



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA GASCA - QUITO,
APLICANDO MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE (LEM)

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de ingeniero civil

AUTORES: MIGUEL ÁNGEL BORBOR PINELA

MARÍA DANIELA MOYANO CELLÁN

TUTOR: ING. KEVIN RICARDO PROAÑO VISCARRA, MSc.

Guayaquil-Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Miguel Ángel Borbor Pinela con documento de identificación N° 0930456256 y María Daniela Moyano Cellán con documento de identificación N° 0955175500; manifestamos que:

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

Guayaquil, 17 de enero del año 2026

Atentamente,



Miguel Ángel Borbor Pinela

0930456256



María Daniela Moyano Cellán

0955175500

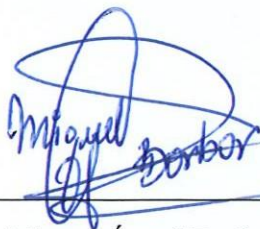
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Miguel Ángel Borbor Pinela con documento de identificación N° 0930456256 y María Daniela Moyano Cellán con documento de identificación N° 0955175500, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA GASCA – QUITO, APLICANDO MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE (LEM)”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 17 de enero del año 2026

Atentamente,



Miguel Ángel Borbor Pinela

0930456256



María Daniela Moyano Cellán

0955175500

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Kevin Ricardo Proaño Viscarra con documento de identificación N° 1205363326, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA GASCA – QUITO, APLICANDO MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE (LEM), realizado por Miguel Ángel Borbor Pinela con documento de identificación N° 0930456256 y por María Daniela Moyano Cellán con documento de identificación N° 0955175500, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 17 de enero del año 2026

Atentamente,



Kevin Ricardo Proaño Viscarra
1205363326

Agradecimiento

Quiero rendir mi agradecimiento de todas personas que me apoyaron, las cuales son responsables por el cual yo logré alcanzar este objetivo.

A todos los docentes, que impartieron su conocimiento a lo largo de la carrera, su manera de enseñar y la forma de tratar al estudiantado son algo que llevare marcado y guardare en mis recuerdos, para mí son los mejores como docentes y como personas.

A mis compañeros, su amistad y su ayuda fueron de gran importancia, disfruté su compañía he hicieron que la carrera sea más llevadera.

A mi compañera de tesis, por su aporte, su responsabilidad, su ayuda incondicional no solo durante la elaboración de nuestra tesis de grado, también en la mayor parte de la carrera, gracias por ser parte de este logro, sé que vendrán más.

Por último, quiero agradecerle a usted, María Franco, aunque no compartimos la misma sangre, yo la considero a usted como si fuera mi propia madre. Supo guiarme, darme fuerzas, impartirme buenos valores, usted es la responsable por el cual yo pude superarme. Usted confió en mí, siempre supo que lo iba a lograr, junto con Jade y María, forman parte del tridente de pilares por el cual seguiré avanzando. Gracias por sus bendiciones, mis respetos serán eternos para usted.

Dedicatoria

Padre, no sabes lo que daría para que veas cuanto me he superado. Aunque ya no formes parte de lo terrenal, sé que donde quiera que estes, me ves con ojos de orgullo, ya han pasado muchísimos años, pero siempre te tendré presente. Te dedico mi trabajo de tesis a manera de honrar tu memoria.

Te extraño.

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios por darme salud, fortaleza y la oportunidad de seguir en pie en cada etapa de este camino.

A mi querida familia, que ha sido el pilar fundamental de este logro. A mi papá Roberto y a mi mamá María, gracias por su amor incondicional, por llevarme cada día a la universidad, por estar siempre pendientes de mí, gracias por, por los sacrificios silenciosos y la confianza que me depositaron que hicieron posible que llegara hasta aquí. Este triunfo también les pertenece.

A mis hermanos, y a mi tía Magaly por acompañarme en este camino.

Con profunda gratitud reconozco a mis profesores, cuya dedicación y pasión por la enseñanza marcaron mi formación académica y personal.

No puedo dejar de mencionar a mis amigos, compañeros de tantas jornadas compartidas. Gracias por las risas que aligeraron los días, por la compañía en los momentos difíciles y por celebrar conmigo cada pequeño avance.

Y de manera muy especial, a alguien cuyo nombre guardo con cariño, pero cuyo papel merece ser mencionado con el corazón. A Miguel, quien fue mi impulso y motivación constante, Su presencia fue un regalo que marcó una diferencia significativa en este camino.

Finalmente, me reconozco a mí misma. A la mujer que durante estos años fue paciente, perseverante y fuerte, que hoy se ven reflejados en este logro.

A todos y cada uno, gracias, que el camino que sigue esté lleno de luz, prosperidad y nuevas metas por alcanzar.

Dedicatoria

A mi abuela Mamichelita, que ya no está físicamente conmigo, pero cuyo recuerdo me acompaña en cada logro. Sé que le hubiera encantado verme culminar esta etapa, y aunque la vida no le permitió estar presente, su amor, sus enseñanzas y su espíritu siguen vivos en mí. Esta tesis también se la dedico a ella, con la certeza de que, desde donde esté, celebra conmigo este momento.

Resumen

El estudio presenta un análisis integral de la estabilidad de taludes, considerando su definición, clasificación y los principales tipos de fallas que pueden ocurrir en suelos y rocas. Se identifican factores naturales (lluvias, sismos, erosión, meteorización) y antropogénicos (excavaciones, deforestación, cargas excesivas, alteración del drenaje) que afectan su comportamiento.

Se revisan diversas técnicas de estabilización, como la modificación geométrica, el reforzamiento estructural, el drenaje superficial y profundo, y la cobertura vegetal, complementadas con sistemas de contención como muros, mallas y barreras dinámicas.

En cuanto al análisis de estabilidad, se estudian los métodos de equilibrio límite más relevantes (Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer y Morgenstern-Price), sustentados en el criterio de Mohr-Coulomb, y se destaca la utilidad del software Slide v6.0 para modelar escenarios complejos y calcular factores de seguridad.

Palabras clave: estabilidad de taludes, factor de seguridad, métodos de equilibrio límite, condiciones pseudostáticas, parámetros geotécnicos, superficie crítica de falla.

Abstract

This study presents a comprehensive analysis of slope stability, considering its definition, classification, and the main types of failures that can occur in soils and rocks. Natural factors (rainfall, earthquakes, erosion, weathering) and anthropogenic factors (excavations, deforestation, excessive loads, drainage disruption) that affect slope behavior are identified.

Various stabilization techniques are reviewed, such as geometric modification, structural reinforcement, surface and subsurface drainage, and vegetation cover, complemented by containment systems such as walls, mesh, and dynamic barriers.

Regarding stability analysis, the most relevant limit equilibrium methods (Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, and Morgenstern-Price), based on the Mohr-Coulomb criterion, are studied, and the usefulness of the Slide v6.0 software for modeling complex scenarios and calculating safety factors is highlighted.

Keywords: slope stability, safety factor, limit equilibrium methods, pseudostatic conditions, geotechnical parameters, critical failure surface.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes.....	2
1.2	Problema de estudio.....	5
1.3	Justificación	6
1.4	Objetivos.....	7
1.4.1	Objetivo general	7
1.4.2	Objetivos específicos.....	7
2	Marco conceptual.....	7
2.1	Definición de talud	7
2.2	Partes de un talud.....	8
2.2.1	Base o pie del talud	8
2.2.2	Cabeza, cresta o escarpe.....	8
2.2.3	Altura del talud.....	8
2.2.4	Altura del nivel freático.....	8
2.2.5	Pendiente	9
2.3	Tipos de taludes	9
2.3.1	Taludes naturales.....	9
2.3.2	Taludes artificiales	10
2.4	Clasificación de los taludes según su función o ubicación.....	11
2.4.1	Taludes de corte	11

2.4.2	Taludes de relleno	11
2.4.3	Taludes mixtos	11
2.5	Tipos de fallas de taludes.....	12
2.5.1	Falla por deslizamiento superficial	12
2.5.2	Falla por rotación	13
2.5.3	Falla local	14
2.5.4	Falla de base	15
2.5.5	Falla por traslación	16
2.5.6	Falla por flujo	16
2.5.7	Falla por licuación.....	17
2.6	Tipos de fallas según el control estructural	18
2.6.1	Falla planar	19
2.6.2	Falla en cuña.....	19
2.6.3	Falla por vuelco (toppling).....	20
2.6.4	Falla circular.....	20
2.7	Derrumbes en taludes	21
2.8	Caídas en taludes	21
2.9	Importancia del análisis de estabilidad.....	21
2.10	Factores que afectan la estabilidad	22
2.10.1	Factores condicionantes	22
2.10.2	Factores desencadenantes.....	23

2.11	Estrategias de Estabilización para reducir las Fallas de Taludes.....	25
2.11.1	Modificación geométrica del talud.....	26
2.11.2	Control de materiales inestables.....	29
2.11.3	Sistemas de contención estructural	31
2.11.4	Estabilización profunda de taludes.....	33
2.11.5	Gestión del agua y drenaje	36
2.11.6	Protección pasiva.....	38
2.12	Sistemas de Contención de Talud.....	40
2.12.1	Muro de contención.....	40
2.12.2	Malla de triple torsión	41
2.12.3	Barrera dinámica	42
2.13	Tipos de Suelos en Taludes	43
2.13.1	Suelos no cohesivos ($C = 0$).....	43
2.13.2	Suelos cohesivos ($C \neq 0$).....	43
2.13.3	Suelos residuales y tropicales.....	44
2.14	Caracterización geotécnica de taludes	44
2.15	Propiedades mecánicas	45
2.15.1	Cohesión (c)	45
2.15.2	Ángulo de fricción interna (ϕ).....	46
2.16	Propiedades físicas	46
2.16.1	Peso unitario (γ)	46

2.16.2	Permeabilidad.....	47
2.16.3	Plasticidad	48
2.17	Ensayos de laboratorio.....	48
2.17.1	Corte directo.....	49
2.17.2	Triaxial	49
2.17.3	Granulometría.....	50
2.17.4	Límites de Atterberg.....	51
2.18	Ensayos de campo	53
2.18.1	Standard Penetration Test (SPT).....	54
2.18.2	Cone Penetration Test (CPT)	55
2.18.3	Penetrómetro de bolsillo.....	56
2.18.4	Medidor láser de altura.....	57
2.19	Parámetros geotécnicos relevantes	59
2.19.1	Factor de seguridad en taludes	59
2.20	Métodos geofísicos aplicados a taludes.....	62
2.20.1	Georradar (GPR)	62
2.20.2	Tomografía de resistividad eléctrica (ERT).....	62
2.20.3	Interpretación de perfiles geofísicos	63
2.21	Métodos de análisis de estabilidad de taludes	64
2.21.1	Método de equilibrio límite.....	65
2.21.2	Método de Fellenius (Ordinary Method of Slices).....	67

2.21.3	Método de Bishop (Simplificado)	69
2.21.4	Método de Janbu	70
2.21.5	Método de Spencer	71
2.21.6	Método de Morgenstern-Price.....	75
2.22	Criterio de Mohr-Coulomb	76
2.23	Comparación entre métodos	77
2.24	Software Slide v6.0 para análisis de taludes.....	78
2.24.1	Características del software.....	78
2.24.2	Modelado de geometría y materiales	80
2.24.3	Cálculo del factor de seguridad	80
2.24.4	Ejemplos de aplicación.....	81
2.24.5	Normativa ecuatoriana	81
2.25	Aplicaciones del método de Spencer en estudios reales.....	82
2.25.1	Casos documentados en Ecuador	82
2.25.2	Aplicación de programación dinámica.....	85
2.26	Consideraciones sísmicas en el análisis de taludes	85
2.26.1	Coeficiente sísmico	85
2.26.2	Efectos de saturación y presión de poros	86
2.26.3	Modelación en Slide bajo condiciones dinámicas.....	87
3	Marco metodológico	88
3.1	Ubicación del proyecto	89

