este ensayo permitió obtener los parámetros de resistencia al corte del suelo, específicamente el ángulo de fricción interna y la cohesión, fundamentales para el análisis de estabilidad de taludes (Lambe & Whitman, 1991).

Procedimiento (ASTM International, 2003):

1. Extraer una muestra del bloque de suelo, tomando en cuenta orientación de los estratos.
2. Tallar de forma perpendicular a los estratos con la ayuda de espátulas, hasta extraer un tamaño similar al de la probeta de ensayo triaxial.
3. En los extremos de la probeta de ensayo triaxial se sella herméticamente con la ayuda de anillos de tipo "o-rings".
4. Los tubos de drenaje se conectan a un sistema que accede visualizar el volumen de agua absorbido o expulsado por el suelo durante el ensayo.
5. El espécimen se coloca dentro de la cámara de presión la cual posee en la parte superior un vástago mismo que tiene como función, transmitir la carga axial

durante el ensayo.

6. Se consolida el espécimen entre un régimen de presión hidrostática, con esto se puede obtener el esfuerzo efectivo que actúa sobre la fase sólida del suelo.
7. Las líneas de drenaje se cierran y el espécimen se carga hasta alcanzar su fallo en condiciones no drenadas.
8. Al terminar el ensayo, se retira la muestra resultante del equipo para llevarla al horno a secar.



*Ilustración 20. (a) Máquina para ensayo "UU"; (b) Extracción de muestra luego del ensayo.
Fuente: Autores*

Se realizaron ensayo en 4 probetas de muestra de suelo, de las cuales se escogió 3 de estos resultados que fueron los que más se asemejaron en términos de valores resultantes de ensayo.

Los cálculos para la obtención de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna, los realiza el complemento computacional de la máquina de ensayo, de esta forma nos entrega los resultados principalmente la envolvente de Morh-Coulomb y los resultados de los parámetros directamente.

4.4.2. Modelamiento De Estabilidad De Taludes.

4.4.2.1. Estabilidad De Taludes.

Se describe procedimientos que se enfocan en el análisis de tres escenarios topográficos: antes del deslizamiento, después del deslizamiento y un modelamiento teórico que hubiera prevenido el evento.

4.4.2.1.1. Recopilación y Análisis de Datos Topográficos

La recopilación de datos topográficos se realizó mediante la utilización de perfiles longitudinales y transversales del talud, obtenidos a través de levantamientos con tecnología GPS y estación total. El análisis de estos perfiles se llevó a cabo en el programa AutoCAD, permitiendo una representación detallada del terreno antes y después del deslizamiento.

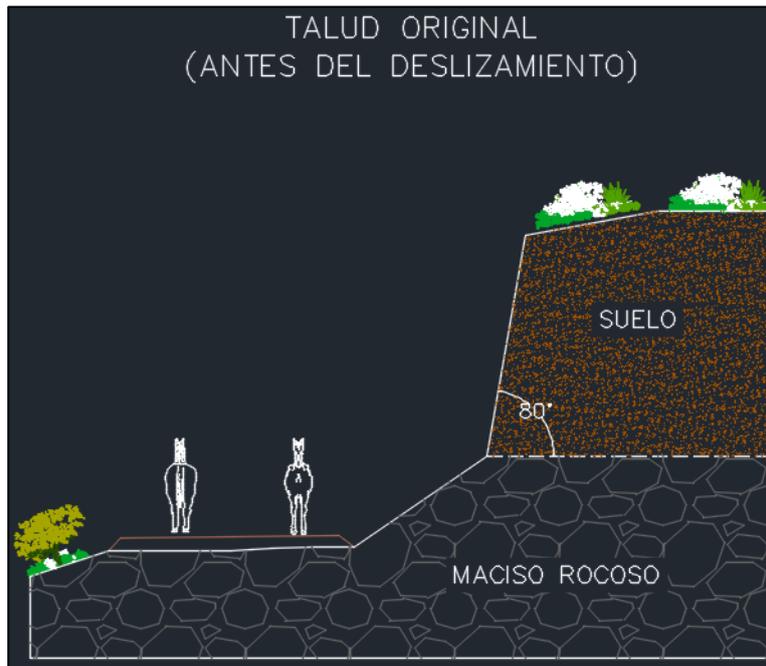
Criterios de diseño

El análisis de estabilidad se llevó a cabo utilizando la metodología de Bishop (1955), reconocida por su aplicabilidad en taludes homogéneos y su capacidad para proporcionar estimaciones confiables del factor de seguridad (Duncan et al., 2014b). Se evaluaron las posibilidades de falla considerando los ángulos de inclinación transversal y las condiciones geotécnicas del material.

4.4.2.1.2. Escenarios De Análisis

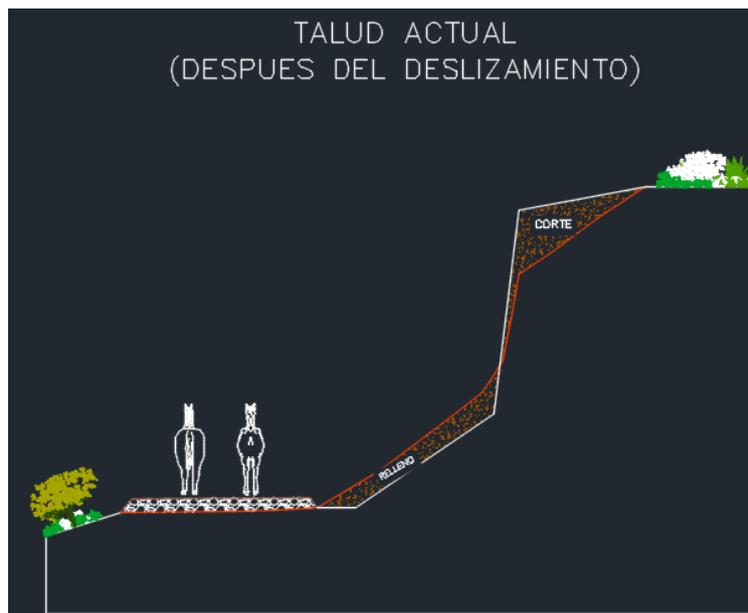
Se desarrollaron tres modelamientos distintos utilizando la información topográfica realizada y un análisis de campo, Los escenarios corresponden a taludes con vistas transversales, mismos que están en función de un ángulo de inclinación para cada escenario correspondiente.

- a. **Escenario Pre-Deslizamiento:** Se reconstruyó el estado original del talud antes del evento, considerando las condiciones geotécnicas y la morfología del terreno, un factor mayormente condicionante es la pendiente de inclinación del perfil del talud, en este caso es de 80° con respecto al plano horizontal.

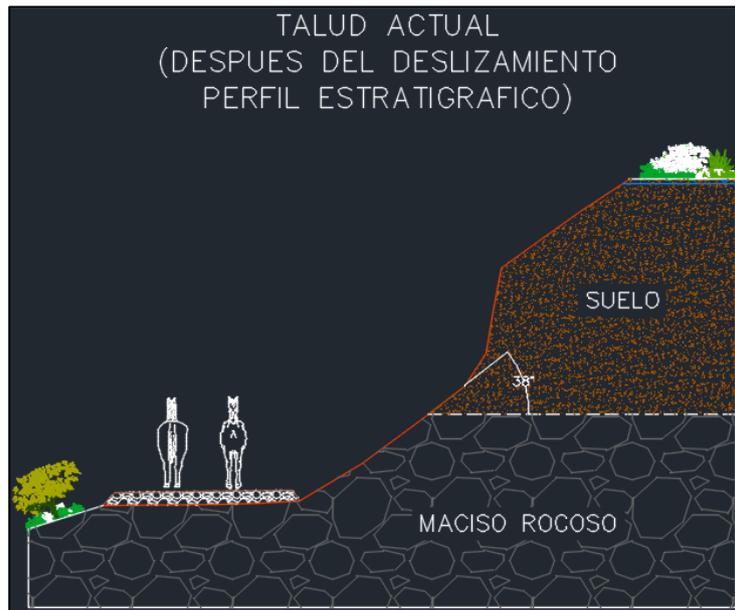


*Ilustración 21. Talud reconstruido (antes del deslizamiento).
Fuente: Autores.*

- b. **Escenario Post-Deslizamiento:** Se analizó el talud tras el deslizamiento, evaluando los cambios topográficos y las nuevas condiciones de estabilidad, un factor mayormente condicionante es la pendiente de inclinación del perfil del talud, en este caso es de 38° con respecto al plano horizontal.

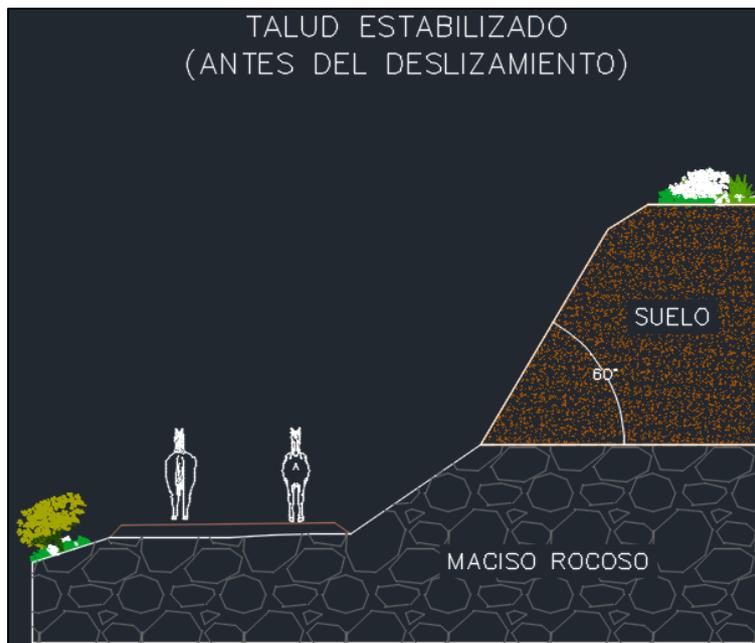


*Ilustración 22. Talud con las condiciones que sucedieron en el deslizamiento.
Fuente: Autores.*



*Ilustración 23. Talud actual (Luego del deslizamiento).
Fuente: Autores*

- c. **Escenario Teórico Preventivo:** Se diseñó un talud teórico con un factor de seguridad aceptable, basado en un ángulo de inclinación transversal óptimo que hubiera prevenido el deslizamiento, un factor mayormente condicionante es la pendiente de inclinación del perfil del talud, en este caso es de 60° con respecto al plano horizontal.

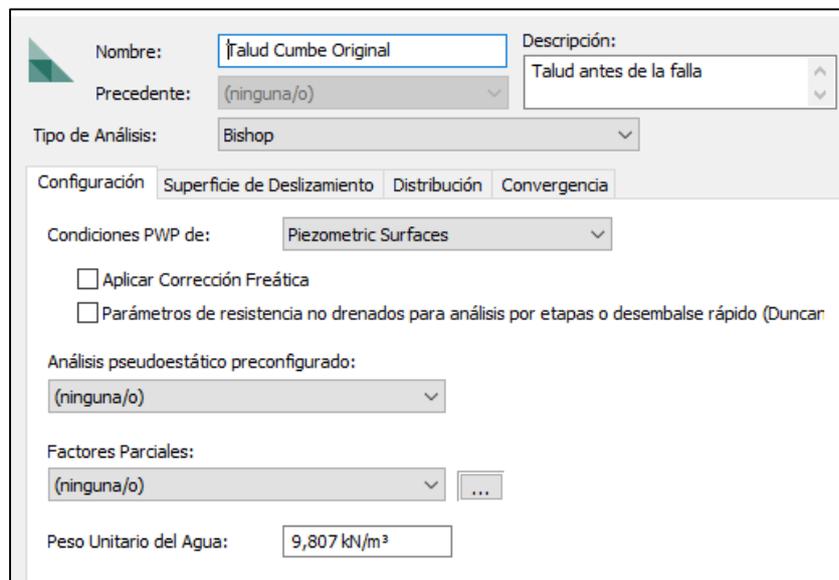


*Ilustración 24. Talud teórico estabilizado (Modelamiento).
Fuente: Autores*

4.4.2.1.3. Modelamiento de Taludes

Para cada uno de los escenarios topográficos, se realizaron modelamientos utilizando el software GeoStudio y la herramienta SLOPE/W. Se generaron modelos geotécnicos que representan el estado del talud antes del deslizamiento, después del deslizamiento y un modelo teórico con las modificaciones necesarias para alcanzar un factor de seguridad aceptable.

1. Inicialmente se designa las características de modelamiento, consiste en el método a usar, que en este caso es el de “Bishop”, además se considera el nivel freático que incide en la zona, y demás características generales.



The screenshot shows the SLOPE/W software configuration window. The 'Nombre' field contains 'Talud Cumbe Original' and the 'Descripción' field contains 'Talud antes de la falla'. The 'Tipo de Análisis' is set to 'Bishop'. Under the 'Configuración' tab, 'Condiciones PWP de:' is set to 'Piezometric Surfaces'. There are two unchecked checkboxes: 'Aplicar Corrección Freática' and 'Parámetros de resistencia no drenados para análisis por etapas o desembalse rápido (Duncan)'. The 'Análisis pseudoestático preconfigurado:' dropdown is set to '(ninguna/o)'. The 'Factores Parciales:' dropdown is also set to '(ninguna/o)'. The 'Peso Unitario del Agua:' is set to '9,807 kN/m³'.

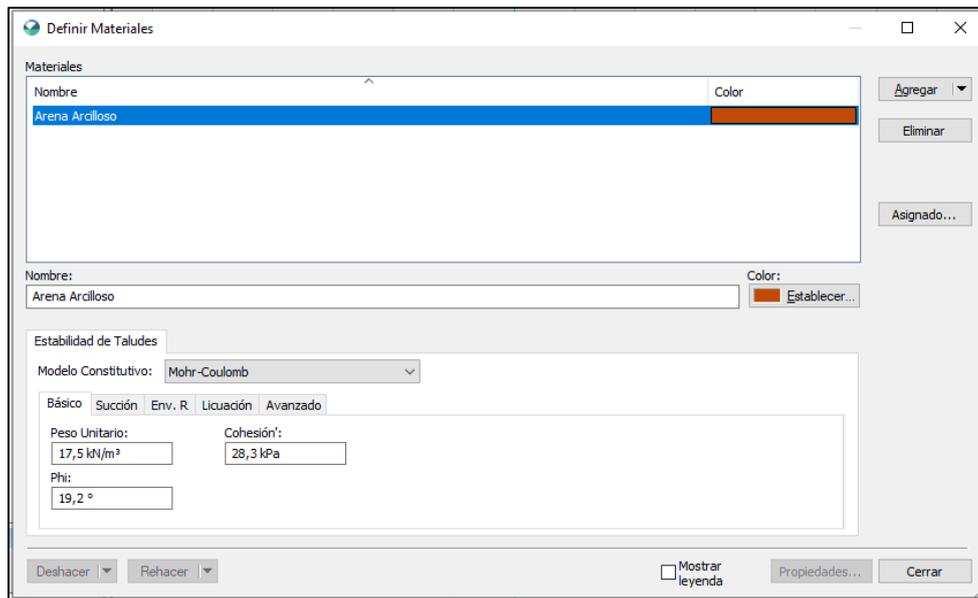
Ilustración 25. Designación de caracteres generales para el modelamiento.
Fuente: Autores

2. Se introduce los parámetros para el modelamiento, como:

El peso específico: Este peso se obtuvo en los ensayos y se consideró el valor final, como la media de los valores de todos los estratos, ya que el material que se analizó es casi homogéneo en sus partículas.

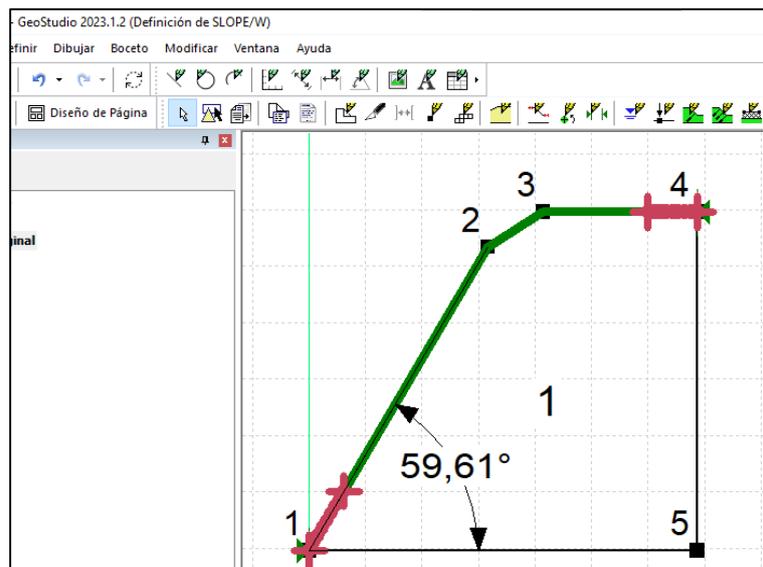
Cohesión: Este valor asignamos en función del resultado del ensayo triaxial “UU”, ensayado para el estrato 5, nuevamente se asigna un valor en representación de todos los estratos ya que sus características en términos de granulometría y demás coeficientes son similares.

Ángulo de fricción: Se implementa el valor obtenido en el ensayo triaxial “UU”, considerando los mismos factores de la cohesión.



*Ilustración 26. Parámetros mecánicos del suelo.
Fuente: Autores*

3. Se realiza la geometría del talud, además se aplica los puntos de entrada y salida que se prevé que se van a deslizar en el talud.



*Ilustración 27. Geometría del talud.
Fuente: Autores*

4. Se asigna el parámetro de nivel freático, considerando que en el ensayo “SPT” se encontró un material casi saturado a partir de los 10 cm de profundidad, por lo tanto, se considera un escenario posible de saturación total, que generalmente se presentaría en épocas de invierno, de esta manera somos conservadores para el diseño y obtenemos resultados prácticamente reales, ya que esta región es una zona de páramo y su precipitación se puede decir que sea constante a lo largo de todo el año.

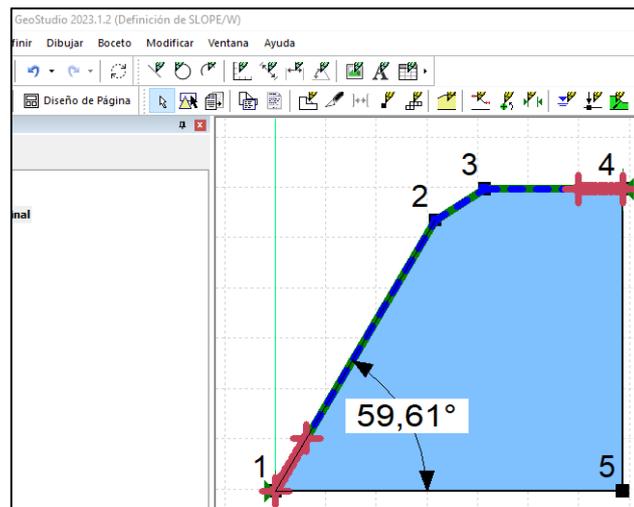


Ilustración 28. Asignación de nivel freático.
Fuente: Autores

5. Se procede a modelar los taludes en sus diferentes escenarios, el programa realizará varias iteraciones, que luego analizará y nos reportará el plano de falla más crítico.

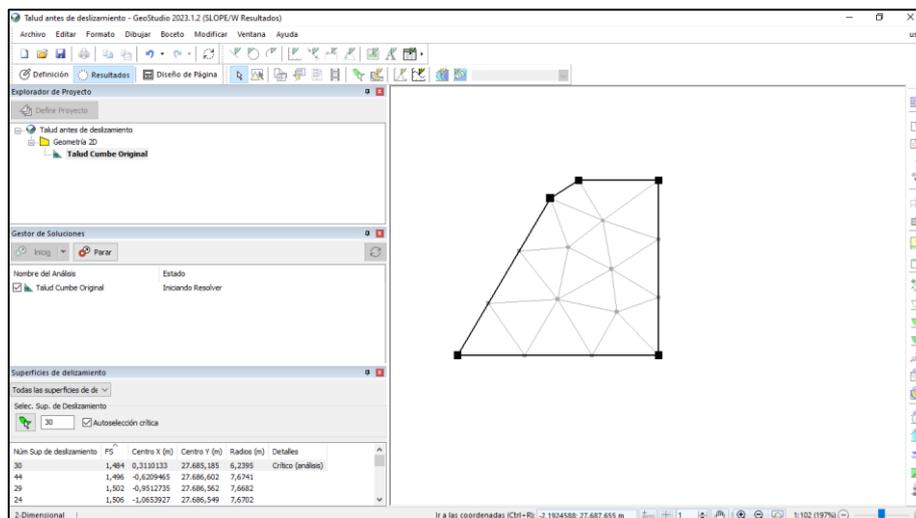


Ilustración 29. Modelamiento en ejecución del programa GeoStudio.
Fuente: Autores

4.4.2.1.4. Evaluación del Factor de Seguridad

La evaluación del factor de seguridad se realizó mediante análisis de estabilidad de taludes, utilizando el método de equilibrio límite y el software GeoStudio. Se consideraron las condiciones geomecánicas del material, la presencia de agua subterránea y las cargas externas aplicadas al talud.

El factor de seguridad para la estabilidad está dado por la normativa “NEC-SE-GC”, normativa ecuatoriana de geotecnia y cimentaciones.

Tabla 19. Factor de seguridad por corte mínimo

Condición **	Fscore Mínimo	
	Diseño	Construcción
Carga Muerta+Carga Viva Nominal	1.5	1.25
Carga Muerta+ Carga Viva Máxima	1.25	1.1
Carga Muerta+ Carga Viva Nominal + Sismo de diseño Pseudo estático	1.1	1.00 *
Taludes - condición estática y Agua Subterránea Normal	1.5	1.25
Taludes - condición pseudo estática con agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de diseño	1.05	1.00 *

Fuente: NEC. (2014)

5. RESULTADOS

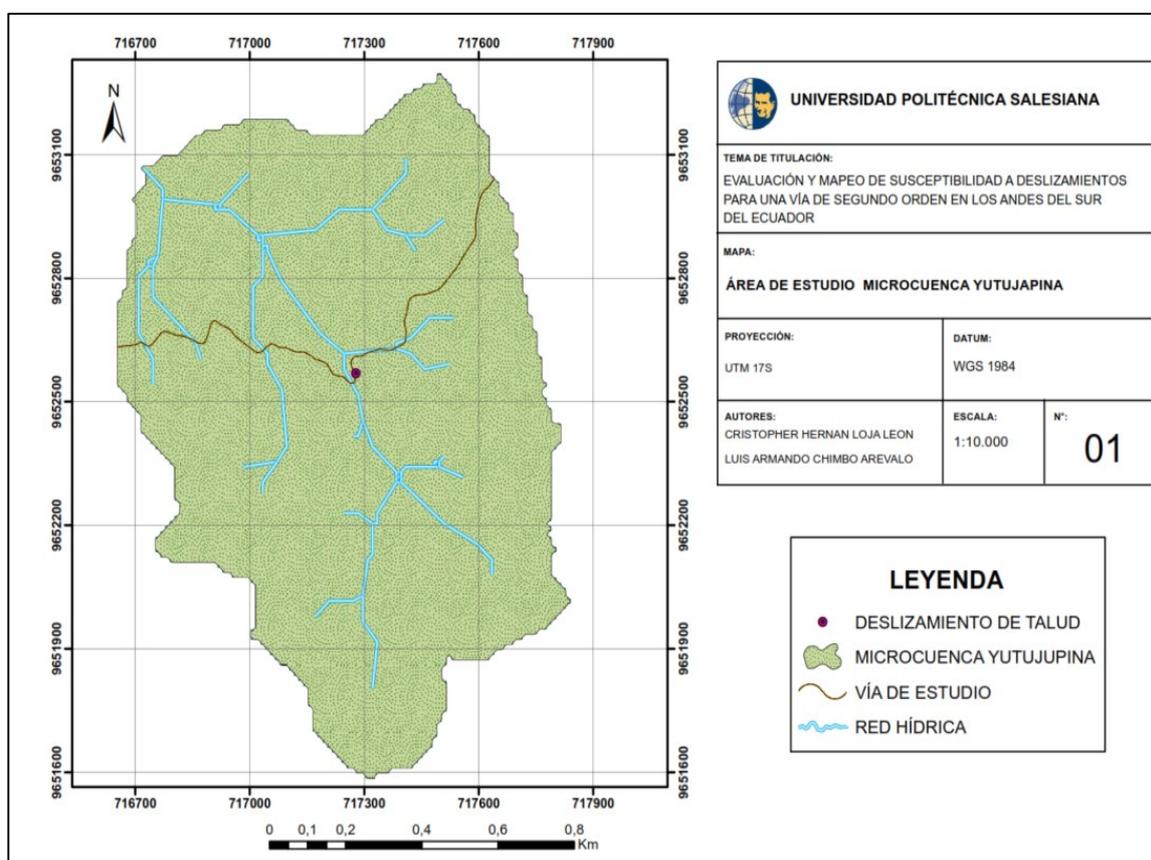
5.1. RESULTADOS: PAQUETE DE TRABAJO 1

5.1.1. Selección de la vía de segundo orden enfocado en parámetros relevantes.

El área de estudio seleccionada para la evaluación de susceptibilidad a deslizamientos corresponde a un segmento de vía de segundo orden en la parroquia Cumbe, específicamente en la cuenca hidrográfica Yutujapina. Esta selección se fundamenta en la relevancia de la vía para la conectividad regional y su ubicación en una zona clasificada como "área no definida" por el PDOT de Cumbe, lo que garantiza que el estudio aporte nueva información.

