

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO GEO MECÁNICO
DE TALUDES E IDENTIFICACIÓN DE SOLUCIONES DE
ESTABILIDAD, EN LA VÍA SAN MATEO – SANTA
MARIANITA, DEL CANTÓN MANTA.”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN GEOTECNIA

Presentado por:

XAVIER ANDRÉS MACÍAS MOREIRA

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año –2023

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado principalmente a Dios, quien me ha abierto los caminos, las oportunidades y me ha permitido cumplir mis metas en su tiempo perfecto. Una dedicación especial a mi esposa y a mi familia, quienes con constante apoyo y cariño me han inspirado para seguir adelante en mis sueños y retos.

Así también, se dedica este trabajo a todos los compañeros gustosos y practicantes de la ingeniería geotécnica para que sigan formándose y aprendiendo porque la ciencia nos permite abrir expandir el horizonte hacia un mundo entero por conocer.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todos los colegas, docentes y empresas que me han dado oportunidades para laborar y permitido desarrollar en el área de la geotecnia de forma profesional. Así también un agradecimiento especial a quienes apoyaron el desarrollo de este proyecto: mi tutor-docente PhD. Jaime Bojorque Iñiguez, la empresa MACMOR CONSULTORA Y ASOCIADOS S.A., la empresa CONSULJOC S.A., la empresa CONGEOTEC S.A. y al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manta, quienes han brindado facilidades para la toma de ensayos en el presente trabajo de titulación.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Xavier Andrés Macías Moreira

EVALUADOR

Jaime Bojorque Iñiguez

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito establecer propuestas viables técnica y económicamente para la estabilidad del talud colapsado ubicado en km 1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita del cantón Manta, provincia de Manabí. Para la generación de estas propuestas se realizan diversos ensayos y procedimientos de campo, laboratorio y gabinete que permiten la caracterización geométrica y litológica del talud mencionado. La adecuada interpretación de resultados permite establecer criterios geotécnicos para realizar un análisis inverso del talud existente, mediante métodos computacionales que apliquen la teoría de Equilibrio Límite con el método de Morgenstern-Price, y así identificar sus causantes del colapso. De la misma manera, con las propiedades geomecánicas determinadas en el talud se proceden a plantear tres propuestas de estabilización, las cuales deberán superar los requerimientos del factor de seguridad mínimo establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Finalmente, se establecen justificaciones técnicas y económicas que recomiendan, como la solución más viable para la estabilización del talud, la ejecución de actividades de corte con movimiento de tierras, denominado terraceo; donde se prevé cambiar la disposición geométrica existente del extendido talud con pendiente actual de 1.2H:1.3V hacia un nuevo talud que soporte demandas sísmicas de 0.177g con inclinación frontal de 1.2H:1.0V y con tres bermas intermedias de 5 m de ancho, distribuidas a distintos niveles desde el pie del talud.

Palabras Clave: Fotogrametría, Estabilidad de Talud, Análisis Inverso, Teoría de Equilibrio Límite, Factor de Seguridad, Geomorfología.

ABSTRACT

The main purpose of this project is to establish technically and economically sustainable proposals for the stability of the collapsed slope located at km 1.9 of the San Mateo-Santa Marianita Road in the city of Manta, Manabí province. To generate these proposals there are various tests and procedures (field, laboratory, and office) that were carried out to characterize the slope with geometric and lithological properties. The adequate interpretation of results establishes geotechnical criteria to carry out an inverse analysis of the existing slope, through computational methods that apply the Limit Equilibrium theory with the Morgenstern-Price method, and therefore identify the causes of the collapse. In the same way, three stabilization proposals are projected with the geo mechanical properties determined in the slope, which must exceed the requirements of the minimum safety factor established in the Ecuadorian Construction Standard under static and pseudo static conditions. Finally, there are technical and economic justifications to recommend, as the most viable solution for the stabilization of the slope, the execution of terracing, as an activity of cutting earthworks. The determined viable solution consists into change the existing geometric arrangement of the extended slope of H:1.2-V:1.3 towards a new slope that supports seismic demands of 0.177g. The planned solution depends on a frontal inclination of H:1.2-V:1.0 and with 3 intermediate berms of 5m wide, distributed at different levels from the foot of the slope.

Keywords: *Photogrammetry, Stability of Slope, Back Analysis, Limit Equilibrium Theory, Safety Factor, Geomorphology.*

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Descripción del Problema.....	2
1.3. Justificación del Problema.....	3
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
1.5. Información relacionada al área de estudio.....	6
1.5.1. Generalidades.....	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Geología Regional.....	7
2.2. Geomorfología.....	11
2.3. Sismicidad	11
2.4. Tipos de movimientos de masa de tierra.....	13
2.5. Factores Desencadenantes de Inestabilidad en Taludes	17
2.6. Exploración Geotécnica en Taludes.....	18
2.6.1. Reconocimiento Preliminar del Área de Estudio.....	19
2.6.2. Muestreo de suelo y roca.....	19
2.6.3. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)	19
2.6.4. Ensayos en Laboratorio	20
• Límites de Atterberg	20
• Granulometría.....	21
• Proctor modificado.....	22
• Humedad Natural	23
• Clasificación SUCS	23
2.6.5. Ensayo de Refracción Sísmica.....	24

2.6.5.1. Parámetros Dinámicos Generales	25
2.7. Resistencia del Suelo – Criterio de Mohr Coulomb	26
2.8. Fotogrametría	27
2.9. Métodos de Estabilización de Taludes	28
2.10. Principios de Estabilidades en Taludes.....	30
2.11. Procedimientos de Análisis para Estabilidades en Taludes	32
3. METODOLOGÍA	34
3.1. Descripción General	34
3.2. Recopilación de Información	36
3.2.1. Reconocimiento de la Zona de Estudio	36
3.2.2. Identificación y Muestreo de Materiales en Campo	37
3.2.3. Ensayos SPT	39
3.2.3.1. Análisis de Muestras en Laboratorio de Suelos	41
3.2.3.2. Ensayos Realizados en Laboratorio	42
3.2.3.3. Procesamiento de Ensayos y Clasificación SUCS.....	42
3.2.4. Ensayos Geofísicos y Correlaciones Geotécnicas.....	43
3.2.5. Fotogrametría	45
3.2.6. Perfiles del Suelo con Características Geométricas y Geomecánicas	47
3.2.7. Análisis Inverso del Talud Colapsado	48
4. MODELACIÓN Y RESULTADOS	50
4.1. Modelo de Elevación Digital	50
4.2. Ensayos de Campo y Laboratorio	52
4.2.1. Resultados de Ensayo SPT	52
4.2.2. Clasificación de Muestras de Suelo tomadas en Campo.....	54
4.2.3. Ensayos Geofísicos	54
4.2.4. Correlaciones para Parámetros Geotécnicos	55

4.3. Parámetros Geotécnicos en Diseño	56
4.4. Resultado del Análisis Inverso del Colapso Existente en el Talud	58
4.4.1. Análisis Inverso del Talud Existente Bajo Condiciones Estáticas	58
4.4.2. Análisis Inverso del Talud Existente Bajo Condiciones Pseudoestáticas	59
4.4.3. Resultados de Análisis Inverso Comparado Con Requerimientos de la NEC15 60	
4.5. Propuestas Constructivas para Mejora de Talud.....	61
4.6. Resultados de Propuestas para Estabilizar el Talud	70
4.6.1. Propuesta 1 de Mejora Geotécnica.....	70
4.6.2. Propuesta 2 de Mejora Geotécnica con Análisis de Estabilidad	71
4.6.3. Propuesta 3 de Mejora Geotécnica con Análisis de Estabilidad	72
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
5.3. CONCLUSIONES.....	74
5.4. RECOMENDACIONES	76
6. BIBLIOGRAFÍA.....	78
7. ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Falla del talud colapsado en la vía San Mateo-Santa Marianita.....	3
Figura 2. Talud colapsado en km 1.9 de la vía San Mateo-Santa Marianita, del cantón Manta.....	4
Figura 3. Talud en km 1.6 en la vía San Mateo - Santa Marianita, del cantón Manta.	4
Figura 4. Ubicación de Zona de Estudio en Parroquia Urbana San Mateo, del Cantón Manta (Fuente: Elaboración Propia).....	6
Figura 5. Modelo de Elevación Digital (DEM) de la estructura morfológica de la Península de Manta (Pedoja, y otros, 2006).	8
Figura 6. Esquema General Litológico de la Región donde está la Zona de Estudio (Reyes & Michaud, 2012).....	8
Figura 7. Mapa Geológico de la Zona de Estudio (Fuente: tomado y modificado IEE. MAGAP-SIGTIERRAS).....	10
Figura 8. Mapa Geomorfológico de la Zona de Estudio (Fuente: tomado y modificado IEE. MAGAP-SIGTIERRAS).	11
Figura 9. Mapa de zonas sísmicas de Ecuador y su factor de zona Z (NEC-SE-DS, 2015).	12
Figura 10. Esquema de movimiento traslacional (USGS, 2004)	14
Figura 11. Esquema de Movimiento Rotacional (USGS, 2004).....	14
Figura 12. Esquema de Movimiento con Extensión Lateral (USGS, 2004).....	15
Figura 13. Mecanismos de volcamientos en rocas y suelos (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004)	15
Figura 14. Formación de los flujos de lodo (Suarez, 2009).....	16
Figura 15. Mecanismos de Desprendimientos de Rocas (Suarez, 2009).....	16
Figura 16. Esquema del plano de falla con respecto al plano principal mayor en el Circulo de Mohr (Das, 2015).....	27
Figura 17. Taludes autoportantes con ángulo continuo y con bermas (Ramirez & Alejano, 2004)	29
Figura 18. Esquema de Muro de Contención con Altura "H" en Talud (Ramirez & Alejano, 2004)	29

Figura 19. Reforzamiento de Taludes con Anclajes en Vigas de Atado (Ramirez & Alejano, 2004).....	30
Figura 20. Reforzamiento de Taludes con Gunita (Ramirez & Alejano, 2004). 30	
Figura 21. Taludes generados desde el km 0+900 hasta el km 1+900 de la vía San Mateo - Santa Marianita.....	36
Figura 22. Talud en Abscisa 1+900 de la vía San Mateo - Santa Marianita.....	37
Figura 23. Materiales expuestos en el Talud Colapsado del km 1.9 del proyecto.	37
Figura 24. Materiales que componen el talud del km1.9: (a) granos finos en la parte superior del talud, (b) detritos color amarillento en laterales del pie de talud, (c) detritos color gris verdoso en centro del pie de talud.	38
Figura 25. Masa compacta de detritos desplazados del talud colapsado.	38
Figura 26. Detritos color gris verdoso, caídos de la base del talud colapsado. (a) masa de suelo compacta. (b) masa de suelo disgregada.	38
Figura 27. Diaclasas ubicadas en la parte baja del talud, en detritos de color gris.	39
Figura 28. Toma de muestras del suelo expuesto para análisis en laboratorio.39	
Figura 29. Ubicaciones de los ensayos SPT realizados en el talud crítico del km1.9 del proyecto	40
Figura 30. Ensayo SPT No. 1 en parte superior de talud	40
Figura 31. Ensayo SPT No. 2 en escarpe de talud	41
Figura 32. Ensayo SPT No. 3 en pie de talud	41
Figura 33. Ensayos normalizados realizados a las muestras de suelo en laboratorio: (a) Contenido de humedad, (b) granulometría, (c) límites de Atterberg, (d) proctor modificado.....	42
Figura 34. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (Das, 2015). 43	
Figura 35. Carta de Plasticidad para el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (Das, 2015).....	43
Figura 36. Ubicaciones de las configuraciones de las líneas de refracción sísmica.	44
Figura 37. Configuración de líneas de refracción sísmica en el proyecto de estudio con su respectiva nivelación.	44
Figura 38. Equipo utilizado para fotografías aéreas, Phantom 4 Pro V2.0 (Fuente: DJI Official Website, https://www.dji.com/phantom-4-pro-v2).....	46

Figura 39. Fotografía Aérea del inicio del talud colapsado en km1.9 de la vía San Mateo - Santa Marianita.	46
Figura 40. Procesamiento de Fotogrametría en Software Agisoft para Modelo de Elevación Digital (DEM) y Ortofoto del talud del km1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita en estudio.....	47
Figura 41. Curvas de nivel exportadas del talud colapsado en software AUTOCAD, a partir de procesamiento fotogramétrico.	47
Figura 42. Curvas de nivel del talud crítico, exportado a plataforma AUTOCAD a través de su Modelo de Elevación Digital. (a) Vista lateral derecha del talud. (b) Vista lateral izquierda.	50
Figura 43. Vista en tres dimensiones del talud crítico, generado por el Modelo de Elevación Digital.....	51
Figura 44. Identificación de estratos en talud del km1.9 de la vía San Mateo - Santa Marianita	51
Figura 45. Perfil del talud en 2D en AutoCAD, reconstruido con información recopilada.....	52
Figura 46. Perfil de Velocidades P y S a partir de Refracción Sísmica, configuración Línea No.1	54
Figura 47. Perfil de Velocidades P y S a partir de Refracción Sísmica, configuración Línea No.2	55
Figura 48. Perfil geométrico del talud km1.9 de la vía San Mateo - Santa Marianita, generado en software GEOSTUDIO.....	58
Figura 49. Estabilidad de talud existente colapsado en condiciones estáticas	59
Figura 50. Estabilidad de talud existente en condiciones pseudoestáticas	60
Figura 51. Análisis estático de propuesta 1.....	62
Figura 52. Análisis pseudoestático de propuesta 1.....	63
Figura 53. Análisis estático de propuesta 2.....	64
Figura 54. Análisis pseudoestático de propuesta 2.....	64
Figura 55. Análisis estático de propuesta 3.....	65
Figura 56. Primer análisis pseudoestático de propuesta 3 con sismo de 0.354g.	66
Figura 57. Planteamiento geométrico del talud con sus distribuciones litológicas en software GeoStudio.....	68

Figura 58. Segundo análisis pseudoestático de propuesta 3 con sismo de 0.177g.
..... 70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del Factor Z en función de la zona sísmica del Ecuador (NEC-SE-DS, 2015)	12
Tabla 2. Registros digitalizados de los datos de campo del ensayo SPT	53
Tabla 3. Valores de Laboratorio para las muestras de ensayo SPT en talud del km 1.9	53
Tabla 4. Valores de Laboratorio para dos muestreos realizados en talud del km 1.9	54
Tabla 5. Clasificación SUCS para dos muestreos realizados en talud del km 1.9.	54
Tabla 6. Valores de Velocidad de Onda de Corte y Compresión para la Línea de Refracción Sísmica No.1 (Pie de talud), con sus respectivas correlaciones geotécnicas.	56
Tabla 7. Valores de Velocidad de Onda de Corte y Compresión para la Línea de Refracción Sísmica No.2 (Corona de Talud), con sus respectivas correlaciones geotécnicas.	56
Tabla 8. Materiales identificados en talud y sus respectivas propiedades geomecánicas	57
Tabla 9. Coeficientes de Perfil de Suelo y Factor Z según (NEC-SE-DS, 2015)	59
Tabla 10. Factores de Seguridad para Análisis Inverso del talud existente.	61
Tabla 11. Áreas de intervención para estabilizar el talud, correspondientes a cada propuesta constructiva.	66
Tabla 12. Tabla de Cantidades y Precios para cada propuesta de mejora de talud	67
Tabla 13. Factores de seguridad de la Propuesta No.1 y verificación con mínimo establecido en la NEC15.....	71
Tabla 14. Factores de seguridad de la Propuesta No.2 y verificación con mínimo establecido en la NEC15.....	72
Tabla 15. Factores de seguridad de la Propuesta No.3 y verificación con mínimo establecido en la NEC15, con demanda sísmica de 0.354g	72

Tabla 16. Factor de seguridad de Propuesta No.3 bajo condiciones pseudoestáticas, ante demanda sísmica de 0.177g..... 73

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Con la modernización de las ciudades se mantiene una relación directa de su desarrollo sostenible con el progreso de sus habitantes y sus actividades antropológicas (Almandoz, 2018) siendo la vialidad un eje principal de comunicación estratégica entre diversas poblaciones, que permite generar y/o dinamizar el crecimiento de sus localidades, así como de sus actividades turísticas, comerciales, entre otras. La correcta planificación, diseño, construcción y rehabilitación de las vías de comunicación y transporte generan condiciones de óptimo servicio para el tránsito de los usuarios cuando su infraestructura y obras complementarias se encuentran en buen estado. Sin embargo, en la provincia de Manabí es característico encontrar suelos de origen arcilloso, limoso, arenoso o combinaciones de estos, que ante factores desencadenantes generan complicaciones en la calidad de las obras e inestabilidad geomecánica en diversas estructuras civiles, viales y/o portuarias.

En la actualidad, el cantón Manta de la provincia de Manabí, ante la necesidad de generar una nueva vía de servicio que otorgue facilidades a la zona de mayor crecimiento poblacional e inmobiliario, ha generado la construcción de un eje vial sur, tramo que comprende desde la parroquia urbana San Mateo hasta la parroquia rural Santa Marianita. Inicialmente, esta vía pretendía ser una solución de comunicación terrestre ante la demanda de usuarios y sus actividades comerciales y turísticas del sector, sin embargo, su construcción se ha paralizado hace algunos años por motivos administrativos del gobierno cantonal. Ante la ausencia de planificación y estudios técnicos adecuados para el proyecto “vía San Mateo – Santa Marianita del cantón Manta” se evidencia la existencia de tramos que alcanzaron a ser construidos hace pocos años y en la actualidad mantienen serias afectaciones, tal como el kilómetro 1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita, en donde existe una falla de talud con gran masa en deslizamiento.

A partir de lo expuesto anteriormente, se pretende realizar ensayos geotécnicos de campo y laboratorio, cuyo procesamiento y resultados permitan en el presente trabajo generar propuestas técnicas-económicas para la remediación del colapso en el talud más crítico de la vía San Mateo-Santa Marianita. Así también, brindar criterios técnicos que en condiciones geométricas y/o geofísicas similares de la mencionada vía permitan su aplicación como recomendaciones geotécnicas. Estas podrían mitigar otras fallas en taludes y contrarrestar el peligro inminente que representan estos movimientos de masas para los habitantes y turistas del sector del cantón Manta.

1.2. Descripción del Problema

La ausencia de estudios técnicos adecuados o la carencia de criterios geotécnicos en las obras de cortes en suelos o rocas podrían ser causantes de grandes inestabilidades de taludes con consecuencias severas, tales como caída de masas de tierras en vías, casas o hasta personas. Por tal razón que surge de forma imperante la necesidad de determinar los factores detonantes de la inestabilidad de taludes y sus posibles soluciones en cada zona (Zhou, 2006).

En la zona costera de la provincia de Manabí generalmente prevalecen formaciones geológicas de edad reciente, tal como: Fm, Canoa, Fm, Cayo, Fm. Tosagua, Fm. San Mateo, Fm. Tablazo, consolidaciones sedimentarias cuaternarias, entre otras (MEM, 2021). Las características geomecánicas heterogéneas de las mencionadas formaciones tienden a generar niveles altos de incertidumbre en las construcciones. Las posibles problemáticas de estos suelos frente a distintos agentes naturales como el aire o agua suelen estar relacionados con erosión, expansión y contracción de sus partículas, tal como es el caso de la estructura de pavimento de la vía estatal E383 tramo km 5.0 – km 17.5. Sin embargo, estos suelos o rocas ante factores detonantes más severos como sismos, tormentas o fuertes temporadas invernales podrían tender a colapsos de mayor magnitud.

El proyecto de la vía San Mateo – Santa Marianita presenta fallas geotécnicas, entre ellas se considera como el caso más crítico el evidente colapso de un talud construido hace algunos años atrás, ubicado en el km 1.9 de la mencionada vía (Figura 1).



Figura 1. Falla del talud colapsado en la vía San Mateo-Santa Marianita.

1.3. Justificación del Problema

La correcta aplicación de un estudio geotécnico permite disminuir considerablemente el nivel de incertidumbre de las propiedades geomecánicas de los suelos o rocas existentes en el área de influencia de un proyecto; con esto se diese apertura a una adecuada aplicación de técnicas y metodologías que garanticen la sostenibilidad del proyecto a diseñar y/o construir.

En el presente trabajo se realiza un análisis que determine los detonantes del colapso del talud más crítico de la vía San Mateo – Santa Marianita, ubicado en km 1.9 (Figura 2), así también, se realizan las propuestas geotécnicas para su estabilización y otorgar criterios geotécnicos para posibles obras con características similares (Figura 3) en el trazado del proyecto de la vía mencionada en el cantón Manta.



Figura 2. Talud colapsado en km 1.9 de la vía San Mateo-Santa Marianita, del cantón Manta.



Figura 3. Talud en km 1.6 en la vía San Mateo - Santa Marianita, del cantón Manta.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Analizar soluciones técnicas y económicamente viables para la estabilidad en talud crítico de la vía San Mateo-Santa Marianita, de la zona sur de Manta, mediante la evaluación del comportamiento geomecánico de los materiales característicos, frente a condiciones invernales, excitaciones sísmicas y/o cortes verticales muy extendidos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Generar modelos de elevación digital del talud más crítico en la vía San Mateo-Santa Marianita, mediante métodos fotogramétricos para la identificación de propiedades geométricas de la infraestructura existente.
- Evaluar las propiedades geomecánicas y geofísicas de los materiales presentes en el talud más crítico de la vía San Mateo-Santa Marianita, a través de distintos ensayos geotécnicos que permitan conocer características del subsuelo, información indispensable para propuestas técnicas de estabilización de talud.
- Diseñar soluciones geotécnicas para la estabilidad de talud más crítico en la vía San Mateo-Santa Marianita, a partir de las caracterizaciones geométricas y geotécnicas de los perfiles de suelo determinados en este estudio.
- Analizar la solución técnico-económica óptima para la estabilización de talud más crítico en la vía San Mateo-Santa Marianita, a través de distintas propuestas de mejora geotécnica.

1.5. Información relacionada al área de estudio

1.5.1. Generalidades

El lugar de análisis para el presente estudio se encuentra ubicado en la zona sur del cantón Manta, provincia de Manabí. En este lugar se evidencian cortes de talud que han generado inestabilidad dentro del trazado vial a partir del km 1.6, sin embargo, se considera como el punto más crítico el talud existente en el km 1.9 debido a su colapso y deslizamiento de una gran masa de suelo. El talud colapsado sobre el km 1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita del cantón Manta mantiene las siguientes coordenadas geográficas UTM – Datum WGS 84 – Zona 17 Sur “9893453 N; 520893 E” (ver Figura 4).



Figura 4. Ubicación de Zona de Estudio en Parroquia Urbana San Mateo, del Cantón Manta (Fuente: Elaboración Propia)

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen las investigaciones previas que permiten un análisis de la disposición geológica y geomorfológica en la zona de estudio, así también se exponen las consideraciones de sismicidad aplicables al área de influencia del proyecto, criterios que se deben emplear en el diseño sísmico según las regulaciones y normativas vigentes en el país. De la misma manera, se presentan conceptos que sirven de base para las fases de exploración y procesamiento geotécnico, tales como los tipos de movimientos de masas de tierra, los factores desencadenantes para una falla en talud, ensayos de campo y laboratorio aplicables, la obtención de parámetros geotécnicos del suelo, métodos de estabilización de un talud y principios de cálculo para el análisis de estabilidad en taludes.

El principal propósito de este marco teórico es brindar conceptos y bases teóricas que sustenten la metodología aplicada en el presente trabajo, lo que permitirá comprender las técnicas y enfoques empleados para generar una investigación geotécnica en el talud colapsado del km 1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita y así dar propuestas sólidas de mejora para su estabilización.

2.1. Geología Regional

La zona de estudio está ubicada sobre la estructura de la Península de Manta, la misma que en análisis morfológicos es reconocida como una de las tres terrazas marinas más relevantes del Ecuador (Pedoja, y otros, 2006). La Península de Manta es una estructura masiva que pertenece a la estructura Manta-Bahía de Caráquez y dispone de una extensión costanera de aproximadamente 30 km frente al océano pacífico. En la Figura 5 se presenta un modelo de elevación digital del cantón Manta y sus zonas colindantes, realizado por (Pedoja, y otros, 2006), donde se evidencian sus principales estructuras morfológicas.