3.2	Selección del área crítica de estudio.....	90
3.3	Caracterización geotécnica del suelo.....	95
3.4	Modelación computacional.....	98
3.4.1	Crear la geometría de la sección	99
3.4.2	Definir las propiedades de los materiales.....	101
3.4.3	Asignar las propiedades de los materiales.....	102
3.4.4	Definir los métodos de búsqueda	103
3.4.5	Definir métodos de cálculo	104
3.4.6	Cálculo e interpretación de resultados	105
3.5	Interpretación de resultados del talud en estado natural.....	106
3.5.1	Talud en estado natural considerando condiciones estáticas	106
3.5.2	Talud en estado natural considerando condiciones pseudoestáticas	110
4	Evaluación de resultados y propuesta de medidas de estabilización	113
4.1	Propuesta 1: Modificación geométrica	114
4.1.1	Caso A.....	114
4.1.2	Caso B	115
4.2	Propuesta 2: Sistema de drenaje	117
4.3	Propuesta 3: Muros y refuerzos	120
4.3.1	Muros por gravedad y muros en voladizo	120
4.3.2	Muro anclado.....	121
4.3.3	Anclaje tipo Grouted Tieback	123

4.4	Propuesta 4: Anclaje tipo Soils Nails	126
4.5	Geotextiles	130
4.6	Propuesta 5 :Gaviones	131
5	Análisis de resultados	136
6	Cronograma de actividades.....	142
7	Presupuesto	142
8	Conclusiones.....	143
9	Recomendaciones	144
10	Bibliografía	145
11	Anexos	158

Índice de figuras

Figura 1 Representación visual del problema de estudio: causas y consecuencias del aluvión de 2022	2
Figura 2 Comparación visual de aluviones ocurridos en La Gasca y sectores cercanos	3
Figura 3 Quebradas del sector afectado por el aluvión de La Gasca (2022).....	4
Figura 4: Estructura de un talud natural y artificial	9
Figura 5 Talud natural	10
Figura 6: Talud artificial.....	10
Figura 7: Falla por deslizamiento superficial en talud	13
Figura 8: Tipos de fallas por rotación en taludes	14
Figura 9 Falla local en un talud.....	15
Figura 10 Falla de base en un talud.....	15
Figura 11 Falla por traslación en taludes.....	16
Figura 12 Efectos por licuación	17
Figura 13: Tipo de fallas de taludes según su forma geométrica	18
Figura 14 Falla por deslizamiento superficial en taludes naturales	19
Figura 15 Modos potenciales de falla en taludes según el control estructural.....	20
Figura 16 Derrumbes en taludes en carretera.....	21
Figura 17 Factores que influyen en la estabilidad de taludes.....	25
Figura 18 Disminución del ángulo del talud	26
Figura 19 Eliminación de peso en la cabecera y adición de peso en el pie talud.....	27
Figura 20 Refuerzo y peso en el pie del talud	28
Figura 21 Construcción de bermas o bancos para la estabilización de un talud	29
Figura 22 Control de materiales inestables en un talud	30

Figura 23	Uso de mallas metálicas en taludes.....	31
Figura 24	Muro de contención prefabricado tipo MC en el pie de un talud	32
Figura 25	Aplicación de malla de acero de doble torsión para la protección de taludes	33
Figura 26	Elementos de un anclaje	34
Figura 27	Procedimiento de ejecución de los anclajes.....	34
Figura 28	Estabilización de talud mediante micropilotes	35
Figura 29	Drenajes de los muros de contención	37
Figura 30	Aplicación de geotextiles en taludes para control de erosión y refuerzo del terreno	38
Figura 31	Barreras dinámicas para la protección de taludes.....	39
Figura 32	Muro de contención aplicado en estabilización de taludes.....	41
Figura 33	Aplicación de malla de triple torsión en taludes para control de caída de rocas	42
Figura 34	Instalación de barrera dinámica para estabilización de taludes	43
Figura 35	Diagrama de los diferentes tipos de peso unitario	47
Figura 36	Partes de la caja de corte.....	49
Figura 37	Sistema triaxial de aire comprimido	50
Figura 38	Equipamiento de laboratorio.....	51
Figura 39	límites de Atterberg de la clasificación de suelos	52
Figura 40	Equipo de corte directo Humboldt HM-5750 utilizado en ensayos de laboratorio .	53
Figura 41	Proceso del ensayo SPT.....	55
Figura 42	Prueba de penetración de cono	56
Figura 43	Penetrómetro de bolsillo	57
Figura 44	Medición de perfiles de altura	58
Figura 45	Deducción del factor de seguridad.....	61

Figura 46 Valores del factor de estabilidad de un talud	61
Figura 47 Equipo GPR con antena blindada	62
Figura 48 Perfilado de ERT.....	63
Figura 49 Diferentes métodos de cálculo	65
Figura 50 Esquema de un talud dividido en dovelas sobre una superficie de falla curva.....	67
Figura 51 Esquema del análisis de estabilidad de taludes por el método de Fellenius	68
Figura 52 Esquema de las fuerzas que actúan en la ψ dovela, de acuerdo al método de Fellenius	69
Figura 53 Análisis de Estabilidad de Taludes por el Método de Bishop. (a) Esquema de las fuerzas que actúan en la dovela. (b) Diagrama de fuerzas en equilibrio de la n ma dovela	70
Figura 54 Diagrama del factor f_0 utilizado en el método de Janbu	71
De acuerdo con Braja M. Das (2021), los métodos de equilibrio límite resultan adecuados para la evaluación de la estabilidad en taludes naturales y artificiales, particularmente cuando se cuenta con parámetros geotécnicos confiables y se requiere una solución expedita sin recurrir a modelaciones tensodeformacionales. Figura 55 Fuerzas actuantes sobre una rotura circular.....	72
Figura 56 Esquema estático del método de Spencer	74
Figura 57 Evaluación comparativa de métodos de análisis de estabilidad en condiciones estáticas y pseudoestáticas	78
Figura 58 Principales características del Software Slide v6.0	79
Figura 59 Interfaz del software Slide	79
Figura 60 Elementos clave en el modelado de geometría y materiales en Slide v6.0	80
Figura 61 Superficie de falla crítica en Slide	81
Figura 62 Curvas de búsqueda en programación dinámica Slide V6.0	85

Figura 63 Zonificación sísmica y factor Z	86
Figura 64 Cuadro FS vs % saturación	87
Figura 65 Fases de la investigación.....	89
Figura 66 Ortofoto georreferenciada de La Gasca	91
Figura 67 Quebrada El Tejado con la zona de afectación	92
Figura 68 Ortofotos y la curva de nivel del talud.....	93
Figura 69 Perfil longitudinal y transversal del talud	94
Figura 70 Dimensionamiento del Talud	95
Figura 71 Perfil estratigráfico del sitio.....	96
Figura 72 Valores del Factor Z según la zona sísmica	98
Figura 73 Flujograma de los pasos a seguir en Slide	99
Figura 74 Representación de polilíneas por medio de capas	100
Figura 75 Importar DXF de AutoCAD	101
Figura 76 Perfil importado correctamente en Slide	101
Figura 77 Definir materiales que conforman el suelo	102
Figura 78 Asignar materiales a cada estrato.....	103
Figura 79 Superficie de falla	104
Figura 80 Cálculo del FS bajo diferentes métodos	104
Figura 81 Coeficiente de carga sísmica.....	105
Figura 82 FS Fellenius	106
Figura 83 FS Bishop Simplificado	107
Figura 84 FS Janbu simplificado.....	107
Figura 85 FS Janbu corregido	108
Figura 86 FS Spencer	109

Figura 87 FS Morgenstern-Price	109
Figura 88 FS Sísmico Fellenius	110
Figura 89 FS Sísmico Bishop.....	110
Figura 90 FS Sísmico Janbu simplificado.....	111
Figura 91 FS Janbu corregido	111
Figura 92 Sísmico Spencer.....	112
Figura 93 FS Sísmico Morgenstern-Price	112
Figura 94 Talud artificial 1H:1V	115
Figura 95 Talud artificial 3H:1V	115
Figura 96 Factor de seguridad estable bajo condiciones estáticas	116
Figura 97 Factor de seguridad estable bajo condiciones sísmicas	117
Figura 98 Sistema de drenaje y protección en un talud.....	118
Figura 99 Simulación del sistema drenaje en Slide.....	119
Figura 100 Factor de seguridad estático con sistema de drenes.....	119
Figura 101 Factor de seguridad pseudoestático con sistema de drenes	120
Figura 102 Propiedades del muro de anclaje	122
Figura 103 Muro de anclaje en el talud.....	123
Figura 104 Muro con 6 anclajes tipo grouted tieback a lo alto del talud	124
Figura 105 características del anclaje.....	125
Figura 106 Factor de seguridad estático con muros de anclaje.....	126
Figura 107 Factor de seguridad pseudoestático con muros de anclaje	126
Figura 108 Shotcrete o concreto proyectado con una capa de 0.1 m.....	127
Figura 109 Parámetros ingresados en Slide para el soporte tipo soil nail.....	128
Figura 110 Soportes tipo soil nail en el talud.....	129

Figura 111 Factor de seguridad estático con muros de anclaje	130
Figura 112 Factor de seguridad pseudoestático con muros de anclaje.....	130
Figura 113 Modelado de los gaviones en AutoCAD en el talud de La Gasca	132
Figura 114 Propiedades asignadas al gavión.....	134
Figura 115 Datos asignados al gavión.....	134
Figura 116 Factor de seguridad estático del talud con gaviones	135
Figura 117 Factor de seguridad pseudoestático del talud con gaviones.....	136
Figura 118 Reducción del factor de seguridad bajo cargas sísmicas	137
Figura 119 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus modificación geométrica	138
Figura 120 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus sistema de drenado	138
Figura 121 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus muro + grouted tieback	139
Figura 122 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus shotcrete + soilnails.....	139
Figura 123 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus gaviones.....	140
Figura 124 Diagrama de barras de la variación del factor de seguridad	141
Figura 125Cronograma de actividades realizadas.....	142

Índice de tablas

Tabla 1 Principales daños reportados por el aluvión de La Gasca (SNGRE, 2022)	4
Tabla 2 Resumen de propiedades geotécnicas	52
Tabla 3 Cuadro resumen – Ensayos de campo aplicados al análisis de taludes.....	58
Tabla 4 Correlación entre métodos geofísicos y geotécnicos	64
Tabla 5 Simbología del método de Spencer	74
Tabla 6 Valores mínimos de FS según NEC.....	82
Tabla 7 Resultados de FS en taludes analizados	82
Tabla 8 Resultados del análisis de estabilidad de talud mediante el método de Spencer.....	83
Tabla 9 Resultados del análisis de estabilidad de talud en Cuyuja mediante el método de Spencer.....	84
Tabla 10 Resultados del análisis de estabilidad de talud en la autopista General Rumiñahui mediante el método de Spencer.....	85
Tabla 11 FS bajo condiciones sísmicas	87
Tabla 12 Ubicación del proyecto.....	90
Tabla 13 Parámetros obtenidos de los ensayos suelo.....	97
Tabla 14 Factores de seguridad del talud en estado natural considerando cargas estáticas y pseudoe estáticas.....	113
Tabla 15 Parámetros de diseño de anclajes – Talud La Gasca	123
Tabla 16 Parámetros de diseño de clavos de suelo (Soil Nails) – Talud La Gasca	128
Tabla 17 Parámetros de diseño de gaviones para talud La Gasca	132
Tabla 18 Variación del factor de seguridad para diferentes tipos de mejoramiento.....	136
Tabla 19 Incremento del factor de seguridad influenciado por cada propuesta de mejoramiento	141