Los análisis preliminares han revelado varios factores críticos que contribuyen a la susceptibilidad a deslizamientos en la zona:

- La cobertura vegetal es principalmente páramo, con muy pocos relictos de vegetación arbustiva, esta zona se encuentra intervenida, o perturbada, lo cual incrementa la probabilidad de deslizamientos.
- Una topografía escarpada que naturalmente predispone al terreno a la inestabilidad.
- La influencia de actividades antrópicas como la deforestación y la agricultura en pendientes, que alteran la cobertura vegetal y modifican los flujos de agua subsuperficiales. Además, la incidencia principal de la alteración del uso de suelo es por la creación de vías en la zona de estudio.



Fuente: Autores.

La “Ilustración 30” muestra un mapa del área de estudio de la microcuenca Yutujupina, que es el resultado del análisis en la selección de una vía de segundo orden en los Andes del Sur del Ecuador.

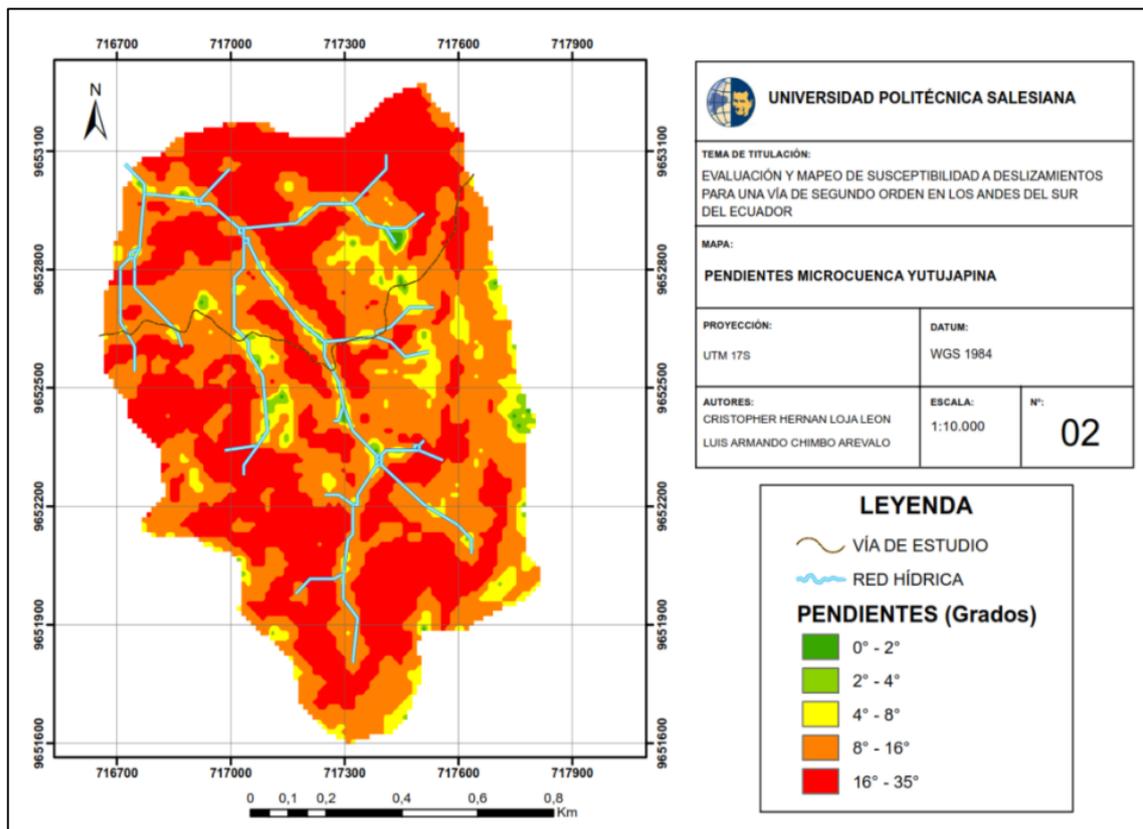
El mapa está centrado en una representación geográfica de la microcuenca con una red

hídrica en azul, que muestra los cuerpos de agua como ríos y arroyos, se destaca un punto púrpura que indica una zona de deslizamiento en un talud, mismo que se explica cómo movimiento de masa o desprendimiento de tierra en una pendiente. También en representación de una polilínea de color marrón se explica la vía de segundo orden que es el enfoque de estudio.

El mapa utiliza la proyección UTM 17S y el datum WGS 1984, que son sistemas estándar para la cartografía y la representación de datos geoespaciales.

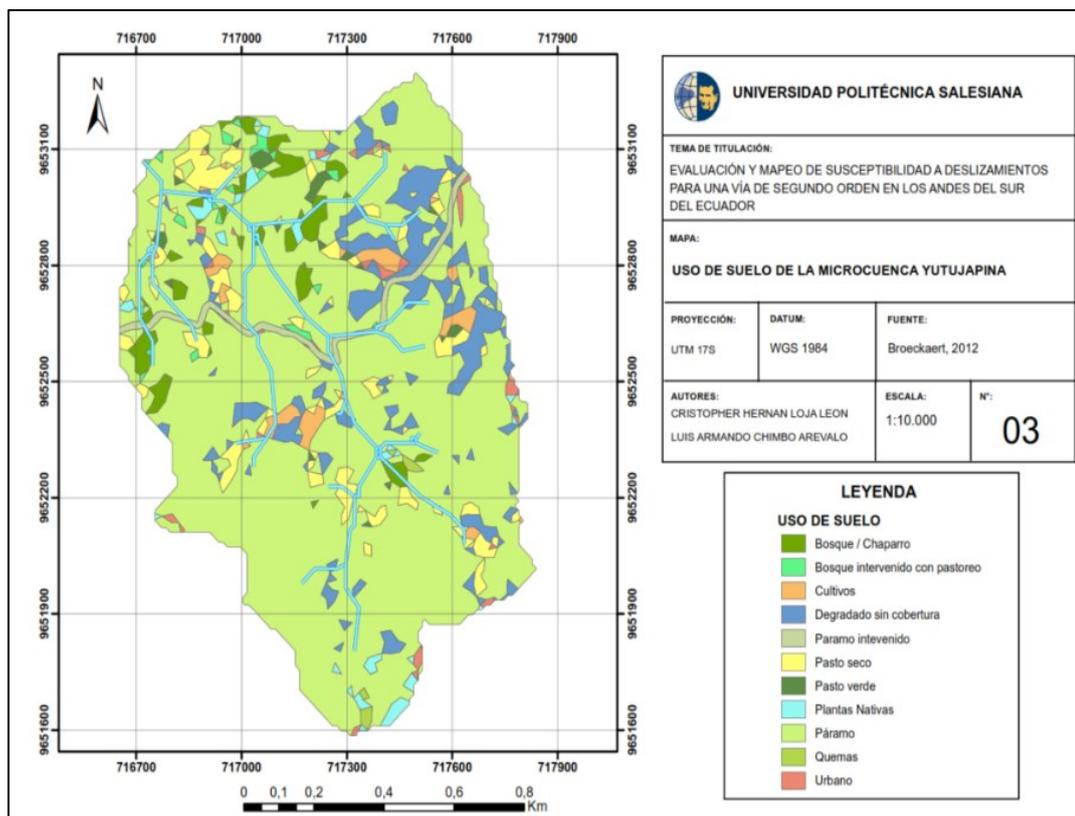
5.1.2. Recopilación De Información Secundaria De Parámetros Morfológicos En La Cuenca De Estudio

Una vez que se ha finalizado con la recolección necesaria para el estudio y su posterior tratamiento básicamente de cartografía base, se elaboró las diferentes capas o mapas de entrada para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos. Las capas contienen información de rangos de pendientes, distancia a las redes de drenaje, el diferente uso de suelo que se ha realizado en la zona, y los diferentes rangos de precipitaciones. Las ponderaciones que se las ha otorgado a cada capa fueron acorde a los análisis que se realizó en campo y su respectiva revisión de literatura. La clasificación que se le dio a cada capa es acorde a la disponibilidad de información de las diferentes variables, lo que permitió realizar un estudio óptimo y un análisis coherente. A continuación, se describe los resultados obtenidos de cada mapa:



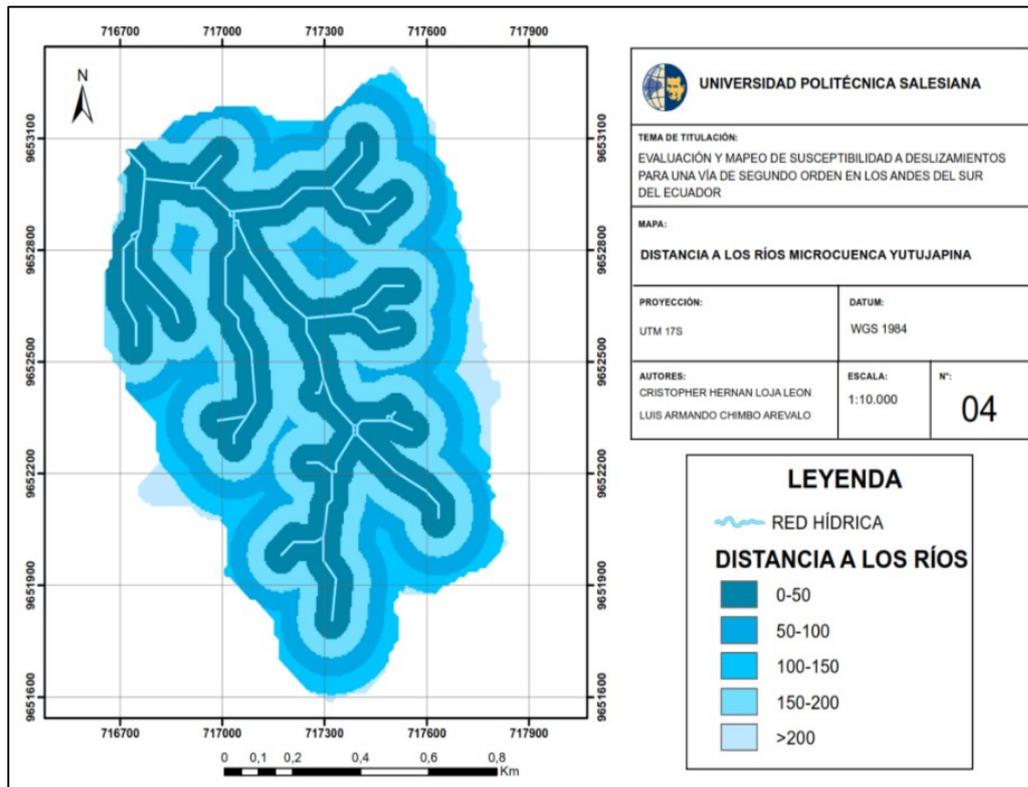
*Ilustración 31. Mapa de pendientes Yutujupina.
Fuente: Autor.*

En la “Ilustración 31” se puede observar el mapa de pendientes existentes en la microcuenca Yutujupina. La clasificación de las diferentes pendientes se las hizo a base de revisión de literatura (Zuidam et al., 1986), donde se recomienda clasificarlas como se indica en la imagen, se utiliza una escala de colores para identificar de mejor manera los rangos de pendientes medidas en grados, donde el color rojo muestra las pendientes más pronunciadas, mientras que las de color verde tienen pendientes más suaves. Siendo la máxima pendiente encontrada igual a 33°.



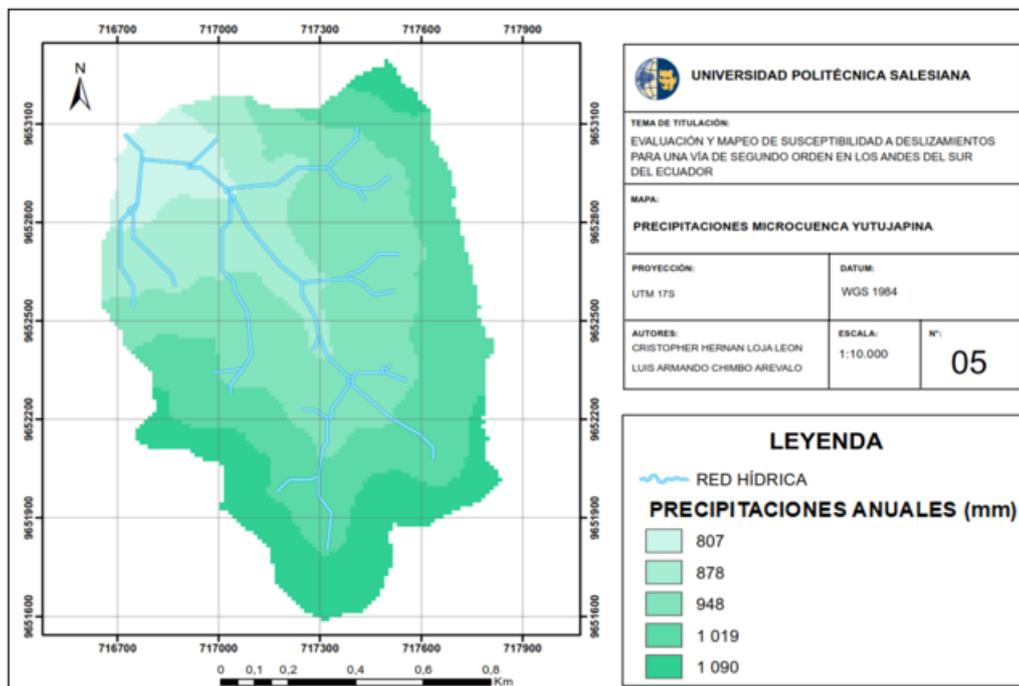
*Ilustración 32. Mapa Uso de suelo Yutujapina.
Fuente: Broekaert. (2012).*

En el Mapa de uso de suelo, “Ilustración 32” se puede observar que en la microcuenca Yutujapina existen once clases de usos de suelo cada uno identificada con un color diferente, en las que se destaca al páramo, ya que tiene una mayor área de cobertura vegetal y también se resalta al páramo intervenido como uno de los factores que mayor incidencia tiene dentro del estudio de deslizamientos de tierras. La categoría urbana incluye pocas viviendas asentadas en la zona de estudio. Esta categoría no incluye la vía de segundo orden para diferenciarla del resto de la cuenca hidrográfica.



*Ilustración 33. Mapa distancia a los ríos de la red hídrica Yutujapina.
Fuente: Autores*

En la “Ilustración 33”, se presenta el mapa de distancia de ríos, en el cual se puede observar la red hídrica y a su vez las distancias que existen a la misma, para ello se realizó una clasificación de cinco categorías que va desde cero metros hasta poco más de doscientos metros, donde se considera que la distancia de cero metros a los cincuenta metros es la de mayor importancia y las que se encuentran alejadas a más de doscientos metros de la red hídrica no tienen mayor influencia en la susceptibilidad de tierras. También se puede observar que se clasificó en una escala de colores para una fácil identificación, de lo cual se desprende que distancias mayores a 200 m de los cauces naturales ya se alcanza la divisoria de aguas



*Ilustración 34. Mapa raster de precipitaciones anuales estimadas para la microcuenca de Yutujapina.
Fuente: Autores.*

En la “Ilustración 34” se presenta el mapa con las diferentes precipitaciones anuales estimadas que se puede llegar a tener en la microcuenca Yutujapina. Para esto se emplearon estaciones pluviométricas cercanas y que fueron instaladas en la cuenca del río Cumbe entre 2009 y 2012 (Iñiguez et al, 2016), como resultado se obtuvo una clasificación de las precipitaciones que va desde los 807 mm hasta los 1090 mm considerando que las precipitaciones más altas son las que tendrán mayor influencia dentro del estudio, de igual manera se ha clasificado en una escala de colores para poder identificar las zonas más afectadas por las altas precipitaciones.

5.1.3. Levantamiento de información relacionada con la caracterización física y mecánica de los suelos.

ENSAYO SPT:

En la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de la vía de segundo orden en los Andes del sur de Ecuador, se realizaron trabajos in situ para obtener datos geotécnicos cruciales. El ensayo SPT se llevó a cabo en un talud crítico, obteniendo valores de resistencia a la penetración estándar que permitieron clasificar el suelo y estimar características. Las muestras alteradas e inalteradas recogidas mediante cucharas partidas y tubos Shelby, respectivamente, proporcionaron información valiosa sobre las propiedades físicas del suelo.

El levantamiento topográfico detallado del talud y la sección de carretera adyacente, efectuado con una estación total y un GPS diferencial, permitió generar un modelo digital del terreno. Este modelo es fundamental para comprender la morfología del área, evaluar la estabilidad del talud y diseñar estrategias de mitigación.

La “Ilustración 35” muestra los estratos de suelo extraídos evidenciando la metodología aplicada en campo para la caracterización geotécnica del sitio de estudio.



*Ilustración 35. Estratos de suelo extraídos en la caja porta-testigos.
Fuente: Autores.*

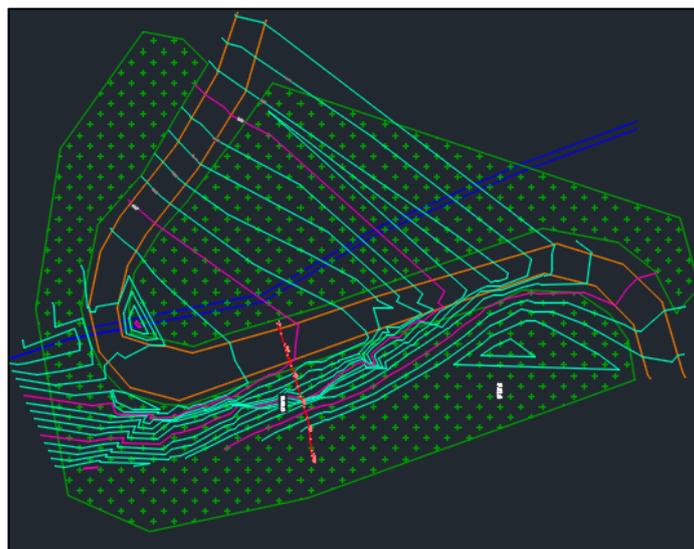
La “Ilustración 35” muestra una caja de portatestigos con compartimentos que contiene seis muestras de suelo, las cuales fueron extraídas a una profundidad de 3.70 metros mediante un ensayo de penetración estándar (SPT). Las muestras representan distintas capas del subsuelo encontradas hasta esa profundidad.

Una muestra de suelo estuvo contenida en el tubo metálico más brillante y sin oxidación visible, que fue extraída con un tubo Shelby. Este tipo de tubo se utiliza para obtener muestras inalteradas del suelo, que son necesarias para realizar ensayos más precisos, como el ensayo triaxial mencionado.

Las muestras se presentan en un estado bastante húmedo y fresco, lo cual es importante para preservar sus propiedades naturales hasta que se realicen los ensayos correspondientes. La variedad de colores y texturas en las muestras sugiere diferencias en la composición del suelo, como contenido orgánico, arcilla, limo, arena o grava. Estas diferencias son claves para entender la estratificación del sitio y para predecir el comportamiento del suelo.

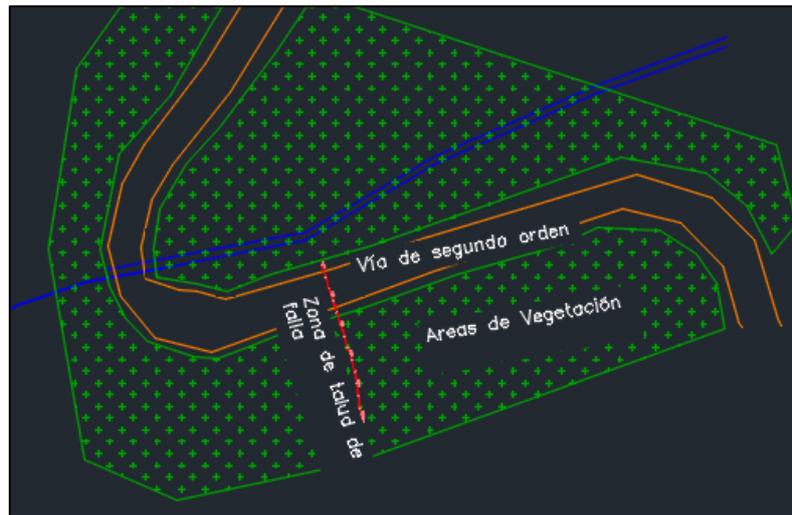
LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO:

Las “Ilustraciones 36,37” muestran el modelo de elevación digital que se obtuvo en el procesamiento del levantamiento topográfico que se realizó en la zona de estudio.



*Ilustración 36. Modelo de elevación digital (Parte alta de la cuenca Yutujapina).
Fuente: Autores*

La “Ilustración 36” muestra una zona topográfica con delimitaciones de áreas, cuenta con curvas de nivel denotando así las zonas de pendiente.



*Ilustración 37. Descripción de las zonas existentes en el área de estudio.
Fuente: Autores*

La “Ilustración 37” muestra una zona topográfica con delimitaciones de áreas como; Vía de segundo orden, áreas de vegetación, un canal de río, también se observa una zona descrita como “zona de talud de falla”, esta área conforme con la “Ilustración 33”, hacen evidente una zona con una pendiente considerable que notoriamente se establece como un talud.

5.2. RESULTADOS: PAQUETE DE TRABAJO 2

5.2.1. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca Yutujapina

El proceso de jerarquización y comparación por pares permitió identificar las variables y subvariables clave dentro del estudio de deslizamientos de tierras (Tabla 20). Se observó una consistencia inferior a 0.10 para cada variable como recomienda (Saaty, 1987) dando validez a la metodología.

Tabla 20. Matriz de jerarquización y comparación por pares de variables y subvariables

VARIABLES	Subvariables	Ponderación subvariables	Pesos subvariables	CR
Pendiente	0°-2°	1	0.036	0.059
	2°-4°	2	0.072	
	4°-8°	3	0.138	
	8°-16°	4	0.258	
	16°-35°	5	0.496	
Uso de suelo	Páramo	1	0.037	0.038
	Degradado sin cobertura	3	0.108	
	Pasto seco	1	0.037	
	Bosque/Chaparro	1	0.037	
	Cultivos	2	0.086	
	Plantas nativas	1	0.037	
	Urbano	4	0.128	
	Pasto verde	1	0.037	
	Bosque intervenido por pastoreo	4	0.121	
	Quemas	1	0.037	
	Páramo intervenido	5	0.337	
Distancia al drenaje	0m-50m	5	0.498	0.086
	50m-100m	4	0.257	
	100m-150m	3	0.132	
	150m-200m	2	0.081	
	>200m	1	0.033	
Precipitación	772-807	2	0.092	0.01
	807-878	2	0.092	
	878-948	2	0.092	
	948-1019	3	0.307	
	1019-1090	3	0.416	

Fuente: Autores

Tras completar la jerarquización, comparación por pares, juicios comparativos y su respectivo análisis de consistencia, se obtuvo la matriz final con las ponderaciones de las cuatro variables donde se observa que la pendiente tiene un mayor nivel de importancia dentro del estudio seguido por el uso del suelo, la distancia al drenaje, y la precipitación (Tabla 21).