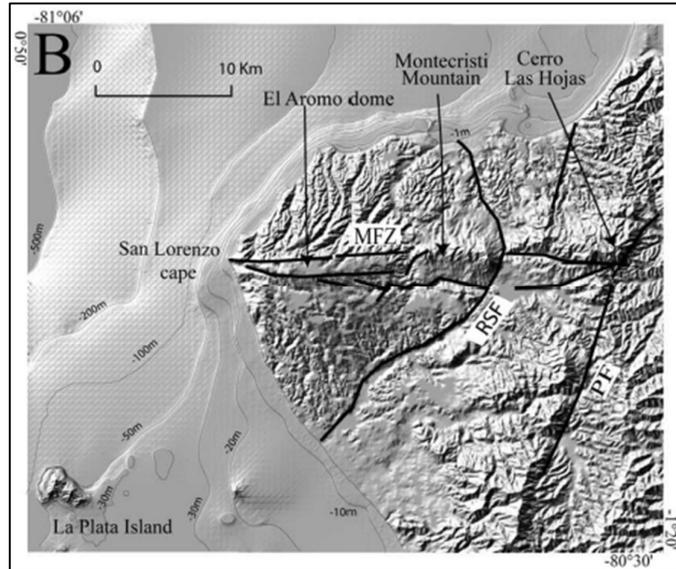


Figura 5. Modelo de Elevación Digital (DEM) de la estructura morfológica de la Península de Manta (Pedoja, y otros, 2006).

Dentro de la Península de Manta y sus áreas colindantes se encuentran rasgos estructurales que corresponden a las formaciones San Mateo, Cayo, Tablazo, Canoa y Miembro Dos Bocas, cuyas composiciones de partículas son distintas y sus orígenes corresponden a periodos geológico comprendido desde Cretácico hasta Pleistoceno (Figura 6).

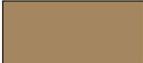
Pleistoceno		Fm. Tablazo	- Terrazas marinas y fluviales de lumaquelas y areniscas calcáreas.
Plioceno		Fm. Canoa	- Areniscas masivas y conglomerados compactos. Hay detriticos de limos arenosos de color amarillo.
Mioceno		Fm. Miembro Dos Bocas	- Lutitas y lodolitas de color chocolate con vetas de yeso y concreciones calcáreas y hasta bancos de moluscos
Eoceno		Fm. San Mateo	- Turbiditas de color blanco amarillento y gris verdoso. Capas de conglomerados de areniscas, limolitas y lutitas.
Cretácico		Fm. Cayo	- Rocas sedimentarias y componentes basálticos. Areniscas de grano fino y grueso que pueden tener color verdoso.

Figura 6. Esquema General Litológico de la Región donde está la Zona de Estudio (Reyes & Michaud, 2012)

La composición litológica de las formaciones corresponde:

- **Formación Cayo:** son reconocidas como “flysch” (alternancias entre rocas duras y muy blandas) de rocas sedimentarias con partes de andesitas, así también, se evidencian areniscas de grano fino y grueso de coloración verdosa. La parte alta de esta formación es reconocida por sus

componentes basálticos. Su formación se genera en el Basamento Cretácico (Reyes & Michaud, 2012).

- **Formación San Mateo:** sus afloramientos corresponden al periodo Eoceno medio-superior, y se evidencian en los flancos orientales y occidentales de la cordillera Chongón-Colonche de la región de Manabí. La caracterización física del suelo hace referencia a turbiditas de color blanco amarillento y gris verdoso con pequeños depósitos en capas alternadas de limolitas, lutitas y areniscas (Nuñez & Dugas, 1986).
- **Formación Miembro Dos Bocas:** la caracterización del suelo en la Fm. Tosagua, Miembro Dos Bocas suele ser fuertemente fracturado y entre las lutitas habría vetas de yeso secundario, donde se podría encontrar concreciones calcáreas y hasta bancos de moluscos. El depósito del Mb. Dos Bocas se encuentra sobre la formación San Mateo y correspondería al periodo del Mioceno Inferior; su presencia principalmente está sobre la cuenca geológica de Manabí y discordantemente sobre la cuenca geológica Progreso (Nuñez & Dugas, 1986).
- **Formación Canoa:** formación del Plioceno, cuya afloración se denota en la costa de Manabí desde la población de Canoa hasta Montecristi; también son evidenciados en el río Manta de forma detrítica con areniscas color amarillo y conglomerados. Su descripción física generalmente corresponde a limos arenosos compactos (Bristow & Hoffstetter, 1977).
- **Formación Tablazo:** denominado con este nombre debido a las aparentes terrazas marinas generadas a lo largo de la zona costera del Ecuador. Su caracterización corresponde a estratificaciones de depósitos marinos o fluviales recientes, ya sean lumaquelas o areniscas calcáreas (Nuñez & Dugas, 1986). El origen temporal de sus depósitos yace en el Pleistoceno Superior, periodo Cuaternario.

La ubicación del talud colapsado para en el presente trabajo se ubica en la vía San Mateo – Santa Marianita del cantón Manta, donde en los principales afloramientos destaca la presencia de la formación San Mateo (ver Figura 7).

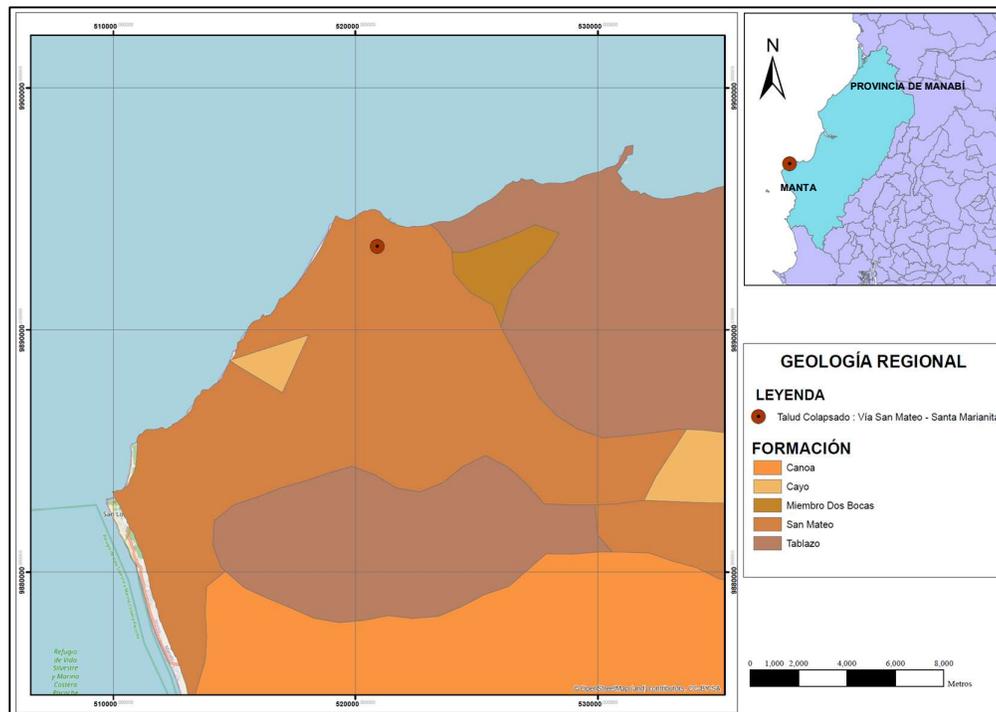


Figura 7. Mapa Geológico de la Zona de Estudio (Fuente: tomado y modificado IEE. MAGAP-SIGTIERRAS)

2.2. Geomorfología

Mediante la aplicación de reconocimientos geomorfológicos se determina la evolución de las zonas de estudio a lo largo del tiempo; conociendo las distintas formas de la superficie terrestre y su actual geometría a través de análisis que determinan la interacción de los depósitos de suelos y rocas con agentes externos, causando erosión, deslaves, depósitos, entre otros.

El talud de análisis del km 1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita está ubicado geomorfológicamente en una superficie de mesa marina, muy cercana a las propias vertientes de la mesa marina (MAGAP-SIGTIERRAS, 2015) (ver Figura 8).

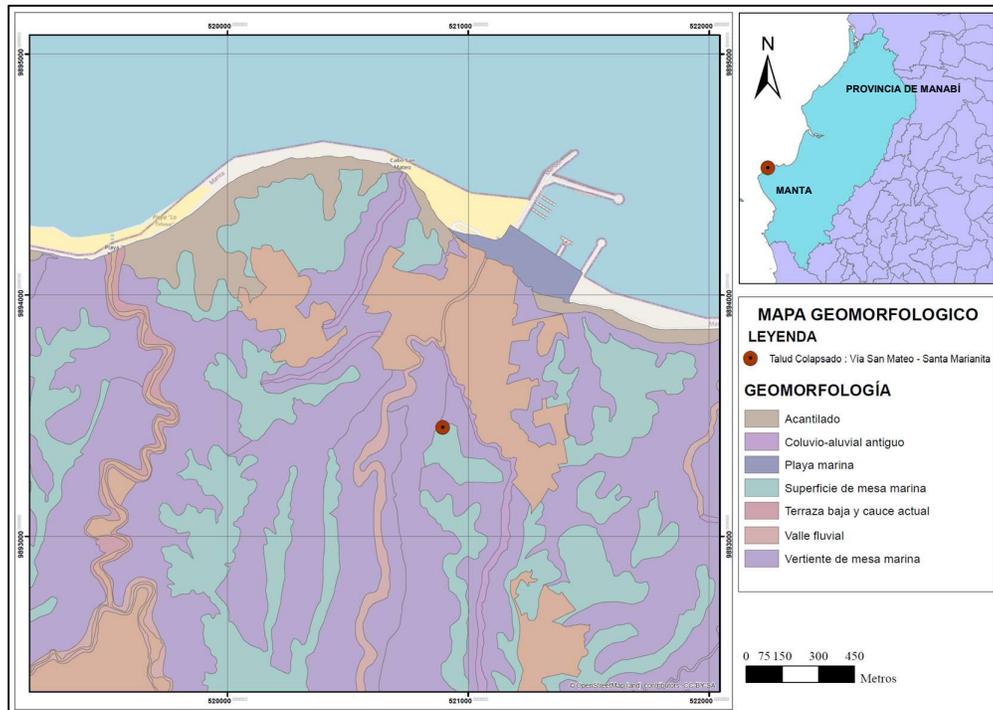


Figura 8. Mapa Geomorfológico de la Zona de Estudio (Fuente: tomado y modificado IEE. MAGAP-SIGTIERRAS).

2.3. Sismicidad

Ecuador es un país que se encuentra en una región altamente sísmica (Parra, 2016), por lo que todo diseño sísmo resistente de cualquier tipo de estructuras debe recurrir a regulaciones establecidas en la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC-SE-DS. Esta normativa establece criterios de diseño sísmicos a partir de registros históricos de los terremotos en el país. La NEC-SE-DS considera estudios de peligro sísmico con un diez por ciento (10%) de

excedencia en 50 años, es decir, un periodo de retorno crítico de sismos en 475 años (NEC-SE-DS, 2015).

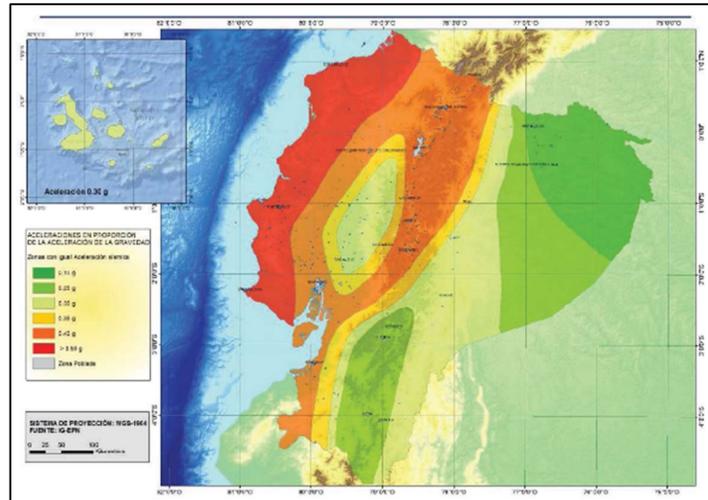


Figura 9. Mapa de zonas sísmicas de Ecuador y su factor de zona Z (NEC-SE-DS, 2015).

En atención al mapa de la zonificación sísmica del Ecuador (ver Figura 9), se evidencia que el área de estudio en el sector del proyecto “TALUD KM 1.9 DE LA VÍA SAN MATEO – SANTA MARIANITA” se encuentra ubicada en una **zona tipo VI** de intensidad sísmica **Muy Alta**. De acuerdo con la misma Norma Ecuatoriana De La Construcción el factor Z que representa la máxima aceleración en roca esperada para el sismo de diseño, expresada en fracción de la aceleración de la gravedad, se identifica por seis zonas sísmica en Ecuador (NEC-SE-DS, 2015).

A continuación, se presentan los datos del valor Z sugeridos por la NEC, determinados para diferentes poblaciones en el área de influencia del proyecto.

Tabla 1. Valores del Factor Z en función de la zona sísmica del Ecuador (NEC-SE-DS, 2015)

Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Según Tabla 1 presentada por NEC-15 NEC-SE-DS, el valor para el proyecto se encuentra con **un factor Z de 0.50**.

2.4. Tipos de movimientos de masa de tierra

Los movimientos de masa de tierra o rocas se refieren a los desplazamientos naturales de materiales sólidos en la superficie terrestre debido a la influencia de fuerzas gravitatorias, geológicas y climáticas (Ramirez & Alejano, 2004). Estos movimientos pueden ocurrir en distintas escalas, desde pequeñas avalanchas de rocas hasta grandes deslizamientos de tierra. Estos fenómenos geológicos representan una amenaza significativa para las áreas habitadas y la infraestructura, así como para la seguridad de las personas. Estos eventos pueden causar daños a la infraestructura, bloquear carreteras, destruir viviendas y provocar la pérdida de vidas humanas. Además, los movimientos de masa pueden tener efectos a largo plazo en el paisaje y el medio ambiente (Suarez, 2009).

La comprensión de los distintos tipos de movimientos de masa es fundamental para el desarrollo de estrategias de mitigación y prevención. La identificación de áreas propensas a movimientos de masa, el monitoreo continuo y la implementación de medidas de prevención o mitigación (Suarez, 2009).

Los movimientos de masa se pueden clasificar en varios tipos, dependiendo de las características de los materiales y las condiciones ambientales. A continuación, se describen algunos de los movimientos de masa más comunes como los deslizamientos de tierra (traslacional, rotacional y de extensión lateral), volcamientos de rocas o suelos, flujos de lodos, desprendimientos de rocas, hundimientos del terreno y avalanchas (USGS, 2004).

- **Deslizamientos de Tierra:** estos movimientos implican el desplazamiento de una masa de tierra o rocas a lo largo de una superficie de falla, ya sea de forma traslacional o rotacional. Los deslizamientos de tierra pueden ser rápidos o lentos, y pueden ocurrir en laderas empinadas o suaves. Las lluvias intensas, la saturación del suelo, la actividad sísmica y la erosión pueden desencadenar deslizamientos de tierra.
 - **Deslizamiento Traslacional:** es conocido como un deslizamiento puro y sin rotación, un fenómeno mecánico que ocurre en el

movimiento entre dos superficies sólidas sin que una gire sobre la otra. Es común encontrar situaciones con fricción y sin movimiento angular. Las fuerzas que intervienen son la normal (perpendicular a la superficie de contacto) y la fuerza de fricción (paralela a la superficie de contacto, sentido contrario al movimiento relativo) (Suarez, 2009). Para una referencia ilustrativa del movimiento traslacional ver Figura 10.

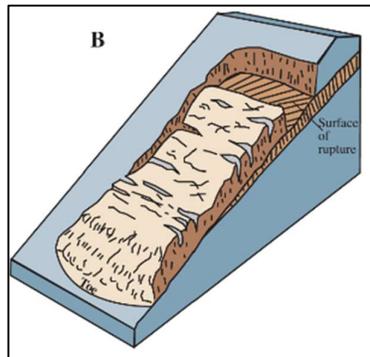


Figura 10. Esquema de movimiento traslacional (USGS, 2004)

- **Deslizamiento Rotacional:** es identificado con un desplazamiento de tierras sobre un plano de falla inferior configurado de forma curva cóncava hacia arriba (Figura 11). El movimiento mecánico que ejerce la superficie superior que está en deslizamiento sobre la superficie de falla podría implicar rodadura, además del fuerza normal y fricción que intervienen en el movimiento traslacional (Suarez, 2009).

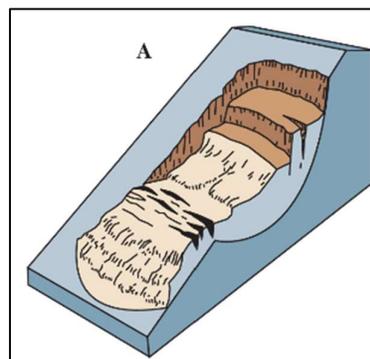


Figura 11. Esquema de Movimiento Rotacional (USGS, 2004)

- **Deslizamiento con Extensión Lateral:** son distintos porque se originan generalmente en superficies planas o baja pendiente. El desplazamiento de masas mantiene de forma predominante un

movimiento lateral, acompañado también de fuerzas de tensión y cortantes (ver Figura 12). Entre sus causantes principales de falla se les responsabilizan a los sismos, saturación de los suelos, pérdidas de partículas cohesivas del suelo, factores que generalmente conllevan a un posible efecto de licuefacción (Novotny, 2013).

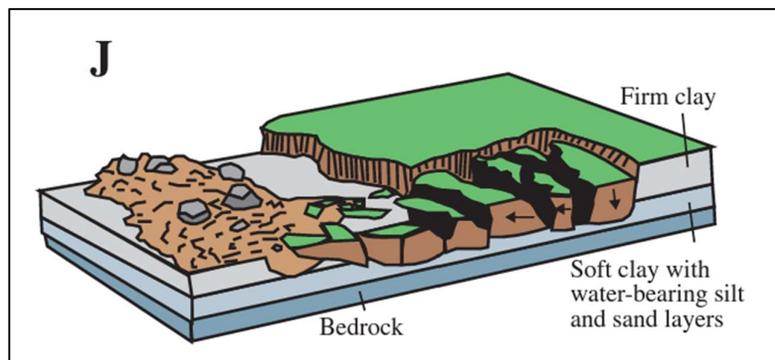


Figura 12. Esquema de Movimiento con Extensión Lateral (USGS, 2004)

- **Volcamiento de Rocas o Suelos:** este movimiento es generado por una rotación hacia adelante de un bloque rocoso o de una masa de suelo cohesivo seco, cuyo giro se origina bajo el centro de gravedad del macizo (Figura 13). Su magnitud de movimiento de masa puede ser determinado por el buzamiento y estratigrafía del suelo o rocas, su altura, el tamaño del macizo y la naturaleza de acción u origen del movimiento (Suarez, 2009).

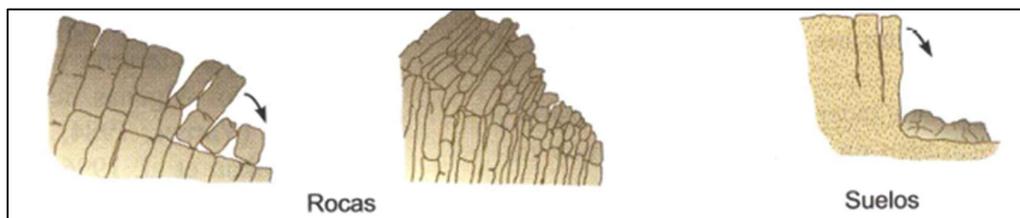


Figura 13. Mecanismos de volcamientos en rocas y suelos (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004)

- **Flujos de Lodo:** los flujos de lodo, también conocidos como lahares, son corrientes generalmente de barro altamente fluido, en donde su actividad puede estar relacionada con lluvias, deshielos de nevados, sismos, deslizamientos en zonas de alta pendiente, entre otros (Suarez, 2009). Su caracterización física se puede entender una masa altamente viscosa en donde los suelos son mezclados con líquidos y son arrastrados a altas velocidades (ver Figura 14). Estos flujos también pueden ocurrir en áreas

volcánicas, cuando la ceniza volcánica y los depósitos de piroclastos se mezclan con agua.

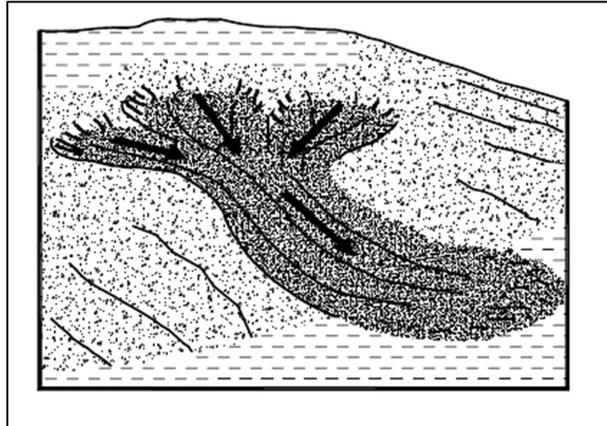


Figura 14. Formación de los flujos de lodo (Suarez, 2009)

- **Desprendimientos de Rocas:** los desprendimientos de rocas son eventos en los que una masa de rocas se despega de una pendiente rocosa y cae al terreno inferior (ver Figura 15). Estos desprendimientos pueden ser causados por la erosión, la actividad sísmica o la meteorización de las rocas.

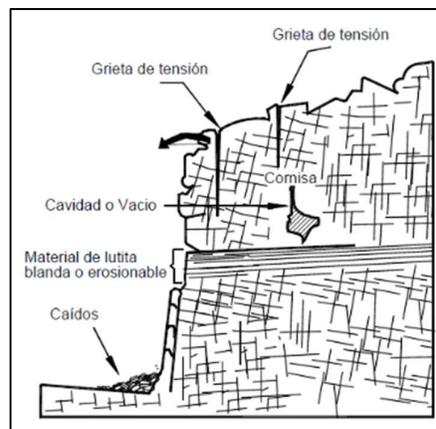


Figura 15. Mecanismos de Desprendimientos de Rocas (Suarez, 2009)

- **Hundimientos del Terreno:** los hundimientos del terreno son movimientos verticales del suelo que pueden ocurrir debido a la extracción de recursos naturales, como la minería o la extracción de agua subterránea. Estos movimientos pueden causar deformaciones en la superficie y daños a la infraestructura.

- **Avalanchas:** las avalanchas de rocas o suelos son movimientos rápidos de grandes masas que se desprenden de las laderas de las montañas. Estos eventos llegar a tener grandes velocidades que se podrían evidenciar como “flujos de masas de roca, suelo u otros residuos” (Suarez, 2009) y pueden ser provocados por terremotos, la erosión del hielo o la presión de la gravedad.

2.5. Factores Desencadenantes de Inestabilidad en Taludes

La inestabilidad de taludes se refiere a la tendencia de las pendientes o laderas a colapsar o deslizarse, lo que puede causar daños y riesgos significativos para las estructuras y las personas. Para que esto suceda existen varios factores desencadenantes que pueden contribuir a la inestabilidad de los taludes. Los factores desencadenantes de la inestabilidad de taludes se pueden establecer a partir de condicionantes del estado original del terreno, con alteraciones naturales o antropológicas. Dentro de las condicionantes naturales que suelen afectar la estabilidad de un talud se encuentran propiedades características como geología, litología, geometría lugar, las mismas que al encontrar factores detonantes como abundante agua, excitaciones sísmicas, intervenciones antropológicas, son causantes de los movimientos de masa en un talud (Carcedo & Posse, 2006). A continuación, se describen algunos factores más comunes que actúan como desencadenantes en una inestabilidad de talud:

1. **Geología y litología:** Las características geológicas y litológicas de un talud son factores clave en la inestabilidad. La presencia de materiales geotécnicamente débiles, como arcillas expansivas, suelos limo-arcillosos o estratos de rocas descompuestas, aumenta el riesgo de deslizamiento. Además, las estructuras geológicas, como las fallas o las juntas de estratificación, pueden debilitar los taludes y provocar inestabilidad (Bell, 2007).
2. **Hidrología y condiciones de agua:** Los cambios en los niveles de agua, como las lluvias intensas, la saturación del suelo o la presencia de agua subterránea, pueden desempeñar un papel importante en la inestabilidad

de los taludes. El exceso de agua puede aumentar la presión intersticial, disminuir la cohesión del suelo y reducir la resistencia al corte, lo que facilita los deslizamientos (Chow et al., 1998).

3. Geometría del talud: La geometría y la inclinación del talud pueden influir en su estabilidad. Los taludes con pendientes pronunciadas o inadecuadas, en relación con las características del suelo, tienen más probabilidades de experimentar deslizamientos. Además, la altura del talud, la presencia de terrazas o la existencia de cortes en el pie del talud pueden afectar su estabilidad (Carcedo & Posse, 2006).
4. Cargas adicionales: Las cargas adicionales aplicadas en la parte superior del talud pueden desencadenar inestabilidad. Esto puede incluir cargas estáticas, como la construcción de edificios o infraestructuras en la cima del talud, o cargas dinámicas, como el tráfico de vehículos o el impacto de terremotos (Brady & Brown, 2005).
5. Actividad humana: La actividad humana, como la excavación de tierras, la alteración de la vegetación, la construcción de carreteras o el desarrollo urbano, puede alterar la estabilidad natural de los taludes. La remoción de la vegetación, en particular, puede aumentar el riesgo de deslizamientos debido a la pérdida de cohesión del suelo y la disminución de la capacidad de retención de agua (Turner & Schuter, 1996).