Tabla 20 Presupuesto para elaboracion de la tesis	142
---	-----

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Resistencia al corte (criterio de Mohr-Coulomb).....	45
Ecuación 2 Índice de plasticidad.....	48
Ecuación 3 Factor de seguridad	61
Ecuación 4 Factor de seguridad según el método de equilibrio límite (criterio de Mohr-Coulomb).....	66
Ecuación 5 Factor de seguridad general según el método de Morgenstern-Price (criterio de Mohr-Coulomb).....	75
Ecuación 6 Resistencia al corte según el criterio de Mohr-Coulomb	76
Ecuación 7 Factor de seguridad en dovelas según el criterio de Mohr-Coulomb	77

1 Introducción

La estabilidad de taludes constituye un aspecto fundamental en la ingeniería civil y geotécnica, dado que su inestabilidad puede generar pérdidas humanas, daños a la infraestructura y afectaciones ambientales (Duncan & Wright, 2005). En Ecuador, la presencia de zonas montañosas y suelos con alta vulnerabilidad geológica hace que el análisis de taludes sea una prioridad en proyectos viales, urbanos y rurales (Sanhueza & Rodríguez, 2013).

El aluvión ocurrido el 31 de enero de 2022 en el sector de La Gasca, Quito, evidenció de manera crítica la vulnerabilidad de los taludes urbanos frente a precipitaciones extremas y procesos de erosión en las laderas del volcán Pichincha. Este evento dejó pérdidas humanas y materiales significativas, y puso en evidencia la necesidad de aplicar metodologías rigurosas de análisis y diseño que permitan anticipar y mitigar riesgos asociados a la inestabilidad de taludes (Bermeo, Guamán & Pérez, 2022; Cerón, Molina & Paredes, 2022).

El presente estudio se centra en el análisis de un talud ubicado en la zona de La Gasca, Quito, con el objetivo de evaluar su estabilidad bajo condiciones estáticas y dinámicas, considerando tanto factores naturales como antropogénicos. Para ello, se revisan los conceptos básicos de los taludes, sus tipos, las fallas más comunes y los factores que condicionan su estabilidad, así como las principales estrategias de estabilización: modificación geométrica, control de materiales inestables, sistemas de contención estructural, gestión del agua y drenaje, y técnicas de protección pasiva y cobertura vegetal (Rodríguez, 2025).

Se analizan también los métodos de cálculo de estabilidad más utilizados en la práctica geotécnica, como Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer y Morgenstern-Price, todos ellos fundamentados en el criterio de Mohr-Coulomb (Zhang et al., 2022). Además, se incorpora el

uso del software Slide v6.0, que permite modelar geometrías complejas y evaluar factores de seguridad en condiciones diversas.

Este marco teórico y metodológico busca proporcionar una base sólida para el análisis del talud en La Gasca, integrando enfoques clásicos y contemporáneos, con el fin de orientar la aplicación de medidas de mitigación y garantizar la seguridad de las obras civiles y de la población que habita en zonas de riesgo.

Figura 1 Representación visual del problema de estudio: causas y consecuencias del aluvión de 2022



Fuente: Elaboración por autores.

1.1 Antecedentes

En la ciudad de Quito, los aluviones en las laderas del volcán Pichincha han ocurrido en varias ocasiones a lo largo de la historia reciente. El primer evento registrado se remonta a 1961, cuando un flujo de lodo afectó los sectores de La Gasca y San Carlos. Posteriormente, en 1975, La Gasca volvió a ser escenario de un aluvión de gran magnitud que ocasionó pérdidas humanas y materiales significativas (Bermeo Álvarez, Guamán & Pérez Jumbo, 2022). Más recientemente, en 2019, un evento similar en El Pinar Alto provocó el taponamiento de

quebradas por tala ilegal de árboles y el arrastre de lodo y escombros hacia las calles Valdiviezo y Occidental.

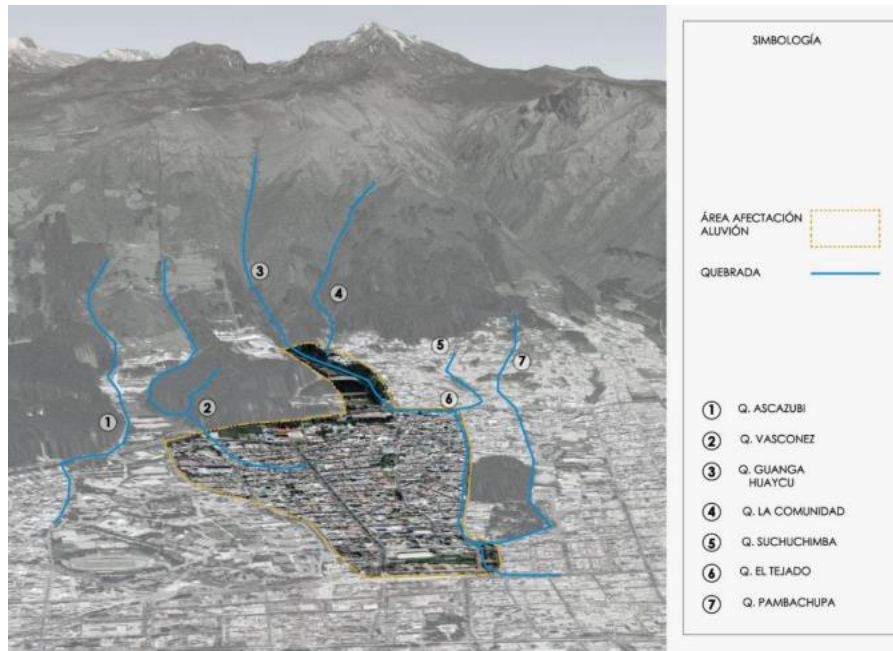
Figura 2 Comparación visual de aluviones ocurridos en La Gasca y sectores cercanos



Fuente: Elaboración por autores.

Finalmente, el 31 de enero de 2022, el sector de La Gasca y La Comuna fue nuevamente afectado por un aluvión de gran intensidad. Este patrón histórico evidencia que los aluviones en las laderas del Pichincha son fenómenos recurrentes, asociados tanto a factores naturales o factores antrópicos

Figura 3 Quebradas del sector afectado por el aluvión de La Gasca (2022)



Fuente: Bermeo Álvarez, Guamán & Pérez Jumbo, (2022).

La sustitución del bosque nativo por monocultivos de eucalipto, la urbanización acelerada y la falta de mantenimiento de las quebradas contribuyeron a la pérdida del equilibrio ecológico y a la disminución de la capacidad de infiltración del suelo (Perin, 2023/2024).

Según el Informe Nro. 011 – Aluvión Quito del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE, 2022), hasta el 8 de febrero de 2022 se registraron:

Tabla 1 Principales daños reportados por el aluvión de La Gasca (SNGRE, 2022)

Categoría	Cantidad / Descripción
Personas fallecidas	28
Personas heridas	52
Personas desaparecidas	1
Familias damnificadas	53
Familias afectadas	107 (555 personas)

Viviendas afectadas	41
Viviendas destruidas	7
Vehículos policiales afectados	10 (4 patrulleros, 6 motos)
UPC afectado	1 (La Gasca)
Vehículos privados afectados	30 autos, 22 motos
Postes de energía destruidos	20
Contenedores EMASEO destruidos	40
Cerramientos privados colapsados	14

Fuente: Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE, 2022).

Este antecedente evidencia la vulnerabilidad de los taludes urbanos de Quito frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos y la necesidad de implementar medidas de prevención y mitigación.

1.2 Problema de estudio

El 31 de enero de 2022, un aluvión provocado por el desbordamiento de la quebrada Tejado arrasó la zona urbana y ocasionó un desastre natural en el sector de La Gasca, en Quito. Según el informe oficial del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, el evento dejó 28 fallecidos, más de 50 personas heridas y daños significativos en viviendas, vehículos, vías principales y servicios básicos. Este hecho evidenció la vulnerabilidad de los taludes del área, donde la combinación de una geometría desfavorable, la saturación del suelo y la ausencia de obras de estabilización y drenaje amplificaron la magnitud de la tragedia.

El riesgo de nuevos deslizamientos continúa presente, pues confluyen factores naturales como lluvias intensas y actividad sísmica con intervenciones humanas, entre ellas la alteración del drenaje natural y el crecimiento urbano acelerado. La carencia de estudios técnicos detallados sobre la estabilidad de los taludes en La Gasca mantiene latente la posibilidad de que se repitan sucesos similares, con consecuencias graves para la población y las infraestructuras. Por ello, el problema central radica en la falta de un análisis integral que permita identificar las condiciones críticas de inestabilidad y plantear medidas de estabilización que reduzcan el nivel de riesgo en el sector.

1.3 Justificación

En primer lugar, la investigación se justifica por su impacto social, ya que busca prevenir pérdidas humanas como las ocurridas durante el aluvión de 2022. La implementación de medidas técnicas orientadas a reducir el riesgo de deslizamientos constituye una garantía de seguridad para los residentes y transeúntes del sector de La Gasca. En segundo término, el estudio adquiere relevancia económica, pues los desastres derivados de la inestabilidad de los taludes generan elevados costos en la reparación de viviendas, infraestructura y servicios básicos, además de afectar la movilidad urbana y la productividad.

Desde la perspectiva técnica, la aplicación de métodos de equilibrio límite (LEM) junto con el software Slide v6.0 permitirá un análisis detallado del factor de seguridad de los taludes, considerando las condiciones sísmicas, los parámetros geotécnicos y la variabilidad en la saturación del suelo. El empleo de estas herramientas modernas asegura resultados más precisos y confiables que los obtenidos mediante enfoques empíricos.

Finalmente, la investigación posee un valor práctico inmediato, al centrarse en una zona crítica real. Los resultados podrán ser utilizados por las autoridades locales y las entidades

responsables de la gestión de riesgos para diseñar e implementar sistemas de drenaje y estabilización que fortalezcan la resiliencia urbana de Quito.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la estabilidad del talud en la zona de estudio, mediante el software de elementos finitos Slide v6.0, utilizando parámetros geotécnicos con el fin de proponer soluciones de estabilización que mejoren la seguridad y funcionabilidad del terreno.

1.4.2 Objetivos específicos

- Seleccionar una zona crítica de estudio en el sector (La Gasca-Quito), mediante la geometría del talud, para implementar medidas de estabilización óptimas, control de drenaje, y regulación de cargas externas.
- Establecer los parámetros geotécnicos del suelo, mediante ensayos de laboratorio-geofísicos, para zonas del talud con mayor riesgo de inestabilidad.
- Evaluar la estabilidad del talud en la zona de proyecto, mediante Métodos de equilibrio límite (LEM), para una estimación de factores de seguridad bajo acción sísmica y variabilidad de parámetros geotécnicos de suelo.