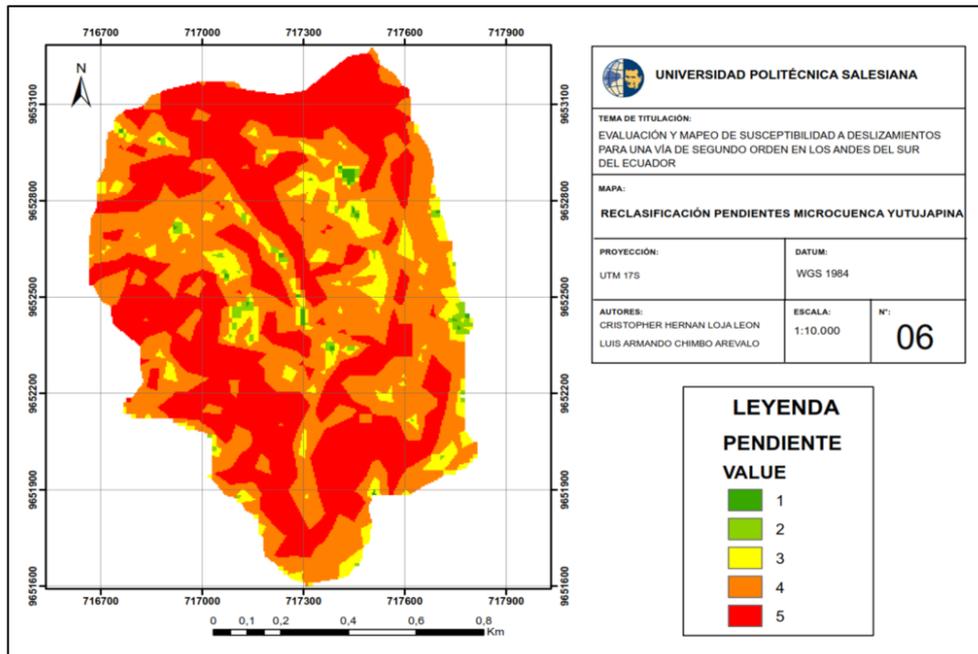
Tabla 21. Matriz de comparación por pares y ponderación final de las variables

Matriz de Comparación por pares				Ponderación	CR Final
	Pendiente	Uso de suelo	Distancia al drenaje	Precipitación	
Pendiente	1				0.446
Uso de suelo	0.33	1			0.306
Distancia al drenaje	0.2	0.33	1		0.094
Precipitación	0.14	0.33	3	1	0.154

Fuente: (Autores)

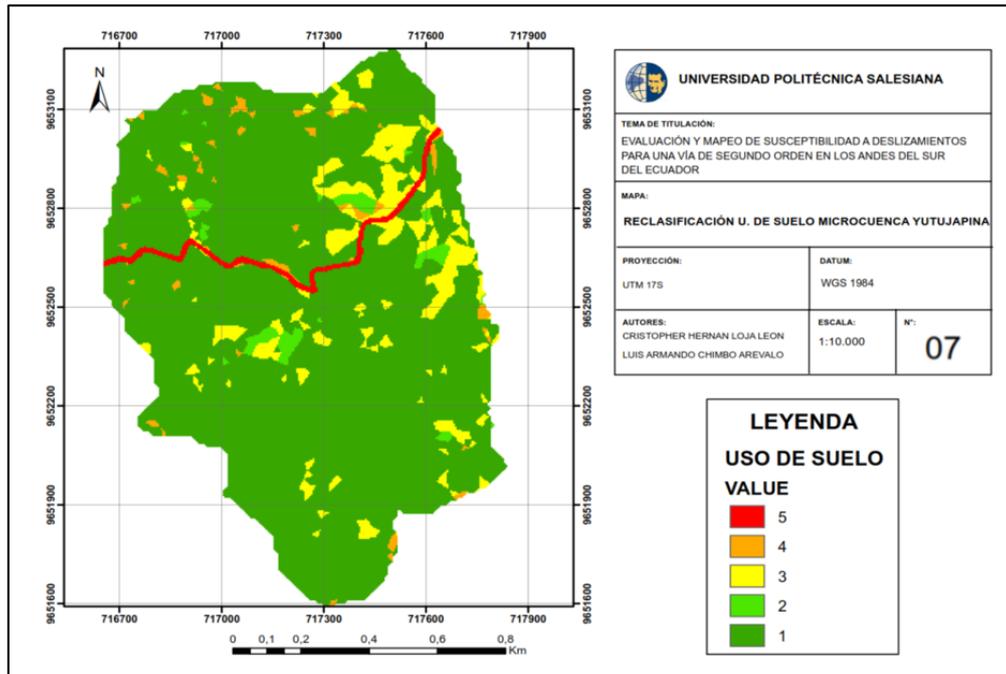
RECLASIFICACIÓN DE CAPAS RÁSTER:

Luego de analizar el nivel de importancia de cada variable y subvariable se obtuvo la reclasificación de las diferentes capas raster empleando los diferentes niveles de ponderación, obteniendo como resultado las siguientes capas reclasificadas.



*Ilustración 38. Reclasificación de capa ráster "Pendientes".
Fuente: Autores.*

En el mapa se puede observar la reclasificación de la pendiente donde se ha utilizado cinco categorías con una ponderación del uno al cinco donde el número uno tiene un grado de importancia baja mientras el cinco tiene el nivel más alto de importancia dentro del estudio, para cada clase se ha utilizado un color diferente para mayor facilidad de identificación de las zonas mayormente afectadas.



*Ilustración 39. Reclasificación de capa ráster "Uso de suelo".
Fuente: Autores.*

En este mapa de reclasificación de uso de suelo de igual manera se observan cinco categorías que están ponderadas del uno al cinco donde el uso de suelo más importante y por ende ponderado con el nivel más alto es el páramo intervenido (vía de segundo orden) ya que es el uso de suelo que tiene intervención directa dentro del estudio, mientras que los otros usos de suelos han sido analizados de igual manera, pero con un nivel de importancia menor.

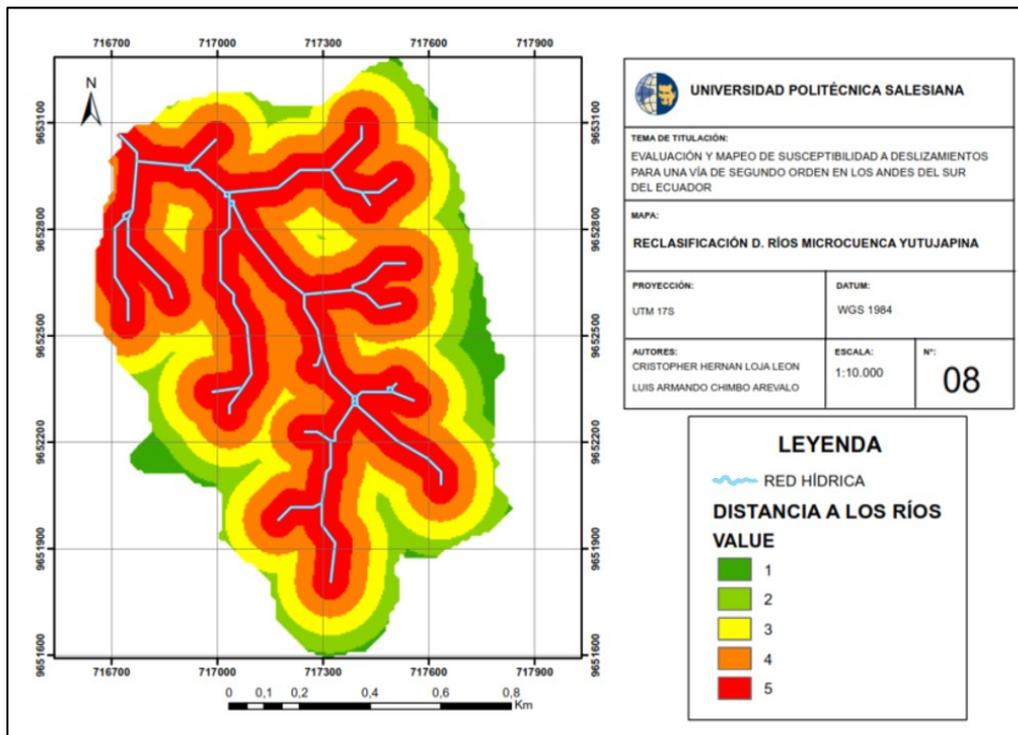
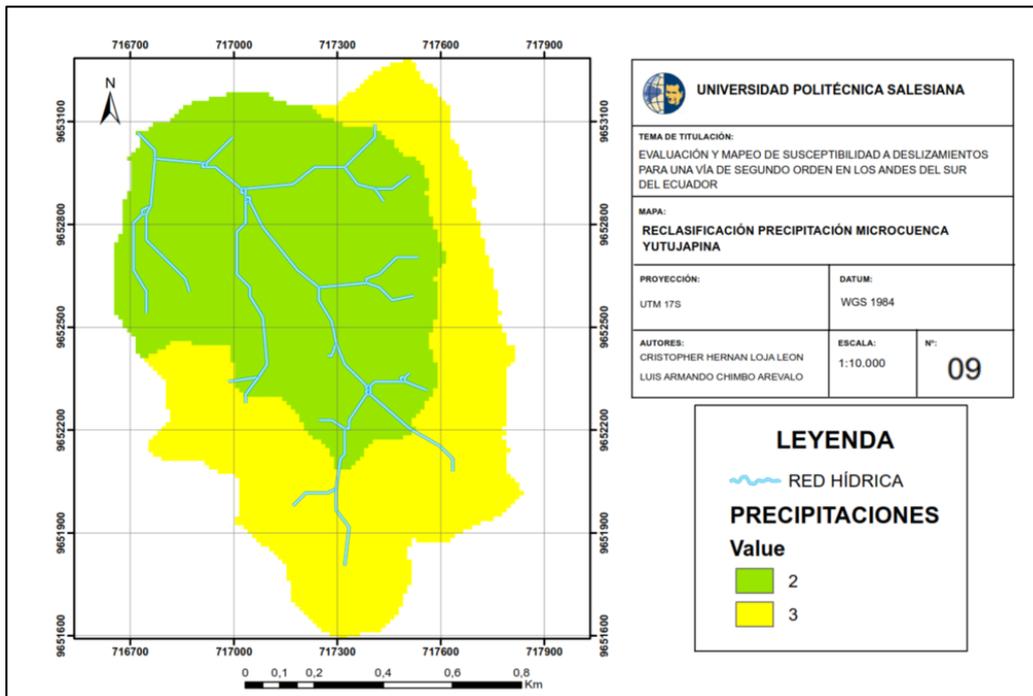


Ilustración 40. Reclasificación de capa ráster "Distancia a los ríos".
Fuente: Autores.

En el mapa reclasificado de distancia a los ríos se ha ponderado con el grado más alto de importancia a los lugares más cercanos a las redes hídricas distancias que van desde cero metros hasta los cincuenta metros, mientras que las distancias más lejanas tienen ponderaciones mucho más pequeñas y menos importantes.



*Ilustración 41. Reclasificación de capa ráster "Mapa temático de precipitaciones".
Fuente: Autores.*

El mapa de precipitaciones reclasificado muestra que existen dos categorías de reclasificación las cuales fueron ponderadas con un grado dos y tres que hace referencia a un nivel bajo y medio de precipitaciones en la zona, este análisis y su respectiva ponderación se realizó en base a registros de estudios similares, donde se indica que los rangos de precipitaciones para la zona de estudio están dentro de valores normales (Iñiguez et al., 2016).

MAPA RÁSTER DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS.

Luego de la rasterización de las capas reclasificadas y la aplicación de la metodología combinación lineal ponderada (WLC) que hace parte de una herramienta SIG se obtuvo un único mapa raster siendo este el mapa de susceptibilidad a deslizamientos (Ilustración 42), el cual se reclasificó en 5 categorías: Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy alta. Según los datos presentados en la (Tabla 22), el área de la microcuenca de Yutujapina reveló los siguientes niveles de susceptibilidad a deslizamientos: 0.34%, 88.36%, 8.34%, 2.29% y 0.67%, respectivamente.

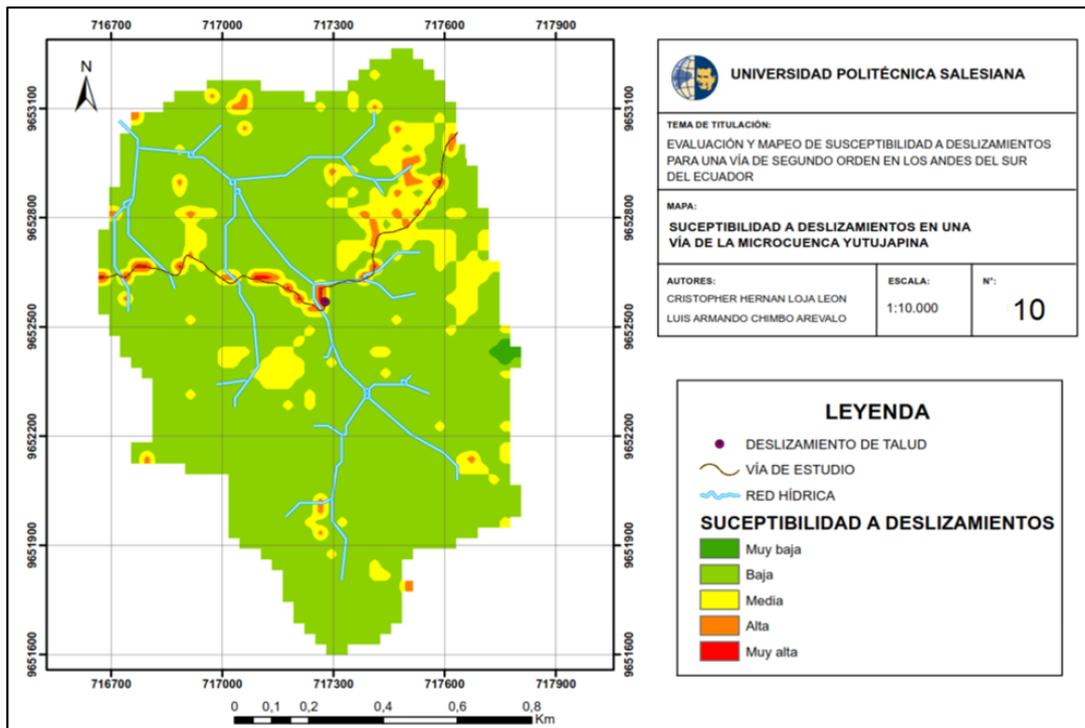


Ilustración 42. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de la cuenca Yutujapina.
Fuente: Autores.

En el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierras se observa una reclasificación de toda la microcuenca Yutujapina dando como resultado diferentes niveles de susceptibilidad que van desde Muy baja hasta el nivel más alto de susceptibilidad donde cada nivel ha sido definido con un único color. Se puede observar también que los lugares con mayores niveles de susceptibilidad se presentan dentro de la vía de segundo orden.

Tabla 22. Superficies correspondientes a las clasificaciones del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

Categorización de Susceptibilidad	Área (m ²)	Área (%)
Muy baja	4381.21	0.34
Baja	1145122.86	88.36
Media	108125.84	8.34
Alta	29712.66	2.29
Muy alta	8618.58	0.67
Total	1295961.15	100%

Fuente: Autores.

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierras se generó a partir del análisis espacial de capas ráster (imágenes de elevación, pendientes, usos del suelo, etc.) de la

subcuenca ubicada en la parroquia Cumbe en Azuay, Ecuador. Este análisis permitió asignar valores numéricos de susceptibilidad baja, media, alta y muy alta a diferentes zonas de acuerdo con factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos descrita en “Ilustración 42”.

Luego de concluir la elaboración del mapa, se identificó que existen ocho zonas a lo largo de la vía en las cuales la susceptibilidad a deslizamientos se clasificó dentro de los rangos de media, alta y muy alta. Una de estas zonas, con susceptibilidad muy alta, será seleccionada para realizar un modelo de uno de los taludes presentes, con el fin de corroborar el resultado de amenaza obtenido a través del mapa de susceptibilidad y así determinar con mayor precisión si efectivamente representa un peligro para la vía debido a posibles deslizamientos.

5.3. RESULTADOS: PAQUETE DE TRABAJO 3

5.3.1. Caracterización Mecánica De Suelos.

El resultado de la realizar la clasificación SUCS es la obtención de las curvas granulométricas, donde se puede evidenciar que casi todos los estratos poseen las mismas propiedades granulométricas, siendo generalmente arenas.

La clasificación SUCS de los estratos resultaron en, SW (Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporción muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo) para los 5 primeros estratos y SM (Son arenas limosas) para el 6to estrato, las descripciones generales como pesos volumétricos, contenido de humedad, límites de consistencia, etc., se pueden revisar en los anexos.

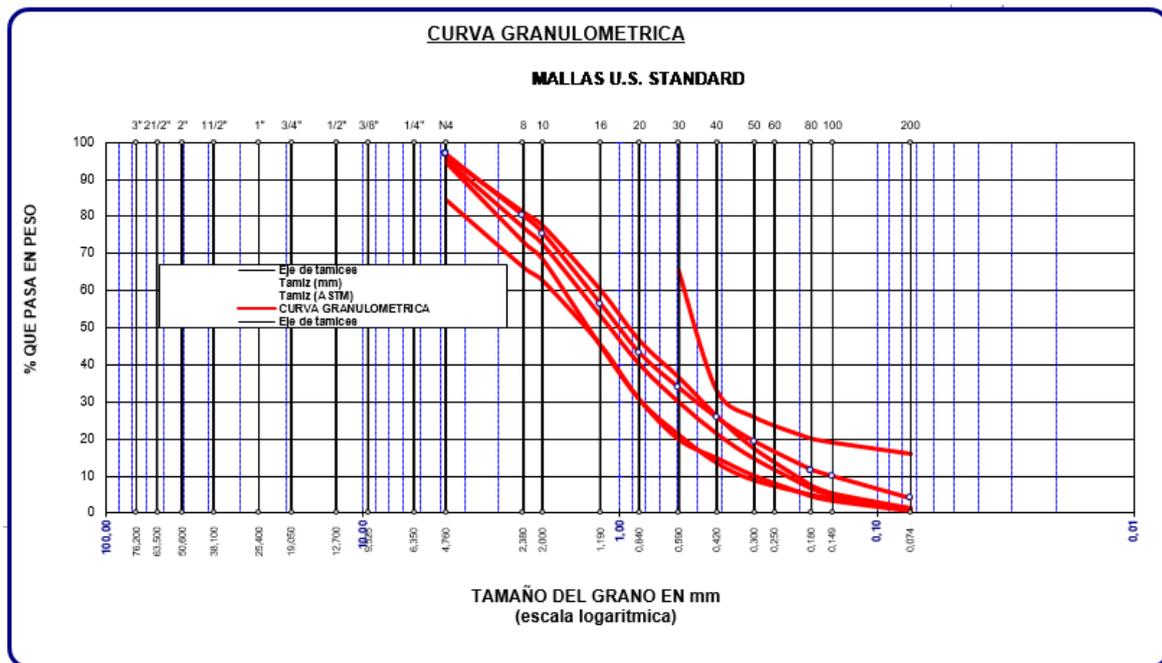


Ilustración 43. Curva granulométrica de los 6 estratos.
Fuente: Autores.

La imagen muestra un gráfico de curvas granulométricas que representa los resultados de análisis granulométricos para seis estratos de suelo diferentes. Cada curva granulométrica refleja la distribución del tamaño de las partículas de un estrato específico. Aquí hay una descripción de la interpretación de las curvas contenidas en “Ilustración 43”:

Interpretación de las Curvas:

Las curvas que presentan una forma más plana y se extienden a lo largo del eje horizontal corresponden a los estratos 1,2,3,4 y 5, estos indican que los suelos de estos estratos son bien graduados. Esto sugiere que estos suelos tienen una mezcla de partículas de diferentes tamaños, por lo que tienden a ser más compactos y estables, características valiosas en la topografía variable y las condiciones climáticas de los Andes. La curva más empinada corresponde al estrato 6 y señala suelos pobremente graduados. Estos suelos, compuestos principalmente por partículas de tamaño similar, pueden ser menos estables y tener una capacidad de drenaje limitada, lo cual es un aspecto crítico en la región andina donde las lluvias pueden resultar intensas y la estabilidad del suelo es crucial para prevenir deslizamientos y erosión. En resumen, la variabilidad en la gradación de los suelos reflejada en las curvas

granulométricas es consistente con la diversidad geológica y las complejas condiciones ambientales de los Andes del Sur del Ecuador. Ofreciéndonos como resultado una visión del material granular variable mismo que es elemental en la estabilidad del terreno.

5.3.2. Ensayo De Penetración Estándar “SPT” Y Ensayo Triaxial No Consolidado No Drenado “UU”.

5.3.2.1. Resultados De Ensayo De Penetración Estándar “SPT”

Tabla 23. Resultados de "SPT" y parámetros de características de suelos.

PROYECTISTAS																	
LUIS A. CHIMBO A - CRISTOPHER H. LOJA L.																	
PROYECTO																	
Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VIA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"																	
UBICACIÓN												HOJA					
SUBCUENCA YUTUJAPINA / PARROQUIA CUMBE / PROVINCIA DEL AZUAY												1 de 1					
												0.00 to 3.7 m.					
EQUIPO												NIVEL DEL AGUA					
MAQUINA HIDRAULICA DE PERFORACION DE SUELOS												- 0.10 m.					
MÉTODO										NORTE		ESTE					
PERFORACIÓN / EXTRACCIÓN DE TESTIGOS										9652618,3		717266,3					
REGISTRO DE SONDEOS																	
PROF (m)	Profundidad de muestreo (m)	TIPO DE MUESTREO	REC (cm/cm)	CHN (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	NUMERO DE GOLPES	N - GOLPES					SUCS	DESCRIPCIÓN	SUELO SIMBOLO	OBSERVACIONES
									0	5	10	15	20				
0,60	0,00 - 0,60	TP	60/60	89,54	-	-	-	(2) (4) (5)	9						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Nada Plásticas, Marrón Oscuro, Mojado	Bajo contenido de partículas finas de cuarzo
1,20	60,00 - 1,20	TP	60/60	83,86	-	-	-	(4) (7) (7)	14						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Nada Plásticas, Marrón Claro, Mojado	Bajo contenido de partículas finas de cuarzo
1,80	1,30 - 1,75	TP	45/60	82,29	47,3	116,7	-69,37	(8) (7) (7)	14						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Nada Plásticas, Gris Claro, Mojado	Bajo contenido de partículas finas de cuarzo
2,40	1,75 - 2,35	TP	60/60	88,86	44,44	21,67	22,78	(2) (6) (5)	11						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Poco Plásticas, Gris Claro, Mojado	Alto contenido de partículas finas de cuarzo
3,00	2,50 - 3,10	TS	60/60	89,9	33,96	57,5	-23,54	(2) (3) (3)	6						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Nada Plásticas, Gris Claro, Mojado	Alto contenido de partículas finas de cuarzo
4,20	3,10 - 3,70	TP	60/60	93,33	35,25	40	-4,5	(3) (3) (3)	6						SM	Arenas Limosas, Nada Plásticas, Gris Oscuro, Mojado	Bajo contenido de partículas finas de cuarzo
4,80																Arenas Limosas, Nada Plásticas, Gris Oscuro, Mojado	Este estrato se observo mediante el perfil estratigráfico expuesto de un talud
6,00																	
9,00																Macizo Rocoso, Gris Claro, Seco	Este estrato se observo mediante el perfil estratigráfico expuesto de un talud

DESCRIPCIÓN							
Tipo de Muestra	Tipo de Suelo	CONSISTENCIA				HUMEDAD	
		SUELOS COHESIVOS		SUELOS COHESION		CONTENIDO DE HUMEDAD	
		N-GOLPES	Consistencia	N-GOLPES	Consistencia	Rangos	Valores
 Tubo Parfido (TP)  Tubo Shelby (TS)	 - Arena  - Arcilla  - Limoso	 - Roca	0 - 2 - Muy blando 2 - 4 - Blando 4 - 8 - Semirigido 8 - 15 - Rigido 15 - 30 - Muy rigido > 30 - Duro	0 - 4 - Muy suelto 4 - 10 - Suelto 10 - 30 - Densidad media 30 - 50 - Denso > 50 - Densidad Alta	0 - 10 - Seco 10 - 30 - Húmedo 30 - 70 - Muy húmedo 70 - 100 - Mojado > 100 - Saturado		
MÉTODO		REC = Recuperación en centímetros	IP = Índice de Plasticidad				
		CHN = Contenido de humedad natural				Verificado por:	
		LL = Límite de Líquido				Certificado por:	
		LP = Límite de Plástico				Fecha de emisión:	
		N = Número de golpes					
Descripción de los estratos según la clasificación ASTM							

Fuente: Autores

En la (Tabla 23) se detallan los siguientes resultados:

- Entre la superficie y la profundidad de 0.6 metros, se identificó un suelo clasificado como SW (arenas bien graduadas con contenido de arcillas y partículas finas) con un número de golpes SPT de 9. Este estrato corresponde a los suelos de páramo, por lo cual se comprueba su baja capacidad soportante o desde el punto de vista mecánico. Por lo tanto, muy susceptible a degradación y/o erosión.
- De 0.6 a 1.2 metros, el suelo es clasificado como SW, con un número de golpes SPT de 14, sugiriendo una densidad media y una resistencia moderada a la compresión.
- Entre 1.3 y 1.75 metros, nuevamente se encuentra un suelo SW con un número de golpes SPT de 14, consistente con un suelo de densidad media.
- De 1.75 a 2.35 metros, se presenta otro estrato de suelo SW, pero con un número de golpes SPT ligeramente menor (11), lo que puede indicar una disminución en la densidad y resistencia del suelo en comparación con los estratos superiores.
- Entre 2.5 y 3.10 metros, el suelo SW muestra un número de golpes SPT de 6, reflejando una densidad baja y una potencial mayor susceptibilidad a deslizamientos. Además, en esta profundidad se realizó la extracción del estrato mediante un tubo Shelby (extracción para estratos inalterados).
- De 3.10 a 3.70 metros, el suelo es clasificado como SM (suelos bien graduados con limos y arenas), también con un número de golpes SPT de 6, lo cual es indicativo de

una densidad baja.

- Desde la profundidad de 3.70 hasta los 6 metros no se realizaron ensayos SPT, pero las observaciones en cortes de talud expuestos sugieren que las características del suelo son similares al estrato anterior.
- A mayores profundidades, entre 6 y 9 metros, se observó la presencia de un macizo rocoso con características distintivas y coloración marrón claro.