2.6. Exploración Geotécnica en Taludes

La exploración geotécnica desempeña un papel fundamental en la evaluación y comprensión de la estabilidad de taludes, proporciona información crucial sobre las características del suelo y la roca, la geometría del talud y los posibles factores desencadenantes potenciales. A través de diversos ensayos se pueden obtener datos geotécnicos que permiten caracterizar el suelo y la roca, determinar las propiedades geomecánicas relevantes y evaluar la estabilidad del talud (Suarez, 2009). A continuación, se exponen algunos de los procedimientos más comunes en la actualidad que permiten un adecuado análisis de estabilidad de taludes:

2.6.1. Reconocimiento Preliminar del Área de Estudio

El reconocimiento preliminar del sitio donde se realizará la exploración geotécnica permite una identificación y comprensión de las condiciones del área de estudio, con lo que se prevé generar mejor toma de decisiones durante las etapas de diseño y construcción de los proyectos de ingeniería (Das, 2015). Con la información recopilada de forma preliminar se evidencian riesgos potenciales y permite determinar las investigaciones geotécnicas que se deban realizar a más detalle para optimizar los recursos económicos del estudio.

2.6.2. Muestreo de suelo y roca

El proceso de ensayos geotécnicos comienza con el muestreo del suelo y la roca en el talud, donde se recolectan muestras representativas mediante técnicas de perforación, excavación manual, excavación mecánica o uso de sondas. El muestreo adecuado es esencial para obtener una muestra representativa del material del talud y garantizar la precisión de los ensayos (NEC-SE-GC, 2015).

2.6.3. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

El ensayo de penetración estándar (SPT) es un método ampliamente utilizado para determinar las características geotécnicas de los suelos. Este ensayo se encuentra normalizado según la ASTM-D 1586. Consiste en la inserción de un cilindro hueco llamado barrenos estándar en el suelo mediante una serie de golpes aplicados por un martillo. Durante el ensayo se registra la resistencia a la penetración mediante el conteo de golpes a determinadas alturas del barrenos, así también, se extraen muestras disturbadas y se mide la profundidad a la que se alcanza cada golpe (ASTM-D 1586, 2011).

El SPT se realiza en un sondeo previamente excavado en el suelo, y la barrenos estándar se introduce hasta una profundidad de 450 mm después de cada golpe. La resistencia a la penetración se registra en unidades de golpes por 300 mm de penetración y se conoce como número de golpes

estándar (N) en perfiles de suelos similares. Este valor se utiliza para evaluar la densidad relativa y la cohesión aparente del suelo (Carcedo & Posse, 2006).

El ensayo SPT proporciona información valiosa sobre las propiedades geomecánicas del suelo que permite determinar valores de resistencia, compacidad, cohesión y hasta ángulo de fricción interna. Estos parámetros son importantes para el diseño de cimentaciones, la evaluación de la estabilidad de taludes y la predicción del comportamiento del suelo en relación con la carga y el drenaje (Das, 2015).

2.6.4. Ensayos en Laboratorio

En la geotecnia, los ensayos de laboratorio desempeñan un rol fundamental para la caracterización de las muestras de suelo tomadas en campo y así determinar sus propiedades geomecánicas. Estos ensayos permiten conocer a mayor detalle valores de resistencia, permeabilidad, tamaños de partículas, densidad máxima, contenido de humedad, entre otros. A continuación, se exponen los ensayos normalizados más comunes en la identificación de los suelos extraídos en los sitios de estudio:

- **Límites de Atterberg**

En el siglo 19, el científico Albert Atterberg establece ensayos en donde el suelo se distribuye en cuatro estados de consistencia según su contenido de humedad; procedimiento que más adelante se le denominaría **los límites de Atterberg**. Estos ensayos se utilizan para conocer el grado de plasticidad y liquidez de los suelos. Estos límites son ampliamente utilizados en geotecnia para clasificar los suelos y evaluar su comportamiento frente a la humedad. A continuación, se describe cada uno de los límites de Atterberg (Das, 2015):

- **Límite de Contracción (LC)**

Definido como el estado del suelo que mantiene una pérdida de humedad hasta establecer la transición de sólido a semisólido. Este dato es poco requerido en la investigación geotécnica, sin embargo, está regulado por la ASTM-D 4943 (Das, 2015).

- **Límite Plástico (LP)**

Cuando el suelo alcanza el límite plástico se identifica como el porcentaje de humedad donde existe una clara transición de un estado semisólido a uno plástico. Mediante el ensayo de la caja de flujo de Atterberg se realiza un enrollamiento del suelo hasta llegar una lámina fina cilíndrica de diámetro de 3 mm a través de simples rodados sobre una placa de vidrio, hasta que la muestra se rompa (ASTM-D 4318, 2017).

- **Límite Líquido (LL)**

El límite líquido es conocido porque el suelo establece una notoria transición de un estado plástico a uno semilíquido. En este proceso el contenido de humedad de la masa de suelo aumenta. Se procedimiento es realizado mediante el cono de Casagrande. Su ensayo requiere medir el número de golpes necesarios para cerrar una ranura en una muestra de suelo humedecida. El límite líquido se define como el contenido de humedad correspondiente a 25 golpes en el cono (ASTM-D 4318, 2017).

- **Índice de Plasticidad (IP)**

El índice de plasticidad de la masa de suelo es definido como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Este índice permite identificar de forma porcentual el grado de saturación del suelo que puede soportar hasta llegar a un estado semilíquido. Su valoración es de gran importancia para los estudios geotécnicos, ya que define la capacidad de absorción de humedad del suelo antes de llegar a deformarse con solicitaciones de cargas. Un valor alto de índice de plasticidad indica un suelo con mayor plasticidad y capacidad de deformación bajo cargas (ASTM-D 4318, 2017).

- **Granulometría**

La granulometría de los suelos es una característica fundamental que describe la distribución de los tamaños de las partículas presentes en una muestra de suelo. Es un parámetro importante en la geotecnia, ya que influye en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, como la permeabilidad, la compacidad y la capacidad de carga. La determinación de la granulometría se realiza mediante el análisis granulométrico, que consiste en separar y pesar las diferentes fracciones de partículas presentes en la muestra (Das, 2015).

El análisis granulométrico se realiza utilizando una serie de tamices de malla de diferentes tamaños, normados por American Society of Testing Materials (ASTM). La muestra de suelo se pasa a través de los tamices y se pesan las fracciones retenidas en cada uno de ellos. Los resultados se presentan en forma de un gráfico llamado curva granulométrica, que muestra el porcentaje acumulado de partículas en función del tamaño de las aberturas de los tamices. Su procedimiento para muestras de suelo está regulado por la norma ASTM D-422. La interpretación de la curva granulométrica proporciona información valiosa sobre la distribución de tamaños de partículas en el suelo (Das, 2015).

- **Proctor modificado**

El Proctor modificado es un ensayo de laboratorio que pretende determinar el máximo grado de compactación de un suelo mediante sus propiedades de densidad máxima alcanzada con su respectivo porcentaje óptimo de humedad. Este procedimiento está normalizado mediante la ASTM D1557. La importancia del ensayo de Proctor modificado recae en la capacidad de proveer datos relevantes de las propiedades de compactación de un suelo, lo que permite diseñar y evaluar con calidad la estabilidad y grado de compactación de los terraplenes o rellenos con distintas condiciones de carga y humedad (Das, 2015).

El procedimiento del ensayo de Proctor modificado implica compactar una muestra de suelo en un molde cilíndrico en capas sucesivas, aplicando un número específico de golpes y utilizando una energía de compactación controlada; estas instrucciones son dependientes del tipo de equipo a utilizar en el ensayo y están detalladas en la ASTM D1557. Posteriormente, cuando la muestra de suelo se compacta a diferentes niveles de humedad, variando desde condiciones húmedas hasta una condición más seca, después de cada nivel de compactación, se mide la densidad y la humedad del suelo para construir una curva de compactación (ASTM-D 1557, 2021).

- **Humedad Natural**

La humedad natural en los suelos se refiere al contenido de agua presente en un suelo en su estado natural, sin agregar o eliminar agua. Es una propiedad importante que influye en la caracterización y comportamiento de los suelos, permite conocer como su densidad, compacidad, resistencia y capacidad de carga del suelo en su estado natural. La humedad natural se expresa generalmente como un porcentaje de peso de agua con respecto al peso seco del suelo (Das, 2015).

La determinación de la humedad natural en los suelos está normalizada por la ASTM D-2216 y se realiza mediante el ensayo de laboratorio conocido como "ensayo de humedad" o "ensayo de contenido de humedad". En este ensayo, se toma una muestra representativa del suelo y se seca en un horno a una temperatura específica para eliminar toda la humedad presente. Luego, se pesa la muestra seca y se calcula el contenido de humedad como el porcentaje de la diferencia entre el peso húmedo original y el peso seco (Das, 2015).

El contenido de humedad natural de los suelos puede variar ampliamente dependiendo de factores como el tipo de suelo, las condiciones climáticas, la ubicación geográfica y la temporada del año. La humedad natural también puede ser influenciada por la presencia de materia orgánica, la compactación del suelo y la interacción con el agua subterránea (Das, 2015).

- **Clasificación SUCS**

La clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) es un sistema ampliamente utilizado para clasificar los suelos según sus características y propiedades físicas. Fue desarrollado por Arthur Casagrande en la década de 1940 y se basa en la interpretación de los resultados de ensayos de laboratorio y observaciones de campo. Actualmente, es un procedimiento normado por ASTM-D 2487 (Das, 2015).

La clasificación SUCS se utiliza en la geotecnia para facilitar la comunicación y comprensión de las propiedades de los suelos entre los

profesionales de la ingeniería. El sistema SUCS clasifica los suelos en función de sus propiedades de tamaño de partículas y características de plasticidad, es decir: la distribución del tamaño de partículas, los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) y la plasticidad relativa (Holtz & Kovacs, 2010).

El primer paso en la clasificación SUCS es determinar la distribución del tamaño de partículas utilizando el análisis granulométrico. Los suelos se dividen en diferentes grupos según el porcentaje de partículas de diferentes tamaños, como arena, limo y arcilla. Luego, se utilizan los límites de Atterberg para clasificar los suelos en términos de su plasticidad. Los suelos se pueden clasificar como arenosos, limosos, arcillosos o como mezclas de estos grupos en función de sus límites de Atterberg. Finalmente, se evalúa la plasticidad relativa del suelo, que es una medida de la relación entre el contenido de arcilla y la plasticidad del suelo. Esto ayuda a refinar aún más la clasificación del suelo dentro del sistema SUCS (ASTM-D 2487, 2017).

2.6.5. Ensayo de Refracción Sísmica

El ensayo de refracción sísmica es una técnica muy utilizada en la exploración geotécnica, en donde por medio de la aplicación de métodos geofísicos se utiliza para investigar la estructura y las propiedades del subsuelo mediante la propagación de ondas sísmicas. Este ensayo tiene una gran importancia en la investigación geotécnica debido a la valiosa información que proporciona sobre la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en diferentes capas del subsuelo (Das, 2015).

Durante la aplicación de este ensayo en la superficie de estudio se generan excitaciones sísmicas sobre el suelo que provocan ondas superficiales P (Compresión) y S (Onda de Corte), las mismas que registran sus velocidades de propagación en los subsuelos a través de geófonos. El propósito de su aplicación es determinar la profundidad de penetración de las ondas en el subsuelo mediante su frecuencia, es decir, mientras menor frecuencia mayor es la longitud de onda y su penetración es más profunda. Con esto es posible recopilar información sobre la geometría y profundidad

de las capas del subsuelo, además de identificar cambios bruscos o discontinuidades de las propiedades geotécnicas del subsuelo, lo cual puede tener un impacto significativo para la estabilidad de estructuras y taludes (Dobrin & Savit, 1988).

2.6.5.1. Parámetros Dinámicos Generales

Los resultados de los ensayos de refracción sísmica permiten obtener valores de propagación de las ondas P y S (V_p y V_s), con lo que es posible realizar correlaciones de la velocidad de corte y compresión con diversas ecuaciones empíricas para determinar propiedades elásticas de los estratos del subsuelo como: Coeficiente de Poisson, Módulo de Elasticidad, Módulo de Corte y hasta el módulo Volumétrico de los distintos estratos del subsuelo (Dal Moro, 2015).

- Módulo de Poisson (ν)

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}$$

donde:

V_p = velocidad de compresión

V_s = velocidad de onda de corte

- Módulo de Corte o Rigidez (G)

$$G = \gamma(V_s^2)$$

γ = densidad natural del suelo

- Módulo de Young (E)

$$E = 2G(1 + \nu)$$

- Módulo de Volumétrico (K)

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

2.7. Resistencia del Suelo – Criterio de Mohr Coulomb

La resistencia del suelo es un parámetro fundamental en la ingeniería geotécnica, ya que afecta directamente la estabilidad y capacidad de carga de las estructuras construidas sobre él. El criterio de Mohr-Coulomb es uno de los métodos más utilizados para determinar la resistencia del suelo en condiciones de corte. Este criterio se basa en la relación entre el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal en una superficie de falla (Lambe & Whitman, 1969).

Según el criterio de Mohr-Coulomb, la resistencia al corte del suelo se define mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_f = c' + (\sigma' * \tan \phi')$$

Donde:

τ_f : es el esfuerzo cortante en el plano de falla,

c' : es la cohesión,

σ' : es el esfuerzo normal efectivo,

ϕ' : es el ángulo de fricción interna efectivo.

La cohesión representa la resistencia del suelo en ausencia de presión normal, mientras que el ángulo de fricción interna representa la resistencia debida a la interacción entre las partículas del suelo (Das, 2015).

El ángulo de fricción interna (ϕ) depende de las características físicas y mecánicas del suelo, como la forma, tamaño y rugosidad de las partículas, la humedad, la densidad y la presencia de minerales arcillosos. La cohesión (c) depende principalmente de la presencia y características del agua en el suelo (Das, 2015).

Para determinar los parámetros de resistencia del suelo utilizando el criterio de Mohr-Coulomb, se realizan ensayos de corte directo o triaxiales. Estos ensayos aplican diferentes niveles de esfuerzo normal y miden la resistencia al corte correspondiente. Luego, se grafican los resultados en un diagrama de Mohr (ver

Figura 16), donde se representan los esfuerzos cortantes en función de los esfuerzos normales (Bowles, 1997).

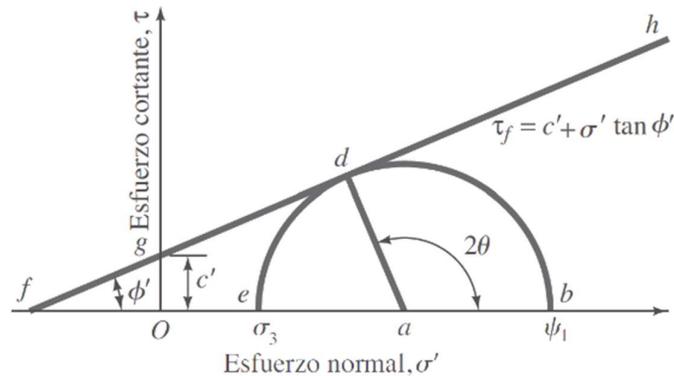


Figura 16. Esquema del plano de falla con respecto al plano principal mayor en el Círculo de Mohr (Das, 2015)

El criterio de Mohr-Coulomb ha sido ampliamente validado y utilizado en la ingeniería geotécnica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este criterio se basa en suposiciones simplificadas y no tiene en cuenta todas las variables que pueden afectar la resistencia del suelo. Por lo tanto, es fundamental combinar el criterio de Mohr-Coulomb con otras pruebas y métodos de análisis para obtener una evaluación completa de la resistencia del suelo en un proyecto de ingeniería (Lambe & Whitman, 1969).

En conclusión, el criterio de Mohr-Coulomb es una herramienta fundamental en la ingeniería geotécnica para determinar la resistencia del suelo en condiciones de corte. Su aplicación permite estimar la resistencia al corte del suelo mediante la consideración de la cohesión y el ángulo de fricción interna. Sin embargo, es importante utilizar este criterio junto con otras pruebas y métodos de análisis para obtener una evaluación completa de la resistencia del suelo.

2.8. Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica de medición de terrenos u objetos a través del procesamiento de fotografías, utilizada con varios métodos de captura de imágenes que permiten mantener distintos grados de precisión y procesamiento tridimensional. Esta metodología pretende encontrar la

geometría del objeto de estudio mediante el compilado de múltiples imágenes generadas de forma secuencial desde distintos ángulos, cuyo propósito es generar una macro perspectiva reconstruida del objeto o el terreno en tres dimensiones.

El proceso fotogramétrico implica la captura de imágenes desde diferentes posiciones y altitudes, preferiblemente utilizando una cámara calibrada. Estas imágenes se superponen y se correlacionan para encontrar puntos de correspondencia comunes. A partir de estos puntos, se puede reconstruir la forma tridimensional del objeto o terreno utilizando técnicas de triangulación (Luhmann, Robson, Kyle, & Harley, 2006).

La fotogrametría se utiliza en diversos campos, como la topografía, la arquitectura, la cartografía, la ingeniería civil y la arqueología. Su aplicación cada vez es más versátil y permite optimizar costos mediante el uso de equipos (drones, cámaras 4k, teléfonos inteligentes, entre otros) más accesibles para los proyectos. Su procesamiento en distintos softwares (Pix4d, Agisoft Metashape, Autodesk ReCap) permite generar modelos digitales de terrenos, realizar mediciones precisas de objetos o estructuras, y crear mapas tridimensionales detallados (Westoby et al., 2012).

2.9. Métodos de Estabilización de Taludes

Los procedimientos constructivos para la estabilización de taludes son técnicas utilizadas para prevenir o mitigar los deslizamientos de suelos en terrenos inclinados. Estos procedimientos se aplican con el objetivo de aumentar la estabilidad del talud y garantizar la seguridad de las estructuras y personas cercanas. En la actualidad existen una amplia gama de métodos y técnicas de estabilización de taludes, cada uno de los cuales se selecciona en función de las características del suelo, el tipo de talud y las condiciones geotécnicas específicas del sitio, sin embargo, estas metodologías de estabilización de taludes se pueden agrupar en tres principios: taludes autoportantes, obras de contención y taludes reforzados (Ramirez & Alejano, 2004).

- **Taludes Autoportantes:** es uno de los métodos más convencionales y utilizados en la ingeniería de taludes cuando disponen de estabilizaciones que tengan facilidad de disposición cercana de los materiales de corte en el talud. En este procedimiento de forma general no es necesario recurrir a la aplicación de elementos estructurales o de refuerzo (ver Figura 17), los mismos que pueden ocasionar costos altos en los proyectos.

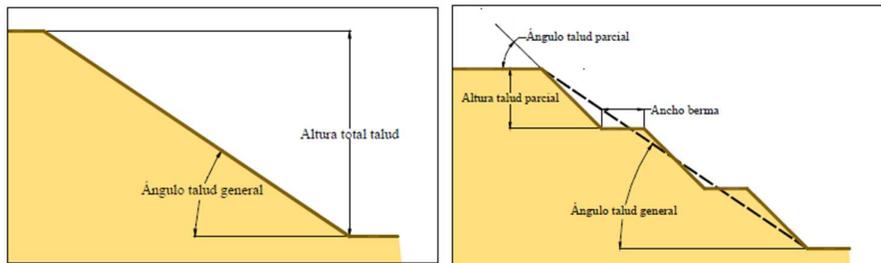


Figura 17. Taludes autoportantes con ángulo continuo y con bermas (Ramirez & Alejano, 2004)

- **Obras de Contención:** estas obras pueden ser de diferentes tipos, como muros de gravedad (Figura 18), muros de anclaje, muros de mampostería, muros de hormigón armado o muros de suelo reforzado, pantalla de pilotes, micropilotes, tablaestacas, etc. La elección del tipo de obra de contención depende de factores como la altura del talud, las características del suelo y la carga esperada. Las obras de contención proporcionan estabilidad al talud al resistir las fuerzas que actúan sobre él.

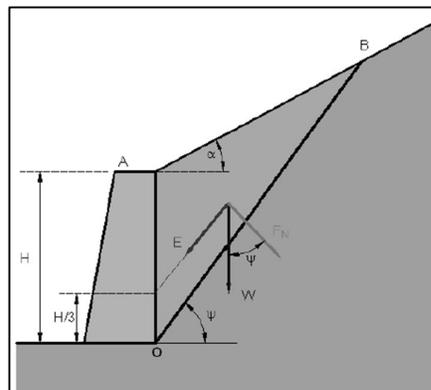


Figura 18. Esquema de Muro de Contención con Altura "H" en Talud (Ramirez & Alejano, 2004)

- **Reforzamiento de Taludes:** La aplicación de los sistemas de reforzamiento en taludes permite aumentar la resistencia del suelo o del macizo rocoso mediante técnicas de anclajes de cables, proyecciones de mortero, pernos de anclaje, reforzamiento con geosintéticos, entre otros.

Para una referencia gráfica de este tipo de reforzamiento en taludes refiérase Figuras 19 y 20.

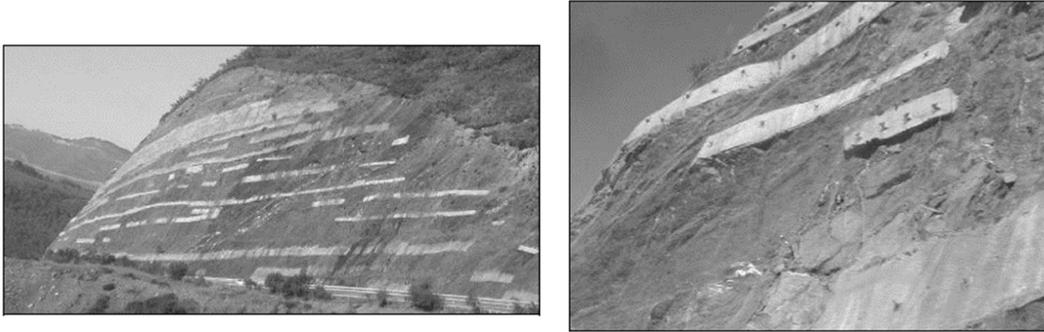


Figura 19. Reforzamiento de Taludes con Anclajes en Vigas de Atado (Ramirez & Alejano, 2004)



Figura 20. Reforzamiento de Taludes con Gunita (Ramirez & Alejano, 2004)

Además, de las técnicas de estabilización del suelo en taludes es necesario garantizar factores de drenaje, compactación, erosión, entre otros; a fin de reducir la susceptibilidad de un colapso de la estructura, mantener o aumentar sus propiedades de resistencia.

Los sistemas de drenaje en un talud previenen la saturación y aumento de la presión de agua en el suelo, lo que podría generar deslizamientos. Se pueden instalar sistemas de drenaje como drenes horizontales, drenes verticales o sistemas de drenaje subterráneo para eliminar el agua y reducir las fuerzas que actúan sobre el talud (Ramirez & Alejano, 2004).

2.10. Principios de Estabilidades en Taludes

Existen diversas metodologías sistemáticas de análisis para la estabilidad de taludes que permiten evaluar y predecir las condiciones necesarias para la

estabilidad de la infraestructura de suelo. Estas metodologías involucran la aplicación de principios geotécnicos y geomecánicos para determinar las fuerzas y deformaciones en el talud, y calcular el factor de seguridad, que indica la capacidad del talud para resistir el deslizamiento (Suarez, 2009). A continuación, se describen las metodologías más comunes en el análisis de estabilidad de taludes:

- **Análisis de Equilibrio Límite:** es una de las metodologías más utilizadas para prever la estabilidad de un talud, que como principio establece la comparación de las fuerzas resistentes de la infraestructura de talud frente a sus fuerzas actuantes en la desestabilización. El análisis de equilibrio límite utiliza métodos gráficos o numéricos para determinar el factor de seguridad (Fredlund et al., 2012). El factor de seguridad puede ser determinado en la longitud de falla o por secciones de la masa del talud (denominadas dovelas). Un factor de seguridad mayor que 1 indica una condición de estabilidad, mientras que un factor de seguridad menor que 1 indica una condición de inestabilidad (Huvaj-Sarihan, 2008) .
- **Análisis con Elementos Finitos:** utiliza modelos numéricos para representar el talud y simular su comportamiento bajo diferentes condiciones (Fredlund et al., 2012). La aplicación del análisis con elementos finitos en la estabilidad de taludes requiere de mayor experticia por parte del equipo técnico, así también de datos geotécnicos más precisos para el caso de estudio (Turner & Schuter, 1996). Este enfoque permite considerar la no linealidad del suelo, la distribución de esfuerzos y deformaciones en el talud, y la interacción entre el agua y el suelo. El análisis de elementos finitos proporciona resultados más detallados y precisos, pero también requiere una mayor capacidad computacional y datos geotécnicos más completos (Fredlund et al., 2012).
- **Procedimientos estadísticos y probabilísticos:** consideran la variabilidad en las propiedades del suelo y los factores de carga para evaluar la incertidumbre en la estabilidad del talud. Estas metodologías utilizan análisis de sensibilidad y simulaciones Monte Carlo para evaluar

el riesgo de deslizamiento y determinar los niveles aceptables de factor de seguridad (Turner & Schuter, 1996).