2 Marco conceptual

2.1 Definición de talud

“Un talud es una superficie inclinada del terreno, natural o artificial, cuya estabilidad depende de factores como la pendiente, el tipo de suelo, la presencia de agua y las condiciones climáticas. Su análisis es fundamental en obras civiles para prevenir deslizamientos y garantizar la seguridad estructural.” (Pérez, 2021, p. 15).

2.2 Partes de un talud

2.2.1 Base o pie del talud

Es el punto donde la pendiente cambia abruptamente en la parte inferior de la ladera. Su forma suele ser cóncava y marca el inicio del talud desde abajo.

2.2.2 Cabeza, cresta o escarpe

Se refiere al punto superior donde la pendiente se vuelve más pronunciada. Si esta inclinación es muy fuerte o casi vertical, se denomina escarpe. Estas zonas suelen coincidir con áreas propensas a deslizamientos y la forma típica de la cabeza es convexa (Suárez Riestra, 2008).

2.2.3 Altura del talud

La altura de un talud corresponde a la medida vertical que existe entre su coronación y su base. Esta medida resulta más clara en estructuras artificiales, mientras que en laderas naturales puede ser difícil de precisar debido a la ausencia de accidentes topográficos marcados (Suárez Riestra, 2008).

2.2.4 Altura del nivel freático

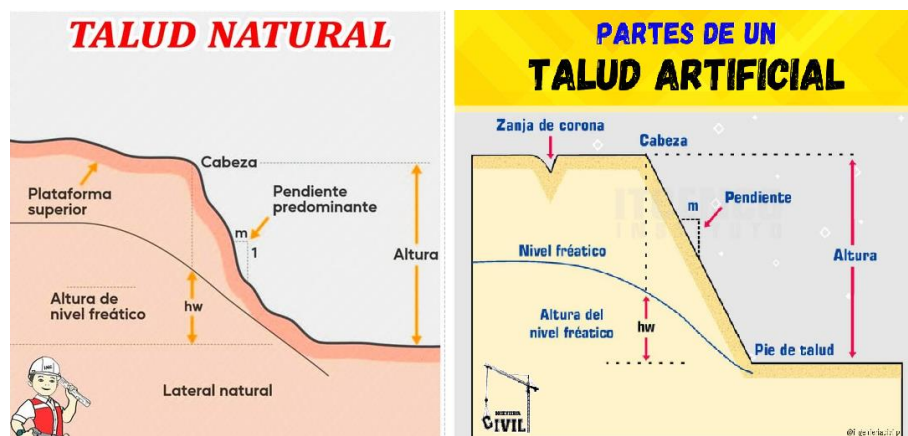
La altura piezométrica corresponde a la separación vertical entre el pie del talud y el nivel freático, donde la presión hidráulica se iguala con la atmosférica. En la práctica, esta medida suele tomarse desde debajo de la cabeza del talud, constituyendo un parámetro fundamental para evaluar la estabilidad de la ladera (Suárez Riestra, 2008; Estrada Bautista & Soberanis Bello, 2014).

2.2.5 Pendiente

La pendiente representa el grado de inclinación que tiene una superficie, como un talud o una ladera. Esta inclinación puede cuantificarse de distintas formas, en grados, como medida angular, porcentaje, donde 100% equivale a una pendiente de 45° .

Como relación $m:1$, donde m indica la distancia horizontal correspondiente a una unidad de altura vertical. Por ejemplo, una pendiente de $1H:1V$ equivale a 45° o 100% (Suárez Riestra, 2008; Estrada Bautista & Soberanis Bello, 2014).

Figura 4: Estructura de un talud natural y artificial



Fuente: Chávez Moncayo, M. Á., Blanco Torrens, R., & Watson Quesada, R. (2020).

2.3 Tipos de taludes

2.3.1 Taludes naturales

Los taludes de origen natural se generan como resultado de procesos geológicos y geomorfológicos, entre los que destacan la erosión, la sedimentación y la actividad tectónica. Su configuración geométrica tiende a ser irregular y depende de las características particulares del entorno, tales como la naturaleza de la roca, la cobertura vegetal y las condiciones

climáticas, lo que los convierte en estructuras dinámicas y variables en el tiempo (Rivas Skarleth, 2020; Estrada Bautista & Soberanis Bello, 2014).

Figura 5 Talud natural



Fuente: Taliosa (2020).

2.3.2 Taludes artificiales

Los taludes artificiales se originan a partir de intervenciones humanas, tales como excavaciones, cortes en vías, rellenos, labores mineras o la construcción de plataformas. En estos casos, tanto la pendiente como la altura son definidas conforme a criterios técnicos, con el objetivo de lograr un balance adecuado entre la funcionalidad de la obra y la estabilidad del terreno. (Estrada Bautista & Soberanis Bello, 2014; Rivas Skarleth, 2020).

Figura 6: Talud artificial



Fuente: Ingeniería Real. (2023).

Cuando un talud presenta una pendiente excesivamente inclinada, la probabilidad de que se torne inestable aumenta considerablemente. Esto ocurre porque, al incrementarse el ángulo de inclinación, también se intensifican las fuerzas que desplazan el suelo hacia abajo, reduciendo la capacidad del terreno para contrarrestarlas. Por esta razón, los estudios geotécnicos sugieren que el ángulo del talud no exceda los 45°, ya que mantenerlo dentro de este rango contribuye a preservar su estabilidad.

2.4 Clasificación de los taludes según su función o ubicación

2.4.1 Taludes de corte

“Los taludes de corte son superficies inclinadas generadas por la remoción de material del terreno, como ocurre en excavaciones para carreteras, túneles o canales. Su estabilidad depende de factores como la pendiente, el tipo de suelo y las condiciones de drenaje.” Garnica, Ramírez & Pérez (2021).

2.4.2 Taludes de relleno

“Los taludes de relleno se conforman mediante el depósito de materiales para elevar el terreno, como en terraplenes o plataformas. Su comportamiento está influenciado por la compactación, el tipo de suelo utilizado y la presencia de agua.” Flores Berenguer et al. (2022).

2.4.3 Taludes mixtos

Los taludes mixtos se caracterizan por integrar áreas tanto de corte como de relleno dentro de una misma estructura. Este tipo de configuración es frecuente en proyectos urbanos, obras viales y procesos de recuperación del paisaje. Su análisis exige una evaluación detallada de la interacción entre los materiales naturales del terreno y los elementos añadidos durante la construcción, así como la aplicación de técnicas específicas de estabilización que garanticen su

comportamiento seguro y duradero (Estrada Bautista & Soberanis Bello, 2014; Rivas Skarleth, 2020).

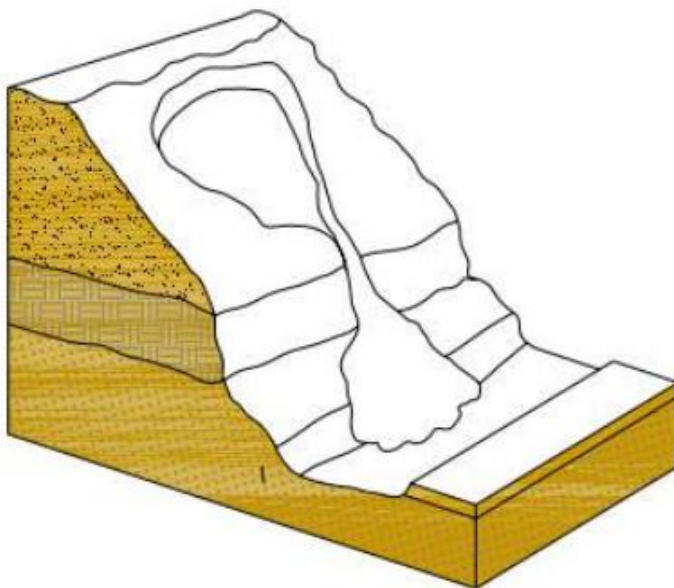
2.5 Tipos de fallas de taludes

En determinados taludes, la pérdida de estabilidad puede originar desplazamientos profundos del terreno, generando el movimiento interno de la masa dentro de la ladera. Este proceso da lugar a una superficie de ruptura de curvatura suave, que generalmente se hace evidente después del evento. Tal configuración es característica de deslizamientos en los que el suelo se desplaza siguiendo trayectorias semicirculares, lo que evidencia una falla estructural relevante en el perfil del terreno. Este tipo de fenómeno suele estar vinculado a condiciones de elevada humedad, pendientes pronunciadas y una disminución progresiva de la resistencia al corte.

2.5.1 Falla por deslizamiento superficial

Se caracterizan por movimientos lentos del suelo, que afectan principalmente taludes naturales. Este tipo de inestabilidad puede manifestarse de dos formas: una modalidad estacional, que compromete únicamente la capa más externa del terreno y suele estar influenciada por factores climáticos; y otra de tipo masivo, en la que el desplazamiento involucra toda la estructura del talud, desde las capas superficiales hasta las más profundas. Aunque su velocidad es reducida, ambas variantes pueden representar riesgos importantes, especialmente en zonas expuestas a cambios ambientales o con presencia de infraestructura cercana (Rico & Del Castillo, 1974; Lacroix, Handwerger & Bièvre, 2020; Abramento & Leite, 2024).

Figura 7: Falla por deslizamiento superficial en talud



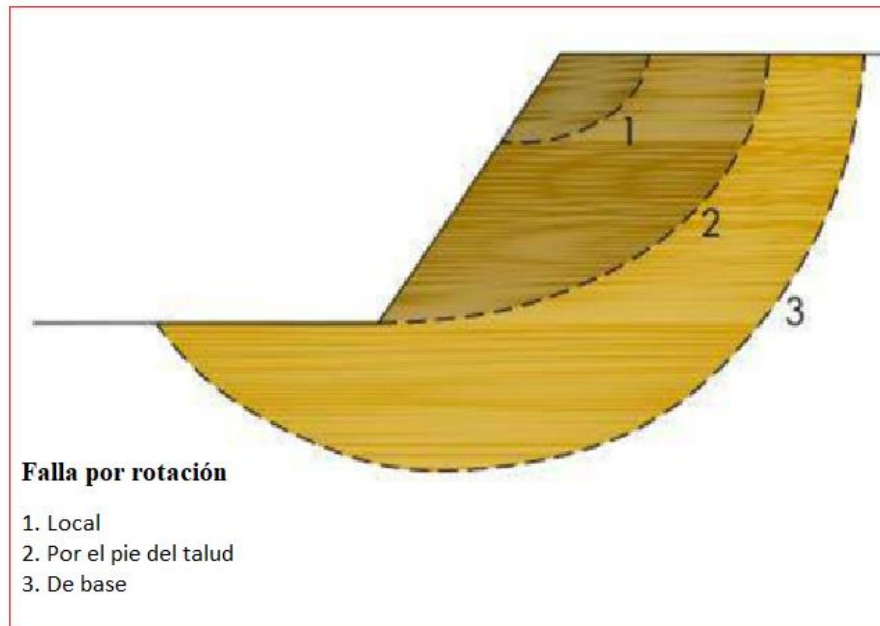
Fuente: Morales Muñoz (2012).