En cuanto al contenido de humedad, se observó que, desde la superficie hasta los 6 metros, el suelo presenta un alto contenido de humedad, lo cual puede influir significativamente en la estabilidad del terreno y en su susceptibilidad a deslizamientos.

La interpretación de estos resultados es crucial para comprender el comportamiento del suelo en la zona estudiada y para evaluar los riesgos asociados a deslizamientos. Estos hallazgos deben ser considerados en el diseño y mantenimiento de la infraestructura vial en la región andina del sur del Ecuador.

5.3.2.2. Resultados De Ensayo Triaxial “UU”

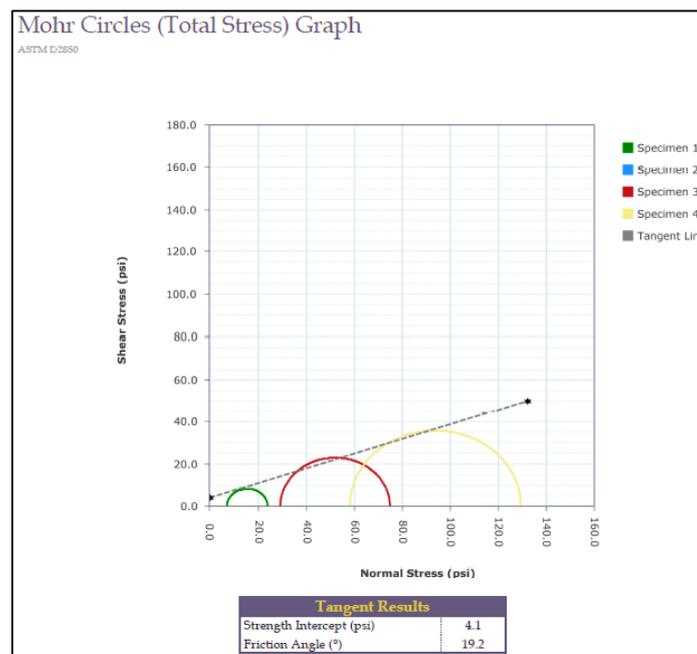


Ilustración 44. Envolvente de Mohr y valores de Cohesión y Angulo de fricción.
Fuente: Programa computacional de Máquina de ensayo “UU”

En la “Ilustración 44”, se examinaron los resultados de un ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) realizado en un estrato de suelo extraído a una profundidad de 2.50 metros, conforme a la norma ASTM D2850. El gráfico de Círculos de Mohr (Esfuerzo Total) muestra tres círculos correspondientes a distintas muestras del suelo ensayado. Los círculos de Mohr representan el estado de esfuerzos al fallar las muestras bajo condiciones controladas.

- Cada círculo, coloreado diferentemente para cada muestra, indica la relación entre el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante en el punto de falla del suelo. La línea tangente que intercepta a los círculos de Mohr, conocida como la envolvente de falla, es crucial para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. El punto donde esta línea tangente toca el eje de esfuerzo cortante se conoce como la cohesión efectiva (c'), y el ángulo de inclinación de la línea respecto al eje horizontal representa el ángulo de fricción interna (ϕ).
- Los resultados obtenidos indican una cohesión efectiva (c') de 28,3 kPa y un ángulo de fricción (ϕ) de 19.2 grados. Estos valores son consistentes con los esperados para un suelo con una resistencia a la corte moderada, lo que sugiere que el suelo posee una capacidad de carga aceptable y un comportamiento predecible bajo cargas no drenadas.
- La cohesión efectiva de 4.1 psi, representada por la intersección de la línea tangente con el eje de esfuerzo cortante, sugiere una capacidad inherente del suelo para resistir esfuerzos de corte sin la necesidad de un esfuerzo normal aplicado. Por otro lado, el ángulo de fricción de 19.2 grados, inferido de la inclinación de la envolvente de falla, refleja la fricción interna entre las partículas del suelo, la cual contribuye a la resistencia al corte del material.
- La disposición de los círculos de Mohr, con su tamaño creciente y su ubicación progresivamente más a la derecha en el gráfico, indica un aumento en el esfuerzo normal

máximo y el esfuerzo cortante en el punto de falla para cada muestra sucesiva. Esto es típico en ensayos triaxiales, donde cada muestra se somete a un confinamiento diferente, reflejando la variabilidad en las condiciones in situ que podrían encontrarse en el estrato de suelo a diferentes profundidades o bajo diferentes condiciones de carga.

5.3.3. Modelamiento De La Estabilidad De Taludes De La Vía En Estudio.

Para los casos de talud, se consideró una de las zonas que presentaron susceptibilidad alta a deslizamientos, mediante un análisis de campo se recorrió la vía de segundo orden en la ubicación del proyecto y se escogió la “Zona 4”, ya que en esta zona existe un talud crítico que presenta un deslizamiento que ha ocurrido anteriormente. Con esto se planteó analizar el talud mediante 3 escenarios y de esta forma evaluar su estabilidad considerando parámetros físicos y mecánicos del suelo, con la finalidad de validar también los datos obtenidos mediante el mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

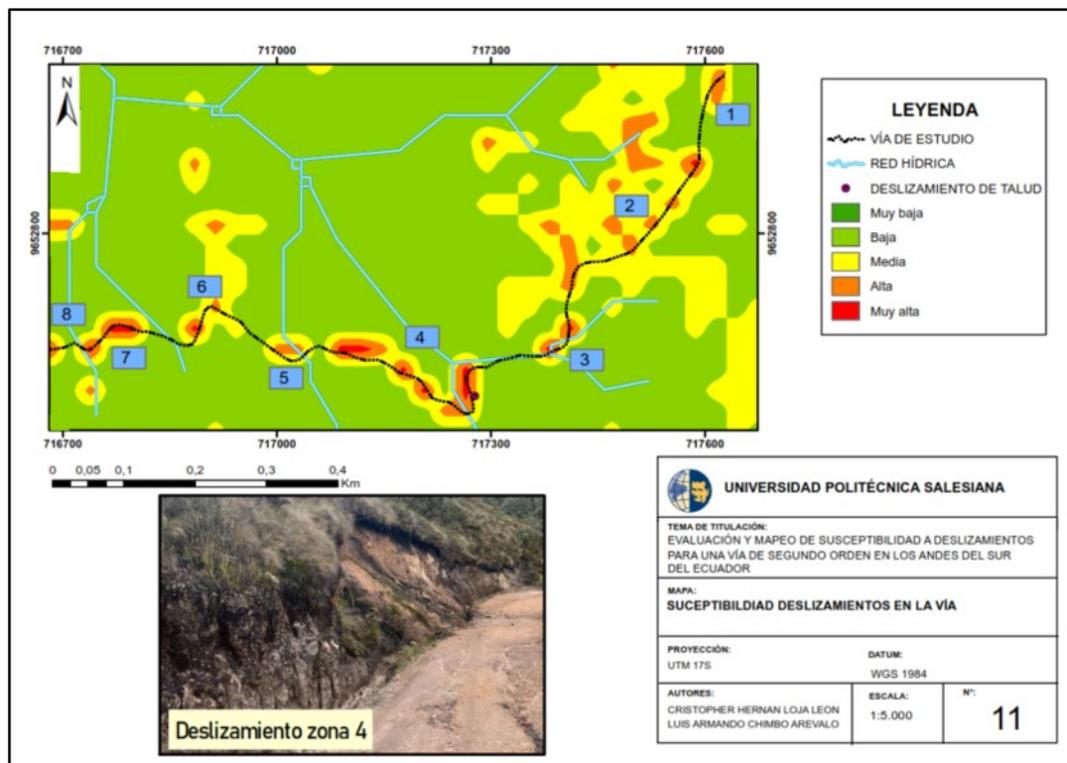


Ilustración 45. Mapa de susceptibilidad de la vía de segundo orden.

Fuente: Autores

El mapa presentado en la “Ilustración 45” muestra la susceptibilidad a deslizamientos de la vía de estudio, en la cual se han identificado distintas zonas con variados grados de susceptibilidad, clasificadas en la leyenda como muy baja, baja, media, alta y muy alta. Las áreas con mayor susceptibilidad están marcadas en rojo y se encuentran principalmente a lo largo de la vía en estudio.

En particular, se destaca la zona 4, señalada en el mapa con un deslizamiento de talud ya ocurrido, cuya imagen se muestra en la parte inferior izquierda. Esta fotografía evidencia un talud que ha cedido, con material desplazado hacia la carretera, lo cual coincide con la clasificación de "muy alta" susceptibilidad indicada en el mapa.

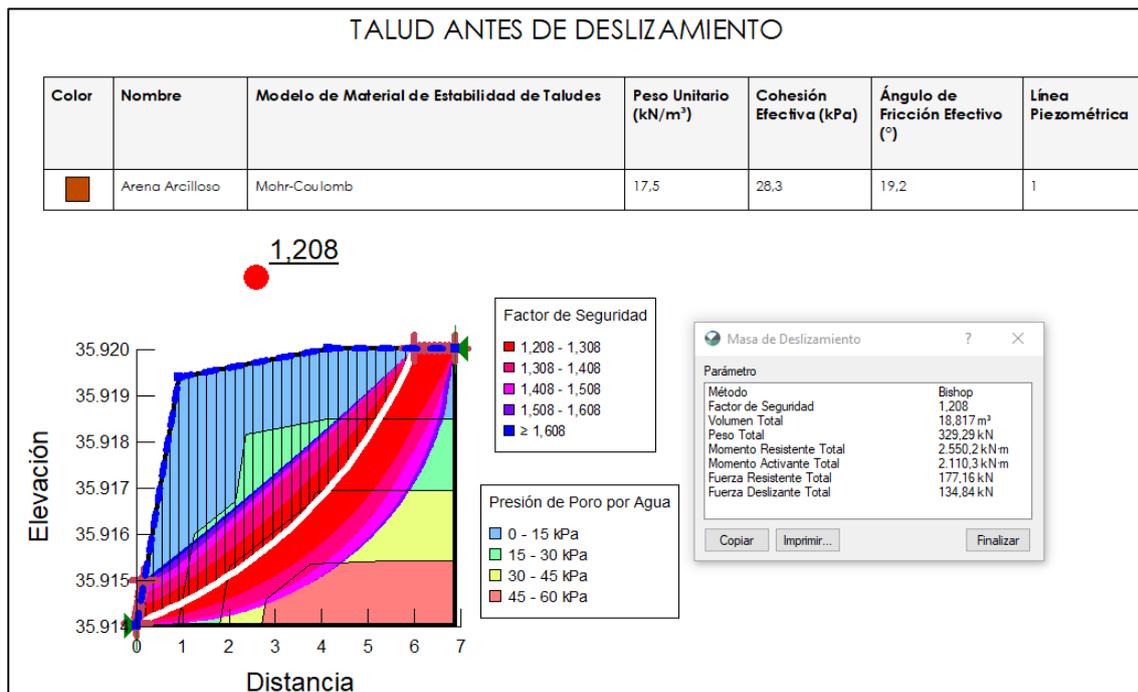
5.3.3.1. Primer Escenario.

Talud antes del deslizamiento: Se reconstruyó el perfil longitudinal del talud y se evaluó su estabilidad.



*Ilustración 46. Talud antes del deslizamiento.
Fuente: Autor.*

La “Ilustración 46” muestra un diagrama esquemático del talud antes de un deslizamiento. Se trata de una representación simplificada de un corte de suelo, con una superficie inclinada que forma un ángulo de 80 grados con la horizontal.



*Ilustración 47. Talud (antes del deslizamiento) modelado.
Fuente: Autores.*

Interpretación de Resultados Caso I:

El presente análisis, realizado con el software GeoStudio, muestra el modelamiento de un talud compuesto por arena arcillosa antes de un evento de deslizamiento. Se utilizó el modelo de estabilidad de taludes de Mohr-Coulomb con los siguientes parámetros: un peso unitario de 17.5 kN/m³, una cohesión efectiva de 28.3 kPa y un ángulo de fricción efectiva de 19.2°. Además, se incorporó en el análisis una línea piezométrica con valor unitario.

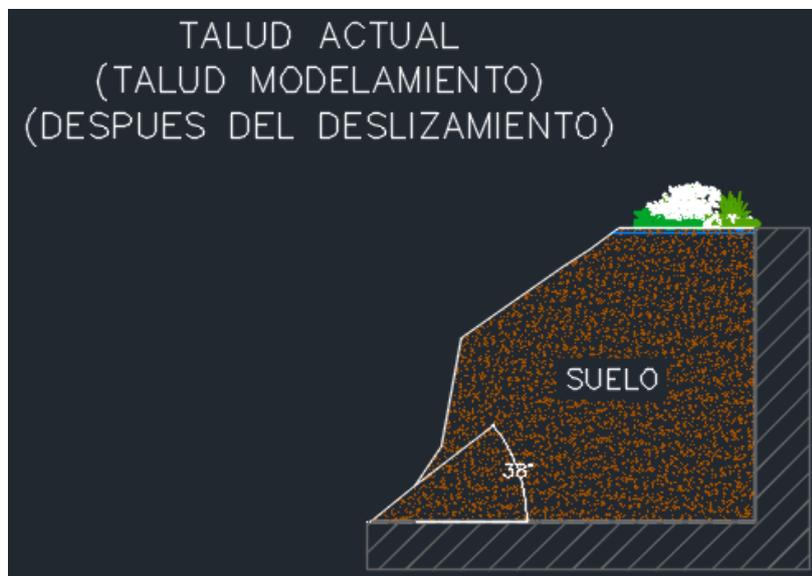
- El gráfico demuestra la variación de la elevación en relación con la distancia, con líneas de contorno que representan diferentes presiones de poro de agua, desde 0 hasta 60 kPa. El factor de seguridad calculado para el talud es de 1.208, lo cual es significativamente inferior al mínimo requerido de 1.5 para las condiciones establecidas en la normativa local. Esto indica una susceptibilidad alta a deslizamientos en el área modelada, lo que requiere atención y posiblemente medidas correctivas para aumentar la estabilidad del talud.
- A través del método de Bishop, se determinaron los siguientes parámetros adicionales: un volumen total potencial de deslizamiento de 18.817 m³, un peso total asociado de

329.29 kN, un momento resistente total de 2550.2 kN·m y un momento desestabilizante total de 2110.3 kN·m. La fuerza resistente total fue calculada en 177,16 kN y la fuerza deslizante total fue de 134,84 kN.

- Estos resultados sugieren que el talud en su estado actual no cumple con los criterios de seguridad establecidos y que se deben considerar intervenciones para mejorar su estabilidad.

5.3.3.2. Segundo Escenario.

Talud después del deslizamiento: Se definió la topografía y se evaluó el modelamiento.



*Ilustración 48. Talud actual (luego de deslizamiento).
Fuente: Autor*

La “Ilustración 48” muestra un diagrama esquemático del talud después de un deslizamiento. Se trata de una representación simplificada de un corte de suelo, con una superficie inclinada que forma un ángulo de 38 grados con la horizontal.

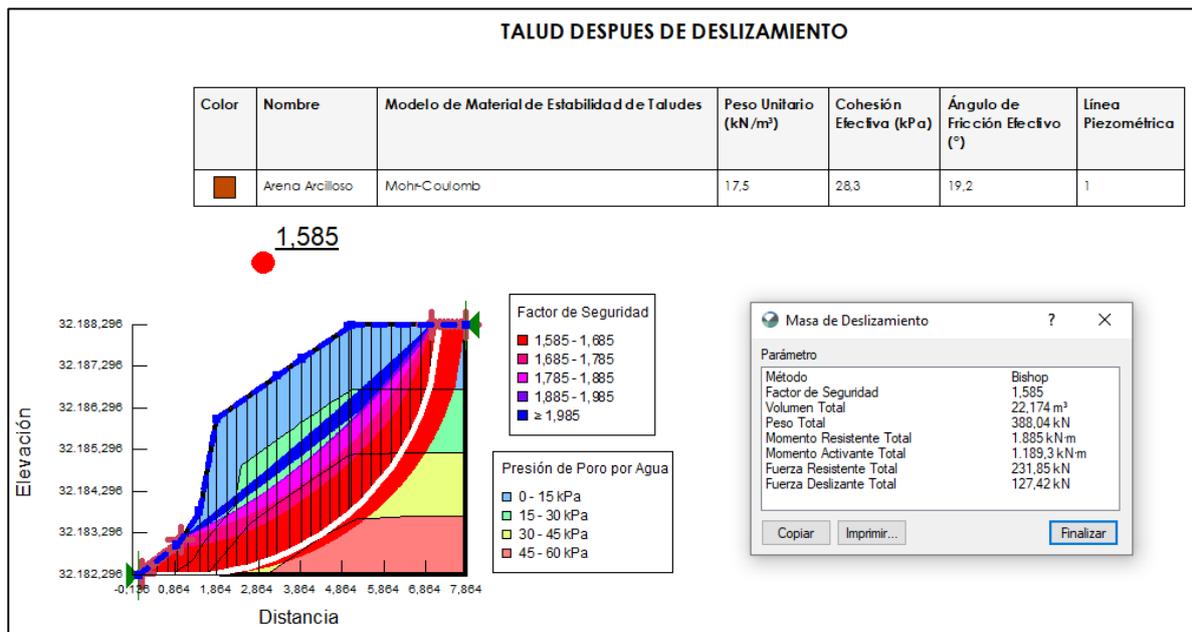


Ilustración 49. Talud (después del deslizamiento) modelado.

Fuente: Autores.

Interpretación de Resultados Caso I:

El modelo de estabilidad de taludes realizado en GeoStudio para un talud de arena arcillosa, después de un evento de deslizamiento, ha proporcionado resultados significativos.

- Utilizando el modelo de Mohr-Coulomb con un peso unitario de 17.5 kN/m³, una cohesión efectiva de 28.3 kPa y un ángulo de fricción efectiva de 19.2°, se ha obtenido un factor de seguridad de 1.585.
- Este valor supera el mínimo requerido de 1.5 para las condiciones de normativa, indicando que, tras las medidas tomadas o las modificaciones naturales ocurridas después del deslizamiento, el talud se encuentra ahora en un estado de estabilidad aceptable. El análisis de estabilidad, siguiendo el método de Bishop, muestra un volumen total afectado por el deslizamiento de 22.174 m³ y un peso total asociado de 388.04 kN. El momento resistente total calculado es de 1885 kN·m frente a un momento desestabilizante de 1189,3 kN·m, y la fuerza resistente total es de 231.85 kN en comparación con una fuerza deslizante total de 127.42 kN.
- Como resultado, la evaluación post-deslizamiento del talud indica que las condiciones

actuales son estables y cumplen con los criterios de seguridad geotécnica establecidos.

5.3.3.3. Tercer Escenario.

Talud después del deslizamiento: Se definió la topografía y se evaluó su estabilidad.



Ilustración 50. Talud estabilizado (Modelado).
Fuente: Autor

La “Ilustración 50” muestra un diagrama esquemático del talud estabilizado o cómo debió diseñarse inicialmente. Se trata de una representación simplificada de un corte de suelo, con una superficie inclinada que forma un ángulo de 60 grados con la horizontal.

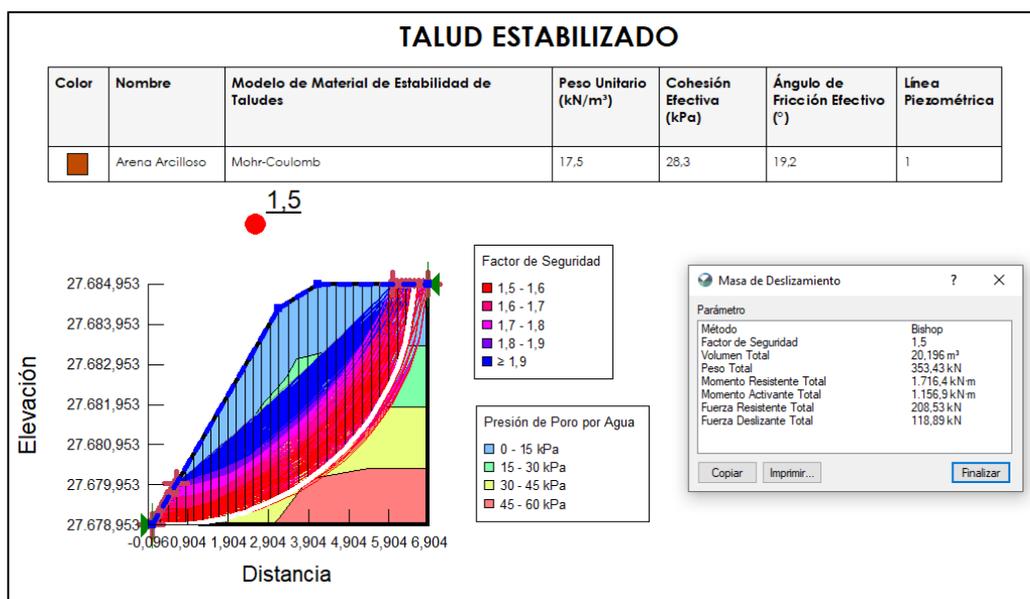


Ilustración 51. Talud (estabilizado antes del deslizamiento) modelado.
Fuente: Autores

El modelamiento de un talud de arena arcillosa realizado con el software GeoStudio ha demostrado que el talud ha sido estabilizado exitosamente. El análisis se ha basado en el criterio de Mohr-Coulomb, con un peso unitario del suelo de 17.5 kN/m^2 , una cohesión efectiva de 28.3 kPa y un ángulo de fricción efectivo de 19.2° . La línea piezométrica se ha establecido con un valor de 1.

- El factor de seguridad obtenido a partir del análisis es de 1.5, lo cual cumple exactamente con el mínimo requerido en Ecuador para considerar un talud como estable. El gráfico muestra diferentes rangos de factor de seguridad, desde 1.5 hasta valores superiores a 1.9, indicados por una gradación de colores desde el rojo hasta el azul. Esto sugiere que varias partes del talud tienen un factor de seguridad aún mayor que el mínimo, lo que refleja un margen de seguridad adicional.
- El análisis de estabilidad proporciona los siguientes datos adicionales: un volumen total de suelo potencialmente deslizable de 20.196 m^3 y un peso total de 353.43 kN . El momento resistente total del talud es de $1716.4 \text{ kN}\cdot\text{m}$, mientras que el momento activante total es de $1156.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$. La fuerza resistente total calculada es de 208.53 kN , en comparación con una fuerza deslizante total de 118.89 kN .
- En resumen, los resultados indican que el talud ha alcanzado un estado de estabilidad adecuado post-intervención.

6. CONCLUSIONES

La recopilación de información correspondiente a la parte alta del cantón Cuenca se realizó de manera exhaustiva. Esto permitió seleccionar una microcuenca hidrográfica localizada en la cuenca alta del río Cumbe, al suroeste de la ciudad de Cuenca, es decir, en los Andes del Sur del Ecuador. Esta microcuenca, cubierta en su totalidad por sub-páramo o páramo y muy pocos relictos de vegetación arbustiva, es conocida por los habitantes de las comunidades aledañas como Yutujapina, gran parte de la misma se encuentra afectada por actividades antrópicas, a pesar de ser una de las principales fuentes de agua de la parroquia rural de Cumbe (5546 habitantes) (GAD-Cumbe, 2020). Adicionalmente, la microcuenca del Yutujapina es atravesada por una vía de segundo orden. Por lo tanto, la metodología implementada permitió identificar esta microcuenca hidrográfica con los criterios establecidos (como son: áreas intangibles - páramo y vegetación arbustiva nativa - pero altamente intervenidas y con vías de segundo orden), lo que sentó las bases para el análisis detallado de la susceptibilidad a deslizamientos.

La elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca de estudio se realizó mediante la jerarquización de parámetros relevantes (como son: pendiente, uso de suelo, distancia a los ríos y precipitación). De estos parámetros el que predomina es la pendiente, con un rango entre 16° y 35° , el mismo que abarca el 44.5% de la microcuenca y presentó una influencia del 44.6 % en el mapa de susceptibilidad. Posteriormente, el parámetro más influyente fue el uso de suelo, alcanzando una ponderación del 30.6% en el mapa de susceptibilidad, siendo la subvariable “páramo intervenido (vía de segundo orden)” la que mayor ponderación obtuvo, con una influencia del 33.7%. Estos parámetros (pendiente y uso de suelo) tuvieron una influencia predominante del 75.2% en el mapa de susceptibilidad, que, en combinación con las variables, distancia a la red de drenaje y precipitación, resultaron en una categorización de susceptibilidad de tipo “Muy alta”. Esta, no obstante, corresponde al

0.67% del área total de la microcuenca; mientras que, el área predominante es del 88.4% que corresponde a la categoría de “Baja”. Por lo tanto, se concluye que las áreas donde la categorización fue “Alta y Muy alta”, representan un 2.96 % del área de la microcuenca. En esta área, su principal afección es la alteración del uso de suelo mediante la creación de vías de segundo orden que juntamente con su topografía escarpada dieron como resultado 8 zonas altamente susceptibles a deslizamientos. Es importante, resaltar que el presente estudio analizó la susceptibilidad a movimientos en masa superficiales, sin embargo, impactos ambientales como degradación, erosión y pérdida progresiva de los suelos de páramo debido a la creación de vías no fueron incluidos de manera explícita, así como, tampoco los impactos sobre la calidad del agua que puede generar una vía de segundo orden en estas zonas de recarga hídrica, principalmente por estar fuera del alcance de la tesis, pero si fueron criterios considerados implícitamente en los valores de ponderación. Es por eso que, si bien el área más propensa a deslizamientos es relativamente pequeña en relación al área de la microcuenca, 2.96%, es obvio que las pérdidas de algunos servicios ambientales de estos páramos son muy significativas, debido principalmente a que la vía de segundo orden la atraviesa en su totalidad.