2.11. Procedimientos de Análisis para Estabilidades en Taludes

- **Análisis Estático**

Mediante el análisis con condiciones estáticas en la estabilidad de taludes se determina el factor de seguridad del talud según las condicionantes estáticas de la infraestructura, considerando las fuerzas actuantes sobre la masa de suelo o roca excede a las fuerzas pasivas y resistentes del talud. En este procedimiento se recurre a factores de fuerzas cortantes del suelo, ángulo de fricción interna, cohesión, distribución de cargas sobre el talud, así como presencia de agua superficial o agua subterránea que influya directamente en las componentes geomecánicas del talud (Turner & Schuter, 1996).

El análisis estático se puede llevar a cabo utilizando diferentes métodos, como el método de las dovelas o el método de las superficies de falla. En el método de las dovelas, el talud se divide en varias rebanadas verticales y se consideran las fuerzas y los momentos que actúan sobre cada rebanada. Se asume que las dovelas son rígidas y se evalúa la estabilidad de cada una de ellas. En el método de las superficies de falla, se define una superficie de falla hipotética a lo largo de la cual se produce el deslizamiento (Fredlund et al., 2012).

- **Análisis Pseudoestático**

El análisis pseudoestático en la estabilidad de taludes es una técnica utilizada para evaluar el comportamiento de un talud frente a cargas sísmicas. Este método se basa en la suposición de que el talud se comporta de manera estática durante el evento sísmico, a pesar de que en realidad se trata de un fenómeno dinámico.

En el procedimiento se consideran el efecto combinado de las fuerzas sísmicas horizontales establecidos por la multiplicación del coeficiente “k” con el peso del elemento de análisis. Se asume que el talud está en equilibrio estático y se evalúa la estabilidad mediante la comparación de las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes (Suarez, 2009). Es importante destacar que, el análisis

pseudoestático es una aproximación simplificada y conservadora, ya que no tiene en cuenta la respuesta dinámica real del talud durante un evento sísmico (Duncan et al., 2014).

Así como el análisis estático, el análisis pseudoestático también requiere de la determinación de los parámetros de resistencia del suelo, como la cohesión y el ángulo de fricción, así como la definición de la superficie de falla y el cálculo del factor de seguridad, adicionalmente la fuerza sísmica a considerar. Se pueden utilizar métodos numéricos, como el método de las dovelas, para llevar a cabo el análisis.

- **Análisis Inverso**

Dentro de la ingeniería geotécnica, se recurre al Análisis Inverso como un procedimiento más eficiente para determinar los detonantes de inestabilidad de taludes, donde es viable realizar un proceso de estudio desde las condiciones observadas del deslizamiento de talud para determinar las propiedades y parámetros del suelo que podrían haber llevado a la inestabilidad (Bojorque, 2016). Esta técnica es útil cuando se dispone de información detallada sobre un deslizamiento ocurrido para retroceder y determinar las condiciones que llevaron a la falla.

El proceso de análisis inverso implica el uso de modelos numéricos o métodos analíticos para simular el comportamiento del talud y comparar los resultados obtenidos con las observaciones reales del deslizamiento. Posterior a la comparación, se pueden ajustar los parámetros del modelo, como la resistencia del suelo, la cohesión y el ángulo de fricción, para lograr una mejor concordancia entre los resultados modelados y los datos del deslizamiento real (Duncan et al., 2014).

El análisis inverso es útil para comprender mejor las causas de los deslizamientos de taludes y los parámetros de resistencia a la falla y mejorar la capacidad de predecir y prevenir futuras inestabilidades. También, se utiliza para evaluar y validar la efectividad de las medidas de estabilización implementadas en taludes existentes.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se da a conocer el proceso sistemático aplicado en el presente estudio para la estabilidad del talud ubicado en el km 1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita. La elección de la metodología a utilizar en una investigación geotécnica propicia de una recolección oportuna de información y optimización de recursos para un proyecto. Los datos que se obtienen en este proceso posteriormente son interpretados con criterios técnicos para garantizar resultados confiables, proponer soluciones geotécnicas viables y otorgar seguridad al cliente y/o usuario final de un proyecto.

Se realiza una investigación cuantitativa con el uso de diversos ensayos de campo y laboratorio, cuyos resultados son procesados con criterios geotécnicos para identificar la caracterización geomecánica de los distintos estratos del subsuelo en el talud de estudio. El adecuado análisis y uso de las propiedades determinadas en los suelos o rocas del lugar de estudio permiten a su vez identificar los factores desencadenantes de la falla en el talud y establecer soluciones geotécnicas para su estabilidad.

3.1. Descripción General

La identificación a tiempo del problema de inestabilidad del talud permite amplificar el rango de acción para solucionar la amenaza de falla de la masa de tierras (Ferrer, 1987); es por tal razón que para proponer diseños con posibles soluciones geotécnicas viables a los presentes problemas de taludes críticos en la vía San Mateo-Santa Marianita se procederá a obtener datos de los materiales con investigación cuantitativa, previendo así a mitigar mayores afectaciones en la infraestructura vial en su etapa de reinicio de etapa constructiva.

Inicialmente, se realiza el trabajo de gabinete para identificar la zona geológica de estudio, en donde existen inestabilidad en taludes de la vía San Mateo-Santa Marianita. De manera seguida, se realizan recorridos técnicos en campo para determinar los puntos más críticos de inestabilidad de taludes, donde se realizarán ensayos para las respectivas caracterizaciones geológicas, litológicas,

geomorfológicas, disposiciones estratigráficas, entre otros que permitan determinar las propiedades geomecánicas de los estratos existentes en el talud.

A continuación, se realizan sondeos geotécnicos para tomas de muestras físicas del suelo para su procesamiento geomecánico en laboratorio con ensayos de humedad natural, granulometría, límites de Atterberg, Proctor estándar, CBR. Así también, se realizan ensayos geofísicos de refracción sísmica y medición de ondas de corte con la finalidad de complementar la información geotécnica de las muestras de suelo.

Posteriormente, en los puntos de análisis se realizan fotogrametrías para estudiar a detalle las posibles fallas de taludes con sus características topográficas correspondientes; el procesamiento fotogramétrico se realiza mediante el uso de software Agisoft Metashape con fotografías aéreas de dron Phantom 4 Pro V2.

A través de correlaciones geotécnicas planteadas en el presente documento se determinan parámetros geotécnicos del sitio de estudio para identificar el proceso de falla del talud mediante un análisis inverso, en el software SLOPE/W de GeoStudio. Con la aplicación de métodos analíticos, simples y numéricos se diseñarán propuestas geotécnicas para la estabilidad de taludes según los distintos factores de seguridad que atiendan las condiciones de temporalidad de la obra (temporal o definitiva) y las condiciones naturales que puedan generar o no excitaciones externas al talud (estática, sísmica, ambiente, actividades antropológicas) (Valiente, Sobrecases, & Díaz, 2016).

El adecuado análisis de las soluciones técnicas diseñadas, con información obtenida en campo y trabajo de gabinete permitirá enfocar la solución geotécnica a la estabilidad de taludes con una correlación que emplee componentes técnicos, económicos, sociales y hasta políticos (De La Cruz & Tunque, 2015).

Finalmente, se propondrá el diseño óptimo de estabilidad de taludes, en zonas más críticas de la vía, según condiciones económicas y metodologías de los coeficientes de estabilidad de taludes regulados con normativas nacionales e

internacionales que garanticen la durabilidad de la solución geotécnica (NEVI-12-MTOP, 2013).

3.2. Recopilación de Información

3.2.1. Reconocimiento de la Zona de Estudio

La vía San Mateo – Santa Marianita del cantón Manta mantiene un tramo reconstruido de 1.0 km, el mismo que inicia en la abscisa 0+900 km desde el inicio del proyecto (“Y” de acceso a zona urbana de San Mateo). En el tramo reconstruido se evidencian procesos de estabilización de los cortes y rellenos generados tanto en el terraplén de la vía como en sus infraestructuras complementarias (en referencia a los taludes); así también, se observan diversos puntos críticos que podrían incurrir a afectaciones a las poblaciones que habitan en el área de influencia del proyecto (ver Figura 21). Sin embargo, el presente estudio considera el análisis del corte en talud más crítico para proponer una solución técnicamente viable.



Figura 21. Taludes generados desde el km 0+900 hasta el km 1+900 de la vía San Mateo - Santa Marianita

Al final de la zona intervenida del proyecto vía San Mateo-Santa Marianita, en el km 1+900, se observa un talud colapsado donde se prevé continuar con la reconstrucción del trazado vial del mencionado proyecto (Figura 22).



Figura 22. Talud en Abscisa 1+900 de la vía San Mateo - Santa Marianita

El presente trabajo de estudio pretende identificar las posibles causas de colapso del talud en la abscisa 1+900 y proponer soluciones técnicamente viables para su reconstrucción, así también de brindar recomendaciones para los próximos cortes a realizar en suelos de condiciones similares.

3.2.2. Identificación y Muestreo de Materiales en Campo

La zona de estudio está ubicada sobre la formación geológica San Mateo, la misma que mantiene características de suelos sedimentarios con depósitos estratificados de limolitas, lutitas y areniscas. En el talud colapsado del km 1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita se evidencian los suelos anteriormente mencionados, con suelos finos de coloración amarillenta en la parte media-superior y detritos de color gris verdoso en la parte inferior (ver Figura 23 y 24).



Figura 23. Materiales expuestos en el Talud Colapsado del km 1.9 del proyecto.



Figura 24. Materiales que componen el talud del km1.9: (a) granos finos en la parte superior del talud, (b) detritos color amarillento en laterales del pie de talud, (c) detritos color gris verdoso en centro del pie de talud.

Así también, en la parte baja del talud colapsado se observan desplazamientos de detritos sedimentarios en conglomerados de gran tamaño, masas compactas de suelo de grano grueso con apariencia rocosa (ver Figuras 25 y 26).



Figura 25. Masa compacta de detritos desplazados del talud colapsado.

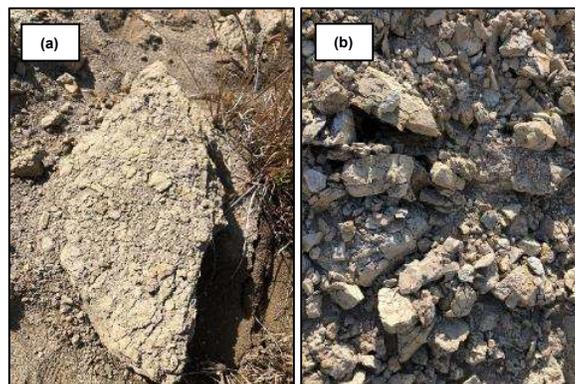


Figura 26. Detritos color gris verdoso, caídos de la base del talud colapsado. (a) masa de suelo compacta. (b) masa de suelo disgregada.

Sobre la presencia de detritos en la parte baja central del talud se evidencian diaclasas con aperturas mayores a 5 cm, lo que genera desprendimientos de los suelos conglomerados (roca pobre) que están en la parte baja del talud, causados probablemente por la fuerza de empuje de la gran masa de suelo superior (Figura 27).



Figura 27. Diaclasas ubicadas en la parte baja del talud, en detritos de color gris.

Para un análisis preliminar con mayor detalle de los afloramientos evidenciados en el reconocimiento del sitio se realizan dos tomas de muestras de los materiales expuestos en el talud para análisis en laboratorio (Figura 28).



Figura 28. Toma de muestras del suelo expuesto para análisis en laboratorio.

3.2.3. Ensayos SPT

La aplicación del ensayo de Penetración Estándar permite identificar los estratos existentes en el subsuelo del talud colapsado; el propósito de este ensayo es

evidenciar la presencia de suelos competentes para el análisis de estabilización de talud, así como sus propiedades geomecánicas. Este procedimiento se realizan trabajos de forma coordinada y colaborativa con la empresa CONSULJOC S.A. para ejecutar 3 perforaciones con ubicaciones estratégicas (Figura 29).

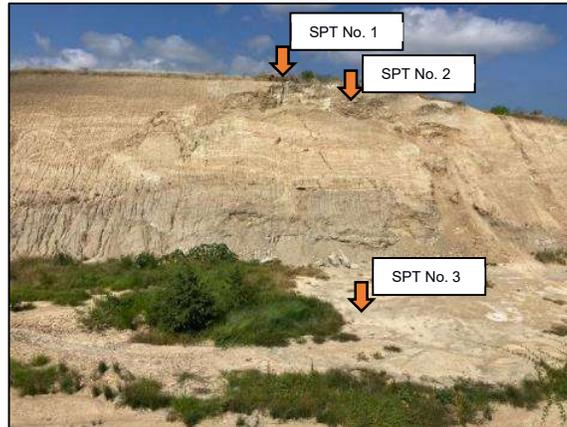


Figura 29. Ubicaciones de los ensayos SPT realizados en el talud crítico del km1.9 del proyecto

El ensayo **SPT No.1** con coordenadas UTM – Datum WGS 84 – Zona 17 Sur “9893433 N; 520871 E”, cota 111 msnm, se ubica en la cabecera del talud colapsado, donde se alcanza a perforar hasta los 5 m de profundidad (Figura 30), encontrando suelos competentes que generan rechazo a este ensayo. Se realiza tomas de muestras para su posterior análisis en laboratorio.



Figura 30. Ensayo SPT No. 1 en parte superior de talud

El ensayo **SPT No. 2** con coordenadas UTM – Datum WGS 84 – Zona 17 Sur “9893433 N; 520881 E”, cota 105 msnm, se ubica en el escarpe principal, zona superior del talud colapsado, donde también se alcanza a perforar hasta los 5 m de profundidad (Figura 31). Se realiza tomas de muestras para su posterior análisis en laboratorio.



Figura 31. Ensayo SPT No. 2 en escarpe de talud

El ensayo **SPT No. 3** con coordenadas UTM – Datum WGS 84 – Zona 17 Sur “9893455 N; 520887 E”, cota 85 msnm, se ubica en el pie del talud colapsado, donde solo se perfora hasta los 3 m de profundidad (Figura 32), encontrando suelos competentes que generan rechazo a este ensayo. Se realiza tomas de muestras para su posterior análisis en laboratorio.



Figura 32. Ensayo SPT No. 3 en pie de talud

3.2.3.1. Análisis de Muestras en Laboratorio de Suelos

Las muestras de suelos tomadas tanto en la identificación preliminar de la zona de estudio como en los ensayos de penetración estándar son necesarias procesarlas en un laboratorio adecuadamente equipado para realizar los ensayos que permitan determinar las propiedades geomecánicas de los materiales. Los siguientes ensayos se realizan de forma coordinada y colaborativa con la empresa MACMOR CONSULTORA Y ASOCIADOS S.A.:

3.2.3.2. Ensayos Realizados en Laboratorio

Los ensayos realizados en el laboratorio de suelos corresponden granulometría, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, Proctor modificado y contenido de humedad de los materiales (ver Figura 33), respectivamente normalizados por la American Society of Testing Materials (ASTM) con los procedimientos D422, D4318, D1557 y D2216, respectivamente (más detalle de los ensayos de laboratorio en Sección 7: ANEXOS 1-4).



Figura 33. Ensayos normalizados realizados a las muestras de suelo en laboratorio: (a) Contenido de humedad, (b) granulometría, (c) límites de Atterberg, (d) proctor modificado.

3.2.3.3. Procesamiento de Ensayos y Clasificación SUCS

A partir de los ensayos normalizados se digitalizan los valores obtenidos en el laboratorio de suelos para las propiedades físicas de los muestreos de materiales realizados en la etapa de identificación inicial de la zona de estudio y en los ensayos de penetración estándar.

Los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio son necesarios analizar de forma interrelacionada para una mejor interpretación de los suelos existentes; es por tal razón que se recurre a la utilización de metodologías de identificación de materiales a través del uso de límites de separación de tamaño del suelo (Das, 2015).

En el presente estudio se utiliza la metodología del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). En la Figura 34 se observa la clasificación de

los suelos según SUCS a partir de la distribución granulométrica, límite líquido e índice plástico; mientras que, en la Figura 35 se establece la Carta de Plasticidad que correlaciona el límite líquido y el índice de plasticidad de los suelos según SUCS, cuyo objetivo también determine el tipo de material que corresponde.

Criteria for assigning group symbols				Group symbol
Coarse-grained soils More than 50% of retained on No. 200 sieve	Gravels More than 50% of coarse fraction retained on No. 4 sieve	Clean Gravels	$C_u \geq 4$ and $1 \leq C_c \leq 3^e$	GW
		Less than 5% fines ^a	$C_u < 4$ and/or $1 > C_c > 3^e$	GP
	Sands 50% or more of coarse fraction passes No. 4 sieve	Gravels with Fines More than 12% fines ^{a,d}	$PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3)	GM
		Clean Sands Less than 5% fines ^b	$C_u \geq 6$ and $1 \leq C_c \leq 3^e$	SW
Fine-grained soils 50% or more passes No. 200 sieve	Silts and clays Liquid limit less than 50	Sands with Fines More than 12% fines ^{a,d}	$C_u < 6$ and/or $1 > C_c > 3^e$	SP
		Inorganic	$PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3) $PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3) ^e	CL ML
	Silts and clays Liquid limit 50 or more	Organic	PI plots on or above "A" line (Figure 5.3) PI plots below "A" line (Figure 5.3)	CH MH
		Inorganic	Liquid limit — oven dried Liquid limit — not dried < 0.75 ; see Figure 5.3; OL zone	OL
Highly Organic Soils	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor	Liquid limit — oven dried Liquid limit — not dried < 0.75 ; see Figure 5.3; OH zone	OH	Pt

^aGravels with 5 to 12% fine require dual symbols: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bSands with 5 to 12% fines require dual symbols: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

Figura 34. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (Das, 2015)

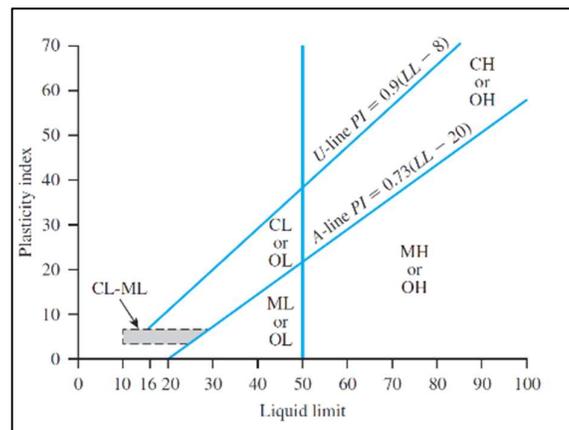


Figura 35. Carta de Plasticidad para el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (Das, 2015)

3.2.4. Ensayos Geofísicos y Correlaciones Geotécnicas

Los ensayos geofísicos realizados en el presente trabajo corresponden a refracción sísmica con martillo y placa de impacto, cuyas configuraciones también son realizadas en MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), lo que permite determinar los valores de las ondas de corte primarias y secundarias de manera más precisa. Este procedimiento es ejecutado con dos líneas de ensayo, configuradas tanto en el pie de talud como en la corona (ver Figura 36).

La realización de estos ensayos es efectuada con coordinación colaborativa para esta investigación con el departamento de ingeniería civil de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.



Figura 36. Ubicaciones de las configuraciones de las líneas de refracción sísmica.

Los ensayos de refracción sísmica son realizados con el sismógrafo MAE-Sysmatrack 24, configuraciones de geófonos en tierra cada 5 metros de separación y software de procesamiento Sysmatrack. Es necesario mencionar que, para el procesamiento de datos de campo se requiere determinar la diferencia de nivel entre la trayectoria de geófonos para mayor precisión en la interpretación de resultados. En la Figura 37 se evidencian actividades correspondientes al procedimiento de este ensayo, tal como: lectura de resultados receptados por la velocidad P y S en el sismógrafo, verificación de conexión adecuada en los geófonos receptores y nivelación altimétrica de las líneas configuradas para la refracción sísmica.

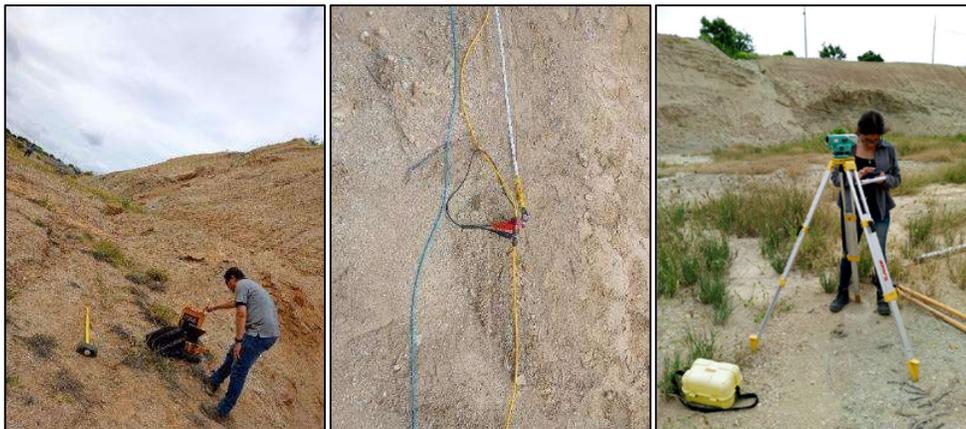


Figura 37. Configuración de líneas de refracción sísmica en el proyecto de estudio con su respectiva nivelación.

Con los datos obtenidos a partir de los ensayos de refracción sísmica es posible realizar correlaciones que determinen propiedades geomecánicas del suelo a distintas profundidades.

El análisis de correlación es efectuado con ecuaciones de “I.G. Mindel, 2002” citadas en (Naranjo, 2010) que determinan el ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión del suelo (c). Las ecuaciones propuestas de “I.G. Mindel, 2002” han sido analizadas en condiciones geológicas similares (Bonilla & Marrugo, 2021) por lo que permiten aplicarse para el presente trabajo de investigación:

- Ángulo de fricción interna (ϕ)

$$\phi = \frac{9.17}{\sqrt{\frac{V_p}{V_s} - 1.41}} + 16 \text{ (grados)}$$

donde:

V_p = velocidad de compresión

V_s = velocidad de onda de corte

- Cohesión del suelo (c)

$$c = \frac{0.554}{\sqrt{\frac{V_p}{V_s} - 1.41}} - 0.073 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

3.2.5. Fotogrametría

En el presente estudio se procede a realizar un análisis fotogramétrico del talud en el km 1.9, con el propósito de generar una construcción geométrica del mismo. La disposición geométrica del talud permite analizar el volumen de masa en deslizamiento del punto de falla, topografía referencial del talud, modelar con

dimensiones precisas para proponer soluciones de reconstrucción o remediación de la falla del talud.

Para la fotogrametría es necesario realizar tomas fotográficas aéreas con equipos que permitan precisión, en el presente estudio se utiliza el dron “Phantom 4 pro V.2” (Figura 38).



Figura 38. Equipo utilizado para fotografías aéreas, Phantom 4 Pro V2.0 (Fuente: DJI Official Website, <https://www.dji.com/phantom-4-pro-v2>)

Las tomas aéreas para la fotogrametría son necesarias efectuarlas en puntos estratégicos del talud que permitan generar una reconstrucción del talud y sus alrededores por medio de un análisis fotogramétrico. En el presente estudio se realizaron 41 tomas de fotografía con información GPS, ubicadas en sitios estratégicos (Figura 39) para un posterior procesamiento en software computacional.



Figura 39. Fotografía Aérea del inicio del talud colapsado en km1.9 de la vía San Mateo - Santa Marianita.

Para la fotogrametría se procede a utilizar el software Agisoft Metashape, cuyo adecuado procesamiento de tomas permite generar condiciones precisas de la geometría del talud en análisis. Los resultados que permite obtener este procesamiento en el software son varios (ver Figura 40): nube de puntos, ortofotos, modelos de elevación digital, entre otros.; estos resultados pueden

exportables para un mejor análisis en distintos formatos para plataformas u otros softwares computacionales.