2.5.2 Falla por rotación

En ciertos taludes, la pérdida de estabilidad puede generar un desplazamiento profundo del suelo, provocando que la masa se movilice internamente dentro de la ladera. Como resultado de este proceso, se forma una superficie de ruptura con curvatura suave, que suele hacerse visible tras el evento. Este tipo de configuración es típica en movimientos donde el suelo se desliza siguiendo trayectorias semicirculares, reflejando una falla estructural significativa en el perfil del terreno.

Este tipo de deslizamiento suele estar asociado a condiciones de alta humedad, pendientes pronunciadas y una pérdida progresiva de resistencia al corte.

Figura 8: Tipos de fallas por rotación en taludes



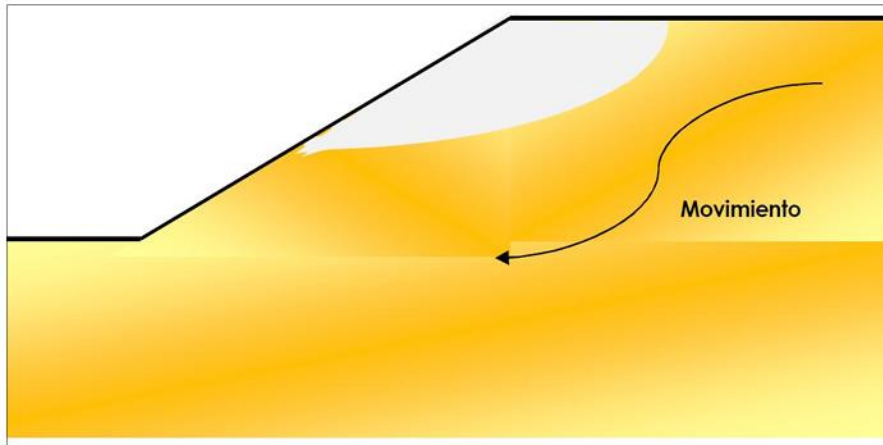
Fuente: Suárez Riestra (2008, pág. 226).

2.5.3 Falla local

Según Suárez Riestra (2008), “en algunos taludes, la pérdida de estabilidad no compromete toda la estructura, sino que se limita a una zona específica entre la parte superior y el cuerpo del terreno.” Este tipo de deslizamiento se caracteriza por su alcance reducido, ya que la base permanece estable y no forma parte del proceso de falla. Aunque el movimiento no es masivo, puede generar afectaciones importantes si ocurre en áreas sensibles o si se repite con el tiempo.

Este tipo de comportamiento suele presentarse en materiales superficiales o en condiciones donde la pérdida de estabilidad ocurre de forma limitada y localizada, sin comprometer la totalidad del perfil. Aunque menos aparente que una falla profunda, este tipo de deslizamiento puede ser asimismo riesgoso, especialmente si se repite o si afecta zonas cercanas a infraestructura o vías de acceso. (Suárez Riestra, 2008; Vargas Rojas, 2021).

Figura 9 Falla local en un talud

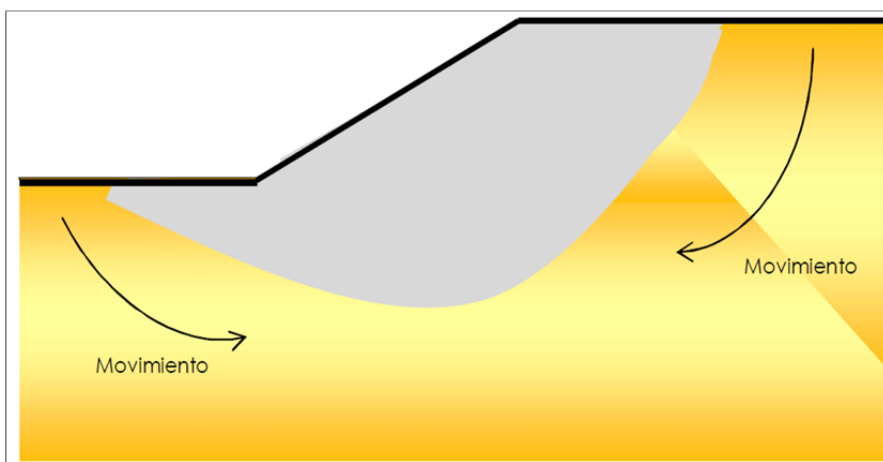


Fuente: Montoya (2009).

2.5.4 Falla de base

“Se produce cuando la superficie de ruptura atraviesa el plano horizontal que constituye la base del talud, comprometiendo toda su geometría. Este tipo de falla suele alcanzar profundidades significativas y puede estar condicionada por la presencia de estratos más resistentes que limitan el desplazamiento.” (Garnica, Ramírez & Pérez, 2021, p. 9)

Figura 10 Falla de base en un talud

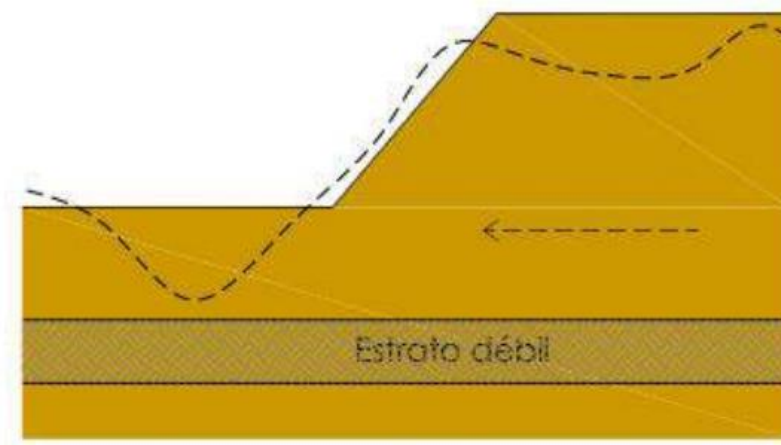


Fuente: Montoya (2009).

2.5.5 *Falla por traslación*

Este fenómeno ocurre cuando una masa de suelo se desplaza casi horizontalmente sobre una superficie de ruptura plana o con ligera inclinación, sin que se produzcan rotaciones significativas en el material. Se trata de un tipo de deslizamiento característico de terrenos con estratificación definida o con planos de debilidad, y suele presentarse en suelos granulares o de baja cohesión. El movimiento sigue la pendiente natural del terreno y puede intensificarse por factores como la saturación del suelo, la presencia de cargas adicionales o la reducción progresiva de la resistencia interna, lo que lo convierte en un proceso especialmente riesgoso en áreas intervenidas o con infraestructura cercana. (Suárez Riestra, 2008).

Figura 11 Falla por traslación en taludes



Fuente: Suárez Riestra (2008, pág. 226).

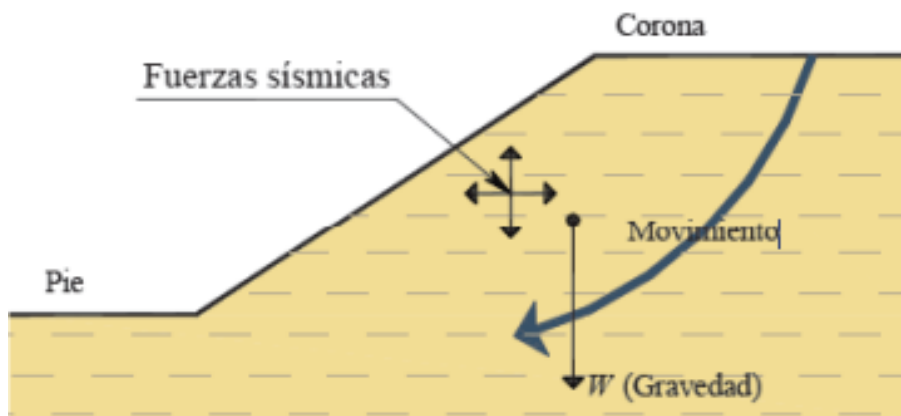
2.5.6 *Falla por flujo*

“Las fallas por flujo se presentan cuando el material del talud, generalmente suelos finos o residuales, se saturan hasta el punto de perder su estructura interna, generando un movimiento rápido y desordenado que puede recorrer grandes distancias. Este fenómeno es común en regiones tropicales con lluvias intensas y pendientes pronunciadas.” Suárez Díaz, J. (2024)

2.5.7 Falla por licuación

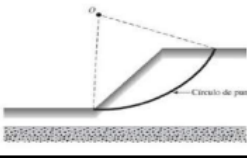

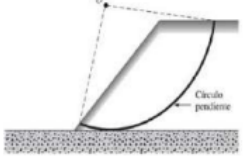
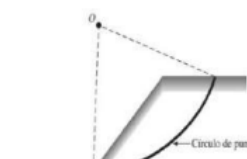
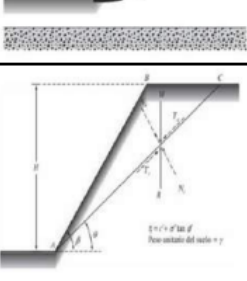
La licuación se produce cuando un suelo saturado, en especial de naturaleza arenosa, pierde su resistencia interna debido al incremento de la presión intersticial. Este proceso modifica el comportamiento del terreno, que pasa a comportarse como un fluido. En el caso de los taludes, esta condición puede originar desplazamientos repentinos y de gran magnitud, particularmente en escenarios sísmicos, donde las vibraciones aceleran la pérdida de estabilidad y propician el colapso estructural del suelo. (Seed & Idriss, 1982; Kramer, 1996; Hernández Valerio, 2023).

Figura 12 Efectos por licuación



Fuente: Geo Web Online (2024).

Figura 13: Tipo de fallas de taludes según su forma geométrica

Tipo de falla	Superficie de falla	Descripción	Gráfico
Falla de talud	Círculo punta	El círculo de falla se conoce como círculo de punta, si pasa a través de la punta del talud	
Falla superficial del talud	Círculo del talud	Cuando la falla se produce de tal manera que la superficie de deslizamiento se cruza con el talud en o por encima de su punta, que se denomina falla de talud	
Falla de talud	Círculo del talud	La falla de círculo pendiente pasa por encima de la punta del talud. Bajo ciertas circunstancias es posible tener una falla de talud poco profunda.	
Falla de la base	Círculo de medio punto	Cuando la falla se produce de tal manera que la superficie de deslizamiento pasa a cierta distancia por debajo de la punta del talud, se le llama falla de base. El círculo de falla en el caso de la falla de base se llama círculo de punto medio	
Falla plana	Falla plana	La rotura plana se produce en aquellos taludes donde por determinadas condiciones geológicas o geotécnicas, el deslizamiento de la masa de suelo ocurre a través de una única superficie plana, llamada plano de rotura	

Fuente: Braja M, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, (2015).

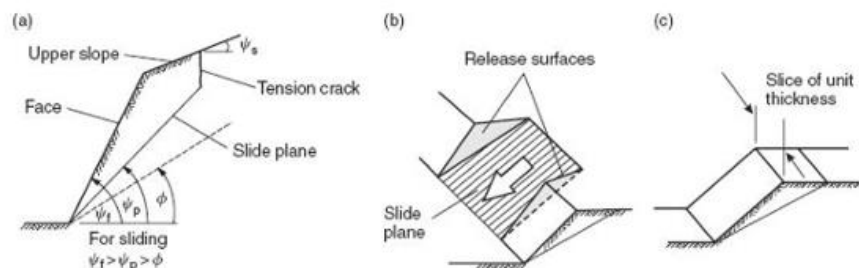
2.6 Tipos de fallas según el control estructural

Las fallas en taludes también pueden analizarse según el control estructural que ejercen las discontinuidades geológicas presentes en el macizo. Este enfoque permite identificar si el deslizamiento está condicionado por la orientación de planos de estratificación, diaclasas o fracturas, lo cual es fundamental en taludes rocosos. Según esta interacción, las fallas se clasifican según la interacción con discontinuidades geológicas que se muestran a continuación:

2.6.1 Falla planar

Ocurre cuando el deslizamiento se produce sobre una única discontinuidad plana que intersecta el talud. Es típica en macizos rocosos con orientación desfavorable de los planos de estratificación o diaclasas. “La condición de falla planar se presenta cuando el plano de discontinuidad tiene una inclinación similar o menor a la del talud, y está orientado hacia el vacío” (Obregón Mitma, 2025).