Por otro lado, mediante los análisis en campo y laboratorio se concluye que el tipo de suelo a 3303 m.s.n.m, en esta zona de páramo Andino correspondiente a la microcuenca Yutujapina se caracteriza mayoritariamente como un suelo “areno-arcilloso” o “SW” considerando la clasificación SUCS. Estos suelos tienen una mezcla de partículas de diferentes tamaños que, en combinación con partículas arcillosas, hacen de este suelo un estrato estable, bajo condiciones de confinamiento e inestable en condiciones no confinadas; y, más aún, al estar expuestos a meteorización por remoción de su cobertura vegetal, acción que es producto del cambio del uso de suelo. En este contexto, el peso específico promedio fue de 17.4 KN/m³, valor que es característico en suelos granulares según Das, (2021). Adicionalmente, del ensayo triaxial “No consolidado no drenado” se obtuvieron los valores de cohesión y ángulo de fricción

interna que fueron de: $C'= 28.3$ KPa y $\phi=19.2^\circ$, estos valores se correlacionan muy bien con la interpretación del ensayo del SPT siendo N-Golpes = 6. Este número de golpes sugiere que se está en presencia de un suelo con consistencia semirrígida, lo cual corrobora las características de una mezcla de propiedades tanto cohesivas como friccionales. Por lo tanto, integrando toda la información anterior, por medio del modelamiento de los taludes con la teoría de Bishop, la misma que considera el análisis por dovelas de un talud, se concluye que el ángulo de inclinación de un talud con respecto a la horizontal interna del mismo, no debería ser mayor a 60° ya que este ángulo conjuntamente con las condiciones mecánicas del suelo, proporcionan un factor de seguridad $FS=1.5$, que es el valor mínimo requerido por la normativa ecuatoriana de geotecnia y cimentaciones (NEC-SE-GC) para garantizar la estabilidad del terreno. En este sentido, el ángulo del talud reconstruido por medio de la topografía levantada en campo, es decir, antes del deslizamiento superficial analizado en el presente estudio, fue de 80° . Lo cual explica la ocurrencia de dicho movimiento en masa.

De esta forma se ha logrado justificar de manera integral todos los objetivos establecidos, haciendo énfasis en que los análisis obtenidos tienen una contribución significativa en el campo de la geotecnia y la futura gestión de riesgos naturales en esta zona. De este modo, hemos contribuido con información elemental que sirve como base para la toma de decisiones en la planificación del uso de suelo y la mitigación de riesgos en la región estudiada, que puede ser realizada en investigaciones futuras.

7. RECOMENDACIONES

- Es oportuno que el GAD Parroquial de Cumbe realice gestiones con entidades responsables en temas de gestión y mitigación de riesgos para de esta manera realizar concientización sobre la susceptibilidad a deslizamientos de tierras y las consecuencias que existen. De esta manera se podrá realizar capacitaciones a moradores del sector y realizar planes de trabajo enfocados en la prevención de este fenómeno, ya que gran parte de lo que está sucediendo en la vía de la microcuenca Yutujapina es la falta de información sobre las consecuencias que conllevan las malas prácticas de moradores como: la deforestación de cobertura vegetal, cultivos en zonas donde la susceptibilidad a deslizamientos es muy alta y principalmente la apertura de vías en este tipo de zonas, ya que al ser una zona de paramo y bosques no debería ser alterado el ecosistema por lo que esta acción debería ser prohibida.
- Con los resultados obtenidos en el estudio se tiene un acercamiento claro y detallada sobre la situación actual en la vía de segundo orden, ya que existen zonas donde se puede observar que ha sido evidente el desprendimiento de tierras y otras zonas donde se empieza a mostrar síntomas de afección. Por lo que, se recomienda realizar estudios técnicos enfocados específicamente en geotecnia, y así poder analizar si de alguna manera es factible realizar la apertura de vías en páramos, puesto que su función dentro del ecosistema es otra.
- Considerando que el talud en la “zona 4” ya falló por el deslizamiento de tierra, aún se recomienda un monitoreo continuo y la evaluación de medidas de mitigación adicionales para asegurar la estabilidad a largo plazo, especialmente considerando la variabilidad de las presiones de poro y las condiciones hidrológicas cambiantes.
- En planes a futuro para el plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Cumbe, en lo que respecta a expansión urbana, es fundamental realizar estudios geotécnicos, esto es

sondeos eléctricos, ensayos de penetración estándar, tomografías del terreno, etc., complementándose con ensayos de resistencia a la compresión simple y al corte en condiciones drenadas, enfocadas a análisis de estabilidad. También haciendo enfoque con estudios geohidrológicos para determinar la permeabilidad y transmisibilidad de los suelos, y su comportamiento con respecto al agua, considerando que es uno de los factores desencadenantes para los movimientos en masa.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alam, A., Bhat, M. S., Farooq, H., Ahmad, B., Ahmad, S., & Sheikh, A. H. (2018). Flood risk assessment of Srinagar city in Jammu and Kashmir, India. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 9(2), 114-129. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-02-2017-0012>.
- American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM D2487-17, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- ASTM, D. (2018). 1586-08. Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split Barrel Sampling of Soils. ASTM International.
- ASTM D1587-15. (2015). Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes. ASTM International.
- ASTM International. (2011). ASTM D1586-11, Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.
- ASTM International. (2010). ASTM D2216-10, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
- ASTM D4914 / D4914M-16, "Standard Test Methods for Density of Soil and Rock in Place by the Sand Replacement Method in a Test Pit," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- ASTM International. (2007). ASTM D422-63, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- ASTM International. (2003). ASTM D2850-03, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.

- Basabe, P., Almeida, E., Bonnard, C., & Heredia, B. (1996). Informe tecnico sobre el informe estado actual del deslizamiento de «La Josefina» y comentarios acerca de la ejecucion de obras viales. [Informe técnico]. Proyecto Precupa.
- Beiler, M., & Treat, C. (2014). Integrating GIS and AHP to Prioritize Transportation Infrastructure Using Sustainability Metrics. *Journal of Infrastructure Systems*, 21, 04014053. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000245)
- Bermeo, H., Barrera, C., Vintimilla, L., Briones, P., Ochoa, V., Alvaro, P., & Cedillo, A. (2010). Proyecto: DIPECHO VII “IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE VULNERABILIDADES A NIVEL CANTONAL” – PAUTE [Preliminar]. Universidad de Cuenca. <https://core.ac.uk/download/pdf/51065813.pdf>
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Bishop, A. W., & Morgenstern, N. (1960). Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, 10(4), 129-153.
- Bogner, C., Bauer, F., Trancón y Widemann, B., Viñan, P., Balcazar, L., & Huwe, B. (2014). Quantifying the morphology of flow patterns in landslide-affected and unaffected soils. *Journal of Hydrology*, 511, 460-473. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.063>
- Broeckaert, S. (2012). Land use dynamics and the spatial occurrence of shallow landslides in a tropical mountainous catchment, Ecuador.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53-72.
- Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. *Public roads*, 13(8), 121-136.
- CEPAL, N. (1998). Ecuador: Evaluación de los efectos socioeconómicos del fenómeno El Niño

en 1997-1998.

Cheng, Y. M., Lansivaara, T., & Wei, W. (2007). Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Computers and geotechnics*, 34(3), 137-150.

Clague, J. J., & Stead, D. (2012). *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling*. Cambridge University Press.

Coulomb, C. A. (1773). Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture. *Mem. Div. Sav. Acad.*

Crosta, G., & Agliardi, F. (2003). A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 407-422.
<https://doi.org/10.5194/nhess-3-407-2003>

Crozier, M. J. (1986). *Landslides: Causes, consequences, and environment*. (No Title).
<https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000795404122368>

Das, B. M., & León, J. C. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.

Das, B. M. (2021). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.
<https://books.google.com.ec/books?id=LmoNEAAAQBAJ>

DEMORAES, F., & D'ERCOLE, R. (2021). Cartografía De Las Amenazas De Origen Natural Por Cantón En El Ecuador (p. 65) [Preliminar]. <https://hal.science/hal-01292338/document>

Dirección de comunicación social del MTOP, M. (2022, mayo 6). MTOP Vias afectadas por temporal de lluvias. Noticia. <https://www.obraspublicas.gob.ec/mtop-continua-labores-constructivas-y-de-limpieza-en-vias-afectadas-por-la-temporada-de-lluvias/>

- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014a). Soil strength and slope stability. John Wiley & Sons.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014b). Soil strength and slope stability. John Wiley & Sons.
- Ecuador: Floods and Landslides - Feb 2022. (2023, May 4). ReliefWeb.
<https://reliefweb.int/disaster/fl-2022-000164-ecu>
- Eberly, D. (2000). Least squares fitting of data. Chapel Hill, NC: Magic Software, 1-10.
- Effat, H. (2014). Spatial Modeling of Optimum Zones for Wind Farms Using Remote Sensing and Geographic Information System, Application in the Red Sea, Egypt. *Journal of Geographic Information System*, 06, 358-374. <https://doi.org/10.4236/jgis.2014.64032>
- El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R. (2019). GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7>
- Fawaz, A., Farah, E., & Hagechegade, F. (2014). Slope Stability Analysis Using Numerical Modelling. *American Journal of Civil Engineering*, 2, 60-67.
<https://doi.org/10.11648/j.ajce.20140203.11>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161-2181.
<https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- GAD parroquial de Cumbe. "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de la parroquia Cumbe, 2020."
- Glade, T. (2000). Modelling landslide-triggering rainfalls in different regions of New Zealand-the soil water status model. *Zeitschrift für Geomorphologie. Supplementband*, 122, 63-84.
- GeoStudio (2020). Software para análisis geotécnico. GEO-SLOPE International Ltd.

- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquia Cumbe, P. C. (2000). PLAN DE DESARROLLO DEL GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO DE LA PARROQUIA CUMBE PARA EL PERÍODO 2019 – 2023. <https://cumbe.gob.ec/azuay/wp-content/uploads/2021/07/PLAN-DE-TRABAJO-GAD-PARROQUIAL-2019.pdf>
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999a). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1), 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999b). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
- Hervas de Diego, J., & Rosin, P. (2001). Tratamiento digital de imagenes de teledetección en el espectro óptico para el reconocimiento y control de deslizamientos. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, 1.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). An introduction to geotechnical engineering (Vol. 733). Prentice-Hall Englewood Cliffs.
- INEN. (1982a). INEN 689 (ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR) [Norma Tecnica Ecuatoriana].
- INEN. (1982b). INEN 690 (DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA METODO DEL SECADO AL HORNO).
- Íñiguez, V., Morales, O., Cisneros, F., Bauwens, W., & Wyseure, G. (2016). Analysis of the drought recovery of Andosols on southern Ecuadorian Andean páramos. *Hydrol. Earth*

- Syst. Sci., 20(6), 2421-2435. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2421-2016>
- Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water resources research*, 36(7), 1897-1910.
- Karlsson, C. S. J., Kalantari, Z., Mörtberg, U., Olofsson, B., & Lyon, S. W. (2017). Natural Hazard Susceptibility Assessment for Road Planning Using Spatial Multi-Criteria Analysis. *Environmental Management*, 60(5), 823-851. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0912-6>
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Cornell Univ., Ithaca
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*. John Willey & Sons. Inc., New York, 553.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1991). *Soil mechanics (Vol. 10)*. John Wiley & Sons.
- Lin, S., & Lu, M. (2012). Characterizing disagreement and inconsistency in experts' judgments in the analytic hierarchy process. *Management Decision*, 50(7), 1252-1265. <https://doi.org/10.1108/00251741211246996>
- Lunne, T., Andersen, K. H., Low, H. E., Randolph, M. F., & Sjørsen, M. (2011). Guidelines for offshore in situ testing and interpretation in deepwater soft clays. *Canadian geotechnical journal*, 48(4), 543-556.
- Luu, C., Ha, H., Bui, Q. D., Luong, N.-D., Khuc, D. T., Vu, H., & Nguyen, D. Q. (2023). Flash flood and landslide susceptibility analysis for a mountainous roadway in Vietnam using spatial modeling. *Quaternary Science Advances*, 11, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100083>
- Mallick, J., Singh, R., Awadh, M., Islam, S., Khan, R., & Qureshi, M. (2018). GIS-based landslide susceptibility evaluation using fuzzy-AHP multi-criteria decision-making techniques in the Abha Watershed, Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, 77.

<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7451-1>

Manual, G. U. (2012). Geo-slope international Ltd. Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5.

McKean, J., & Roering, J. (2004). Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57(3-4), 331-351.

Metternicht, G., Hurni, L., & Gogu, R. (2005). Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote sensing of Environment*, 98(2-3), 284-303.

Mercurio, R. E. (2023, December 29). Deslizamientos y caída de rocas en las vías del Azuay. *Diario El Mercurio*. <https://elmercurio.com.ec/2023/12/29/deslizamientos-caida-piedras-vias-azuay/>

Moharrami, M., Naboureh, A., Gudiyangada Nachappa, T., Ghorbanzadeh, O., Guan, X., & Blaschke, T. (2020). National-Scale Landslide Susceptibility Mapping in Austria Using Fuzzy Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/ijgi9060393>.

Ministerio del Ambiente de Ecuador (2017). Guía para la gestión de riesgos geológicos.

Naranjo Aguay, H. X. (2010). Análisis comparativo del cálculo de capacidad portante en base a geofísica y método convencional caso práctico Puente sobre el río Maicito.

Núñez Romero, R. A., & Sanchez Llacta, I. J. (2016). Riesgo a deslizamiento en taludes del sistema vial Lampa–Pariahuanca, Huancayo.

Pandey, V. K., & Sharma, M. C. (2017). Probabilistic landslide susceptibility mapping along Tipri to Ghuttu highway corridor, Garhwal Himalaya (India). *Remote Sensing*

Applications: Society and Environment, 8, 1-11.

Parwata, I. N. S., Nakashima, S., Shimizu, N., & Osawa, T. (2020). Effect of digital elevation models on monitoring slope displacements in open-pit mine by differential interferometry synthetic aperture radar. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(5), 1001-1013. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.01.003>.

Raymond, S. (1948). *The Standard Penetration Test and the Engineering*.

Roscoe, K. H., Schofield, A., & Wroth, A. P. (1958). On the yielding of soils. *Geotechnique*, 8(1), 22-53.

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60-91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>

Rodríguez-Pineda, J. A., Carreón, E., Lafon, A., Santos, J., & Ruiz, R. (2017). Cambio de uso de suelo en la cuenca del río Conchos, Chihuahua, México. *La cuenca del río conchos: Una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*, 157.

Rosero Mier, M. M. (2018). Análisis multitemporal del uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca del Río Tahuando y proyección de cambios al año 2031, en el cantón Ibarra, provincia de Imbabura.

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Sarkar, S., & Kanungo, D. (2004). An Integrated Approach for Landslide Susceptibility Mapping Using Remote Sensing and GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, 617-625. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.617>

Schmertmann, J. H. (1975). Measurement of in situ shear strength, SOA Report. 2, 57-138.

- Skempton, A. (1953). The colloidal activity of clays. *Selected papers on soil mechanics*, 1, 57-61.
- Smith, I. M., Griffiths, D. V., & Margetts, L. (2013). *Programming the finite element method*. John Wiley & Sons.
- Stark, T. D., & Eid, H. T. (1994). Drained residual strength of cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(5), 856-871.
- Sun, D., Gu, Q., Wen, H., Xu, J., Zhang, Y., Shi, S., Xue, M., & Zhou, X. (2023). Assessment of landslide susceptibility along mountain highways based on different machine learning algorithms and mapping units by hybrid factors screening and sample optimization. *Gondwana Research*, 123, 89-106.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*.
- Turner, A., & Schuster, R. (1996). *Special report 247: Landslides: Investigation and mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC.
- Van Den Eeckhaut, M., Kerle, N., Poesen, J., & Hervás, J. (2012). Object-oriented identification of forested landslides with derivatives of single pulse LiDAR data. *Geomorphology*, 173-174, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.024>
- Van Westen, C., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—Why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 65, 167-184.
- Vanacker, V., Molina, A., Govers, G., Poesen, J., & Deckers, J. (2007). Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: The Paute River, southern Ecuador. *Human Impact and Geomorphology in Tropical Mountain Areas*, 87(1), 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.042>
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., & De

- Bievre, B. (2003). Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. *Geomorphology*, 52(3), 299-315. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00263-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00263-5)
- Varnes, D. J. (1978a). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.
- Varnes, D. J. (1978b). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.
- Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: A review of principles and practice, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. *Natural Hazards*, 3.
- Vojteková, J., & Vojtek, M. (2020). Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 131-148. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1713233>
- Wang, Y.-Q., Zhang, S.-B., Chen, L.-L., Xie, Y.-L., & Wang, Z.-F. (2019). Field monitoring on deformation of high rock slope during highway construction: A case study in Wenzhou, China. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(12), 1550147719895953. <https://doi.org/10.1177/1550147719895953>
- Wang, Z., & Lin, M. (2021). Finite element analysis method of slope stability based on fuzzy statistics. <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n1.93320>
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.
- World Bank Group. (2022, June 27). Strengthening Ecuador's Resilience and Responsiveness to Disasters and Macroeconomic Shocks. World Bank. <https://www.worldbank.org/en/results/2022/06/27/strengthening-ecuador-resilience-and-responsiveness-to-disasters-and-macroeconomic-shocks>
- Zuidam, R. A. van, Zuidam-Cancelado, F. I., & International Institute for Aerospace Survey

and Earth Sciences. (1986). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publishers The Hague; WorldCat.

9. ANEXOS

Anexo (A)

PONDERACIÓN VARIABLES

Matriz de Comparación de pares de las variables

Factores condicionantes	Pendiente	Uso de suelo	Distancia a los rios	Precipitacion
Pendiente	1,00	3,00	5,00	7,00
Uso de suelo	0,333	1,00	3,00	3,00
Distancia a los rios	0,200	0,333	1,00	0,33
Precipitacion	0,14	0,333	3,00	1,00
SUMA	1,68	4,67	12,00	11,33
1/SUMA	0,60	0,21	0,08	0,09

Tabla N° 2: Consistencia aleatoria (CA) de la matriz de comparación por pares de factores.

Total de alternativas (n)	Consistencia Aleatoria (CA)
1	0,00
2	0,00
3	0,50
4	0,9
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49

Elaboración: Proyecto de Zonificación, mayo 2013
Fuente: Sánchez (2003)

Matriz de Normalización de pares de las variables

Factores condicionantes	Pendiente	Uso de suelo	Distancia a los rios	Precipitacion	Vector priorizacion	%
Pendiente	0,60	0,64	0,42	0,62	0,568	57
Uso de suelo	0,20	0,21	0,25	0,26	0,232	23
Distancia a los rios	0,12	0,07	0,08	0,03	0,076	8
Precipitacion	0,09	0,07	0,25	0,09	0,124	12
					1,000	100,000

Matriz de Relación de Consistenciae pares de los factores

Factores condicionantes	Pendiente	Uso de suelo	Distancia a los rios	Precipitacion	Vector suma ponderada	Amax
Pendiente	0,57	0,70	0,38	0,87	2,510	4,42
Uso de suelo	0,19	0,23	0,23	0,37	1,020	4,40
Distancia a los rios	0,11	0,08	0,08	0,04	0,308	4,06
Precipitacion	0,08	0,08	0,23	0,12	0,510	4,12
					Suma	17,00
					Promedio	4,25

ÍNDICE DE CONSISTENCIA (CI)

$$CI = \frac{0,25}{3,00}$$

$$CI = 0,083$$

ÍNDICE ALEATORIO

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

RELACIÓN DE CONSISTENCIA

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CR = 0,092 < 0,1 \quad \text{CUMPLE}$$

CI	0,083
CR	0,092

Anexo (B)

VARIABLE- PENDIENTE

Descripción	Rango
Pendiente fuerte (16°-35°)	16°-35°
Pendiente moderada (8°-16°)	8°-16°
Pendiente baja (4°-8°)	4°-8°
Pendiente muy baja (2°-4°)	2°-4°
Planicie (0°-2°)	0°-2°

Matriz de Comparación de pares del parámetro Pendiente

Pendiente	16°-35°	8°-16°	4°-8°	2°-4°	0°-2°
Pendiente fuerte (16°-35°)	1,00	3,00	5,00	6,00	9,00
Pendiente moderada (8°-16°)	0,33	1,00	3,00	5,00	6,00
Pendiente baja (4°-8°)	0,20	0,33	1,00	3,00	5,00
Pendiente muy baja (2°-4°)	0,17	0,20	0,33	1,00	3,00
Planicie (0°-2°)	0,11	0,17	0,20	0,33	1,00
SUMA	1,81	4,70	9,53	15,33	24,00
1/SUMA	0,55	0,21	0,10	0,07	0,04

Matriz de Normalización de pares del parámetro Pendiente

Pendiente	16°-35°	8°-16°	4°-8°	2°-4°	0°-2°	Vector priorización	%
Pendiente fuerte (16°-35°)	0,55	0,64	0,52	0,39	0,38	0,496	49,62
Pendiente moderada (8°-16°)	0,18	0,21	0,31	0,33	0,25	0,258	25,75
Pendiente baja (4°-8°)	0,11	0,07	0,10	0,20	0,21	0,138	13,80
Pendiente muy baja (2°-4°)	0,09	0,04	0,03	0,07	0,13	0,072	7,20
Planicie (0°-2°)	0,06	0,04	0,02	0,02	0,04	0,036	3,62
						1,00	100,00

5
4
3
2
1

Matriz de Relación de Consistencia de pares del parámetro Pendiente

Pendiente	16°-35°	8°-16°	4°-8°	2°-4°	0°-2°	Vector suma ponderada	Amax
Pendiente fuerte (16°-35°)	0,50	0,77	0,69	0,43	0,33	2,72	5,47
Pendiente moderada (8°-16°)	0,17	0,26	0,41	0,36	0,22	1,41	5,49
Pendiente baja (4°-8°)	0,10	0,09	0,14	0,22	0,18	0,72	5,22
Pendiente muy baja (2°-4°)	0,08	0,05	0,05	0,07	0,11	0,36	5,02
Planicie (0°-2°)	0,06	0,04	0,03	0,02	0,04	0,19	5,13
						Suma	26,33
						Promedio	5,27

ÍNDICE DE CONSISTENCIA (CI)

$$CI = \frac{0,27}{4,00}$$

$$CI = 0,066$$

ÍNDICE ALEATORIO

n	3	4	6	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

RELACIÓN DE CONSISTENCIA

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CR = 0,059 < 0,10 \text{ CUMPLE}$$

CI	0,066
CR	0,059

Anexo (C)

VARIABLE - PRECIPITACIÓN

PRECIPITACION	VALOR
772-807	2,00
807-878	2,00
878-948	2,00
948-1018	3,00
1018-1090	3,00

7.3.1.3 CLASIFICACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (P)

PRECIPITACIÓN (mm/AÑO)	CLAS E	CLASIFICACIÓN
0-750	1	Baja
750-1000	2	Moderada
1000-1250	3	Mediana
1250-1500	4	Alta
1500-1800	5	Muy Alta

Matriz de Comparación de pares del parámetro de Precipitación

Precipitación	772-807	807-878	878-948	948-1018	1018-1090
772-807	1,00	1,00	1,00	0,33	0
807-878	1,00	1,00	1,00	0,33	0
878-948	1,00	1,00	1,00	0,33	0,20
948-1018	3,00	3,00	3,00	1,00	1,00
1018-1090	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00
SUMA	11,00	11,00	11,00	3,00	2,60
1/SUMA	0,09	0,09	0,09	0,33	0,38

Matriz de Normalización de pares del parámetro de Precipitación

Precipitación	772-807	807-878	878-948	948-1018	1018-1090	Vector priorización	%
772-807	0,09	0,09	0,09	0,11	0,08	0,092	9,22
807-878	0,09	0,09	0,09	0,11	0,08	0,092	9,22
878-948	0,09	0,09	0,09	0,11	0,08	0,092	9,22
948-1018	0,27	0,27	0,27	0,33	0,38	0,307	30,72
1018-1090	0,45	0,45	0,45	0,33	0,38	0,416	41,63
						1,00	100,00

Matriz de Relación de Consistencia de Precipitación

Precipitación	772-807	807-878	878-948	948-1018	1018-1090	Vector suma ponderada	λ_{max}
772-807	0,09	0,09	0,09	0,10	0,08	0,46	5,01
807-878	0,09	0,09	0,09	0,10	0,08	0,46	5,01
878-948	0,09	0,09	0,09	0,10	0,08	0,46	5,01
948-1018	0,28	0,28	0,28	0,31	0,42	1,55	5,05
1018-1090	0,46	0,46	0,46	0,31	0,42	2,11	5,06
						Suma	25,16
						Promedio	5,03