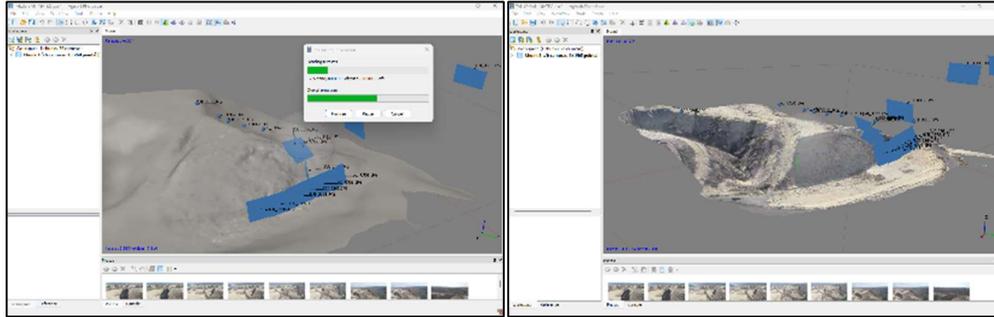


Figura 40. Procesamiento de Fotogrametría en Software Agisoft para Modelo de Elevación Digital (DEM) y Ortofotografía del talud del km1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita en estudio.

3.2.6. Perfiles del Suelo con Características Geométricas y Geomecánicas

A partir de los datos geométricos y caracterizaciones de suelos en el talud se procede a realizar un perfil en dos dimensiones de la zona más crítica del talud colapsado, en este caso la zona de mayor altura, para su posterior análisis de inestabilidad.

Con el modelo de elevación digital (DEM) realizado en el software Agisoft Metashape se crean curvas de nivel exportables hacia formatos manejables para el software AUTOCAD (Figura 41), lo que permite reconstruir perfiles geométricos del talud colapsado.

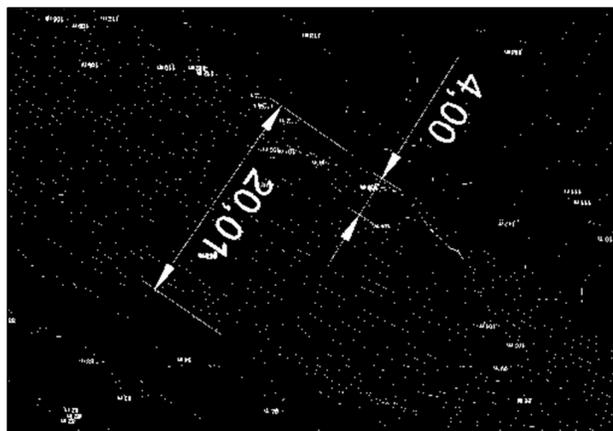


Figura 41. Curvas de nivel exportadas del talud colapsado en software AUTOCAD, a partir de procesamiento fotogramétrico.

Posteriormente, se realiza un análisis comparativo con los valores obtenidos en los ensayos SPT, refracción sísmica y procesamiento en laboratorio para la toma de decisiones de los parámetros geotécnicos definidos en la estructura del talud.

A partir de las curvas de nivel se proporciona información relevante para la geometría del talud. De manera complementaria se consideran los criterios geotécnicos del subsuelo existente en el talud para establecer profundidades de los estratos.

Con el procedimiento que antecede, se procesa información del talud para su posterior ingreso de datos al software GEOSTUDIO, donde se realiza una reconstrucción geométrica del perfil en 2D del talud del km 1.9 la vía San Mateo – Santa Marianita con sus características geotécnicas de la estructura de suelo.

3.2.7. Análisis Inverso del Talud Colapsado

Se recurre al procedimiento de Análisis Inverso del talud colapsado para corroborar que las condiciones geotécnicas y geométricas identificadas en el talud corresponden al colapso de la infraestructura.

El presente Análisis Inverso se realiza en condiciones estáticas y pseudoestáticas, donde se identifica el factor de seguridad del talud para cada caso de estudio.

- **Condiciones Estáticas:**

Para la metodología de análisis en el software GeoStudio que determine la inestabilidad existente en el talud, bajo condiciones estáticas, se emplea la teoría de Equilibrio Límite con el método de Morgenstern-Price. El método de Morgenstern-Price permite realizar un análisis preciso en distintos tipos de taludes y perfiles de suelo, tomando en consideración el equilibrio de fuerzas aplicadas en la estructura del talud subdividido en un número definido de dovelas (Suarez, 2009).

Con lo anteriormente expuesto, se procede a generar el perfil del talud con sus propiedades geomecánicas para el análisis tipo SLOPE/W del software GeoStudio.

- **Condiciones Pseudoestáticas:**

Para el análisis de estabilidad de taludes en condiciones pseudoestáticas se establece la participación de la carga sísmica en el equilibrio de fuerzas, es por tal motivo que, se recurre a parámetros de diseño ante demandas sísmicas establecidas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

Según el capítulo de geotecnia y cimentaciones de la NEC15 para un análisis pseudo estático se considera el 60% de la aceleración máxima del terreno (NEC-SE-GC, 2015), expresada en función de la gravedad de la siguiente manera:

$$k_h = 0.6 * Z * F_a$$

Donde:

k_h : es el coeficiente sísmico horizontal,

Z: es el factor de la zona sísmica según tabla 19 de (NEC-SE-DS, 2015)

F_a : es el coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto según tabla 3 de (NEC-SE-DS, 2015)

4. MODELACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se establecen los resultados obtenidos a partir de cada procedimiento utilizado para el estudio del talud del km 1.9 de la vía San Mateo-Santa Marianita, así también se exponen los análisis técnicos de los productos comparados con los requerimientos mínimos de la normativa vigente.

Es por tal razón que, a partir de la metodología aplicada y sus respectivas propuestas constructivas se busca la mejora del talud con adecuada viabilidad técnica y económica que garantice de una solución geotécnica fiable para la estabilidad del talud en el proyecto.

4.1. Modelo de Elevación Digital

Con el proceso de fotogrametría realizado en el presente estudio se ha realizado un modelo de elevación digital (DEM), el mismo que permitido obtener información a detalle sobre el relieve y características topográficas del talud del km 1+900 de la vía San Mateo – Santa Marianita del cantón Manta.

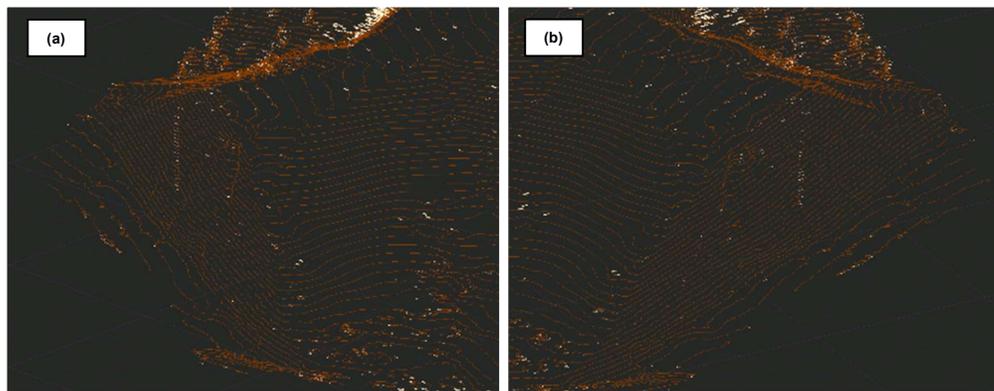


Figura 42. Curvas de nivel del talud crítico, exportado a plataforma AUTOCAD a través de su Modelo de Elevación Digital. (a) Vista lateral derecha del talud. (b) Vista lateral izquierda.

En la Figura 42 se evidencian algunos resultados del procesamiento del modelo de elevación digital obtenido, como las curvas de nivel del talud, con lo que se ha obtenido datos como: geometría y volumen de masa en deslizamiento.

Con la geometría obtenida en el proceso DEM se determina que la pendiente de la cara frontal del talud mantiene una configuración 1.0H-1.3V de talud principal, altura precisa de 26 m en el punto máximo del talud.



Figura 43. Vista en tres dimensiones del talud crítico, generado por el Modelo de Elevación Digital

El proceso DEM del talud ha permitido generar un modelo tridimensional con representación fotográfica restituída del talud (Figura 43), con lo que se delimitó el área de riesgo potencial de deslizamiento y se analizó el perfil geológico visto en la cara frontal del talud.

De la misma manera, es necesario identificar los mismos en la cara expuesta del talud para una adecuada trayectoria litológica de los estratos. En la Figura 44 se exponen los estratos identificados en las inspecciones de campo y sus respectivas dimensiones, las mismas que han sido generadas a partir de datos geométricos determinados en el proceso DEM:



Figura 44. Identificación de estratos en talud del km1.9 de la vía San Mateo - Santa Marianita

Esta información procesada con un análisis técnico permite producir un perfil del talud en 2D, reconstruido con información geométrica y geotécnica (Figura 45), con lo que se generó distintos procedimientos que determinan los factores detonantes de la desestabilización y permitir dar propuestas de mejora

geotécnica para su estabilización. A continuación, a partir de la información geométrica y litología visualizada en campo se expone un esquema en dos dimensiones del talud en su altura crítica:

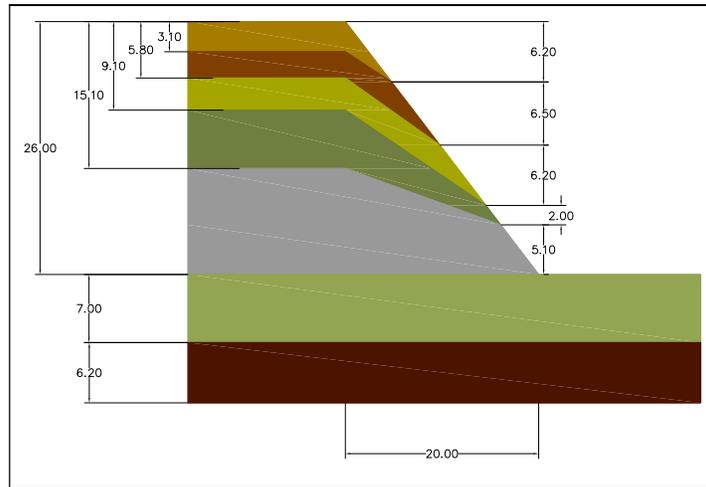


Figura 45. Perfil del talud en 2D en AutoCAD, reconstruido con información recopilada.

4.2. Ensayos de Campo y Laboratorio

Durante la fase de exploración geotécnica se establecen distintos procedimientos en campo (ensayo SPT y Refracción Sísmica) que otorgan mayor fiabilidad y precisión de resultados, después de que las muestras físicas de suelo hayan sido procesadas en laboratorio.

La comparación de los datos obtenidos en estos diversos ensayos permite establecer con mayor criterio técnico las características geomecánicas del subsuelo.

4.2.1. Resultados de Ensayo SPT

Los registros del ensayo de SPT permiten entender de forma preliminar la caracterización geotécnica de los subsuelos en la zona de estudio. El correcto análisis e interpretación de datos se realiza, generalmente, por profesionales que conozcan de la geología de la zona de estudio. A continuación, en la Tabla 2 se muestran los registros de campo digitalizados de los tres ensayos SPT realizados en el talud colapsado del km 1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita:

Tabla 2. Registros digitalizados de los datos de campo del ensayo SPT

P-1 (CORONA DE TALUD)						
Prof. (m)		No. Golpes			9893433 N; 520871 E - 111msnm	
Desde	Hasta	N_(0-15)	N_(15-30)	N_(30-45)	N_spt	Descripción Litológica en Campo
0	1	6	12	34	46	MATERIAL GRANULAR - ARCILLOSO
1	2	13	46	49	95	MATERIAL GRANULAR - ARCILLOSO
2	3	16	30	48	78	MATERIAL GRANULAR - ARCILLOSO
3	4	29	52	59	111	MATERIAL GRANULAR - ARCILLOSO
4	5	46	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	MATERIAL ARCILLOSO COMPACTO
5	6	3	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	MATERIAL ARCILLOSO COMPACTO

P-2 (ESCARPE DE TALUD)						
Prof. (m)		No. Golpes			9893433 N; 520881 E - 105msnm	
Desde	Hasta	N_(0-15)	N_(15-30)	N_(30-45)	N_spt	Descripción Litológica en Campo
0	1	1	2	3	5	MATERIAL GRANULAR ARCILLOSO - SUELTO
1	2	8	17	20	37	MATERIAL GRANULAR - ARCILLOSO
2	3	14	33	45	78	MATERIAL GRANULAR - ARCILLOSO
3	4	32	59	68	127	MATERIAL ARCILLOSO COMPACTO
4	5	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	MATERIAL ARCILLOSO COMPACTO
5	6	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	MATERIAL ARCILLOSO COMPACTO

P-3 (PIE DE TALUD)						
Prof. (m)		No. Golpes			9893455 N; 520887 E - 85msnm	
Desde	Hasta	N_(0-15)	N_(15-30)	N_(30-45)	N_spt	Descripción Litológica en Campo
0	1	34	48	56	104	MATERIAL GRANULAR - ARCILLOSO
1	2	59	65	78	143	MATERIAL ARCILLOSO COMPACTO
2	4	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	MATERIAL ARCILLOSO COMPACTO

Con las muestras de los ensayos SPT realizados en el talud se procede a analizar las características físicas de los materiales encontrados en el subsuelo del talud con procesamiento en laboratorio, valores que se exponen de forma resumida en la Tabla 3 (más detalle en Sección 7: ANEXOS 5-7).

Tabla 3. Valores de Laboratorio para las muestras de ensayo SPT en talud del km 1.9

PROFUNDIDAD (m)	SUCS	PERFIL	HUMEDAD NATURAL % W	LÍMITES DE ATTERBERG			N_spt	GRANULOMETRÍA			Representación Gráfica
				L _L	L _P	I _P		% FINOS	% ARENA	% GRAVA	
PERFORACIÓN SPT No. 1											
1.00 mts	CL	C	13.58 %	39.28	24.65	14.63	46	63 %	37 %	0 %	
2.00 mts	CL	C	15.92 %	43.34	25.96	17.38	95	55 %	45 %	0 %	
3.00 mts	ML	M	14.80 %	43.81	32.45	11.36	78	48 %	52 %	0 %	
4.00 mts	CL	C	17.24 %	32.71	18.42	14.29	111	53 %	47 %	0 %	
5.00 mts	ML	M	16.66 %	31.26	25.60	5.66	RECHAZO	71 %	29 %	0 %	
6.00 mts	CL	C	17.35 %	36.62	22.43	14.19	RECHAZO	54 %	46 %	0 %	
PERFORACIÓN SPT No. 2											
1.00 mts	ML	M	9.21 %	41.82	35.15	6.67	5	47 %	53 %	0 %	
2.00 mts	ML	M	16.25 %	44.17	32.14	12.03	37	61 %	39 %	0 %	
3.00 mts	ML	M	13.58 %	37.50	25.31	12.19	78	58 %	42 %	0 %	
4.00 mts	CL	C	11.94 %	39.26	21.65	17.61	127	55 %	45 %	0 %	
5.00 mts	ML	M	15.63 %	41.55	28.74	12.81	RECHAZO	68 %	32 %	0 %	
6.00 mts	ML	M	15.11 %	46.21	29.31	16.90	RECHAZO	57 %	43 %	0 %	
PERFORACIÓN SPT No. 3											
1.00 mts	ML	M	16.77 %	37.54	31.92	5.62	104	57 %	43 %	0 %	
2.00 mts	ML	M	13.83 %	49.22	37.19	12.03	143	51 %	49 %	0 %	
4.00 mts	ML	M	15.05 %	44.70	31.88	12.82	RECHAZO	62 %	38 %	0 %	

4.2.2. Clasificación de Muestras de Suelo tomadas en Campo

En la identificación inicial de la zona de estudio del talud ubicado en el km 1.9 se evidencian materiales expuestos que requieren una caracterización física para correlacionar con la geología del lugar, las mismas que se presentan a partir del procesamiento de laboratorio y sus clasificaciones bajo el sistema SUCS respectivamente en la Tablas 4 y 5:

Tabla 4. Valores de Laboratorio para dos muestreos realizados en talud del km 1.9

Muestra	Descripción del Material	% Humedad Natural	LÍMITES DE ATTERBERG			GRANULOMETRÍA			PROCTOR MODIFICADO	
			LL	LP	IP	% FINOS	% ARENA	% GRAVA	DENSIDAD MÁXIMA DE COMPACTACIÓN (kg/m ³)	% HUMEDAD ÓPTIMO
SM-01	LUTITA COLOR PARDO AMARILLO	17.77	42.81	29.70	13.11	68.16	31.84	0.00	1555.12	21.32
SM-02	LUTITA COLOR GRIS VERDOSO	15.63	38.63	32.20	6.43	66.58	33.42	0.00	1520.38	25.11

Tabla 5. Clasificación SUCS para dos muestreos realizados en talud del km 1.9.

MUESTRA	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	CLASIFICACIÓN SUCS	DESCRIPCIÓN SUCS
SM-01	LUTITA COLOR PARDO AMARILLO	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plásticidad.
SM-02	LUTITA COLOR GRIS VERDOSO	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plásticidad.

4.2.3. Ensayos Geofísicos

En la Figura 46 es posible evidenciar uno de los resultados del ensayo geofísico aplicado en este estudio, a partir del perfil unidimensional del subsuelo para configuración No. 1 del ensayo de refracción sísmica, ubicada en el pie del talud. Este perfil realiza una correlación de las velocidades P y S para cada estrato correspondiente a distintas profundidades (mayor detalle de los valores obtenidos en la geofísica aplicada en ANEXO 8).

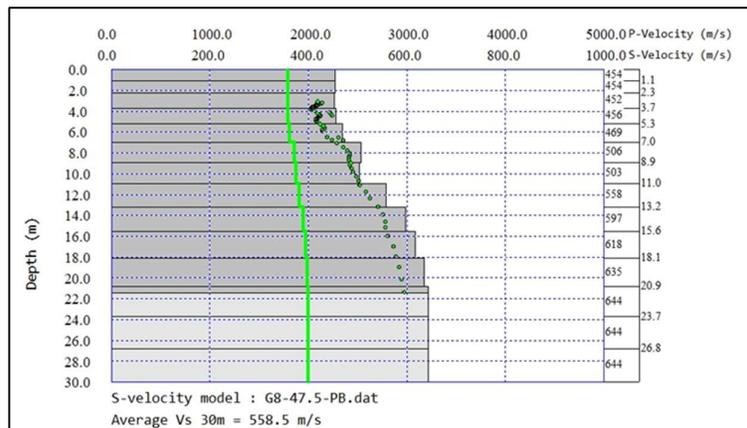


Figura 46. Perfil de Velocidades P y S a partir de Refracción Sísmica, configuración Línea No.1

En la Figura 47 es posible evidenciar el perfil unidimensional del subsuelo para configuración No. 2 del ensayo de refracción sísmica, ubicada la corona del talud. Este perfil realiza una correlación de las velocidades P y S para cada estrato correspondiente a distintas profundidades (mayor detalle de los valores obtenidos en la geofísica aplicada en ANEXO 9).

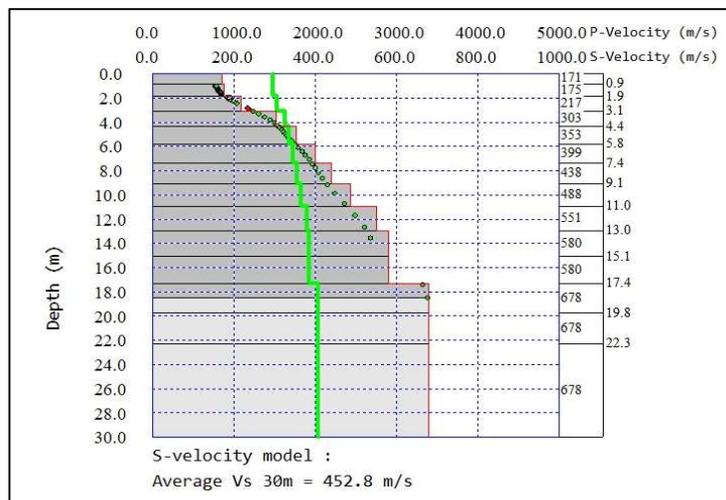


Figura 47. Perfil de Velocidades P y S a partir de Refracción Sísmica, configuración Línea No.2

Los resultados de este ensayo permiten identificar los subsuelos existentes en el talud a mayor profundidad que un ensayo tradicional, sin embargo, su información debe ser complementada con exploraciones físicas para establecer mejores criterios de diseño geotécnico.

4.2.4. Correlaciones para Parámetros Geotécnicos

Con los valores que se obtienen en la configuración de la línea de refracción sísmica No.1 (ubicada en el pie del talud) se procede a analizar los subsuelos existentes en la zona de estudio según la normativa vigente, en donde se evidencian suelos con características “suelos muy densos o roca blanda” según (NEC-SE-DS, 2015), correspondientes a perfiles tipo “C” para el diseño sísmico. Estos valores se exponen en la Tabla 6 de a continuación:

Tabla 6. Valores de Velocidad de Onda de Corte y Compresión para la Línea de Refracción Sísmica No.1 (Pie de talud), con sus respectivas correlaciones geotécnicas.

PIE DE TALUD						
Linea 1			520907.9 m; 9894506.1 m			
Prof.	Vs	Vp	NEC / IBC	γ^* (Est.)	ϕ	c
m	m/s	m/s		kg/m3	grados	KN/m2
0 - 2.3	454.4	1794.4	C	2239.2	21.8	26.9
2.3 - 3.7	456.9	1792.7	C	2238.9	21.8	27.1
3.7 - 7.0	506.9	1852.7	C	2249.5	22.1	29.1
10.9 - 13.2	597.6	1953.3	C	2267.0	22.7	32.7
13.2 - 18.1	635.2	1995.1	C	2274.1	23.0	34.1
18.1 - 20.9	635.2	2005.2	C	2275.9	22.9	34.0
20.9 - 23.7	644.4	2005.2	C	2275.9	23.0	34.5
23.7 - 26.8	644.6	2005.2	C	2275.9	23.0	34.5
23.8 - 29.9	644.4	2005.2	C	2275.9	23.0	34.5
30	∞	∞	-	-		

Con los valores que se obtienen en la configuración de la línea de refracción sísmica No.2 (ubicada en la corona del talud) se procede a analizar los subsuelos existentes en la zona de estudio según la normativa vigente, en donde se evidencian 2 tipos de suelos diferenciados a los 3.1 m de profundidad con las siguientes características según (NEC-SE-DS, 2015): desde el Nivel 0.00 de rasante hasta el Nivel -3.10 se evidencian “suelos rígidos” con un perfil de diseño sísmico tipo “D” y desde el Nivel -3.10 en adelante con “suelos muy densos o roca blanda” pertenecientes a perfiles tipo “C” para el diseño sísmico. Estos valores se exponen en la Tabla 7 de a continuación:

Tabla 7. Valores de Velocidad de Onda de Corte y Compresión para la Línea de Refracción Sísmica No.2 (Corona de Talud), con sus respectivas correlaciones geotécnicas.

CORONA DE TALUD						
Linea 2			520905.1 m; 9893416.2 m			
Prof.	VS	Vp	NEC / IBC	γ^* (Est.)	ϕ	c
m	m/s	m/s		kg/m3	grados	KN/m2
0 - 1.9	217.4	1531.3	D	2190.2	19.9	15.7
1.9 - 3.1	303.6	1627.0	D	2208.5	20.6	20.2
3.1 - 5.8	399.2	1733.1	C	2228.1	21.4	24.6
5.8 - 9.1	488.2	1831.9	C	2245.9	22.0	28.4
9.1 - 10.9	551.2	1901.9	C	2258.1	22.4	30.9
10.9 - 12.9	580.8	1934.7	C	2263.8	22.6	32.1
12.9 - 15.1	580.8	1934.7	C	2263.8	22.6	32.1
15.1 - 19.7	678.7	2043.3	C	2282.3	23.2	35.8
19.7 - 22.3	678.9	2043.3	C	2282.3	23.2	35.8
30	∞	∞	-	-		

4.3. Parámetros Geotécnicos en Diseño

A partir de la metodología de investigación geotécnica aplicada en el presente estudio, mediante diversos ensayos (SPT, refracción sísmica y de laboratorio) se determinaron las características físicas de los estratos del subsuelo,

evidenciadas en la Tabla 3Tabla 4¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Así también, con la correlación de estos datos y las ecuaciones de I.G. Mendel (2002) se han obtenido parámetros geotécnicos de diseño, presentados en la Tabla 6 y Tabla 7.