Figura 14 Falla por deslizamiento superficial en taludes naturales



Fuente: Obregón Mitma, C. (2025).

2.6.2 Falla en cuña

Se genera por la intersección de dos planos de discontinuidad que forman una cuña. El deslizamiento ocurre a lo largo de la línea de intersección. “La falla en cuña es común en

macizos rocosos con dos familias de discontinuidades que convergen en dirección al talud” (Obregón Mitma, 2025).

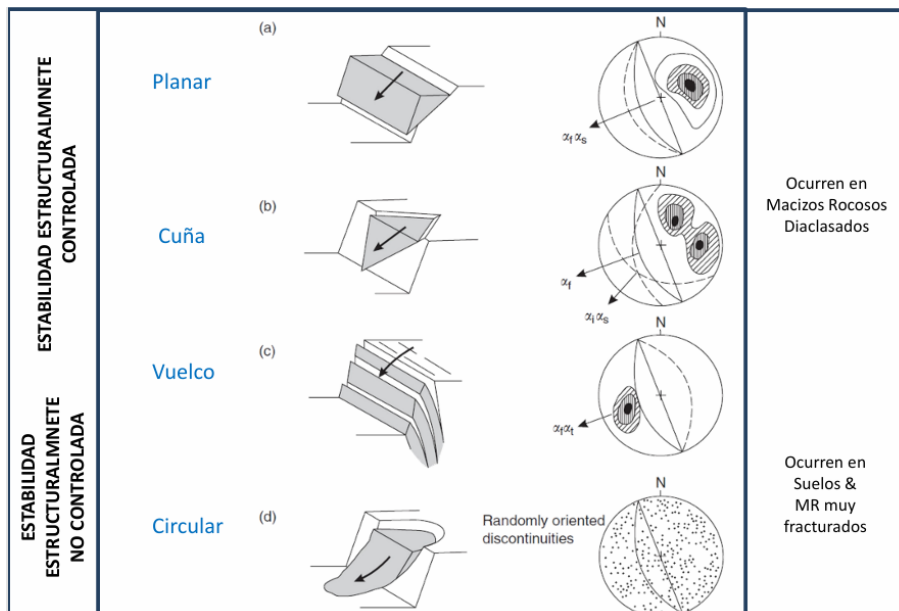
2.6.3 Falla por vuelco (toppling)

Se produce cuando bloques de roca rotan hacia adelante por efecto de la gravedad, debido a la inclinación de las discontinuidades opuestas al talud. “El vuelco ocurre cuando los planos de discontinuidad están inclinados hacia atrás respecto al talud, generando rotación de bloques” (Obregón Mitma, 2025).

2.6.4 Falla circular

Es típica en suelos o macizos rocosos muy fracturados, donde no existe un control estructural definido. La superficie de deslizamiento es curva y se analiza mediante métodos de equilibrio límite. “La falla circular se caracteriza por una superficie rotacional, común en suelos cohesivos o rocas altamente alteradas” (Obregón Mitma, 2025).

Figura 15 Modos potenciales de falla en taludes según el control estructural



Fuente: Elaboración por autores.

2.7 Derrumbes en taludes

“Los derrumbes consisten en el colapso repentino de una masa de suelo o roca, generalmente en materiales no consolidados, que se desplaza de forma rápida y sin una superficie de falla claramente definida. Suelen estar asociados a pendientes inestables, lluvias intensas o vibraciones sísmicas.” Flores Berenguer et al. (2020)

Figura 16 Derrumbes en taludes en carretera



Fuente: Amelia Rueda. (2024).

2.8 Caídas en taludes

“Las caídas se producen cuando bloques de roca o fragmentos de suelo se desprenden de una pendiente casi vertical y descienden por gravedad, sin una superficie de deslizamiento bien definida. Este tipo de movimiento es común en taludes rocosos fracturados o erosionados.”

Suárez Díaz, J. (2024).

2.9 Importancia del análisis de estabilidad

El análisis de estabilidad de taludes es esencial para prevenir deslizamientos que puedan causar pérdidas humanas, daños a la infraestructura y afectaciones ambientales. Según la

Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR, 2012), en Ecuador se han registrado más de 150 deslizamientos entre 2010 y 2023, muchos de ellos en zonas montañosas con alta vulnerabilidad geológica.

2.10 Factores que afectan la estabilidad

La estabilidad de un talud está determinada por la interacción de diversas variables, las cuales influyen directamente en su respuesta frente a esfuerzos de origen natural o antrópico. Estos factores se dividen en dos grandes grupos: factores condicionantes y factores desencadenantes.

2.10.1 Factores condicionantes

Son las características propias del terreno y del entorno que determinan la susceptibilidad del talud a fallar. Incluyen los siguientes aspectos:

2.10.1.1 Geometría del talud

La geometría de un talud, definida por su altura, ángulo de inclinación y configuración, ejerce una influencia directa sobre la distribución de los esfuerzos internos. En aquellos casos donde las pendientes son muy pronunciadas o se presentan sobrecortes, las tensiones tienden a concentrarse en zonas críticas, lo que incrementa la probabilidad de falla. En este sentido, distintos estudios destacan que tanto la forma del material como el ángulo de la pendiente constituyen factores clave para la estabilidad, ya que condicionan la manera en que se distribuyen las cargas y los empujes dentro del terreno. (Santos Jara, 2020; Ocando Sánchez, 2020; Mamani & Pisco, 2020).

2.10.1.2 Propiedades del suelo o roca

La resistencia al corte de un terreno está determinada por parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción interna, la densidad y el grado de meteorización. Los suelos con baja

cohesión o las rocas fracturadas muestran una mayor vulnerabilidad frente a procesos de deslizamiento. En este contexto, diferentes investigaciones destacan que tanto la calidad de las fracturas como el nivel de meteorización del material constituyen factores que modifican de manera significativa el comportamiento mecánico de los taludes. (Santos Jara, 2020; Mamani & Pisco, 2020; Ocando Sánchez, 2020).

2.10.1.3 Presencia de agua

El agua constituye uno de los factores más determinantes en la estabilidad de los taludes. La infiltración y el incremento de la presión intersticial disminuyen la resistencia del terreno, pudiendo desencadenar procesos como la licuación o el flujo. En este contexto, Flores Berenguer et al. (2023) subrayan que el estudio de la mecánica de suelos parcialmente saturados permite integrar variables hidrológicas que influyen en la estabilidad de los taludes, aportando así una visión renovada en el análisis de estos fenómenos.

2.10.1.4 Condiciones geológicas

Las condiciones geológicas, como la orientación de estratos, la presencia de discontinuidades, fallas o contactos litológicos, condicionan el tipo y la dirección del deslizamiento. Taludes ubicados en zonas con estratificación inclinada o materiales heterogéneos presentan mayor riesgo de falla. En este sentido, diversos estudios señalan que la estructura geológica de los taludes juega un papel decisivo en la estabilidad, especialmente cuando se combina con geometrías desfavorables (Santos Jara, 2020; Mamani & Pisco, 2020; Ocando Sánchez, 2020).

2.10.2 Factores desencadenantes

Son eventos o acciones que activan el proceso de inestabilidad, generando el movimiento del terreno. Entre ellos se encuentran:

2.10.2.1 Cargas externas

Las cargas inducidas por actividades humanas, como edificaciones, tránsito vehicular, operación de maquinaria pesada o la ejecución de rellenos, alteran el equilibrio natural de los taludes. Estas intervenciones generan esfuerzos adicionales que pueden superar la resistencia del terreno. En este contexto, distintos estudios destacan que la estabilidad de los taludes está condicionada por factores capaces de modificar tanto las fuerzas internas como las externas que actúan sobre el suelo. (Santos Jara, 2020; Ocando Sánchez, 2020; Mamani & Pisco, 2020).

2.10.2.2 Actividad sísmica o volcánica

La actividad sísmica o volcánica constituye uno de los principales desencadenantes de fallas súbitas en taludes, especialmente con baja cohesión y en suelos saturados. Las vibraciones producidas por la actividad sísmica generan esfuerzos dinámicos que modifican la distribución de las tensiones internas del terreno y disminuyen su resistencia efectiva, favoreciendo procesos de licuación o colapso estructural. Diversos estudios han evidenciado que la inclusión del coeficiente sísmico regional en el cálculo del factor de seguridad posibilita la evaluación de escenarios críticos de inestabilidad, y anticipar posibles fallas en condiciones extremas (Santos Jara, 2020; Mamani & Pisco, 2020; Ocando Sánchez, 2020).

Estos factores pueden actuar de forma combinada, desencadenando movimientos en masa. A continuación, en la figura 12 resume estos factores.

Figura 17 Factores que influyen en la estabilidad de taludes



Fuente: Elaborado por autores.

2.11 Estrategias de Estabilización para reducir las Fallas de Taludes

La estabilidad de los taludes puede verse afectada por múltiples factores, entre ellos la infiltración de agua, la configuración geométrica del terreno, las cargas externas y las características propias del suelo. Para reducir estos riesgos, se emplean distintas técnicas de estabilización que integran soluciones de tipo hidráulico, estructural y natural.

2.11.1 Modificación geométrica del talud

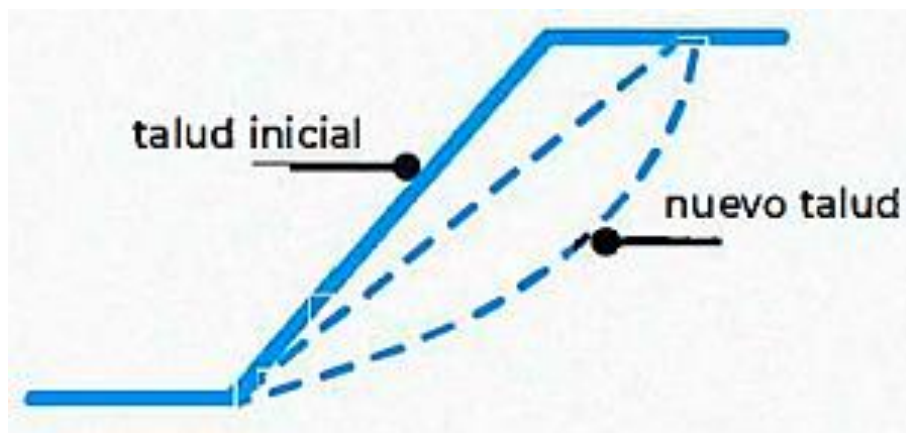
Constituye una técnica de estabilización que implica la reconfiguración del perfil del terreno, comúnmente a través del aplanamiento de pendientes pronunciadas o la incorporación de bermas escalonadas. El objetivo principal de esta intervención es reducir los esfuerzos cortantes dentro de la masa del suelo y mejorar el factor de seguridad, especialmente en suelos granulares o residuales, donde las inclinaciones marcadas incrementan la susceptibilidad a procesos de inestabilidad superficial. (Tarambís Rodríguez, 2020; Soto Luzuriaga, 2021).