ÍNDICE DE CONSISTENCIA (CI)

$$CI = \frac{0,03}{4,00}$$

$$CI = 0,008$$

ÍNDICE ALEATORIO

n	3	4	5	6	7	8	9	10
Ri	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,46	1,49

RELACIÓN DE CONSISTENCIA

$$CR = \frac{CI}{Ri}$$

$$CR = 0,01 < 0,1 \quad \text{CUMPLE}$$

CI	0,008
CR	0,007

Anexo (D)

VARIABLE USO DE SUELO

Matriz de Comparación de pares del parámetro Uso de suelo

Geología	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Paramo (1)	1,00	1/3	1	1	1/3	1	1/3	1	1/3	1	1/7
Degradado sin cobertura (2)	3,00	1,00	3,00	3	3	3,00	1,00	3	1/3	3	1/3
Pasto seco (3)	1,00	0,33	1,00	1	1/3	1,00	0,33	1	1/3	1	1/7
Bosque/Chaparro (4)	1,00	0,33	1,00	1,00	1/3	1,00	0,33	1,00	1/3	1	1/7
Cultivos (5)	3,00	0,33	3,00	3,00	1,00	3,00	0,33	3,00	1/3	3,00	1/3
Plantas nativas (6)	1,00	0,33	1,00	1,00	0,33	1,00	0,33	1	1/3	1	1/7
Urbano (7)	3,00	1,00	3,00	3,00	3,00	3,00	1,00	3,00	3,00	3,00	1/3
Pasto verde (8)	1,00	0,33	1,00	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	1/7
Bosque intervenido por pastoreo (9)	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	0,33	3,00	1,00	3,00	1/3
Quemas (10)	1,00	0,33	1,00	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	1/7
Paramo intervenido (11)	7,00	3,00	7,00	7,00	5,00	7,00	3,00	7,00	5,00	7,00	1,00
SUMA	25,00	12,33	25,00	25,00	17,00	25,00	9,67	25,00	11,67	25,00	2,66
1/SUMA	0,04	0,08	0,04	0,04	0,06	0,04	0,10	0,04	0,08	0,04	0,38

Matriz de Normalización de pares del parámetro Uso de suelo

Geología	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	Vector priorización	%
Paramo (1)	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,037	3,67
Degradado sin cobertura (2)	0,12	0,08	0,12	0,12	0,18	0,12	0,10	0,12	0,09	0,12	0,08	0,108	10,77
Pasto seco (3)	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,037	3,67
Bosque/Chaparro (4)	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,037	3,67
Cultivos (5)	0,12	0,03	0,12	0,12	0,06	0,12	0,03	0,12	0,03	0,12	0,08	0,086	8,58
Plantas nativas (6)	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,037	3,67
Urbano (7)	0,12	0,08	0,12	0,12	0,18	0,12	0,10	0,12	0,09	0,12	0,08	0,128	12,85
Pasto verde (8)	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,037	3,67
Bosque intervenido por pastoreo (9)	0,12	0,24	0,12	0,12	0,18	0,12	0,03	0,12	0,09	0,12	0,08	0,121	12,14
Quemas (10)	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,037	3,67
Paramo intervenido (11)	0,28	0,41	0,28	0,28	0,29	0,28	0,32	0,28	0,43	0,28	0,38	0,337	33,65
												1,00	100,00

Matriz de Relación de Consistencia de Uso de suelo

Geología	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	Vector suma ponderada	Amx
Paramo (1)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,42	11,34
Degradado sin cobertura (2)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,26	0,11	0,13	0,11	0,04	0,11	0,07	1,26	11,71
Pasto seco (3)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,42	11,34
Bosque/Chaparro (4)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,42	11,34
Cultivos (5)	0,11	0,04	0,11	0,11	0,09	0,11	0,04	0,11	0,04	0,11	0,07	0,93	10,86
Plantas nativas (6)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,42	11,34
Urbano (7)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,26	0,11	0,13	0,11	0,36	0,11	0,07	1,99	12,34
Pasto verde (8)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,42	11,34
Bosque intervenido por pastoreo (9)	0,11	0,32	0,11	0,11	0,26	0,11	0,04	0,11	0,12	0,11	0,07	1,47	12,13
Quemas (10)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,42	11,34
Paramo intervenido (11)	0,26	0,54	0,26	0,26	0,43	0,26	0,64	0,26	0,61	0,26	0,34	4,09	12,17
												Suma	127,26
												Promedio	11,57

ÍNDICE DE CONSISTENCIA (CI)

$$CI = \frac{0,57}{10,00}$$

$$CI = 0,057$$

ÍNDICE ALEATORIO

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,48	1,49	1,51

RELACIÓN DE CONSISTENCIA

$$RC = \frac{CI}{RI}$$

CR 0,038 < 0,10 CUMPLE

CI	0,057
CR	0,038

Anexo (E)

VARIABLE - DISTANCIA RÍOS

Matriz de Comparación de pares del parámetro Distancia ríos

Geomorfología	0m-50m	50m-100m	100m-150m	150m-200m	>200m
0m-50m	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00
50m-100m	1/3	1,00	3,00	5,00	7,00
100m-150m	1/5	1/3	1,00	3,00	5,00
150m-200m	1/7	1/5	1/3	1,00	5,00
>200m	1/9	1/7	1/5	1/5	1,00
SUMA	1,79	4,68	9,53	16,20	27,00
1/SUMA	0,56	0,21	0,10	0,06	0,04

Matriz de Normalización de pares del parámetro Distancia ríos

Geomorfología	0m-50m	50m-100m	100m-150m	150m-200m	>200m	Vector priorización	%
0m-50m	0,56	0,64	0,52	0,43	0,33	0,498	49,82
50m-100m	0,19	0,21	0,31	0,31	0,26	0,257	25,66
100m-150m	0,11	0,07	0,10	0,19	0,19	0,132	13,17
150m-200m	0,08	0,04	0,03	0,06	0,19	0,081	8,09
>200m	0,06	0,03	0,02	0,01	0,04	0,033	3,26
						1,00	100,00

5
4
3
2
1

Matriz de Relación de Consistencia de pares del parámetro Distancia ríos

Geomorfología	0m-50m	50m-100m	100m-150m	150m-200m	>200m	Vector suma ponderada	Amax
0m-50m	0,50	0,77	0,66	0,57	0,29	2,79	5,59
50m-100m	0,17	0,26	0,40	0,40	0,23	1,45	5,65
100m-150m	0,10	0,09	0,13	0,24	0,16	0,72	5,49
150m-200m	0,07	0,05	0,04	0,08	0,16	0,41	5,07
>200m	0,06	0,04	0,03	0,02	0,03	0,17	5,12
						Suma	26,93
						Promedio	5,39

ÍNDICE DE CONSISTENCIA (CI)

$$CI = \frac{0,39}{4,00}$$

$$CI = 0,097$$

ÍNDICE ALEATORIO

n	3	4	6	8	7	8	9	10
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,48

RELACIÓN DE CONSISTENCIA

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CR = 0,086 < 0,1 \text{ CUMPLE}$$

CI	0,097
CR	0,086

Anexo (F)

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

PROYECTO Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"

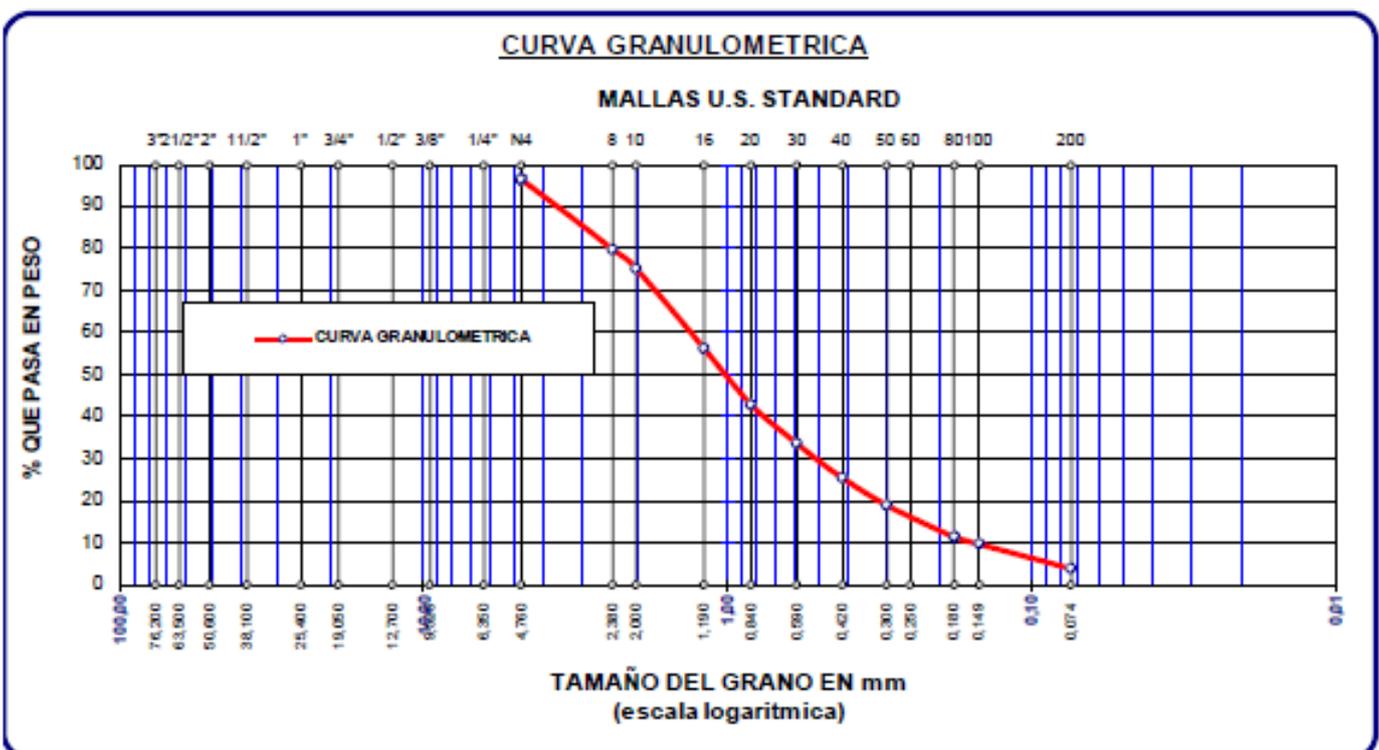
UBICACIÓN Parroquia "Cumbe"

SOLICITANTE Luis Chimbo - Christopher Loja

FECHA 08/11/2023

MUESTRA 1ra

TAMICES ASTM	ABERTURA mm	PESO RETENIDO	%RETENIDO PARCIAL	%RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
3"	76,200					GRAVA GRUESA	CALICATA Nº 01 Profundidad = 0.6 mts. Límites de Consistencia : LL = LP = IP = Peso de la Muestra: 235,00 gr. GRAVA 3,40 % ARENA 96,60 % CLASIFICACION SUCS: OBSERVACIONES La muestra corresponde al estrato Nº 1 de 0.00 a 0.6 m de profundidad.
2 1/2"	63,500						
2"	50,600						
1 1/2"	38,100						
1"	25,400						
3/4"	19,050					GRAVA FINA	
1/2"	12,700						
3/8"	9,525						
1/4"	6,350					ARENA	
No4	4,760	8,00	3,40	3,40	96,60		
No8	2,380	39,00	16,60	20,00	80,00		ARENA MEDIA
No10	2,000	11,00	4,68	24,68	75,32		
No16	1,190	45,00	19,15	43,83	56,17		
No20	0,840	31,00	13,19	57,02	42,98		ARENA FINA
No30	0,590	22,00	9,36	66,38	33,62		
No40	0,420	19,00	8,09	74,47	25,53		
No 50	0,300	15,00	6,38	80,85	19,15		
No60	0,250						LIMOS
No80	0,180	18,00	7,66	88,51	11,49		
No100	0,149	4,00	1,70	90,21	9,79		
No200	0,074	14,00	5,96	96,17	3,83		
BASE		9,00	3,83	100,00	0,00		
TOTAL		235,00	100,00				



ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO

PROYECTO Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"

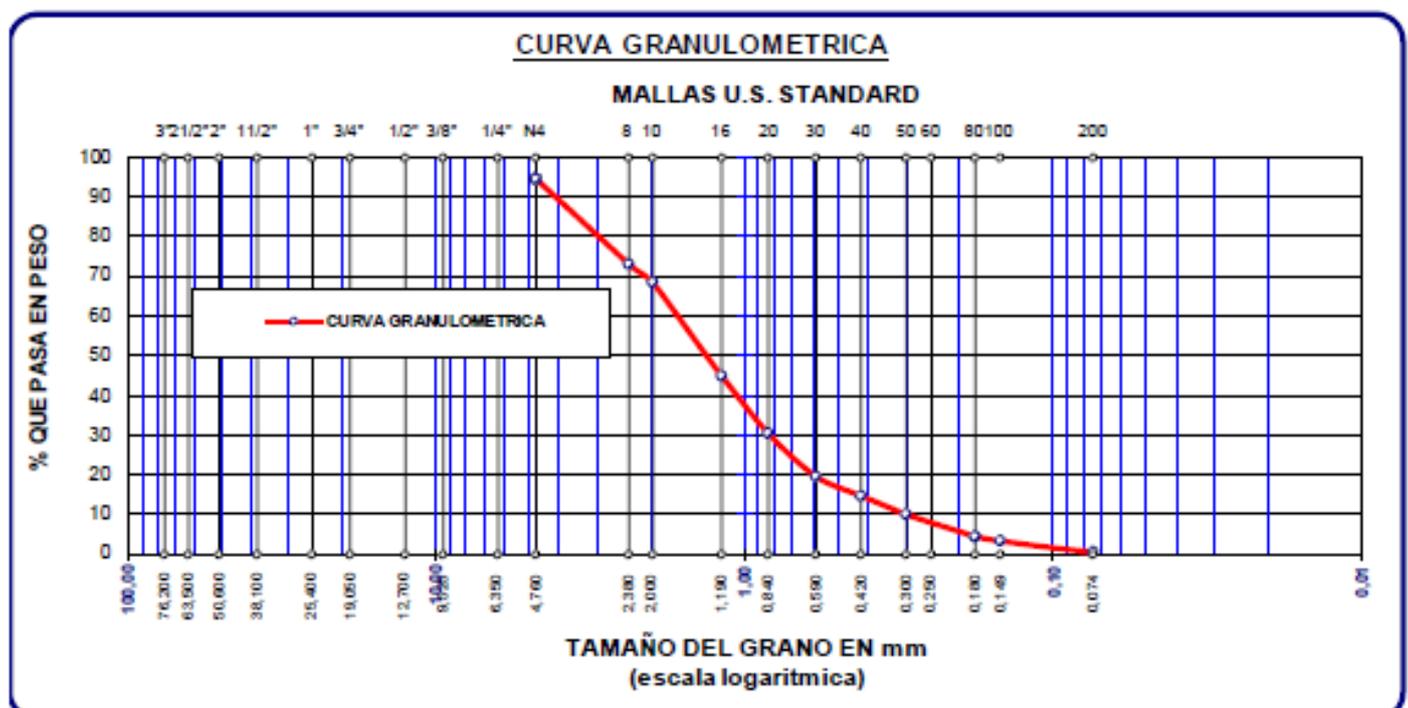
UBICACIÓN Parroquia "Cumbe"

SOLICITANTE Luis Chimbo - Cristopher Loja

FECHA 08/11/2023

MUESTRA 2da

TAMICES ASTM	ABERTURA mm	PESO RETENIDO	%RETENIDO PARCIAL	%RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
3"	76,200					GRAVA GRUESA	CALICATA N° 02 Profundidad = 1.2 mts. Límites de Consistencia : LL = LP = IP = Peso de la Muestra: 504,00 gr. GRAVA 5,36 % ARENA 94,64 % CLASIFICACION SUCS: OBSERVACIONES La muestra corresponde al estrato N° 2 de 0.60 a 1.20 m de profundidad.
2 1/2"	63,500						
2"	50,800						
1 1/2"	38,100						
1"	25,400						
3/4"	19,050					GRAVA FINA	
1/2"	12,700						
3/8"	9,525						
1/4"	6,350					ARENA	
No4	4,760	27,00	5,36	5,36	94,64		
No8	2,380	108,00	21,43	26,79	73,21		
No10	2,000	24,00	4,76	31,55	68,45		ARENA MEDIA
No16	1,190	118,00	23,41	54,96	45,04		
No20	0,840	73,00	14,48	69,44	30,56		
No30	0,590	54,00	10,71	80,16	19,84		ARENA FINA
No40	0,420	25,00	4,96	85,12	14,88		
No 50	0,300	24,00	4,76	89,88	10,12		
No60	0,250						
No80	0,180	28,00	5,56	95,44	4,56		
No100	0,149	6,00	1,19	96,63	3,37		
No200	0,074	14,00	2,78	99,40	0,60		
BASE		3,00	0,60	100,00	0,00	UMOS	
TOTAL		504,00	100,00				



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

PROYECTO Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"

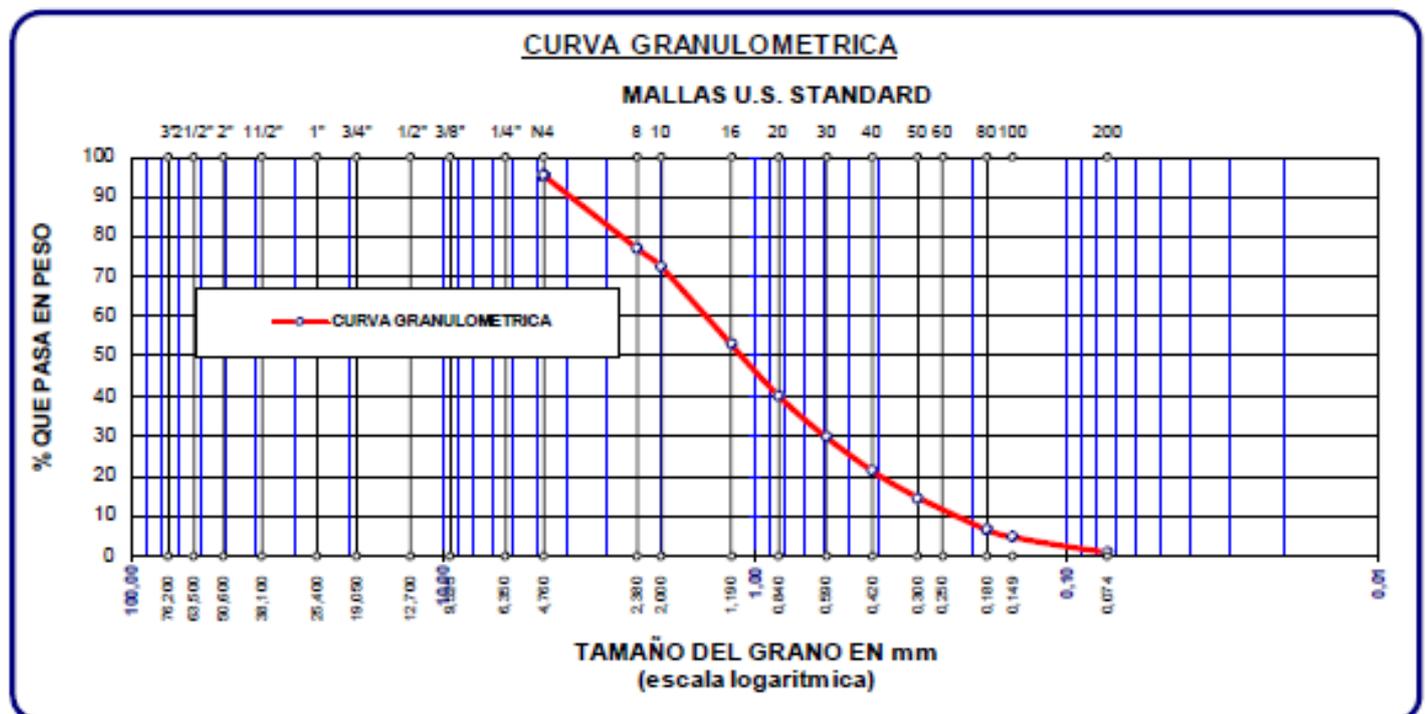
UBICACIÓN Parroquia "Cumbe"

SOLICITANTE Luis Chimbo - Christopher Loja

FECHA 08/11/2023

MUESTRA 3ra

TAMICES ASTM	ABERTURA mm	PESO RETENIDO	%RETENIDO PARCIAL	%RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
3"	76,200					GRAVA GRUESA	CALICATA N° 03 Profundidad = 1.75 mts. Límites de Consistencia : LL = LP = IP = Peso de la Muestra: 460,00 gr. GRAVA 4,78 % ARENA 95,22 % CLASIFICACION SUCS: OBSERVACIONES La muestra corresponde al estrato N° 3 de 1.30 a-1.75 m de profundidad.
2 1/2"	63,500						
2"	50,800						
1 1/2"	38,100						
1"	25,400						
3/4"	19,050					GRAVA FINA	
1/2"	12,700						
3/8"	9,525						
1/4"	6,350					ARENA	
No4	4,760	22,00	4,78	4,78	95,22		
No8	2,380	84,00	18,26	23,04	76,96		
No10	2,000	21,00	4,57	27,61	72,39		
No16	1,190	89,00	19,35	46,96	53,04		ARENA MEDIA
No20	0,840	60,00	13,04	60,00	40,00		
No30	0,590	47,00	10,22	70,22	29,78		
No40	0,420	39,00	8,48	78,70	21,30		
No 50	0,300	31,00	6,74	85,43	14,57		
No60	0,250						ARENA FINA
No80	0,180	37,00	8,04	93,48	6,52		
No100	0,149	8,00	1,74	95,22	4,78		
No200	0,074	18,00	3,91	99,13	0,87		
BASE		4,00	0,87	100,00	0,00	LIMOS	
TOTAL		460,00	100,00				



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

PROYECTO Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"

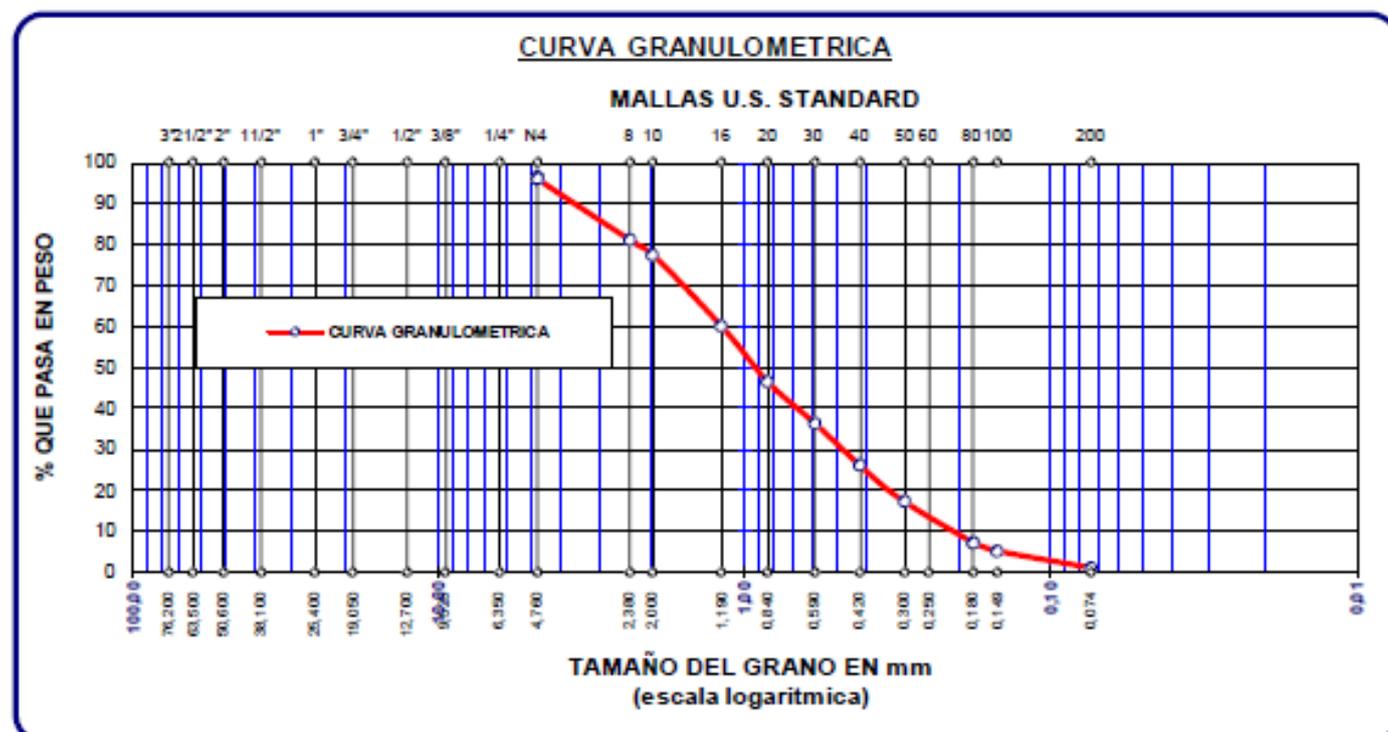
UBICACIÓN Parroquia "Cumbe"