En la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se reúnen los estratos del subsuelo del talud, identificados con criterio geotécnico a partir de la compilación de información calculada en los diversos ensayos usados en este estudio.

Tabla 8. Materiales identificados en talud y sus respectivas propiedades geomecánicas

No. ITEM	DESCRIPCIÓN MATERIAL	γ	c	ϕ
		kN/m ³	KN/m ²	grados
ESTRUCTURA PRINCIPAL DE TALUD				
1	LUTITA AMARILLA 1 - FIRME	21.90	15.70	19.90
2	LUTITA AMARILLA 2 - COMPACTA	22.28	24.60	21.40
3	LUTITA AMARILLA 3 - COMPACTA	22.46	28.40	22.00
4	LUTITA VERDE - COMPACTA	22.62	31.70	22.60
5	DETRITOS GRIS VERDOSO	22.83	35.80	23.20
SUBSUELO EN PIE DE TALUD				
6	MATERIAL SUPERIOR EN PIE DE TALUD	22.49	29.00	22.10
7	MATERIAL INFERIOR EN PIE DE TALUD	22.75	34.30	23.00

Con el procedimiento que antecede, se procesa información del talud para su posterior ingreso de datos al software GEOSTUDIO, donde se realiza una reconstrucción geométrica del perfil en 2D del talud del km 1.9 la vía San Mateo – Santa Marianita con sus características geotécnicas de la estructura de suelo (Figura 48):

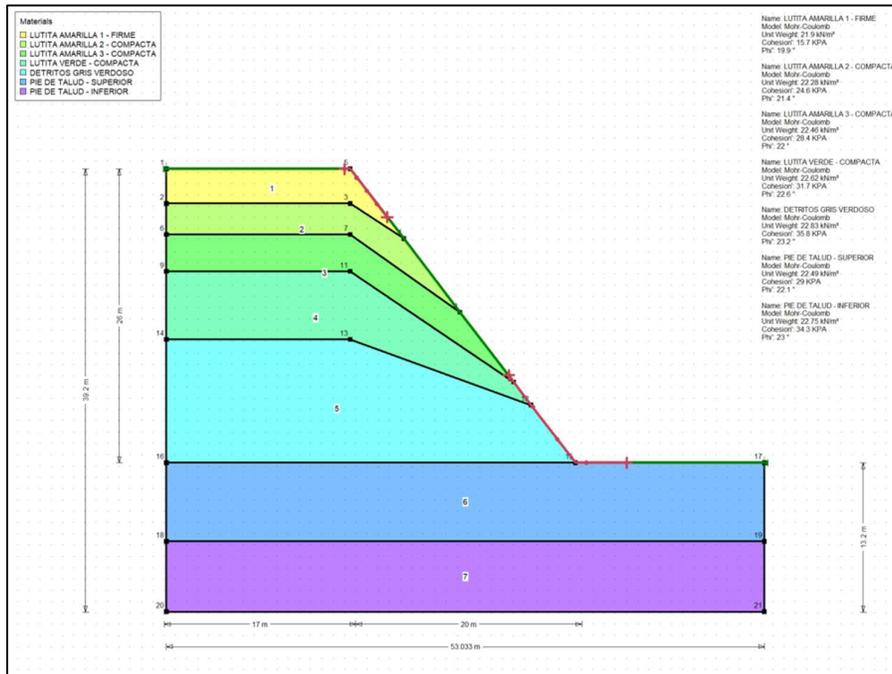


Figura 48. Perfil geométrico del talud km1.9 de la vía San Mateo - Santa Marianita, generado en software GEOSTUDIO

4.4. Resultado del Análisis Inverso del Colapso Existente en el Talud

4.4.1. Análisis Inverso del Talud Existente Bajo Condiciones Estáticas

El procesamiento del talud existente con el software GeoStudio (Figura 49) determina un factor de seguridad de 0.994, valor que deberá ser analizado con los requisitos mínimos de la normativa vigente para este tipo de infraestructura, pero que debido a que es menor a la unidad no es estable.

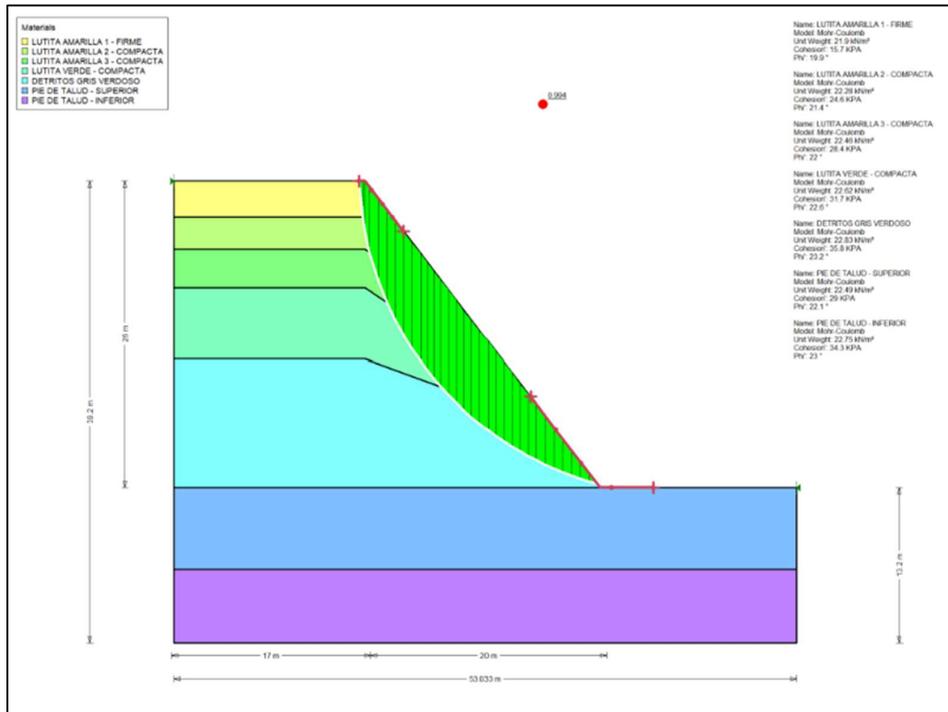


Figura 49. Estabilidad de talud existente colapsado en condiciones estáticas

4.4.2. Análisis Inverso del Talud Existente Bajo Condiciones Pseudoestáticas

Para el cálculo del coeficiente sísmico horizontal se procede a utilizar los valores de los factores sísmicos para los distintos tipos de suelo y según su zona sísmica, datos establecidos en la Normativa Ecuatoriana de la Construcción:

Tabla 9. Coeficientes de Perfil de Suelo y Factor Z según (NEC-SE-DS, 2015)

Tipo de Suelo	Zona sísmica	Factor Z	F_a
C	VI	≥ 0.5	1.18
D	VI	≥ 0.5	1.12

El presente caso de análisis pseudoestático prevé el uso de las condiciones más críticas (ver Tabla 8), esperando una respuesta elástica mayor en el suelo **tipo C** encontrado en los ensayos de refracción sísmica.

Se determina el coeficiente sísmico horizontal con la fórmula propuesta y los factores más críticos del tipo de suelo, determinados en la Tabla 8.

$$k_h = 0.6 * 0.5 * 1.18$$

$$k_h = 0.354$$

Con el cálculo del coeficiente de carga sísmica se genera el perfil del talud con sus propiedades geomecánicas para respectivo análisis en el software GeoStudio.

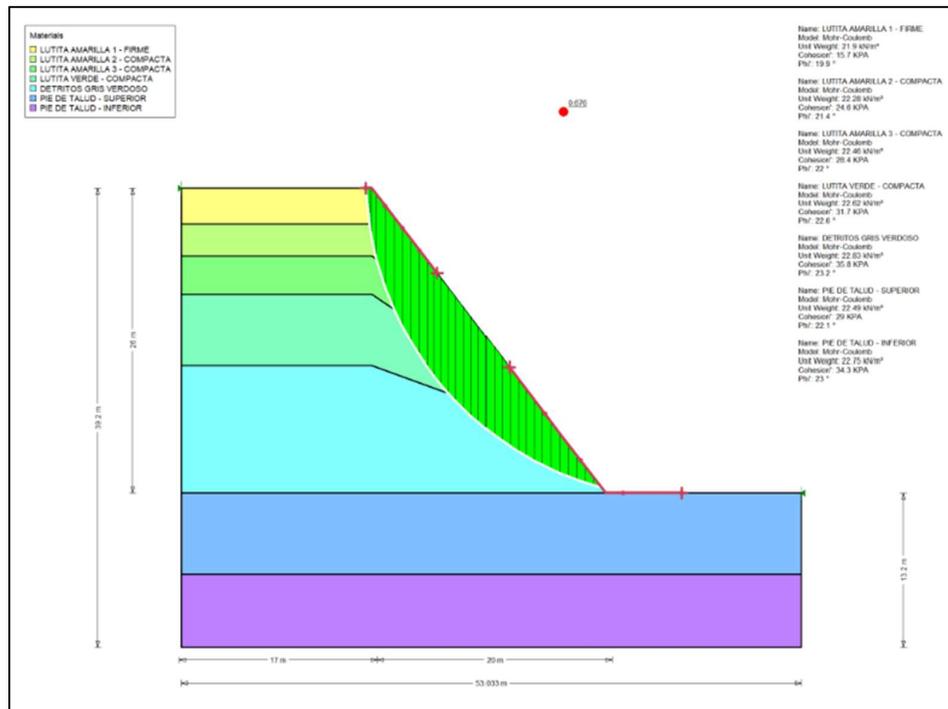


Figura 50. Estabilidad de talud existente en condiciones pseudoestáticas

El análisis de estabilidad del talud existente bajo condiciones pseudoestáticas determina que existe un factor de seguridad de 0.676 (Figura 50), valor que deberá ser analizado con los requisitos de normativa de diseño para este tipo de obras, pero que debido a que es menor a la unidad no es estable.

4.4.3. Resultados de Análisis Inverso Comparado Con Requerimientos de la NEC15

De acuerdo con la metodología aplicada en el acápite 3.2.8 del presente trabajo se evidencia que el talud existente en el km 1+900 de la vía San Mateo – Santa Marianita es necesario analizarlo bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Con el modelamiento en el software GeoStudio se evidencia que las condiciones geométricas y geotécnicas existentes en el talud **no cumplen** con los factores

de seguridad mínimos establecidos en la (NEC-SE-GC, 2015) para la estabilidad de taludes (ver Tabla 10). El presente análisis inverso corrobora técnicamente la no viabilidad del proceso constructivo existente, es por tal razón que ante las diversas situaciones que demandan resistencia de la estructura del talud en la actualidad se encuentra colapsado. A continuación, se establece un cuadro comparativo de los factores de seguridad determinados en el Análisis Inverso (Figura 49 y Figura 50), comparado con los requisitos mínimos de la normativa vigente:

Tabla 10. Factores de Seguridad para Análisis Inverso del talud existente.

ANÁLISIS TIPO	FACTOR DE SEGURIDAD
A. CONDICIONES ESTÁTICAS	
Back Analysis - Geometría Existente	0.994
F.S_diseño mayor a 1.5?	NO CUMPLE
B. CONDICIONES PSEUDOESTÁTICAS	
Back Analysis - Geometría Existente	0.676
F.S_diseño mayor a 1.05?	NO CUMPLE

4.5. Propuestas Constructivas para Mejora de Talud

La adecuada elección de una técnica para estabilización del talud permite mitigar riesgos de grandes deslizamientos, otorga garantías de sostenibilidad de la infraestructura en el tiempo y optimización de recursos al momento de invertir en el proyecto. Una de las técnicas más empleadas en la construcción de obras civiles para estabilizar taludes es la generación de terrazas sobre terrenos inclinados, mediante el movimiento de tierras, la cual se aplica en el presente estudio mediante diversas configuraciones geométricas y el uso de bermas a distintas alturas.

Con el propósito de brindar estabilidad al actual talud colapsado del km 1.9 se establece como iniciativa la actividad de generar terrazas o bermas de estabilización, con lo que se prevé quitar peso al talud de la masa de tierra desestabilizada mediante el movimiento de tierras a máquinas. A continuación, se plantean diversas propuestas de terracedo a máquina del presente talud para su respectivo análisis técnico:

- Propuesta 3:** se plantea mantener la pendiente existente en el talud de **1.2H-1.0V** y realizar 3 bermas intermedias de 5 m distribuidas de la siguiente manera: una berma a los 8 m de altura, una segunda berma a los 16 m de altura y la tercera berma a los 21 m de altura. La altura mencionada empieza como referencia desde el nivel del pie de talud, y el motivo de distribución de bermas a distintas alturas es dado a que en los estratos inferiores tienen suelos más competentes y compactos, donde existe mayor beneficio para la estabilidad con alturas mayores.

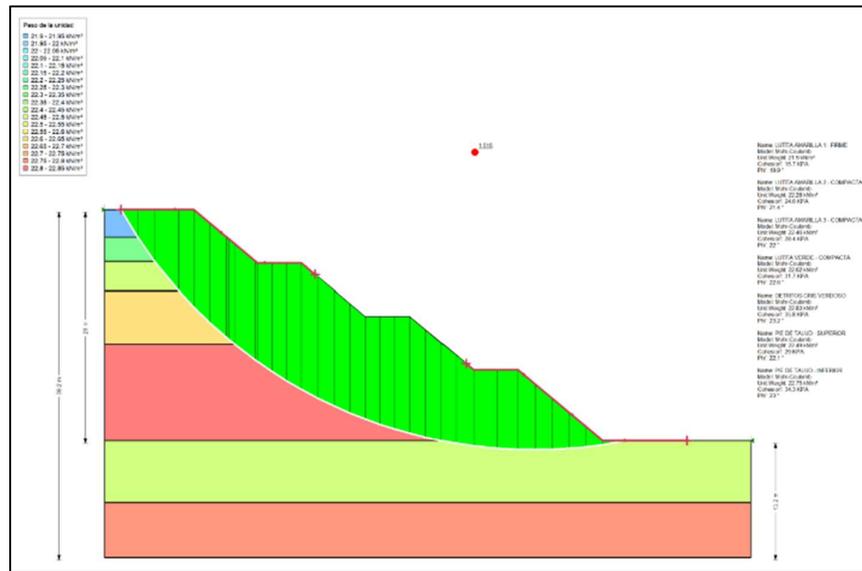


Figura 55. Análisis estático de propuesta 3.

A partir de la geometría de la **propuesta No. 3** se realiza el procesamiento del talud existente con el software GeoStudio en **condiciones estáticas** (Figura 55), donde se determina un **factor de seguridad de 1.515**.

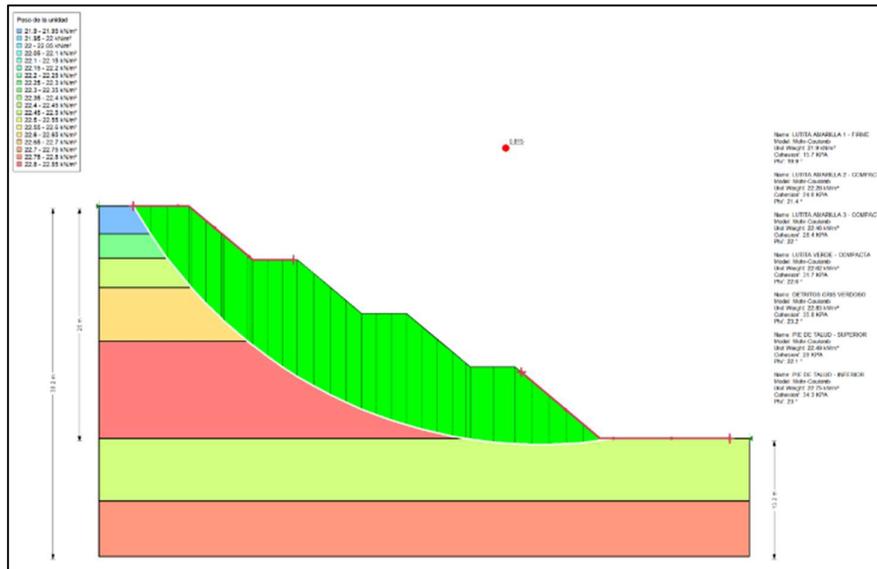


Figura 56. Primer análisis pseudoestático de propuesta 3 con sismo de 0.354g.

Con la propuesta geométrica anteriormente planteada se ejecuta el análisis de estabilidad del talud bajo **condiciones pseudoestáticas** (Figura 56), que determina que existe un **factor de seguridad de 0.815**, menor a la unidad.

Los análisis previamente realizados son establecidos en dos dimensiones, sin embargo, para cuantificar los volúmenes de ejecución de obra en el terraseo del talud y determinar el valor económico de las propuestas se necesita conocer la extensión longitudinal del talud. Esto es importante para la determinación de costos.

A partir de la información recopilada en campo y laboratorio se establece la necesidad de intervenir en estabilizar en el presente talud en una longitud de 75 m. A continuación, se detalla las áreas de intervención en perfiles determinados para cada propuesta de reconstrucción para estabilizar el talud:

Tabla 11. Áreas de intervención para estabilizar el talud, correspondientes a cada propuesta constructiva.

Extensión del Talud:	75	m
Áreas de Excavación por Propuesta		
Propuesta 1	198.00	m2
Propuesta 2	243.00	m2
Propuesta 3	325.60	m2

Las presentes propuestas constructivas establecen su presupuesto económico a partir de las cantidades de terraseo expuestas en Tabla 11 y su

correspondiente precio unitario referencial para la parroquia San Mateo dispuesto por (Rodríguez, Gómez, & Arboleda, 2023). En la Tabla 12 se evidencian las variaciones de las distintas propuestas de mejora en el talud, tanto en la cantidad de volumen de excavación como en sus respectivos presupuestos referenciales:

Tabla 12. Tabla de Cantidades y Precios para cada propuesta de mejora de talud

Propuesta	Rubro/Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario*	Total Propuesta
No. 1	Excavación con máquina en suelo (suelo rocoso), incluye desalojo	m3	14850.00	\$ 16.07	\$ 238,639.50
No. 2	Excavación con máquina en suelo (suelo rocoso), incluye desalojo	m3	18225.00	\$ 16.07	\$ 292,875.75
No. 3	Excavación con máquina en suelo (suelo rocoso), incluye desalojo	m3	24420.00	\$ 16.07	\$ 392,429.40

Las presentes propuestas constructivas para estabilización del talud del km 1.9 de la vía San Mateo – Santa Marianita requieren de análisis técnico que determine la optimización de recursos económicos y garantías técnicas de calidad en la reconstrucción del talud.

- **Criterio Técnico de las 3 Propuestas de Estabilización de Talud**

Según la Normativa Ecuatoriana de la Construcción, los análisis de estabilidad para cortes deben ser superior para cumplir con los factores de seguridad mínimos establecidos tanto para condiciones estáticas como para condiciones pseudoestáticas con demandas sísmicas.

Para las tres propuestas de mejora de estabilización del talud, establecidas en el presente capítulo, se procede a comparar los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas con la Tabla 4 de (NEC-SE-GC, 2015). La normativa vigente en Ecuador considera que el factor de seguridad mínimo en cortes para condiciones estáticas a largo plazo es de 1.5, mientras que para condiciones pseudoestáticas el mínimo es de 1.05.

Los planteamientos propuestos en el presente estudio demuestran que existirían mejoras considerables de estabilización con respecto al talud existente. Sin embargo, la propuesta No. 1 y No. 2 no superan al factor de seguridad mínimo

de la Tabla 4 de (NEC-SE-GC, 2015) en condiciones estáticas, así tampoco en condiciones con demandas sísmicas.

Por otro lado, la propuesta No. 3 (Figura 57) cumple con el factor de seguridad mínimo establecido por la normativa vigente para condiciones estáticas del talud, sin embargo, en condiciones de demandas sísmicas de 0.354g el análisis pseudoestático otorga un factor de seguridad de 0.815, cuando el mínimo establecido es de 1.05. Es necesario considerar que el coeficiente sísmico determinado en 0.354g es alto para el análisis pseudoestático, pues considera zonas con riesgo altamente sísmico, donde en un periodo de retorno de 475 años se prevé presenciar las más altas exigencias de los terremotos.

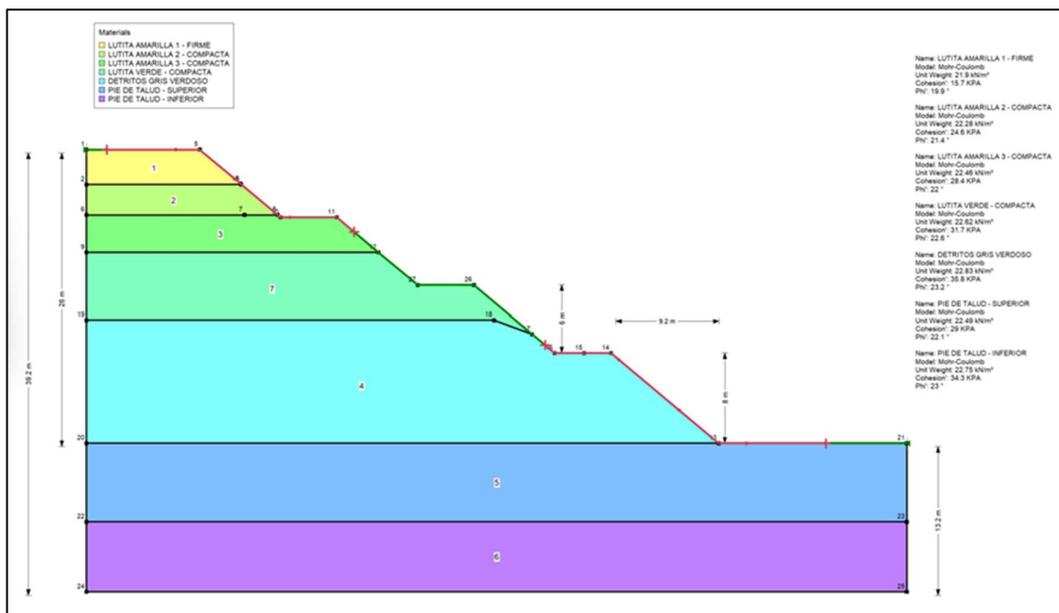


Figura 57. Planteamiento geométrico del talud con sus distribuciones litológicas en software GeoStudio.

La presente investigación expone distintos componentes que generan fiabilidad del estudio realizado en el talud y posibilitan la disminución de demandas en diseño influyentes en el factor de seguridad, tal como es el caso del criterio para el uso de un menor coeficiente horizontal sísmico en el análisis pseudoestático de la estabilidad del talud. Las justificaciones en el estudio para la flexibilización de criterios relacionados al factor de seguridad en condiciones sísmicas corresponden con el bajo nivel de incertidumbre epistémica en la caracterización geotécnica del talud obtenida por los diversos ensayos realizados (Cornforth, 2005), así como el bajo riesgo de posibles pérdidas humanas y una baja relación

costo de construcción ante costos de reparación en una posible desestabilización en condiciones sísmicas (Duncan et al., 2014).

El uso de un coeficiente horizontal sísmico menor puede ser relacionado de forma directamente proporcional tanto a la reducción del factor de zona sísmica “Z” como al coeficiente de amplificación del suelo ante demandas sísmicas, los mismos que han sido determinados originalmente por (NEC-SE-DS, 2015) en un estudio de peligro sísmico del 10% de probabilidad de ocurrencia en 50 años (475 años de periodo de retorno).

En el presente estudio se prevé plantear **una propuesta que cumpla con criterios técnicos y sea viable económicamente**, es por tal razón, que se elige utilizar la propuesta No.3 que cumple el análisis estático para un nuevo análisis pseudoestático. Este **nuevo análisis pseudoestático de la propuesta No. 3 considera una exigencia sísmica menor, previendo que la inversión económica mantenga su vida útil** hasta tener demandas sísmicas altas **en una probabilidad de ocurrencia del 10% en 25 años**, un periodo de retorno aproximado a la mitad planteado por el estudio de peligro sísmico de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción. Por consiguiente, **para brindarle factibilidad económica a la inversión se establece un valor de aceleración sísmica “Z” relativo a la mitad** del determinado con el procedimiento de la (NEC-SE-DS, 2015), obteniendo un **nuevo coeficiente horizontal sísmico de 0.177g** para el análisis pseudoestático de la propuesta No. 3.