“La reducción del ángulo de talud y la incorporación de bermas mejora significativamente el factor de seguridad en suelos friccioneaste” (Zhang et al., 2022). A continuación, se define las formas diferentes formas de realizar la modificación geométrica

2.11.1.1 Reducción del ángulo de pendiente del talud

La reducción del ángulo de la pendiente implica atenuar la acción de la fuerza gravitatoria sobre el terreno. Un talud con menor inclinación incrementa su capacidad de resistencia frente al deslizamiento y proyecta la sensación de un perfil más estable y equilibrado.

Figura 18 Disminución del ángulo del talud

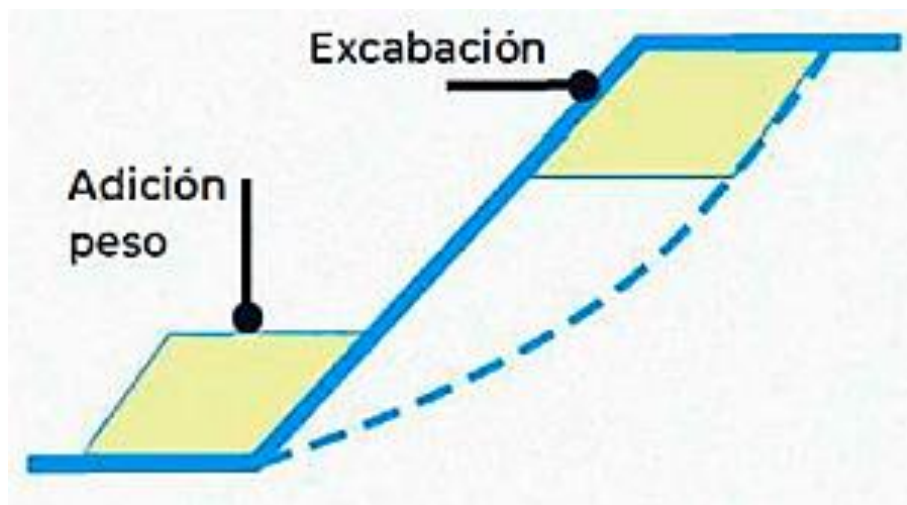


Fuente: Geocontacto (2023).

2.11.1.2 Descabezamiento del talud

La técnica consiste en remover material de la parte superior o “corona” del talud. Al reducir la carga en la cabecera, se disminuye la presión ejercida hacia abajo, lo que equivale a liberar al terreno de un peso excesivo y, en consecuencia, mejorar sus condiciones de estabilidad. (Rodríguez & González, 2020; Universidad Nacional de Colombia, 2020; Gurruchaga & Viscarra, 2020).

Figura 19 Eliminación de peso en la cabecera y adición de peso en el pie talud

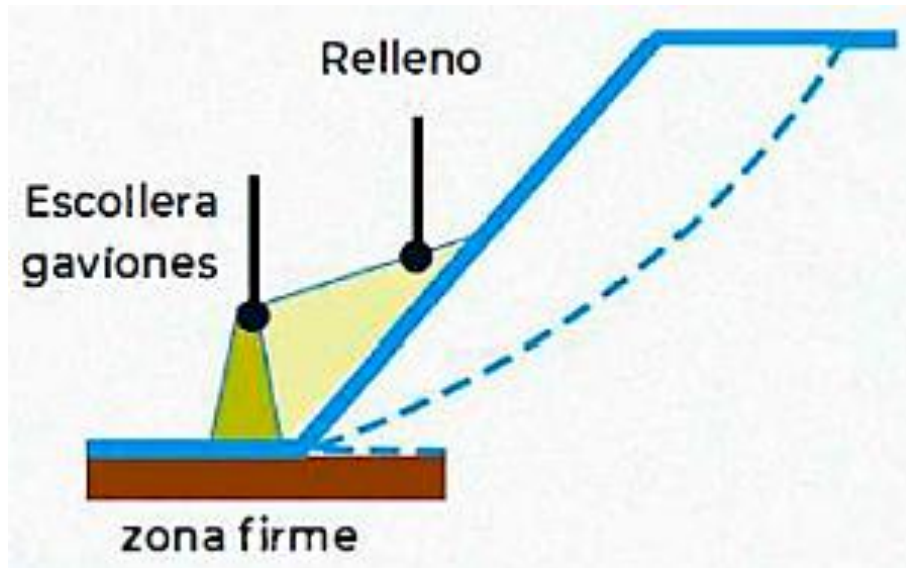


Fuente: Geocontacto (2023).

2.11.1.3 Refuerzo en el pie del talud

Se incrementa el peso en la base mediante tacones, rellenos o escolleras. Esta acción funciona como colocar un contrapeso que estabiliza la pendiente, dándole un “ancla” sólida que evita que el terreno se desplace. Es el equivalente a fortalecer los cimientos de una pared.

Figura 20 Refuerzo y peso en el pie del talud



Fuente: Geocontacto (2023).

2.11.1.4 Aplanamiento de pendientes escarpadas

La reducción del ángulo de inclinación de un talud constituye una medida de estabilización que permite disminuir los esfuerzos cortantes en la masa del suelo y, en consecuencia, incrementar el factor de seguridad frente a fallas tanto superficiales como profundas. La geometría del talud ejerce una influencia directa sobre su estabilidad; por ello, suavizar la pendiente favorece el equilibrio estático y reduce significativamente el riesgo de deslizamiento. (Martínez, López & Ramírez, 2020).

2.11.1.5 Construcción de bermas o bancos

Las bermas son estructuras en forma de escalones que interrumpen la continuidad del talud, reducen la energía de la escorrentía superficial y actúan como elementos disipadores frente a la caída de rocas, favoreciendo la estabilidad local. Su implementación contribuye al

control de la erosión, a la disminución de la velocidad del agua pluvial y a la disipación de la energía cinética de los materiales en movimiento (CONDESAN–AICCA, 2021).

Figura 21 Construcción de bermas o bancos para la estabilización de un talud



Fuente: Ecogreen (2018).

2.11.1.6 Cobertura vegetal y revegetación

La cobertura vegetal contribuye a la estabilización del suelo superficial, disminuye los procesos erosivos y favorece el drenaje natural. Para este fin se emplean especies nativas caracterizadas por raíces profundas y adecuada adaptación a las condiciones climáticas locales. Se trata de una técnica de bajo costo y sostenible, especialmente apropiada para taludes en entornos naturales o rurales.

2.11.2 Control de materiales inestables

Esta estrategia se aplica en taludes rocosos o mixtos donde la inestabilidad está asociada a bloques sueltos, derrubios o fragmentos fracturados. Su objetivo es prevenir desprendimientos mediante la remoción controlada de materiales críticos y la instalación de sistemas de

contención superficial, como mallas metálicas, bulonado o revestimientos de concreto proyectado (Valiente Sanz, Sobrecases Martí & Díaz Orrego, 2020; Centro Geotécnico Internacional, 2025).

2.11.2.1 Escalado y corte de bloques sueltos

Consiste en la remoción manual o mecánica de rocas y derrubios que presentan riesgo de desprendimiento. Esta técnica se aplica en taludes con fracturamiento superficial, donde los bloques inestables pueden iniciar procesos de caída o colapso local.

Valiente Sanz, Sobrecases Martí y Díaz Orrego (2020) señalan que el escalado es una medida preventiva clave en taludes rocosos. De manera similar, Gurruchaga y Viscarra (2020) destacan su aplicación en proyectos viales, mientras que el Centro Geotécnico Internacional (2025) confirma su utilidad en macizos fracturados.

Figura 22 Control de materiales inestables en un talud



Fuente: López Montes, A. M. (2025).

2.11.2.2 Uso de mallas metálicas

La instalación de mallas de acero galvanizado o de triple torsión permite contener bloques sueltos y evitar su desplazamiento superficial. Estas mallas se fijan al talud mediante pernos o anclajes, formando una barrera flexible que intercepta materiales en movimiento sin modificar la geometría del terreno.

“La solución de estabilización mediante mallas metálicas mejoró la cohesión de las rocas y el suelo del talud, aumentando la resistencia ante la erosión fluvial.” (Universidad Técnica de Manabí, 2021).

Figura 23 Uso de mallas metálicas en taludes



Fuente: López Montes, A. M. (2025).

2.11.3 Sistemas de contención estructural

Las soluciones geotécnicas de carácter estructural están concebidas para contrarrestar el empuje lateral del terreno y evitar desplazamientos de gran magnitud en taludes con condiciones de inestabilidad. Su aplicación resulta especialmente pertinente en situaciones

donde no es posible modificar la geometría del talud o cuando se busca garantizar la protección de infraestructuras críticas.

2.11.3.1 Muros de contención en el pie del talud

Los muros de contención constituyen estructuras rígidas emplazadas en la base de los taludes, cuya función principal es resistir el empuje activo del suelo y prevenir el colapso de la masa inestable. El diseño de estas obras depende de variables como la altura del talud, las características geotécnicas del terreno, la presión intersticial y las cargas externas que actúan sobre la estructura (Universidad Técnica de Manabí, 2021).

Figura 24 Muro de contención prefabricado tipo MC en el pie de un talud



Fuente: Mitlan Ingeniería. (2025).

2.11.3.2 Defensas de hormigón o acero

Las defensas rígidas, tales como muros de hormigón armado o barreras metálicas, se implementan en áreas de tránsito o en sectores con infraestructura crítica con el propósito de interceptar la caída de rocas o materiales desprendidos. Estas estructuras funcionan como sistemas de protección pasiva, al disipar la energía generada por el impacto y prevenir daños tanto a las personas como a los bienes (CONDESAN – AICCA Ecuador, 2021).

Figura 25 Aplicación de malla de acero de doble torsión para la protección de taludes



Fuente: Maccaferri. (2017).

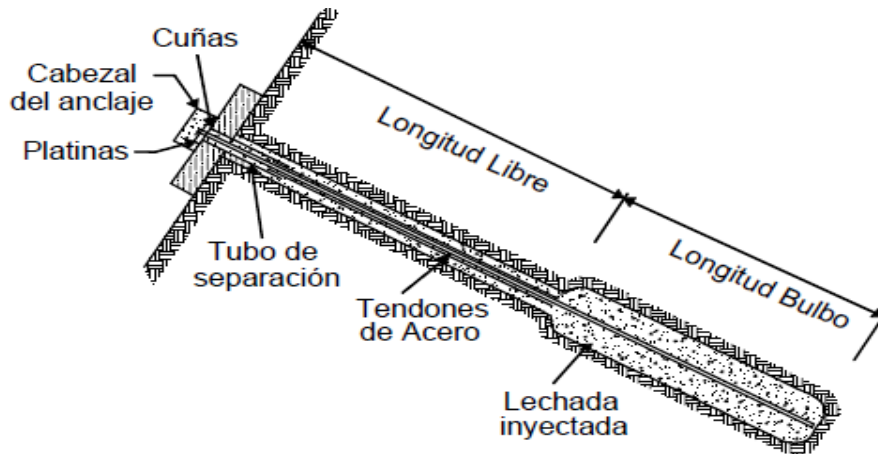
2.11.4 Estabilización profunda de taludes

La estabilización profunda consiste en reforzar internamente el macizo mediante elementos que transfieren cargas desde zonas inestables hacia estratos más competentes. Esta técnica se aplica cuando las soluciones superficiales no son suficientes para controlar mecanismos de falla rotacional, traslacional o por corte profundo.