SOLICITANTE Luis Chimbo - Christopher Loja

FECHA 08/11/2023

MUESTRA 4ta

TAMICES ASTM	ABERTURA mm	PESO RETENIDO	%RETENIDO PARCIAL	%RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
3"	76,200					GRAVA GRUESA	CALICATA N° 04 Profundidad = 2.35 mts. Límites de Consistencia : LL = LP = IP = Peso de la Muestra: 624,00 gr. GRAVA 4,01 % ARENA 95,99 % CLASIFICACION SUCS: OBSERVACIONES La muestra corresponde al estrato N° 4 de-1.75 a-2.35 m de profundidad.
2 1/2"	63,500						
2"	50,600						
1 1/2"	38,100						
1"	25,400						
3/4"	19,050					GRAVA FINA	
1/2"	12,700						
3/8"	9,525					ARENA GRUESA	
1/4"	6,350						
No4	4,760	25,00	4,01	4,01	95,99		
No8	2,380	93,00	14,90	18,91	81,09		
No10	2,000	23,00	3,69	22,60	77,40	ARENA MEDIA	
No16	1,190	109,00	17,47	40,06	59,94		
No20	0,840	85,00	13,62	53,69	46,31	ARENA FINA	
No30	0,590	62,00	9,94	63,62	36,38		
No40	0,420	65,00	10,42	74,04	25,96		
No 50	0,300	55,00	8,81	82,85	17,15		
No60	0,250					LIMOS	
No80	0,180	62,00	9,94	92,79	7,21		
No100	0,149	13,00	2,08	94,87	5,13		
No200	0,074	25,00	4,01	98,88	1,12		
BASE		7,00	1,12	100,00	0,00		
TOTAL		624,00	100,00				



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

PROYECTO Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"

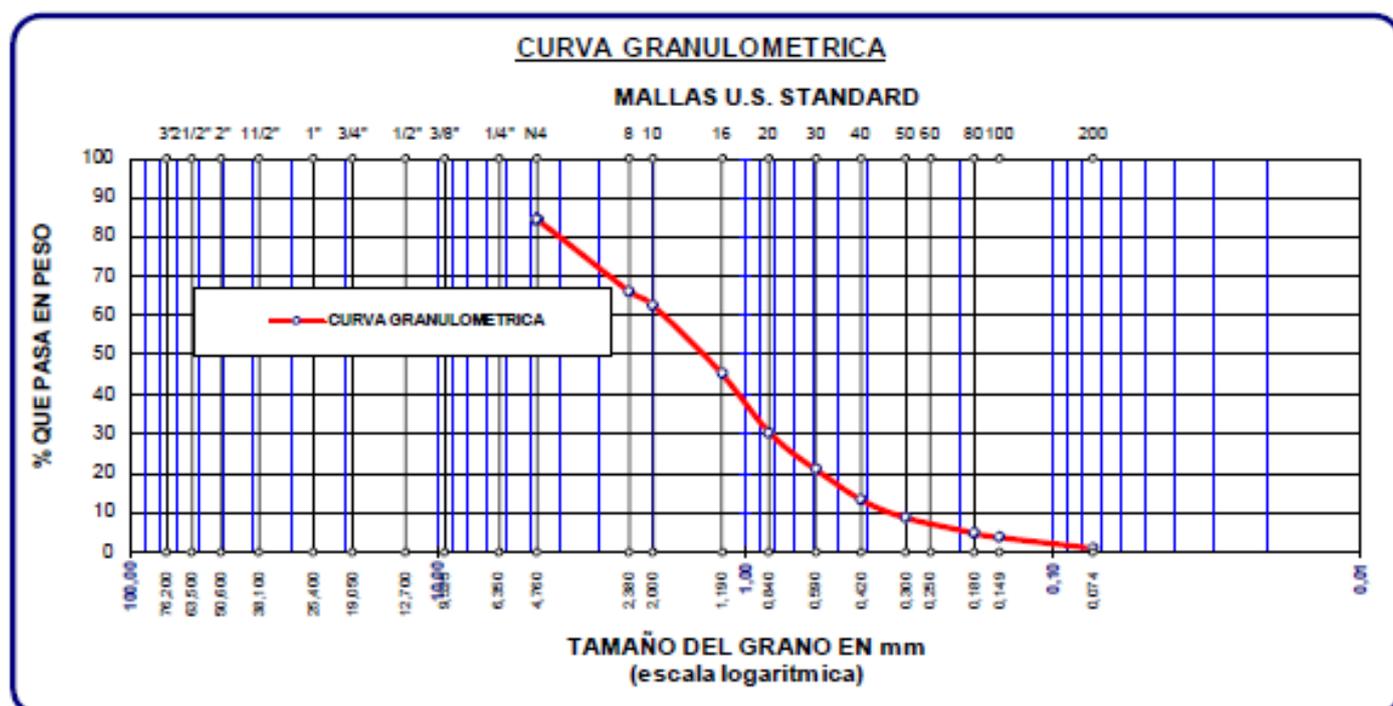
UBICACIÓN Parroquia "Cumbe"

SOLICITANTE Luis Chimbo - Christopher Loja

FECHA 08/11/2023

MUESTRA 5ta

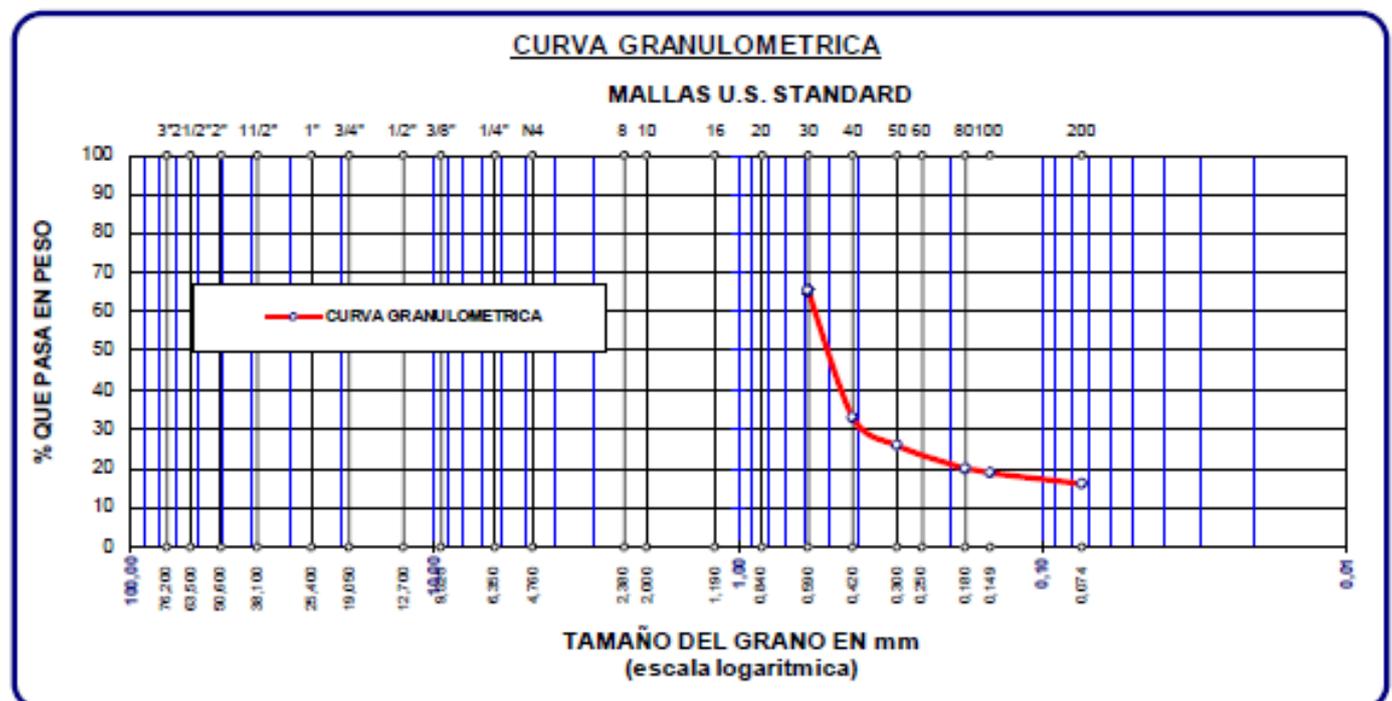
TAMICES ASTM	ABERTURA mm	PESO RETENIDO	%RETENIDO PARCIAL	%RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
3"	76,200					GRAVA GRUESA	CALICATA N° 05 Profundidad = 3.10 mts. Límites de Consistencia : LL = LP = IP = Peso de la Muestra: 878,00 gr. GRAVA 15,49 % ARENA 84,51 % CLASIFICACION SUCS: OBSERVACIONES La muestra corresponde al estrato N° 5 de 2.50 a 3.10 m de profundidad.
2 1/2"	63,500						
2"	50,600						
1 1/2"	38,100						
1"	25,400						
3/4"	19,050						
1/2"	12,700					GRAVA FINA	
3/8"	9,525						
1/4"	6,350						
No4	4,760	136,00	15,49	15,49	84,51		
No8	2,380	160,00	18,22	33,71	66,29		
No10	2,000	32,00	3,64	37,36	62,64		ARENA MEDIA
No16	1,190	153,00	17,43	54,78	45,22		
No20	0,840	130,00	14,81	69,59	30,41	ARENA FINA	
No30	0,590	83,00	9,45	79,04	20,96		
No40	0,420	67,00	7,63	86,67	13,33		
No50	0,300	41,00	4,67	91,34	8,66		
No60	0,250						
No80	0,180	34,00	3,87	95,22	4,78		
No100	0,149	9,00	1,03	96,24	3,76		
No200	0,074	23,00	2,62	98,86	1,14		
BASE		10,00	1,14	100,00	0,00	UMOS	
TOTAL		878,00	100,00				



ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO

PROYECTO SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR*
UBICACIÓN Parroquia "Cumbe"
SOLICITANTE Luis Chimbo - Christopher Loja
FECHA 08/11/2023
MUESTRA 6ta

TAMICES ASTM	ABERTURA mm	PESO RETENIDO	%RETENIDO PARCIAL	%RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
3"	76,200					GRAVA GRUESA	CALICATA N° 06 Profundidad = 3.70 mts. Límites de Consistencia : LL = LP = IP = Peso de la Muestra: 206,70 gr. GRAVA 98 ARENA 98 CLASIFICACION SUCS: OBSERVACIONES La muestra corresponde al estrato N° 6 de 3.10 a 3.70 m de profundidad.
2 1/2"	63,500						
2"	50,800						
1 1/2"	38,100						
1"	25,400						
3/4"	19,050					GRAVA FINA	
1/2"	12,700						
3/8"	9,525					ARENA GRUESA	
1/4"	6,350						
No4	4,760					ARENA MEDIA	
No8	2,380						
No10	2,000					ARENA FINA	
No16	1,190						
No20	0,840					ARENA FINA	
No30	0,590	71,30	34,49	34,49	65,51		
No40	0,420	66,90	32,37	66,86	33,14		
No 50	0,300	15,00	7,26	74,12	25,88		
No60	0,250						
No80	0,180	12,00	5,81	79,92	20,08		
No100	0,149	2,10	1,02	80,94	19,06		
No200	0,074	6,30	3,05	83,99	16,01		
BASE		33,10	16,01	100,00	0,00	LIMOS	
TOTAL		206,70	100,00				



Anexo (G)

Proyecto : Tesis "EVALUACION Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VIA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"
 Projectistas : Luis A. Chimbo A
 Christopher H. Loja L

Realizado por :

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN S.U.C.S

Ubicación :	C - 1	Prof:	0,60 m		
Estrato :	E - 1				
% Que Pasa la Malla Nº 200			3,83		
% Que Pasa la Malla Nº 4			96,60		
Límite Líquido	LL =	D60 =	1,2000	Cu =	8,000
Límite Plástico	LP =	D30 =	0,50	Cc =	1,389
Índice de Plasticidad	IP =	D10 =	0,15	Suelo Bien Graduado	
Tipo de Suelo Según su Granulometría :	Suelo Grueso Arena				
Tipo de Simbología :	Simbología Normal				
Tipo de Suelo :	SW , SP				
Suelo :	SW	Orgánico			
Características del Suelo :	SW	Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo			

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN S.U.C.S

Ubicación :	C - 1	Prof:	1,20 m		
Estrato :	E - 2				
% Que Pasa la Malla Nº 200			0,60		
% Que Pasa la Malla Nº 4			94,64		
Límite Líquido	LL =	D60 =	1,7000	Cu =	5,667
Límite Plástico	LP =	D30 =	0,84	Cc =	1,384
Índice de Plasticidad	IP =	D10 =	0,30	Suelo Bien Graduado	
Tipo de Suelo Según su Granulometría :	Suelo Grueso Arena				
Tipo de Simbología :	Simbología Normal				
Tipo de Suelo :	SW , SP				
Suelo :	SW	Inorgánico			
Características del Suelo :	SW	Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo			

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN S.U.C.S

Ubicación :	C - 1	Prof:	1,75 m		
Estrato :	E - 3				
% Que Pasa la Malla Nº 200			0,87		
% Que Pasa la Malla Nº 4			95,22		
Límite Líquido	LL =	D60 =	1,3000	Cu =	5,200
Límite Plástico	LP =	D30 =	0,60	Cc =	1,108
Índice de Plasticidad	IP =	D10 =	0,25	Suelo Bien Graduado	
Tipo de Suelo Según su Granulometría :	Suelo Grueso Arena				
Tipo de Simbología :	Simbología Normal				
Tipo de Suelo :	SW , SP				
Suelo :	SW	Inorgánico			
Características del Suelo :	SW	Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo			

Proyecto : Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA
 Projectistas : Luis A. Chimbo A
 Christopher H. Loja L

Realizado por :

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN S.U.C.S

Ubicación :	C - 1	Prof:	2,35 m		
Estrato :	E - 4				
% Que Pasa la Malla Nº 200		1,12			
% Que Pasa la Malla Nº 4		95,99			
Límite Líquido	LL =	44,44%	D60 =	1,2000	Cu = 6,000
Límite Plástico	LP =	21,67%	D30 =	0,50	Cc = 1,042
Índice de Plasticidad	IP =	22,78%	D10 =	0,20	Suelo Bien Graduado
Tipo de Suelo Según su Granulometría :	Suelo Grueso Arena				
Tipo de Simbología :	Simbología Normal				
Tipo de Suelo :	SW, SP				
Suelo :	SW Inorgánico				
Características del Suelo :	SW Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las				

CLASIFICACION DE SUELOS SEGUN S.U.C.S

Ubicación :	C - 1	Prof:	3,10 m		
Estrato :	E - 5				
% Que Pasa la Malla Nº 200		1,14			
% Que Pasa la Malla Nº 4		84,51			
Límite Líquido	LL =	33,96 %	D60 =	1,9000	Cu = 5,429
Límite Plástico	LP =	57,5 %	D30 =	0,90	Cc = 1,218
Índice de Plasticidad	IP =	-23,54 %	D10 =	0,35	Suelo Bien Graduado
Tipo de Suelo Según su Granulometría :	Suelo Grueso Arena				
Tipo de Simbología :	Simbología Normal				
Tipo de Suelo :	SW, SP				
Suelo :	SW Inorgánico				
Características del Suelo :	SW Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las				

CLASIFICACION DE SUELOS SEGUN S.U.C.S

Ubicación :	C - 1	Prof:	3,70 m		
Estrato :	E - 6				
% Que Pasa la Malla Nº 200		16,01			
% Que Pasa la Malla Nº 4		100,00			
Límite Líquido	LL =	35,25 %	D60 =	0,4500	Cu = #DIV/0!
Límite Plástico	LP =	40 %	D30 =	0,40	Cc = #DIV/0!
Índice de Plasticidad	IP =	-4,75 %	D10 =	0,00	#DIV/0!
Tipo de Suelo Según su Granulometría :	Suelo Grueso Arena				
Tipo de Simbología :	Simbología Normal				
Tipo de Suelo :	SM, SC				
Suelo :	SM				
Características del Suelo :	SM Son arenas limosas				

Proyecto :	Tesis "EVALUACION Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"
Proyectistas :	Luis A. Chimbo A Christopher H. Loja L

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN A.A.S.H.T.O.

Realizado por :

CLASIFICACIÓN AASHTO

Parámetros Usados	Ubicación :	C - 1	Prof:	0,60 m
% Que Pasa la Malla N° 200	3,83	Estrato :	E - 1	
% Que Pasa la Malla N° 40	25,53	Determinación del Índice de Grupo IG		
% Que Pasa la Malla N° 10	75,32	a =	0,00	IG = 0,00
Límite Líquido LL =	0,00 %	b =	0,00	
Límite Plástico LP =	0,00 %	c =	0,00	
Índice de Plasticidad : IP =	0,00 %	d =	0,00	
Tipo de Suelo :	Material Granular			
Clasificación de Suelos :	A - 2			
Suelo :	A - 2 - 4 (0)			
Tipo de Material :	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas			
Terreno de Fundación :	Excelente a Bueno			

CLASIFICACIÓN AASHTO

Parámetros Usados	Ubicación :	C - 1	Prof:	1,20 m
% Que Pasa la Malla N° 200	0,60	Estrato :	E - 2	
% Que Pasa la Malla N° 40	14,88	Determinación del Índice de Grupo IG		
% Que Pasa la Malla N° 10	68,45	a =	0,00	IG = 0,00
Límite Líquido LL =	0,00 %	b =	0,00	
Límite Plástico LP =	0,00 %	c =	0,00	
Índice de Plasticidad : IP =	0,00 %	d =	0,00	
Tipo de Suelo :	Material Granular			
Clasificación de Suelos :	A - 2			
Suelo :	A - 2 - 4 (0)			
Tipo de Material :	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas			
Terreno de Fundación :	Excelente a Bueno			

CLASIFICACIÓN AASHTO

Parámetros Usados	Ubicación :	C - 1	Prof:	1,75 m
% Que Pasa la Malla N° 200	0,87	Estrato :	E - 3	
% Que Pasa la Malla N° 40	21,30	Determinación del Índice de Grupo IG		
% Que Pasa la Malla N° 10	72,39	a =	0,00	IG = 0,00
Límite Líquido LL =	47,30 %	b =	0,00	
Límite Plástico LP =	116,67 %	c =	7,30	
Índice de Plasticidad : IP =	-69,37 %	d =	0,00	
Tipo de Suelo :	Material Granular			
Clasificación de Suelos :	A - 2			
Suelo :	A - 2 - 5 (0)			
Tipo de Material :	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas			
Terreno de Fundación :	Excelente a Bueno			

Proyecto : Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA
 Projectistas : Luis A. Chimbo A
 Christopher H. Loja L

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN A.A.S.H.T.O.

Realizado por :

CLASIFICACIÓN AASHTO			
Parámetros Usados		Ubicación :	C - 1
		Prof:	2,35 m
% Que Pasa la Malla N° 200	1,12	Estrato :	E - 4
% Que Pasa la Malla N° 40	25,96	Determinación del Índice de Grupo IG	
% Que Pasa la Malla N° 10	77,40	a =	0,00
Límite Líquido LL =	44,44 %	b =	0,00
Límite Plástico LP =	21,67 %	c =	4,44
Índice de Plasticidad : IP =	22,77 %	d =	12,77
Tipo de Suelo : Material Granular			
Clasificación de Suelos : A - 2			
Suelo : A - 2 - 7 (0)			
Tipode Material : Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas			
Terreno de Fundación : Regular			

CLASIFICACIÓN AASHTO			
Parámetros Usados		Ubicación :	C - 1
		Prof:	3,10 m
% Que Pasa la Malla N° 200	1,14	Estrato :	E - 5
% Que Pasa la Malla N° 40	13,33	Determinación del Índice de Grupo IG	
% Que Pasa la Malla N° 10	62,64	a =	0,00
Límite Líquido LL =	33,96 %	b =	0,00
Límite Plástico LP =	57,50 %	c =	0,00
Índice de Plasticidad : IP =	-23,54 %	d =	0,00
Tipo de Suelo : Material Granular			
Clasificación de Suelos : A - 2			
Suelo : A - 2 - 4 (0)			
Tipo de Material : Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas			
Terreno de Fundación : Excelente a Bueno			

CLASIFICACIÓN AASHTO			
Parámetros Usados		Ubicación :	C - 1
		Prof:	3,70 m
% Que Pasa la Malla N° 200	16,01	Estrato :	E - 6
% Que Pasa la Malla N° 40	33,14	Determinación del Índice de Grupo IG	
% Que Pasa la Malla N° 10	100,00	a =	0,00
Límite Líquido LL =	35,25 %	b =	1,01
Límite Plástico LP =	40,00 %	c =	0,00
Índice de Plasticidad : IP =	-4,75 %	d =	0,00
Tipo de Suelo : Material Granular			
Clasificación de Suelos : A - 2			
Suelo : A - 2 - 4 (0)			
Tipode Material : Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas			
Terreno de Fundación : Excelente a Bueno			

Anexo (H)

Proyecto :		Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"																							
Proyectistas :		Luis A. Chimbo A Christopher H. Loja L																							
Ensayo :		CONTENIDO NATURAL DE HUMEDAD :						Norma : ASTM D 2216						PESO ESPECÍFICO :						Norma : INEN 690					
Fecha de Muestreo :		Cumbe / 26 - 10 - 2023																							
Muestreado por :																									
CONTENIDO NATURAL DE HUMEDAD :																									
Observaciones :		Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1								
		Estrato : E1			Estrato : E2			Estrato : E3			Estrato : E4			Estrato : E5			Estrato : E6								
		Prof: 0,60 m			Prof: 1,20 m			Prof: 1,75 m			Prof: 2,35 m			Prof: 3,10 m			Prof: 3,70 m								
Tara Número	Unidades	1			1			1			1			1			1								
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	607,10			1098,15			998,00			1108,90			171,20			676,10								
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	393,10			668,15			617,00			656,90			163,20			424,10								
Peso de la Tara	Gr	154,10			154,15			154,00			153,90			154,20			154,10								
Peso de la Muestra Seca	Gr	239,00			514,00			463,00			503,00			9,00			270,00								
Peso del Agua	Gr	214,00			430,00			381,00			452,00			8,00			252,00								
Contenido de Humedad	%	89,54			83,66			82,29			89,86			88,89			93,33								
Promedio		89,54			83,66			82,29			89,86			88,89			93,33								
PESO ESPECÍFICO :																									
Observaciones :		Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1			Ubicación : C - 1								
		Estrato : E1			Estrato : E2			Estrato : E3			Estrato : E4			Estrato : E5			Estrato : E6								
		Potencia : 0,60 m			Potencia : 1,20 m			Potencia : 1,75 m			Potencia : 2,35 m			Potencia : 3,10 m			Potencia : 3,70 m								
Tara Número	Unidades	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3						
Peso del Suelo Seco	Gr	62,80	62,80	62,80	64,50	64,50	64,50	63,10	63,10	63,10	65,20	65,20	65,20	67,20	67,20	67,20	66,30	66,30	66,30						
Medicion 1	cm	3,20	3,20	3,50	3,20	3,50	3,20	3,30	3,30	3,30	3,40	3,20	3,30	3,30	3,30	3,60	3,50	3,50	3,40						
Medicion 2	cm	3,50	3,30	3,30	3,40	3,50	3,30	3,40	3,20	3,50	3,30	3,40	3,60	3,60	3,40	3,30	3,40	3,50	3,10						
Medicion 3	cm	3,40	3,30	3,20	3,40	3,30	3,40	3,50	3,10	3,20	3,50	3,20	3,20	3,40	3,20	3,50	3,10	3,40	3,10						
Volumen	Cm ³	38,08	34,85	36,96	36,99	40,43	35,90	39,27	32,74	36,96	39,27	34,82	38,02	40,39	35,90	41,58	36,89	41,65	32,67						
Peso Especifico de Sólidos	Gr / Cm ³	1,65	1,80	1,70	1,74	1,60	1,80	1,61	1,93	1,71	1,66	1,87	1,72	1,66	1,87	1,62	1,80	1,59	2,03						
Promedio	Gr / Cm ³	1,72			1,71			1,75			1,75			1,72			1,81								
	Kg/m ³	1716,80			1711,87			1747,21			1749,36			1717,17			1806,07								
	KN/m ³	17,17			17,12			17,47			17,49			17,17			18,06								

Anexo (I)

Proyecto : Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"