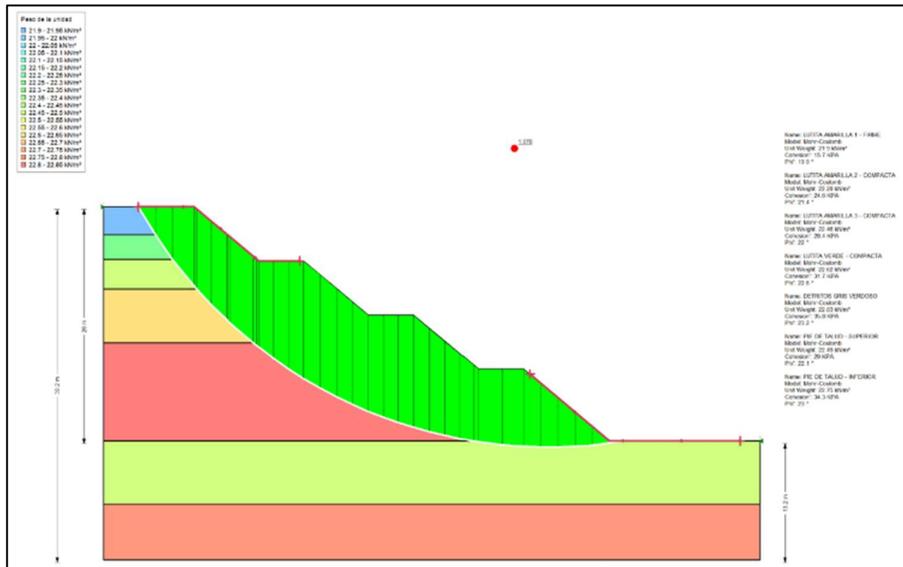


Figura 58. Segundo análisis pseudoestático de propuesta 3 con sismo de 0.177g.

Con la geométrica establecida en la propuesta No. 3 se establece un **factor de seguridad de 1.07** bajo **condiciones pseudoestáticas** (Figura 58), siendo mayor al indicado por la Normativa Ecuatoriana de la Construcción.

4.6. Resultados de Propuestas para Estabilizar el Talud

Las propuestas de mejora geotécnica para estabilizar el talud existente en el km 1+900 se establecen en la sección 4.5. Estos planteamientos consideran la estabilización del talud mediante el método de terraceo, ya que en la actualidad existe un volumen considerable de masa de suelo desestabilizada que es necesario remover con maquinaria pesada.

Para validar las propuestas de estabilización del talud se realizan análisis que cumplan con criterios de establecidos en la (NEC-SE-GC, 2015), para lo cual es necesario verificar que los factores de seguridad determinados en condiciones estáticas y pseudoestáticas sean superior a los mínimos requeridos en la normativa vigente.

4.6.1. Propuesta 1 de Mejora Geotécnica

A partir de la necesidad de la plantear alternativas de mejora geotécnica para estabilizar el talud se procede a establecer una primera propuesta de

intervención por medio de terraceo con un volumen de excavación de 14.850 m³ y un presupuesto de \$238.639,50 (Tabla 12). En esta propuesta se prevé modificar la pendiente existente del talud de 1.0H-1.3V en 1.0H-1.0V, en la misma que se generarían 2 bermas intermedias de 5 m distribuidas de la siguiente manera: una berma a los 10 m de altura y la segunda berma a los 18 m de altura, con el propósito de dar mayor estabilidad al corte generado. En la Figura 51 y Figura 52 se obtienen los factores de seguridad de la presente propuesta geotécnica, donde al compararlos con los valores mínimos establecidos para condiciones de corte en la (NEC-SE-GC, 2015) se determina la **no viabilidad técnica** de ejecutar la intervención de estabilidad del talud con lo propuesto (ver Tabla 13).

Tabla 13. Factores de seguridad de la Propuesta No.1 y verificación con mínimo establecido en la NEC15

PROPUESTA No. 1	
ANÁLISIS TIPO	FACTOR DE SEGURIDAD
A. CONDICIONES ESTÁTICAS	
Back Analysis - Geometría Existente	1.339
F.S_diseño mayor a 1.5?	NO CUMPLE
B. CONDICIONES PSEUDOESTÁTICAS	
Back Analysis - Geometría Existente	0.763
F.S_diseño mayor a 1.05?	NO CUMPLE

4.6.2. Propuesta 2 de Mejora Geotécnica con Análisis de Estabilidad

La segunda propuesta de mejora geotécnica pretende un movimiento de tierras de excavación en talud de 18.225 m³ con un presupuesto \$292.875,75. En esta propuesta se plantea modificar la pendiente existente del talud de 1.0H-1.3V en 1.0H-1.0V, en la misma que se generarían 3 bermas intermedias de 5 m distribuidas de la siguiente manera: una berma a los 8 m de altura, la segunda berma a los 16m de altura y la tercera a los 23 m de altura. En la Figura 53 y Figura 54 se obtienen los factores de seguridad de la presente propuesta geotécnica, donde al compararlos con los valores mínimos establecidos para condiciones de corte en la (NEC-SE-GC, 2015) se determina la **no viabilidad técnica** de ejecutar la intervención de estabilidad del talud con lo propuesto (ver Tabla 14).

Tabla 14. Factores de seguridad de la Propuesta No.2 y verificación con mínimo establecido en la NEC15

PROPUESTA No. 2	
ANÁLISIS TIPO	FACTOR DE SEGURIDAD
A. CONDICIONES ESTÁTICAS	
Back Analysis - Geometría Existente	1.401
F.S_diseño mayor a 1.5?	NO CUMPLE
B. CONDICIONES PSEUDOESTÁTICAS	
Back Analysis - Geometría Existente	0.768
F.S_diseño mayor a 1.05?	NO CUMPLE

4.6.3. Propuesta 3 de Mejora Geotécnica con Análisis de Estabilidad

Con la tercera propuesta de intervención por medio de terraceo se pretende realizar cortes del talud con un volumen de 23.420 m³ con una inversión de \$392.429,40. En esta propuesta se pretende modificar la pendiente del talud de 1.0H-1.3V en 1.2H-1.0V, otorgando mayor estabilidad autosoportante del suelo a mayor inclinación de la pendiente. En esta propuesta también se generarían 3 bermas intermedias de 5 m distribuidas de la siguiente manera: una berma a los 8 m de altura, la segunda berma a los 16 m de altura y la tercera con 21 m de altura. En la Figura 55 se determina el factor de seguridad de esta propuesta en condiciones estáticas, donde al compararlos con los valores mínimos establecidos para condiciones de corte en la (NEC-SE-GC, 2015) se determina que **bajo condiciones estáticas sí cumple** con la normativa vigente (Tabla 15). En la Figura 56 se observa el factor de seguridad de la presente propuesta para condiciones pseudoestáticas de demandas sísmicas de 0.354g donde se evidencia el **no cumplimiento** del factor de seguridad mínimo establecido por la normativa (Tabla 15).

Tabla 15. Factores de seguridad de la Propuesta No.3 y verificación con mínimo establecido en la NEC15, con demanda sísmica de 0.354g

PROPUESTA No. 3	
ANÁLISIS TIPO	FACTOR DE SEGURIDAD
A. CONDICIONES ESTÁTICAS	
Back Analysis - Geometría Existente	1.515
F.S_diseño mayor a 1.5?	SI CUMPLE
B. CONDICIONES PSEUDOESTÁTICAS - SISMO DE 0.354g	
Back Analysis - Geometría Existente	0.815
F.S_diseño mayor a 1.05?	NO CUMPLE

En consideración a los criterios técnicos expuestos en las varias alternativas analizadas, las condiciones de riesgo actual en el talud colapsado y su volumen de suelo suelto, es necesario plantear una alternativa que brinde de estabilidad al presente talud de estudio bajo parámetros que sean viables de forma técnica y económica. Con los resultados expuestos se evidencia que la viabilidad económica se vuelve poco atractiva si se sigue aumentando volumen de corte para invertir en la estabilización ante altas demandas sísmicas de 0.354g.

Conociendo que el coeficiente sísmico de 0.354g es calculado en un periodo de retorno de 475 años según (NEC-SE-DS, 2015), se plantea la propuesta No. 3 para condiciones pseudoestáticas de exigencias sísmicas menores, establecidas en la sección 4.5 (pp. 67-69), ante un menor periodo de retorno con un coeficiente horizontal sísmico de 0.177g (Figura 58).

Tabla 16. Factor de seguridad de Propuesta No.3 bajo condiciones pseudoestáticas, ante demanda sísmica de 0.177g

PROPUESTA No. 3	
ANÁLISIS TIPO	FACTOR DE SEGURIDAD
C. CONDICIONES PSEUDOESTÁTICAS - SISMO DE 0.177g	
Back Analysis - Geometría Existente	1.07
F.S_diseño mayor a 1.05?	SI CUMPLE

En la Tabla 16 se evidencia que el análisis pseudoestático realizado con condiciones de sismo de 0.177g ha determinado que el factor de seguridad **sí cumple** con lo requerido por la normativa vigente; es por tal motivo que con criterio técnico-económico esta propuesta se plantea como la más viable para estabilización el talud del km 1+900 de la vía San Mateo - Santa Marianita del cantón Manta.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones a partir de todo el trabajo realizado, así también se incluyen recomendaciones de futuras investigaciones que pueden ser consideradas dentro de esta temática.

5.3. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrollaron diversos ensayos geotécnicos de campo y laboratorio que permitieron determinar las características geométricas, geológicas y geotécnicas del talud más crítico de la vía San Mateo – Santa Marianita, ubicado en km 1+900. El procesamiento de esta información obtenido de un análisis inverso indica que el colapso del mencionado talud pudo generarse por ausencia de criterio geotécnico para realizar el corte del talud, pues aún sin considerar los efectos de sismos (condición estática) los resultados obtenidos determinan que las fuerzas actuantes son mayores a las fuerzas resistentes de la infraestructura, con valores del factor de seguridad menor a la unidad.

Del proceso fotogramétrico se desarrolló un modelo de elevación digital (DEM) con el que se determinaron las condiciones geométricas determinantes del talud existente de forma adecuada, tal es el caso de la pendiente extendida 1.0H-1.3V que pretendía servir de autoaporte al corte de suelo para estabilizar la infraestructura y la máxima altura del talud de 26 m.

En la zona de estudio se evidenció distintos tipos de suelos, materiales de coloración pardo-amarillo y gris-verdoso, que, según la interpretación de resultados de los ensayos de SPT, refracción sísmica y de laboratorio corresponden a: arcillas de plasticidad baja-media, arcillas arenosas, arcillas limosas, limos arcillosos o limos con arena muy fina. En atención a sus propiedades geomecánicas y geofísicas se determinaron que en los suelos de la parte superior del talud existen menor velocidad de onda de corte y de compresión, así como mantienen una menor compacidad; sin embargo, a medida que los suelos se ubican a mayor profundidad sus propiedades de resistencia mejoran hasta encontrar estratos muy compactos donde el ensayo SPT generó “rechazo” durante su ejecución, al encontrar estratos muy

competentes. Este análisis geológico y geotécnico expuesto tanto en la metodología y resultados concluye que en la zona de estudio se evidencian caracterizaciones físicas de materiales correspondientes a la formación San Mateo, propia de la región.

Luego de los análisis de estabilidad en condiciones estáticas y pseudoestáticas realizados en el talud existente y en varias propuestas de mejora geotécnica para su estabilización, se determina que su principal problema de desestabilización se produce por la prolongada extensión del talud en sus 26 m de altura sin bermas de “descanso” o estabilización; estas condiciones en las que el peso propio de la masa de suelo es inestable y más aún con detonantes sísmicos que podría colapsar su estructura autosoportante.

Se exponen tres propuestas de estabilización del talud, de las cuales después de un análisis técnico solo la tercer propuesta (terraceo 1.2H-1.0V con bermas) cumple con el factor de seguridad mínimo requerido en condiciones estáticas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción vigente, mientras que en el análisis pseudoestático las tres propuestas no satisfacen los requisitos de factor de seguridad mínimo para una alta demanda sísmica de 0.354g, la misma que se calcula para un periodo de retorno de 475 años.

Las tres propuestas de estabilización del talud presentadas en este estudio fueron generadas de manera que el primero y segundo planteamiento consideran el menor volumen de excavación con una pendiente de talud de 1.0H-1.0V y distintas formas de disposición de bermas, mientras que, la tercera propuesta establece condiciones de corte de mayor magnitud con un talud de 1.2H-1.0V. Con los análisis de estabilidad de talud se determinó que las propuestas a mayor corte mejoran sus condiciones de estabilidad local y global.

Por consiguiente, conociendo que la tercera propuesta de estabilización del talud ya genera un volumen muy alto de excavación (24.420 m³), con un presupuesto referencial elevado de \$392.429,40 se determina que por viabilidad técnica y económica es preferente realizar un análisis pseudoestático con condiciones con menor demanda sísmica, recurrente en un periodo de retorno menor. Con el

nuevo análisis pseudoestático, frente a una demanda sísmica de 0.177g, la propuesta No. 3 se concluye que sí cumple los factores de seguridad mínimos requeridos por la normativa vigente en consideraciones pseudoestáticas y cumple con factibilidad técnica a un costo de inversión ejecutable para el proyecto ante una probabilidad de ocurrencia del 10% de altas demandas sísmicas en 25 años. Es importante indicar que la presencia de un sismo de una magnitud alta, si bien podría ocasionar una inestabilidad del talud, este no causaría afectaciones de vida humanas pues no se encuentran infraestructuras habitadas en el talud. Es por tal razón que la tercera propuesta otorga viabilidad técnica y económica al proyecto de estabilización de talud.

5.4. RECOMENDACIONES

Para futuras líneas de investigación se recomienda realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en este trabajo mediante el método de Equilibrio Límite frente a una estabilidad de taludes con análisis de elementos finitos. El uso del método numérico de elementos finitos podría modelar la estabilidad del talud con mayor discretización desde la distribución heterogénea del suelo, su capacidad de deformación y el comportamiento no lineal ante las distintas solicitudes o demandas de cargas a la estructura.

En consideración a que el presente proyecto de construcción de la vía San Mateo – Santa Marianita se encuentra paralizado y su proyección geométrica pretende atravesar una zona montañosa con una excavación de gran magnitud en el kilómetro 2+600 se sugiere realizar un análisis geotécnico que garantice estabilidad en el área de corte, para así evitar problemas de inestabilidad existentes en el talud del kilómetro 1+900.

Para las estructuras de talud del proyecto vía San Mateo – Santa Marianita se recomienda no construir taludes de gran altura con pendientes extendidas, pues las condiciones litológicas determinadas en el presente estudio no permiten asegurar su sostenibilidad en el tiempo.

Se recomienda que en la construcción de la estabilidad de talud se establezcan obras de drenaje que ayuden a evitar la acumulación o saturación con aguas

superficiales en el talud, cuyo propósito es evitar el riesgo de deslizamientos o erosión. Existen medidas comunes en este tipo de obras, tal como la aplicación de cunetas o zanjas ubicadas a lo largo de las bermas donde se deberá considerar su respectiva evacuación en zonas técnicamente protegidas para la salida del agua.

Así también, se sugiere que en los taludes del proyecto o la zona de estudio se establezcan bermas en máximo 8 m de altura, con el propósito de brindar mayor estabilidad, controlar su erosión y dar accesibilidad para actividades de monitoreo, inspección y mantenimiento del sistema de contención.

Por otro lado, existen obras complementarias que podrían contribuir con la mitigación de erosión y ayudar técnicamente a la estabilidad del talud, como es el caso del uso de mantos geosintéticos anclados en el talud. Se recomienda que futuros análisis evalúen su integración con distintos tipos de tejido y propiedades de tracción o permeabilidad, para examinar sus beneficios y una oportuna evaluación económica que determine su factibilidad de inversión en el proyecto.

De la misma manera, es recomendable recurrir a un asesoramiento técnico ambiental que evalúe medidas de conservación y protección al medio ambiente durante la etapa constructiva de la estabilización del talud. En este proceso es necesario tener en cuenta que también existen técnicas de ingeniería ambiental que mitigan el impacto de este tipo de obras y a su vez aportan a la biodiversidad y a la estabilidad del talud, tal es el caso de siembra de especies vegetales que se usan en terrazas para contribuir con mayor estabilidad a partir de un enraizamiento profundo de sus plantas.

Finalmente, previo a la construcción de obras de talud con gran altura o magnitud, se recomienda realizar adecuados estudios geotécnicos que permitan identificar las propiedades geotécnicas del suelo, proponer soluciones que sean sostenibles y también evitar deslizamientos que podrían generar lamentables pérdidas, tales como humanas o materiales.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Almandoz, A. (2018). Modernización Urbana en América Latina, de las grandes aldeas a las metrópolis masificadas. Santiago de Chile: Colección Estudios Urbanos UC.
- ASTM-D 1557. (July de 2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effor (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). Obtenido de American Society of Testing Materials: <https://www.astm.org/d1557-12r21.html>
- ASTM-D 1586. (2011). Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. Obtenido de American Society of Testing Materials: https://www.astm.org/d1586_d1586m-18e01.html
- ASTM-D 2487. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Obtenido de American Society of Testing Materials: <https://www.astm.org/d2487-17.html>
- ASTM-D 4318. (2017). Método de Ensayo Estándar para Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos. Obtenido de American Society of Testing Materials: <https://www.astm.org/d4318-17e01.html>
- Bell, F. (2007). Engineering Geology. Gran Bretaña: Elsevier.
- Bojorque, J. (2016). Back-Analysis of Slope Failures by Numerical Techniques. Obtenido de Universidad de Cuenca: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/29247/1/documento.pdf>
- Bonilla, L., & Marrugo, J. (2021). Análisis De Las Correlaciones Utilizadas En La Determinación De Parámetros Geomecánicos, Mediante La Velocidad De Onda De Corte (Vs) Y/O La Velocidad De Compresión (Vp), Obtenidas A Partir De Ensayos Geofísicos . Obtenido de Universidad De Cartagena.
- Bowles, J. (1997). Foundation Analysis and Design. Illinois: McGraw Hill Companies Inc.
- Brady, B., & Brown, E. (2005). Rock Mechanics for underground mining. Australia: Kluwer Academic Publisher.
- Bristow, C., & Hoffstetter, R. (1977). Amérique Latine, Equateur incl. Galapagos. Union Internationale des Sciences Geologiques.

- Carcedo, A., & Posse, A. (2006). Manual de Ingeniería de Taludes. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Chow et al. (1998). Applied Hidrology. Singapore: McGraw-Hill Education.
- Cornforth, D. (2005). Landslides in Practice. New Jersey: Wiley & Sons.
- Dal Moro, G. (2015). Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Amsterdam: Elsevier.
- Das, B. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Mexico: CENGAGE Learning.
- De La Cruz, L., & Tunque, L. (2015). Inestabilidad de Taludes en el Sector de Santa Bárbara de la Ciudad de Huancavilca. Huancavilca: Universidad Nacional de Huancavilca.
- Dobrin, M., & Savit, C. (1988). Introduction to Geophysical Prospecting. Houston: McGraw-Hill.
- Duncan et al. (2014). Soil Strength and Slope Stability. New Jersey: Wiley & Sons INC.
- Ferrer, M. (1987). Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas. Madrid: Serie de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.
- Fredlund et al. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. New Jersey: John Wiley & Sons INC.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación SA.
- Holtz, R., & Kovacs, W. (2010). An Introduction to Geotechnical Engineering. New Jersey: Pearson.
- Huvaj-Sarihan, N. (2008). Evaluation of the rate of movement of a reactivated landslide. GeoEdmonton.
- Lambe, W., & Whitman, R. (1969). Soil Mechanics. New York: Wiley & Sons.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2006). Close Range Photogrammetry. Dunbeath: Whittles Publishing.
- MAGAP-SIGTIERRAS. (Diciembre de 2015). Cartografía de Geomorfología escala 1:25000. Obtenido de Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica: http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/Geomorfologia_16122015

- MEM. (JUNIO de 2021). MINISTERIO DE ENERGÍAS Y MINAS, DIRECCIÓN NACIONAL DE GEOLOGÍA. Obtenido de MAPA GEOLOGICO DEL ECUADOR:
https://www.inamhi.gob.ec/docum_institucion/MapasBiblioteca/Geolog-Ecuador-25pc.pdf
- Naranjo, H. (Febrero de 2010). Análisis Comparativo De Cálculo De Capacidad Portante En Base A Geofísica Y Método Convencional Caso Práctico: Puente Sobre El Río Maicito. Obtenido De Facultad De Ingenierías: Universidad Politécnica Salesiana:
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4459>
- NEC-SE-DS. (2015). Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente. Obtenido de MIDUVI: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- NEC-SE-GC. (2015). Norma Ecuatoriana de La Construcción. Obtenido de Geotécnica y Cimentaciones: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/7.-NEC-SE-GC-Geotecnia-y-Cimentaciones.pdf>
- NEVI-12-MTOP. (2013). Norma Para Estudios Y Diseños Viales. Quito, Subsecretaría de Infraestructura del Transporte.
- Novotny, J. (Noviembre de 2013). Varnes Landslide Classification (1978). Obtenido de Addis Ababa University:
http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove-materialy/2_Varnes_landslide_classification.pdf
- Núñez, E., & Dugas, F. (1986). Guía Geológica Del Sur Oeste De La Costa Ecuatoriana. Obtenido de Escuela Superior Politécnica del Litoral; Consejo Nacional de Universidades y Escuelas Politécnicas:
https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-07/21572.pdf
- Parra, H. (2016). Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador Continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid:
https://oa.upm.es/39353/1/HUMBERTO_PARRA_CARDENAS_V-2.pdf
- Pedroja, K., Dumont, J., Lamothe, M., Ortlieb, L., Collot, J., Ghaleb, B., . . . Labrousse, B. (2006). Plio-Quaternary uplift of the Manta Peninsula and

- La Plata Island and the subduction of the Carnegie Ridge, central coast of Ecuador. *ELSEVIER*, 21.
- Ramirez, P., & Alejano, L. (2004). *Mecanica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Reyes, P., & Michaud, F. (2012). *Mapa Geológico de la Margen Costera Ecuatoriana (1:500000)*. (E. PetroEcuador, Ed.) Quito, Ecuador. Obtenido de *Mapa Geologico de la Margen Costera Ecuatoriana (1:500000)*.
- Rodriguez, E., Gómez, F., & Arboleda, R. (Marzo de 2023). G8 PRESUPUESTO-Grupo 8 - Cshocrbc - Construcción De Redes De Alcantarillado Y Obras Complementarias En La Parroquia San Mateo, Ciudad De Manta, Provincia De Manabi. Obtenido de Sistema Oficial de Contratación Pública del Ecuador: https://www.compraspublicas.gob.ec/ProcesoContratacion/compras/PC/informacionProcesoContratacion2.cpe?idSoliCompra=6f1IUNII0L7ucy9qfP1qISixwU2fBe7NE8OXsO28Q_4,
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*. Bucaramanga: División de Publicaciones UIS.
- Turner, A., & Schuter, R. (1996). *Landslides Investigation and Mitigation*. Washington: Transportation Research Board.
- USGS. (July de 2004). *Landslide Types and Processes*. Obtenido de US Geological Survey Landslide Program: <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>
- Valiente, R., Sobrecases, S., & Díaz, A. (2016). *Universitat Politecnica de Valencia*. Obtenido de *Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo*: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76781/taludes.pdf>
- Westoby et al. (Septiembre de 2012). Structure-from Motion photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300-314. Obtenido de *ELSEVIER*.
- Zhou, Y. (2006). *Geotechnical Engineering Slope Stability: Continuing Education and Development Inc.*

7. ANEXOS

• ENSAYOS REALIZADOS PARA EL PRESENTE TALUD

ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN PARA PROPÓSITOS DE INGENIERÍA (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS) SUCS						
PROYECTO: Sondeos en Talud km1.9 de la Vía San Mateo-Santa Marianita del cantón Manta.						
DESCRIPCIÓN: LUTITA COLOR PARDO AMARILLO			MATERIAL: EXPUESTOS EN TALUD			
FECHA: 22 de febrero de 2023			ENSAYO No: SM-01			
UBICACIÓN: Talud con falla en la vía San Mateo-Santa Marianita, INICIO			ENSAYADO POR: Josselyn Velez			
			COTA: (m)			
Valor de:		P. Húmedo + cápsula	P. Seco + cápsula	Peso cápsula	W%	Resultados
1. CONTENIDO DE AGUA		348.30	305.70	66.00	17.77	17.8
		2. LIMITE LIQUIDO				
Golpes						
35		35.24	29.85	16.33	39.87	42.8
29		41.20	34.12	17.29	42.07	
24		41.07	33.81	17.28	43.92	
15		40.64	33.18	16.90	45.82	
3. LIMITE PLASTICO		17.79	15.31	6.82	29.21	29.7
		20.79	17.56	6.86	30.19	
4. GRANULOMETRIA				5. RESUMEN		
Peso total del material = 200				% de Grava = 0		
Peso inicial seco para lavado = 169.3				% de Arena = 32		
				% de Finos = 68		
				Límite Líquido LL = 43		
				Límite Plástico LP = 30		
				Índice Plástico IP = 13		
				% Humedad w = 18		
				6. CLASIFICACION		
				SUCS: ML		
				AASHTO: A-7-5		
				IG(86): 8.7		
				IG(45): 8.3		
Tamiz		Pes. Ret. acumulado	% Retenido acumulado	% que pasa		
4"		0	0.0	100.0		
3"		0	0.0	100.0		
1"		0	0.0	100.0		
3/4"		0	0.0	100.0		
No. 4		0	0.0	100.0		
No. 10		10.1	6.0	94.0		
No. 40		25.9	15.3	84.7		
No. 200		53.9	31.8	68.2		
7. DESCRIPCION SUCS: Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plásticidad.						
LÍMITE LÍQUIDO						

ANEXO 1. Resultado de Clasificación SUCS de Muestra 1 tomada en Reconocimiento Inicial del Talud (Realizado de forma colaborativa y coordinada con la empresa MACMOR CONSULTORA Y ASOCIADOS S.A.)

**ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN PARA PROPÓSITOS DE INGENIERÍA
(SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS) SUCS**

PROYECTO: Sondeos en Talud km1.9 de la Vía San Mateo-Santa Marianita del cantón Manta.

DESCRIPCION: LUTITA COLOR PARDO AMARILLO	MATERIAL: EXPUESTOS EN TALUD
FECHA: 22 de febrero de 2023	ENSAYO No: SM-01
	ENSAYADO POR: Josue Pesantez

MASA DEL CILINDRO (P7)	3728
VOLUMEN DEL CILINDRO (V)	948
MASA DEL MARTILLO (Kg.)	4.54
ALTURA DE CAÍDA DEL MARTILLO (cm.)	45.72
TIPO DEL ENSAYO	Modificado Ø=4'
# DE CAPAS	5
# DE GOLPES POR CAPA	25

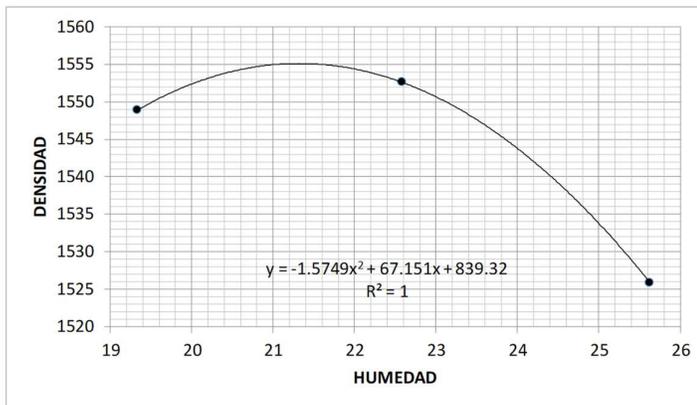
Observaciones:
NORMAS DE REFERENCIA
ASTM D 698-07
ASTM D 1557-07
AASHTO T 99-15
AASHTO T 180-15

UBICACIÓN:

Talud con falla en la via San Mateo-Santa Marianita

DATOS DEL ENSAYO

PUNTO #	1	2	3	4	5	6
RECIPIENTE #	A	B	C			
MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA (P1)	113.58	108.09	130.63			
MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA (P2)	101.93	95.60	112.36			
MASA DE AGUA (P3 = P1 - P2)	11.65	12.49	18.27			
MASA DE RECIPIENTE (P4)	41.67	40.29	41.07			
MASA DE MUESTRA SECA (P5 = P2 - P4)	60.26	55.31	71.29			
% DE HUMEDAD (W = P3 × 100 ÷ P5)	19.33	22.58	25.63			
% DE HUMEDAD PROMEDIO	19.33	22.58	25.63			
% DE HUMEDAD AÑADIDA AL SUELO	6	9	12			
MASA DE CILINDRO + SUELO HÚMEDO (P6)	5480	5532	5545			
MASA DE SUELO HÚMEDO (P8 = P6 - P7)	1752	1804	1817			
DENSIDAD HÚMEDA DEL SUELO (Dh = P8 ÷ V)	1848	1903	1917			
DENSIDAD SECA DEL SUELO (Ds = Dh ÷ (1 + W ÷ 100))	1549	1553	1526			



RESULTADOS

Densidad Seca Máxima
1555 Kg./m³

% de Humedad Óptima
21.32 %

ANEXO 2. Resultado de Ensayo de Proctor para Muestra 1 tomada en Reconocimiento Inicial del Talud (Realizado de forma colaborativa y coordinada con la empresa MACMOR CONSULTORA Y ASOCIADOS S.A.)

ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN PARA PROPÓSITOS DE INGENIERÍA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS) SUCS ASTM D 2487, D 2216, D 4318, D 422						(SISTEMA										
PROYECTO: Sondeos en Talud km1.9 de la Vía San Mateo-Santa Marianita del cantón Manta.																
DESCRIPCIÓN: LUTITA COLOR GRIS VERDOSO			MATERIAL: DE TALUD													
FECHA: 17 de febrero de 2023			ENSAYO No: SM-02													
UBICACIÓN: Talud con falla en la vía San Mateo-Santa Marianita, FINAL			ENSAYADO POR: Josselyn Velez													
			COTA: (m)													
Valor de:		P. Húmedo + cápsula	P. Seco + cápsula	Peso cápsula	W%	Resultados										
1. CONTENIDO DE AGUA		157.04	146.28	77.45	15.63	15.6										
		Golpes														
		30	35.96	16.84	35.09	38.6										
2. LIMITE LIQUIDO		24	35.62	17.17	39.84											
		20	34.45	16.96	42.60											
		15	33.55	16.90	47.21											
3. LIMITE PLASTICO		35.61	30.69	15.67	32.76	32.2										
		22.65	18.65	6.00	31.65											
4. GRANULOMETRIA				5. RESUMEN												
Peso total del material = 200				% de Grava = 0												
Peso inicial seco para lavado = 161.3				% de Arena = 33												
				% de Finos = 67												
				Límite Líquido LL = 39												
				Límite Plástico LP = 32												
				Índice Plástico IP = 7												
				% Humedad w = 16												
				6. CLASIFICACION												
				SUCS: ML												
				AASHTO: A-4												
				IG(86): 6.3												
				IG(45): 6.3												
7. DESCRIPCION SUCS: Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.																
<p style="text-align: center;">LÍMITE LÍQUIDO</p> <table border="1"> <caption>Data for Liquid Limit Chart</caption> <thead> <tr> <th>Número de Golpes</th> <th>Humedad %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15</td> <td>47.21</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>42.60</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>39.84</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>35.09</td> </tr> </tbody> </table>							Número de Golpes	Humedad %	15	47.21	20	42.60	25	39.84	30	35.09
Número de Golpes	Humedad %															
15	47.21															
20	42.60															
25	39.84															
30	35.09															

ANEXO 3. Resultado de Clasificación SUCS de Muestra 2 tomada en Reconocimiento Inicial del Talud (Realizado de forma colaborativa y coordinada con la empresa MACMOR CONSULTORA Y ASOCIADOS S.A.)

CONTROL DE CALIDAD
DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE SUELOS
CURVA DE COMPACTACIÓN

PROYECTO: Sondeos en Talud km1.9 de la Vía San Mateo-Santa Marianita del cantón Manta.

DESCRIPCION: LUTITA COLOR GRIS VERDOSO **MATERIAL:** DE TALUD
FECHA: 17 de febrero de 2023 **ENSAYO No:** SM-02
ENSAYADO POR: Josue Pesantez

MASA DEL CILINDRO (P7)	3728
VOLUMEN DEL CILINDRO (V)	948
MASA DEL MARTILLO (Kg.)	4.54
ALTURA DE CAÍDA DEL MARTILLO (cm.)	45.72
TIPO DEL ENSAYO	Modificado Ø=4'
# DE CAPAS	5
# DE GOLPES POR CAPA	25

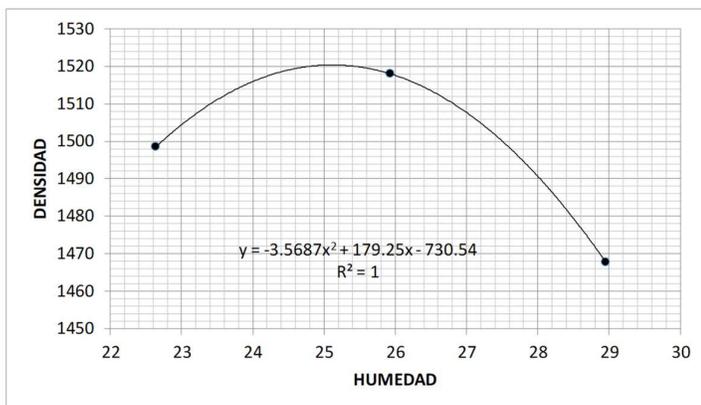
Observaciones:
NORMAS DE REFERENCIA
 ASTM D 698-07
 ASTM D 1557-07
 AASHTO T 99-15
 AASHTO T 180-15

UBICACIÓN:

 Talud con falla en la via San Mateo-Santa Marianita

DATOS DEL ENSAYO

PUNTO #	1	2	3	4	5	6
RECIPIENTE #	A	B	C			
MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA (P1)	122.16	109.20	147.50			
MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA (P2)	107.12	95.17	123.56			
MASA DE AGUA (P3 = P1 - P2)	15.04	14.03	23.94			
MASA DE RECIPIENTE (P4)	40.69	41.07	40.89			
MASA DE MUESTRA SECA (P5 = P2 - P4)	66.43	54.10	82.67			
% DE HUMEDAD (W = P3 × 100 ÷ P5)	22.64	25.93	28.96			
% DE HUMEDAD PROMEDIO	22.64	25.93	28.96			
% DE HUMEDAD AÑADIDA AL SUELO	7	10	13			
MASA DE CILINDRO + SUELO HÚMEDO (P6)	5470	5540	5522			
MASA DE SUELO HÚMEDO (P8 = P6 - P7)	1742	1812	1794			
DENSIDAD HÚMEDA DEL SUELO (Dh = P8 ÷ V)	1838	1912	1893			
DENSIDAD SECA DEL SUELO (Ds = Dh ÷ (1 + W ÷ 100))	1499	1518	1468			



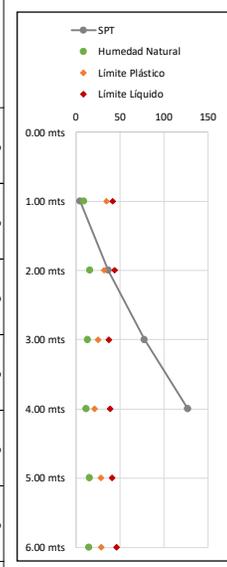
RESULTADOS
Densidad Seca Máxima 1520 Kg./m³
% de Humedad Óptima 25.11 %

ANEXO 4. Resultado de Ensayo de Proctor para Muestra 2 tomada en Reconocimiento Inicial del Talud (Realizado de forma colaborativa y coordinada con la empresa MACMOR CONSULTORA Y ASOCIADOS S.A.)

SOLICITADO POR:	ING. XAVIER MACÍAS MOREIRA		PROYECTO:	TALUD COLAPSADO EN KM 1.9 DE LA VÍA SAN MATEO - SANTA MARIANITA															
CÓDIGO:	TESIS XM 001		UBICACIÓN:	MANTA, MANABÍ, ECUADOR															
FECHA INICIO:	28 DE ABRIL DE 2023		ELEVACIÓN:	111.00 msnm	TAMAÑO DE POZO:	75 mm													
FECHA FINAL:	28 DE ABRIL DE 2023		COORDENADAS:	9893433 N; 520871 E															
PERFORADOR:	L.A.		NIVEL FREAT.	DESDE: ---															
REGISTADO POR:	J.C.		HASTA: ---																
OBSERVACIONES:																			
UBICACIÓN P# 1			LÍMITES DE ATTERBERG			GRANULOMETRÍA													
PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	SUCS	PERFIL	HUMEDAD NATURAL % W	LL	LP	IP	N_spt	% FINOS	% ARENA	% GRAVA								
1.00 mts	Arcillas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, arcillas limosas. Consistencia dura	CL		13.58 %	39.28	24.65	14.63	46	63 %	37 %	0 %								
2.00 mts	Arcillas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, arcillas limosas. Consistencia dura	CL		15.92 %	43.34	25.96	17.38	95	55 %	45 %	0 %								
3.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		14.80 %	43.81	32.45	11.36	78	48 %	52 %	0 %								
4.00 mts	Arcillas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, arcillas limosas. Consistencia dura	CL		17.24 %	32.71	18.42	14.29	111	53 %	47 %	0 %								
5.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		16.66 %	31.26	25.60	5.66		71 %	29 %	0 %								
6.00 mts	Arcillas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, arcillas limosas. Consistencia dura	CL		17.35 %	36.62	22.43	14.19		54 %	46 %	0 %								
<p>*Nota: A partir de los 5m de profundidad el registro de Nspt reporta rechazo por parte de los estratos del subsuelo.</p>																			
<p>*SIMBOLOGÍA:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>Arcilla</td> <td style="text-align: center;"></td> <td>Limo</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>Arena</td> <td style="text-align: center;"></td> <td>Grava</td> </tr> </table>													Arcilla		Limo		Arena		Grava
	Arcilla		Limo																
	Arena		Grava																

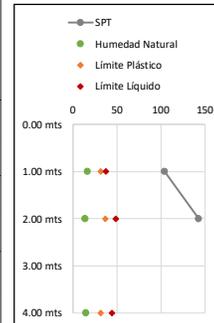
ANEXO 5. Resultados de Ensayo SPT No. 1 (Realizado de forma colaborativa y coordinada con la empresa CONSULJOC S.A.)

SOLICITADO POR:	ING. XAVIER MACÍAS MOREIRA		PROYECTO:	TALUD COLAPSADO EN KM 1.9 DE LA VÍA SAN MATEO - SANTA MARIANITA															
CÓDIGO:	TESIS XM 001		UBICACIÓN:	MANTA, MANABÍ, ECUADOR															
FECHA INICIO:	28 DE ABRIL DE 2023		ELEVACIÓN:	105.00 msnm	TAMAÑO DE POZO:	75 mm													
FECHA FINAL:	28 DE ABRIL DE 2023		COORDENADAS:	9893433 N; 520881 E															
PERFORADOR:	L.A.		NIVEL FREAT.	DESDE: ---															
REGISTADO POR:	J.C.		HASTA: ---																
OBSERVACIONES:																			
UBICACIÓN P# 2			LÍMITES DE ATTERBERG			GRANULOMETRÍA													
PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	SUCS	PERFIL	HUMEDAD NATURAL % W	LL	LP	IP	N_spt	% FINOS	% ARENA	% GRAVA								
1.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		9.21 %	41.82	35.15	6.67	5	47 %	53 %	0 %								
2.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		16.25 %	44.17	32.14	12.03	37	61 %	39 %	0 %								
3.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		13.58 %	37.50	25.31	12.19	78	58 %	42 %	0 %								
4.00 mts	Arcillas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, arcillas limosas. Consistencia dura	CL		11.94 %	39.26	21.65	17.61	127	55 %	45 %	0 %								
5.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		15.63 %	41.55	28.74	12.81		68 %	32 %	0 %								
6.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		15.11 %	46.21	29.31	16.90		57 %	43 %	0 %								
<p>*Nota: A partir de los 5m de profundidad el registro de Nspt reporta rechazo por parte de los estratos del subsuelo.</p>																			
<p>*SIMBOLOGÍA:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;">Arcilla</td> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;">Limo</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;">Arena</td> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;">Grava</td> </tr> </table>													Arcilla		Limo		Arena		Grava
	Arcilla		Limo																
	Arena		Grava																

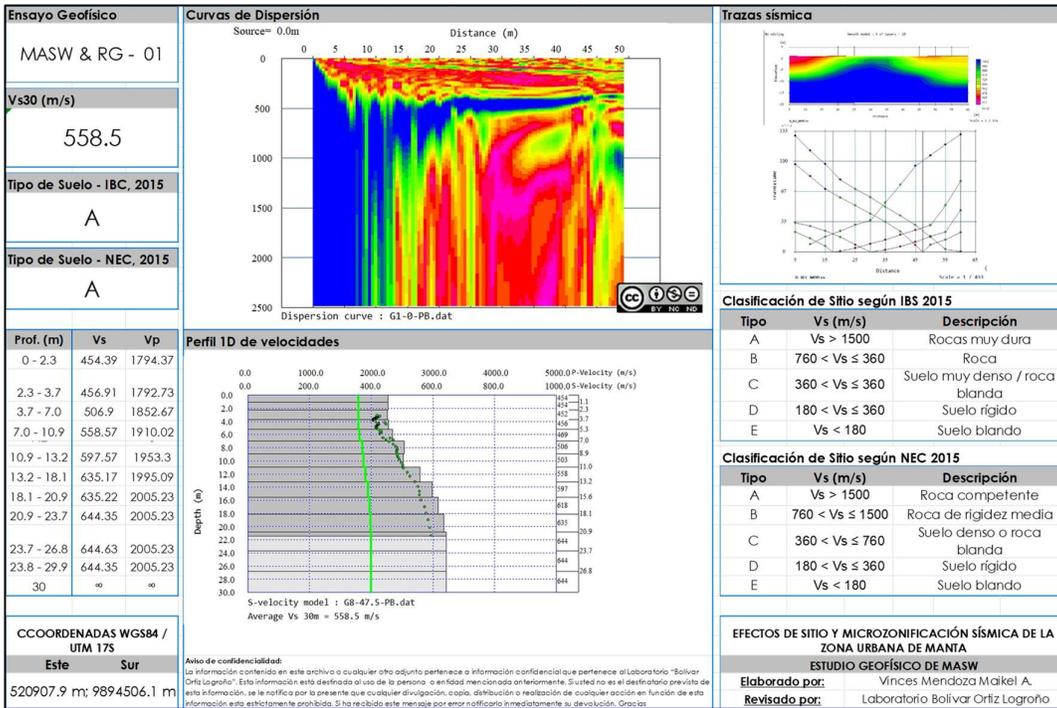


ANEXO 6.Resultados de Ensayo SPT No. 2 (Realizado de forma colaborativa y coordinada con la empresa CONSULJOC S.A.)

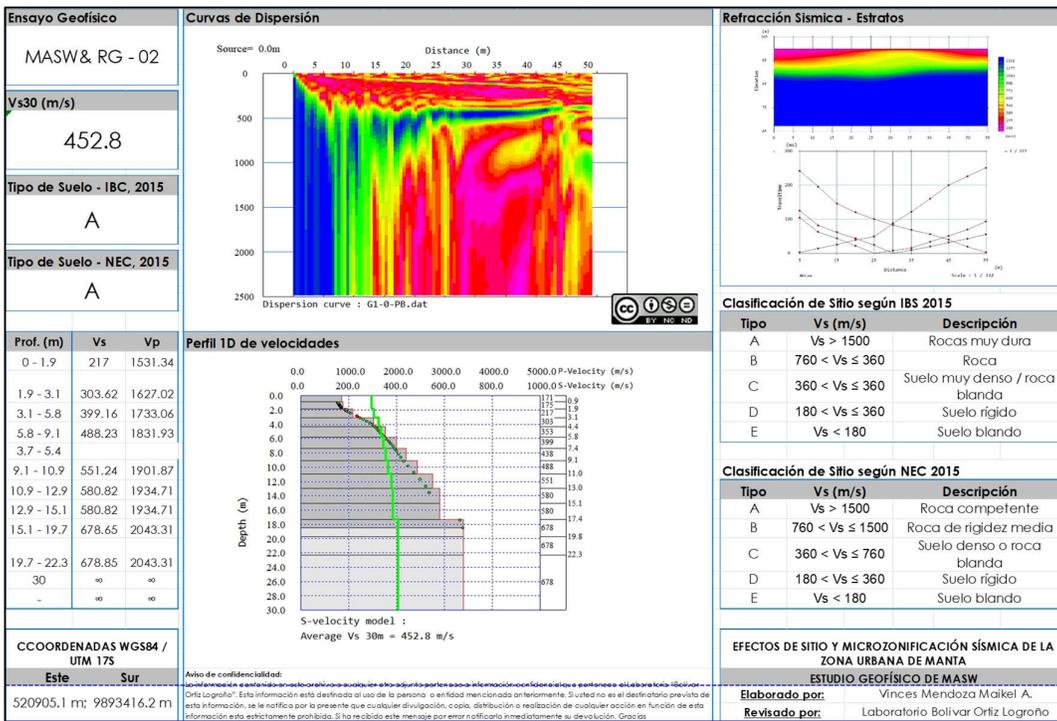
SOLICITADO POR:	ING. XAVIER MACÍAS MOREIRA		PROYECTO:	TALUD COLAPSADO EN KM 1.9 DE LA VÍA SAN MATEO - SANTA MARIANITA															
CÓDIGO:	TESIS XM 001		UBICACIÓN:	MANTA, MANABÍ, ECUADOR															
FECHA INICIO:	28 DE ABRIL DE 2023		ELEVACIÓN:	85.00 msnm	TAMAÑO DE POZO:	75 mm													
FECHA FINAL:	28 DE ABRIL DE 2023		COORDENADAS:	9893455 N; 520887 E															
PERFORADOR:	L.A.		NIVEL FREAT.	DESDE: ---															
REGISTRADO POR:	J.C.		HASTA: ---																
OBSERVACIONES:																			
UBICACIÓN P# 3			LÍMITES DE ATTERBERG			GRANULOMETRÍA													
PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	SUCS	PERFIL	HUMEDAD NATURAL % W	LL	LP	IP	N _{spt}	% FINOS	% ARENA	% GRAVA								
1.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		16.77 %	37.54	31.92	5.62	104	57 %	43 %	0 %								
2.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		13.83 %	49.22	37.19	12.03	143	51 %	49 %	0 %								
4.00 mts	Limos inorgánicos y arenas muy finas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. Consistencia dura	ML		15.05 %	44.70	31.88	12.82		62 %	38 %	0 %								
<p>*Nota: A partir de los 2m de profundidad el registro de N_{spt} reporta rechazo por parte de los estratos del subsuelo.</p>																			
<p>*SIMBOLOGÍA:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;"></td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Arcilla</td> <td style="width: 50%; text-align: center;"></td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Limo</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;">Arena</td> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;">Grava</td> </tr> </table>													Arcilla		Limo		Arena		Grava
	Arcilla		Limo																
	Arena		Grava																



ANEXO 7.Resultados de Ensayo SPT No. 3 (Realizado de forma colaborativa y coordinada con la empresa CONSULJOC S.A.)



ANEXO 8. Resultados de Ensayo de Refracción Sísmica, línea no. 1 (Realizado de forma colaborativa y coordinada con la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí)



ANEXO 9. Resultados de Ensayo de Refracción Sísmica, línea no. 2 (Realizado de forma colaborativa y coordinada con la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí)

CERTIFICACIÓN DE REVISIÓN DE PROYECTO DE TITULACIÓN

Por medio de la presente, Yo Davide Besenzon Venegas, Coordinador del Programa de Maestría en Geotecnia de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), certifico que:

Con fecha 24 de febrero de 2023, el estudiante Xavier Andrés Macías Moreira con número de identificación 1312576398, de la Cohorte 4, presentó la propuesta de su tema de titulación al Comité Académico del programa. Posteriormente, con fecha 21 de abril de 2023, el Comité revisó y aprobó la propuesta mediante la resolución FICT-CA-GEOTEC-017-2023, cumpliendo con los requisitos establecidos para la aprobación del tema.

A partir de dicha aprobación, el estudiante mantuvo reuniones periódicas con el tutor designado, Jaime Asdrúbal Bojorque Ñeñez, para la elaboración y desarrollo de su proyecto de titulación, siguiendo los lineamientos establecidos por el programa. Con fecha 08 de julio de 2023, el estudiante presentó y sustentó su proyecto de titulación ante el tribunal evaluador asignado, cumpliendo con el proceso formal de evaluación académica.

Por lo tanto, en calidad de Coordinador del Programa de Maestría en Geotecnia, certifico que el trabajo de titulación denominado "**Análisis del comportamiento geo mecánico de taludes e identificación de soluciones de estabilidad, en la vía San Mateo - Santa Marianita, del cantón Manta**", realizado por el estudiante Xavier Andrés Macías Moreira con número de identificación 1312576398, ha sido revisado y evaluado conforme a los lineamientos y estándares establecidos por el programa.

Debido a circunstancias externas, no ha sido posible obtener las firmas de los involucrados (estudiante, tutor(es) y/o evaluadores). No obstante, en calidad de Coordinador del Programa, certifico que el proyecto cumple con los requisitos académicos y ha sido revisado para su presentación y archivo institucional.

Atentamente,



M. Sc. Davide Besenzon Venegas
Coordinador de la Maestría en Geotecnia