Proyectistas : Luis A. Chimbo A
Cristopher H. Loja L

Ensayo : LÍMITES DE CONSISTENCIA

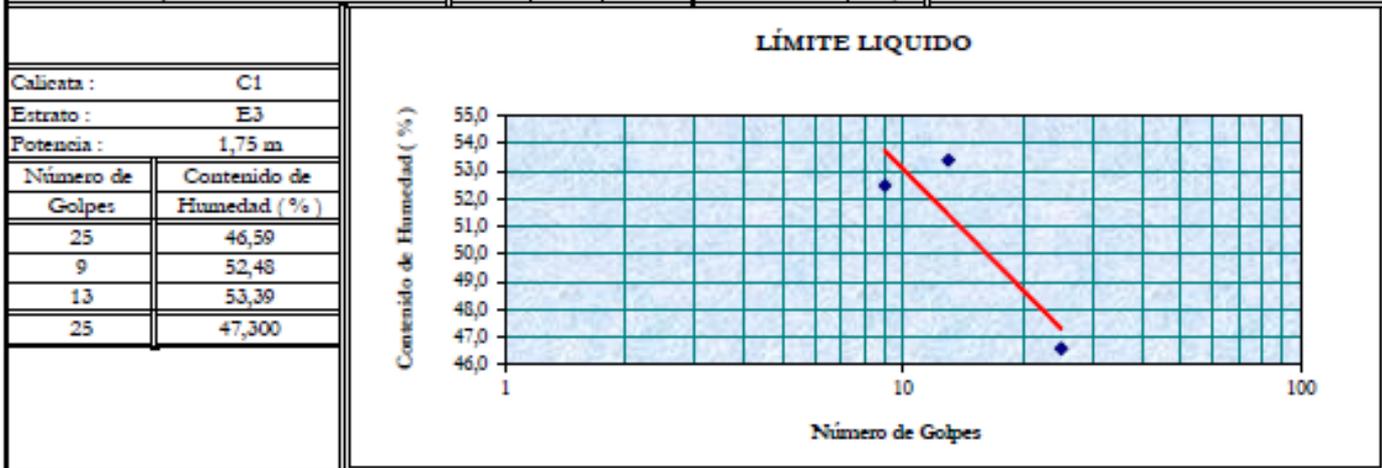
LÍMITE LÍQUIDO Norma : INEN 691

LÍMITE PLÁSTICO Norma : INEN 692

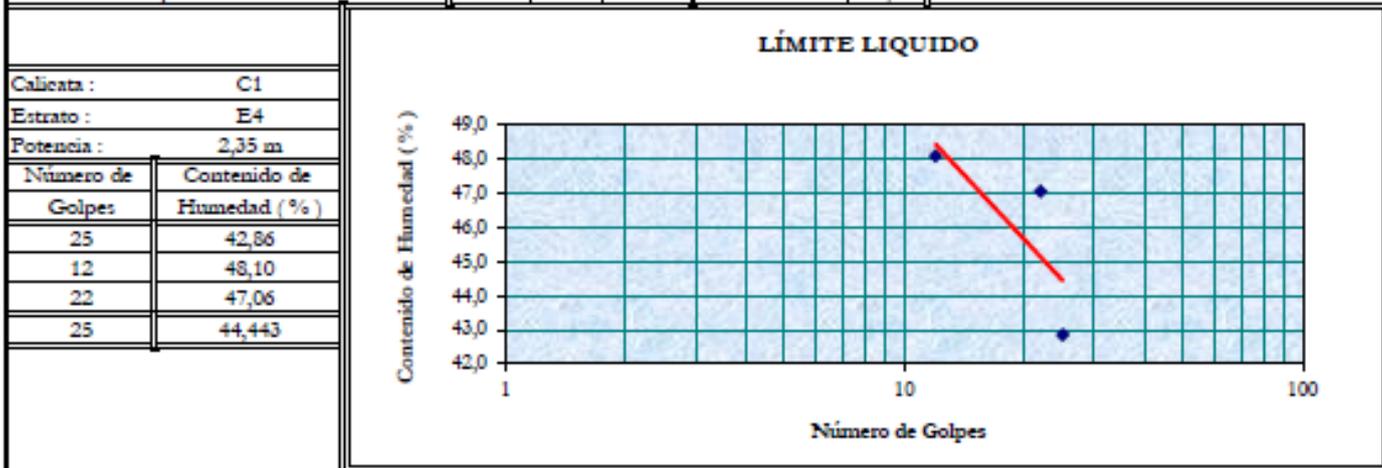
Fecha de Muestreo : Cumbe / 26 - 10 - 2023

Muestreado por :

LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : Calicata C1	Prof : 1,75 m						
		Estrato : E3							
		LÍMITE LIQUIDO			LÍMITE PLASTICO			Límites de Consistencia	
Tara Número	Unidades	1	2	3	1	2	3		
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	30,60	33,00	35,70	18,00	17,70		Límite Líquido: LL =	47,30%
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	26,50	27,70	29,40	17,80	17,60		Límite Plástico: LP =	116,67%
Peso de la Tara	Gr	17,70	17,60	17,60	17,70	17,30		Índice de Plasticidad : IP =	-69,37%
Peso de la Muestra Seca	Gr	8,80	10,10	11,80	0,10	0,30		Contenido de Humedad : W _n =	82,29%
Peso del Agua	Gr	4,10	5,30	6,30	0,20	0,10		Grado de Consistencia : K _w =	0,50
Contenido de Humedad	%	46,59	52,48	53,39	200,00	33,33		Grado de Consistencia : Suave	
Número de Golpes		25	9	13	Promedio :		116,67		



LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : Calicata C1	Prof : 2,35 m						
		Estrato : E4							
		LÍMITE LIQUIDO			LÍMITE PLASTICO			Límites de Consistencia	
Tara Número	Unidades	1	2	3	1	2	3		
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	29,50	29,20	30,20	18,40	18,20		Límite Líquido: LL =	44,44%
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	25,90	25,40	26,20	18,30	18,00		Límite Plástico: LP =	21,67%
Peso de la Tara	Gr	17,50	17,50	17,70	17,30	17,40		Índice de Plasticidad : IP =	22,78%
Peso de la Muestra Seca	Gr	8,40	7,90	8,50	1,00	0,60		Contenido de Humedad : W _n =	89,86%
Peso del Agua	Gr	3,60	3,80	4,00	0,10	0,20		Grado de Consistencia : K _w =	-1,99
Contenido de Humedad	%	42,86	48,10	47,06	10,00	33,33		Grado de Consistencia : Consistencia Líquida	
Número de Golpes		25	12	22	Promedio :		21,67		



Proyecto : Tesis "EVALUACION Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VIA DE

Proyectistas : Luis A. Chimbo A
Cristopher H. Loja L

Ensayo : LÍMITES DE CONSISTENCIA

LÍMITE LÍQUIDO Norma : INEN 691

LÍMITE PLÁSTICO Norma : INEN 692

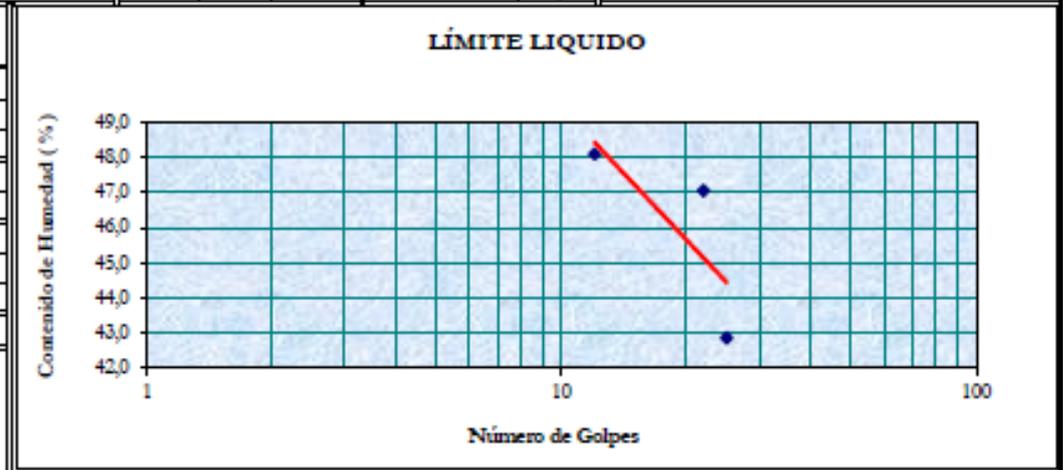
Fecha de Muestreo : Cumbe / 26 - 10 - 2023

Muestreado por :

LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : Calicata C1			Prof : 3,10 m		
		Estrato : E5					
		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO		
Tara Número	Unidades	1	2	3	1	2	3
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	30,80	34,10	33,30	18,40	18,50	
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	27,30	29,90	29,30	18,20	18,20	
Peso de la Tara	Gr	17,40	17,70	17,20	17,70	17,80	
Peso de la Muestra Seca	Gr	9,90	12,20	12,10	0,50	0,40	
Peso del Agua	Gr	3,50	4,20	4,00	0,20	0,30	
Contenido de Humedad	%	35,35	34,43	33,06	40,00	75,00	
Número de Golpes		12	29	26	Promedio :	57,50	

Límites de Consistencia	
Límite Líquido:	LL = 33,96%
Límite Plástico:	LP = 57,50%
Índice de Plasticidad:	IP = -23,54%
Contenido de Humedad:	W _n = 88,89%
Grado de Consistencia:	K _{cv} = 2,33
Grado de Consistencia:	Media Dura , Sólida

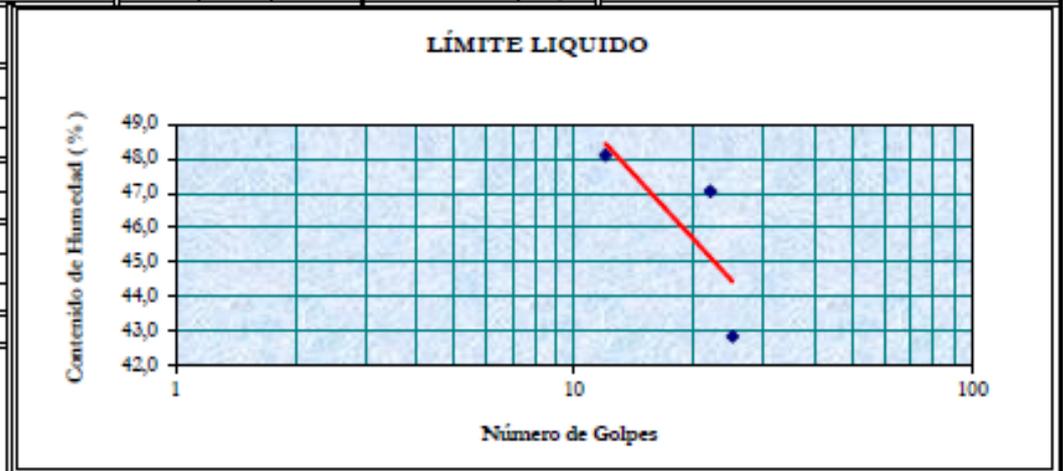
Número de Golpes	Contenido de Humedad (%)
12	35,35
29	34,43
26	33,06
25	33,959



LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : Calicata C1			Potencia : 3,70 m		
		Estrato : E6					
		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO		
Tara Número	Unidades	1	2	3	1	2	3
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	32,40	28,50	26,00	18,20		
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	28,10	24,90	23,20	18,00		
Peso de la Tara	Gr	17,40	17,50	17,50	17,50		
Peso de la Muestra Seca	Gr	10,70	7,40	5,70	0,50		
Peso del Agua	Gr	4,30	3,60	2,80	0,20		
Contenido de Humedad	%	40,19	48,65	49,12	40,00		
Número de Golpes		16	8	7	Promedio :	40,00	

Límites de Consistencia	
Límite Líquido:	LL = 35,25%
Límite Plástico:	LP = 40,00%
Índice de Plasticidad:	IP = -4,75%
Contenido de Humedad:	W _n = 93,33%
Grado de Consistencia:	K _{cv} = 12,22
Grado de Consistencia:	Media Dura , Sólida

Número de Golpes	Contenido de Humedad (%)
16	40,19
8	48,65
7	49,12
25	35,249



Anexo (J)

RESUMEN DE ENSAYO DE LABORATORIO

Proyecto : Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"
Proyectistas : Luis A. Chimbo A
 Christopher H. Loja L

RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Calicata	Estrato	Contenido de		Peso Específico (gr / cm ³)	Límites de Consistencia		Índice de Plasticidad IP (%)	Grado de Consistencia Kw	Granulometría			Clasificación de Suelos				
		Profundidad (m)	Humedad W (%)		Líquido LL (%)	Plástico LP (%)			% Que Pasa			Clasificación AASHTO		Clasificación SUCS		
									Nº 10	Nº 40	Nº 200	Simbología	Suelo		T. Fundación	
C - 1	E1	1,20	89,54	1,72	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	75,32	25,53	3,83	A - 2 - 4 (0,0)	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas	Excelente a Bueno	SW	Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo
	E2	2,70	83,66	1,71	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	68,45	14,88	0,60	A - 2 - 4 (0,0)	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas	Excelente a Bueno	SW	Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo
	E3	2,20	82,29	1,75	47,30	116,67	-69,37	0,50	72,39	21,30	0,87	A - 2 - 5 (0,0)	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas	Excelente a Bueno	SW	Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo
	E4	2,50	89,86	1,75	44,44	21,67	22,78	-1,99	77,40	25,96	1,12	A - 2 - 7 (0,0)	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas	Regular	SW	Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo
	E5	1,30	88,89	1,72	33,96	57,50	-23,54	2,33	62,64	13,33	1,14	A - 2 - 4 (0,0)	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas	Excelente a Bueno	SW	Son arenas bien graduadas, exentas de partículas finas o en proporciones muy reducidas y que no intervienen en las características generales del suelo
	E6	2,50	93,33	1,81	35,25	40,00	-4,75	12,22	100,00	33,14	16,01	A - 2 - 4 (0,0)	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas	Excelente a Bueno	SM	Son arenas limosas

Anexo (K)

Unconsolidated Undrained Test

ASTM D2850

Before Test	Specimen Number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Membrane Thickness (in)	0.001	0.001	0.001	0.001				
Initial Cell Pressure (Kpa)	50.000	100.000	200.000	400.000				
Height (cm)	8.500	9.600	9.600	9.600				
Diameter (cm)	4.800	4.800	4.800	4.800				
Water Content (%)	0.0	0.0	0.0	0.0				
Wet Density (Units)	0.0	0.0	0.0	0.0				
Dry Density (pcf)	0.0	0.0	0.0	0.0				
Degree of Saturation (%)	0.0	0.0	0.0	0.0				
Void Ratio	0.000	0.000	0.000	0.000				
Height To Diameter Ratio	1.771	2.000	2.000	2.000				
Test Data	1	2	3	4	5	6	7	8
Comp. Strength at Failure (psi)	16.4	63.3	45.8	69.9				
σ_1 at Failure (psi)	23.7	77.8	74.8	127.9				
σ_3 at Failure (psi)	7.3	14.5	29.0	58.0				
Rate of Strain (in/min)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000				
Axial Strain at Failure (%)	21.2	20.9	20.8	20.4				
After Test	1	2	3	4	5	6	7	8
Final Water Content (%)	0.0	0.0	0.0	0.0				

Project:	
Project Number:	
Sampling Date:	
Sample Number:	
Sample Depth:	
Location:	
Location:	
Client Name:	
Project Remarks:	

Unconsolidated Undrained Test

ASTM D2850

Specimen 1	
Test Description: CUMBE 50	
Other Associated Tests:	
Device Details:	
Test Specification:	
Test Time: 1/11/2023	
Technician:	Sampling Method:
Specimen Code:	Specimen Lab #:
Specimen Description:	
Specific Gravity: 2.720	Liquid Limit: 0
Plastic Limit: 0	
Height (cm): 8.500	Diameter (cm): 4.800
Area (in ²): 2.805	Volume (in ³): 9.39
Large Particle:	
Moisture Material:	
Moist Weight (g): 0.0	
Test Remarks:	

Specimen 2	
Test Description: CUMBE 100	
Other Associated Tests:	
Device Details:	
Test Specification:	
Test Time: 1/11/2023	
Technician:	Sampling Method:
Specimen Code:	Specimen Lab #:
Specimen Description:	
Specific Gravity: 2.720	Liquid Limit: 0
Plastic Limit: 0	
Height (cm): 9.600	Diameter (cm): 4.800
Area (in ²): 2.805	Volume (in ³): 10.60
Large Particle:	
Moisture Material:	
Moist Weight (g): 0.0	
Test Remarks:	

Unconsolidated Undrained Test

ASTM D2850

Specimen 3

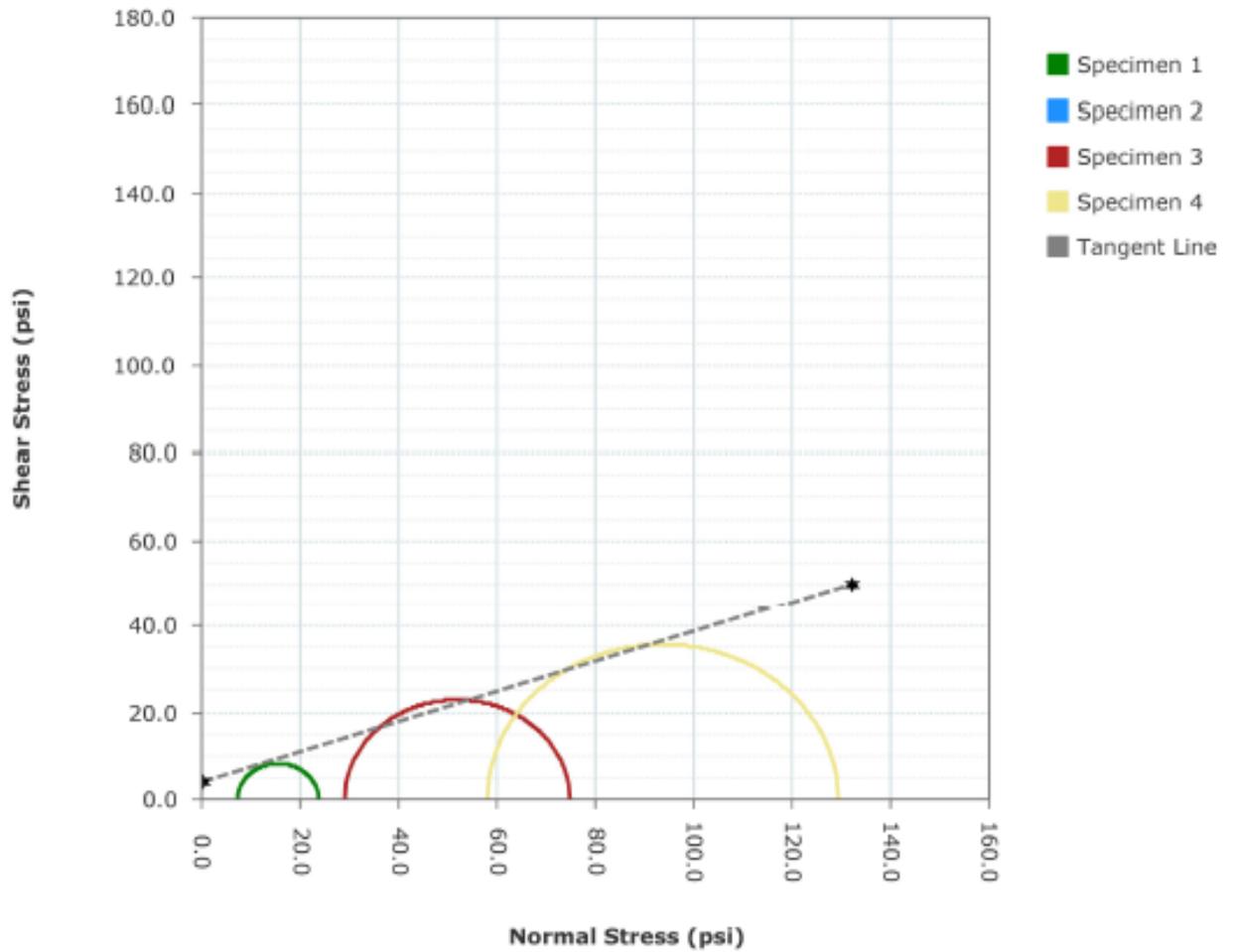
Test Description: CUMBE 200	
Other Associated Tests:	
Device Details:	
Test Specification:	
Test Time: 1/11/2023	
Technician:	Sampling Method:
Specimen Code:	Specimen Lab #:
Specimen Description:	
Specific Gravity: 2.720	Liquid Limit: 0
Plastic Limit: 0	
Height (cm): 9.600	Diameter (cm): 4.800
Area (in ²): 2.805	Volume (in ³): 10.60
Large Particle:	
Moisture Material:	
Moist Weight (g): 0.0	
Test Remarks:	

Specimen 4

Test Description:	
Other Associated Tests:	
Device Details:	
Test Specification:	
Test Time: 1/11/2023	
Technician:	Sampling Method:
Specimen Code:	Specimen Lab #:
Specimen Description:	
Specific Gravity: 2.720	Liquid Limit: 0
Plastic Limit: 0	
Height (cm): 9.600	Diameter (cm): 4.800
Area (in ²): 2.805	Volume (in ³): 10.60
Large Particle:	
Moisture Material:	
Moist Weight (g): 0.0	
Test Remarks:	

Mohr Circles (Total Stress) Graph

ASTM D2850



Tangent Results	
Strength Intercept (psi)	4.1
Friction Angle (°)	19.2

Anexo (L)

PROYECTISTAS LUIS A. CHIMBO A. - CRISTOPHER H. LOJA L.	
PROYECTO Tesis "EVALUACIÓN Y MAPEO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS PARA UNA VÍA DE SEGUNDO ORDEN EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR"	
UBICACIÓN SUBCUENCA YUTUJAPINA / PARROQUIA CUMBE / PROVINCIA DEL AZUAY	HOJA 1 de 1 0.00 to 3.7 m.
EQUIPO MAQUINA HIDRAULICA DE PERFORACION DE SUELOS	NIVEL DEL AGUA - 0.10 m.
MÉTODO PERFORACIÓN / EXTRACCIÓN DE TESTIGOS	NORTE 9652618.3 ESTE 717266.3

REGISTRO DE SONDEOS

PROF (m)	Profundidad de muestreo (m)	TIPO DE MUESTREO	REC (cm/cm)	CHN (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	NUMERO DE GOLPES	N - GOLPES					SUCS	DESCRIPCIÓN	SUELO SIMBOLO	OBSERVACIONES		
									0	5	10	15	20						
0.00	0.00 - 0.60	T P	6090	89.54	-	-	-	(2) (4) (5)	9						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Nada Plásticas, Marrón Oscuro, Mojado		Bajo contenido de partículas finas de cuarzo	
1.20	60.00 - 1.20	T P	6090	83.66	-	-	-	(4) (7) (7)	14						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Nada Plásticas, Marrón Claro, Mojado		Bajo contenido de partículas finas de cuarzo	
1.80	1.30 - 1.75	T P	4590	82.29	47.3	116.7	-69.37	(8) (7) (7)	14						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Nada Plásticas, Gris Claro, Mojado		Bajo contenido de partículas finas de cuarzo	
2.40	1.75 - 2.35	T P	6090	89.86	44.44	21.67	22.78	(2) (8) (5)	11						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Nada Plásticas, Gris Claro, Mojado		Alto contenido de partículas finas de cuarzo	
3.00	2.50 - 3.10	T S	6090	88.9	33.96	57.5	-23.54	(2) (3) (3)	6						SW	Arenas bien graduadas con arcillas, Nada Plásticas, Gris Claro, Mojado		Alto contenido de partículas finas de cuarzo	
4.20	3.10 - 3.70	T P	6090	93.33	36.26	40	-4.5	(3) (3) (3)	6						SM	Arenas Limosas, Nada Plásticas, Gris Oscuro, Mojado		Bajo contenido de partículas finas de cuarzo	
4.80																	Arenas Limosas, Nada Plásticas, Gris Oscuro, Mojado		Este estrato se observo mediante el perfil estratigráfico expuesto de un talud
6.00																			
9.00																			Este estrato se observo mediante el perfil estratigráfico expuesto de un talud

DESCRIPCIÓN

Tipo de Muestra	Tipo de Suelo	CONSISTENCIA				HUMEDAD	
		SUELOS COHESIVOS		SUELOS COHESION		CONTENIDO DE HUMEDAD	
		N-GOLPES	Consistencia	N-GOLPES	Consistencia	Rangos	Valores
	- Arena - Roca	0 - 2	- Muy blando	0 - 4	- Muy suelto	0 - 10	- Seco
	- Arcilla	2 - 4	- Blando	4 - 10	- Suelto	10 - 30	- Húmedo
	- Limoso	4 - 8	- Semirígido	10 - 30	- Densidad media	30 - 70	- Muy húmedo
		8 - 15	- Rígido	30 - 50	- Densa	70 - 100	- Mojado
		15 - 30	- Muy rígido	> 50	- Densidad Alta	> 100	- Saturado
		> 30	- Duro				

MÉTODO	REC = Recuperación en centímetros	IP = Índice de Plasticidad	Verificado por:
	CHN = Contenido de humedad natural		
	LL = Límite de líquido		Certificado por:
	LP = Límite de Plástico		Fecha de emisión:
	N = Número de golpes		

Descripción de los estratos según la clasificación ASTM