2.11.4.1 Anclajes y pernos de roca

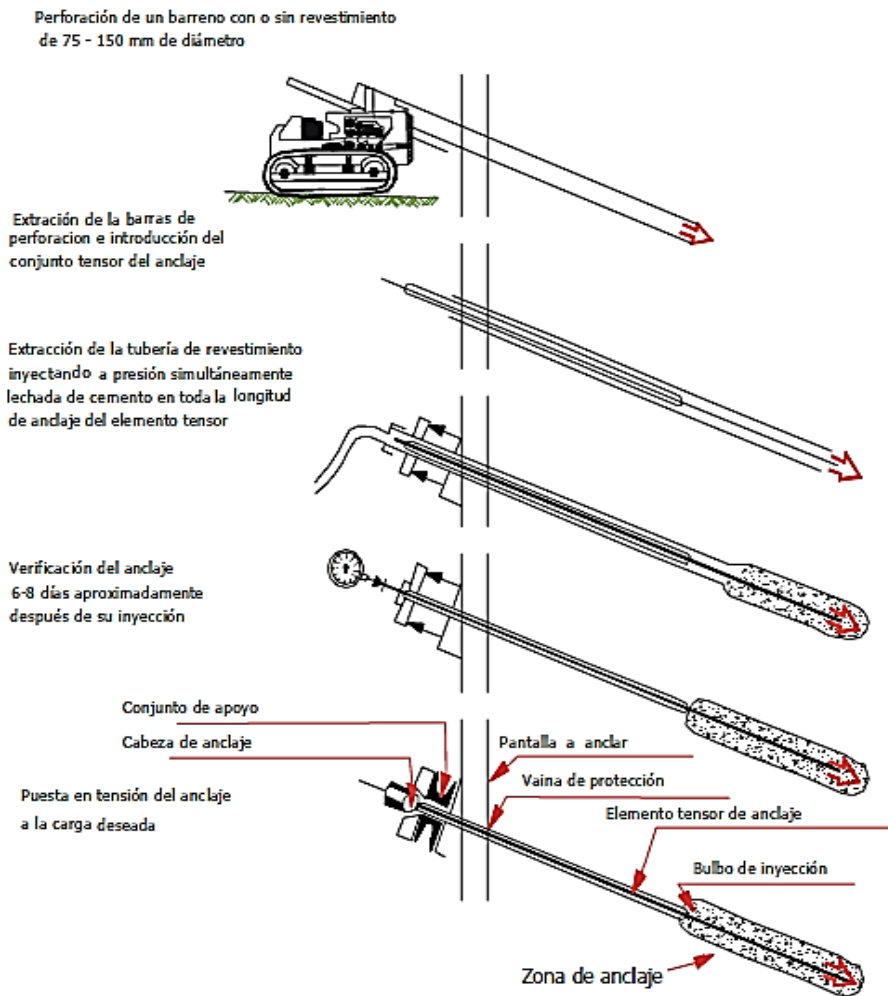
Los anclajes y pernos de roca constituyen elementos de refuerzo empleados en la estabilización de taludes y estructuras de contención. Su función principal es transferir las cargas desde las zonas inestables hacia estratos más competentes, incrementando la cohesión interna y la resistencia al corte del macizo. De esta manera, contribuyen a controlar desplazamientos y a mejorar el factor de seguridad global del talud. Estos sistemas han demostrado ser eficaces en proyectos de infraestructura en Ecuador, particularmente en obras hidráulicas y viales, donde las condiciones geotécnicas requieren soluciones de soporte adicionales (Guevara Duta, 2015).

Figura 26 Elementos de un anclaje



Fuente: Cimentatec (2022).

Figura 27 Procedimiento de ejecución de los anclajes



Fuente: Cimentatec (2022).

2.11.4.2 *Uso de tacos y micropilotes*

Son soluciones de refuerzo puntual que se instalan en zonas críticas del talud con el objetivo de incrementar la capacidad portante y la estabilidad interna del terreno. Estos elementos permiten transferir cargas verticales hacia estratos más competentes y proporcionan un confinamiento adicional en suelos heterogéneos o de baja resistencia. En estudios realizados en Quito, se ha demostrado que la incorporación de micropilotes en taludes urbanos reduce significativamente el riesgo de deslizamientos, especialmente en sectores con alta pluviosidad y presencia de suelos volcánicos, donde las condiciones geotécnicas demandan sistemas de soporte complementarios (Calderón Cabascango, 2023).

Figura 28 Estabilización de talud mediante micropilotes



Fuente: Prontubeam. (2016).

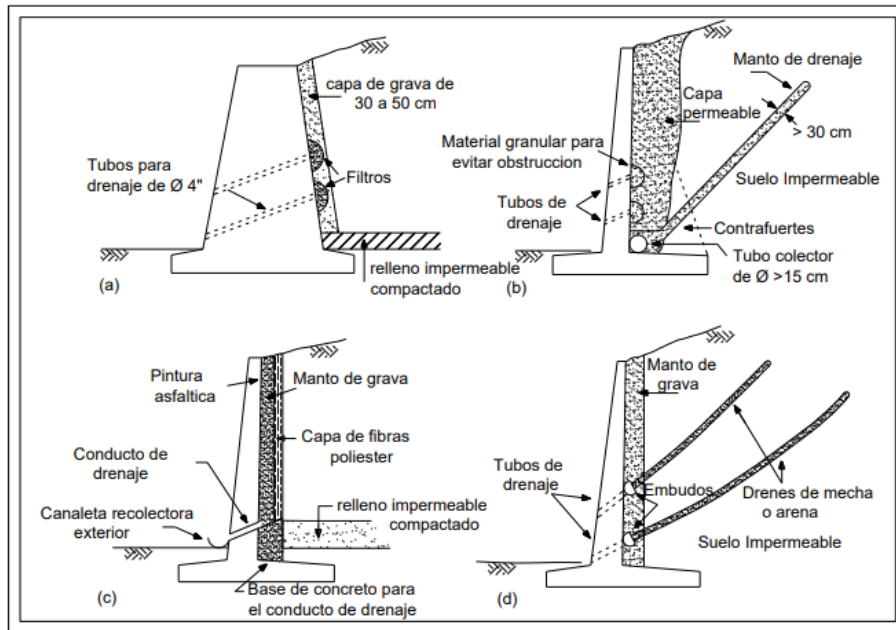
2.11.5 Gestión del agua y drenaje

El manejo del agua en taludes constituye una estrategia fundamental para garantizar la estabilidad del terreno, más allá de ser una medida complementaria. La infiltración no controlada puede provocar la saturación del suelo, incrementar la presión intersticial y reducir la resistencia al corte, lo que favorece la ocurrencia de fallas superficiales, procesos de erosión acelerada o incluso deslizamientos de mayor profundidad. En consecuencia, la implementación de sistemas de drenaje tanto superficial como interno resulta indispensable (Flores Berenguer, González Haramboure & García Tristá, 2020).

2.11.5.1 Construcción de drenajes de escorrentía

Los sistemas de drenaje superficial están diseñados para captar y conducir el agua de lluvia antes de que se infiltre en el terreno. Al dirigir el flujo pluvial mediante zanjas, cunetas o canales revestidos, se logra disminuir de manera significativa la saturación del suelo, controlar los procesos de erosión superficial y evitar el incremento de la presión intersticial, factores que suelen desencadenar fallas superficiales o deslizamientos durante periodos de lluvias intensas (Castro Solórzano, 2023).

Figura 29 Drenajes de los muros de contención

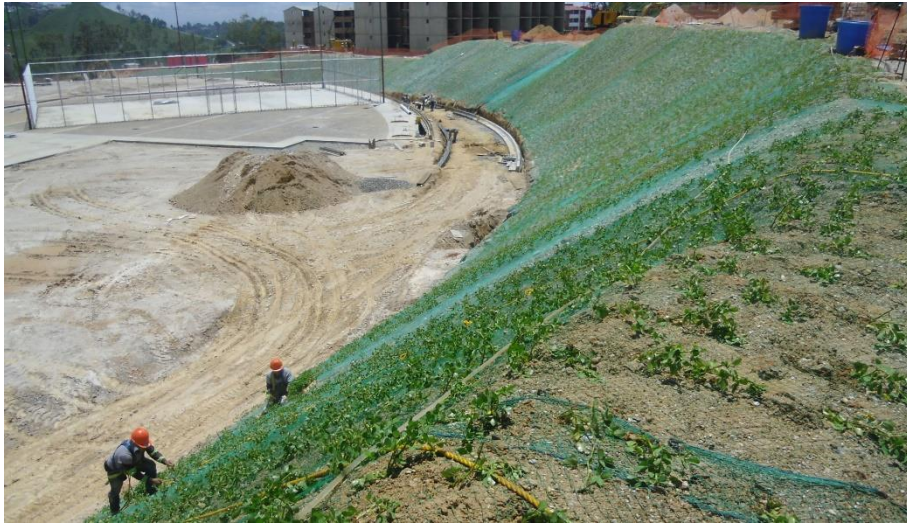


Fuente: Cevallos, J. P. (2019).

2.11.5.2 Uso de geotextiles

Son materiales sintéticos de carácter permeable que se instalan en el interior de los taludes con el fin de optimizar el drenaje interno y reforzar la estructura del suelo. Funcionan como filtros que permiten la circulación del agua, reteniendo al mismo tiempo las partículas finas, lo que contribuye a disminuir la presión intersticial y a incrementar la estabilidad del macizo. Su aplicación resulta especialmente adecuada en suelos coluviales, rellenos susceptibles a la saturación y áreas con deficiente drenaje, donde se busca controlar procesos de reptación y prevenir fallas asociadas a la pérdida de cohesión (Flores Berenguer, González Haramboure & García Tristán, 2020).

Figura 30 Aplicación de geotextiles en taludes para control de erosión y refuerzo del terreno



Fuente: Comopaca (2023).

2.11.6 Protección pasiva

Consiste en la instalación de sistemas destinados a contener o interceptar materiales sueltos, como rocas o derrubios, sin modificar directamente la estructura del terreno. Este tipo de medidas resulta particularmente eficaz en taludes rocosos con riesgo de desprendimiento, donde la finalidad principal es salvaguardar infraestructuras o áreas de tránsito sin alterar la pendiente natural (CONDESAN – AICCA Ecuador, 2021).

2.11.6.1 Vallas y barreras dinámicas

Los sistemas flexibles de protección están diseñados para interceptar rocas en caída libre y disipar la energía del impacto sin llegar a colapsar. Estas estructuras, conformadas por redes de acero, postes anclados y dispositivos amortiguadores, permiten deformaciones controladas que garantizan su eficacia. Se instalan en áreas de tránsito, infraestructuras críticas o en la base de taludes rocosos con alta recurrencia de desprendimientos. Su función principal es brindar seguridad sin alterar la geometría del talud, actuando como un mecanismo de defensa pasiva frente a eventos impredecibles (CONDESAN – AICCA Ecuador, 2021).

Figura 31 Barreras dinámicas para la protección de taludes



Fuente: Yepes, V. (2020).

2.11.6.2 Rejillas aseguradas a bloques sueltos

Las rejillas metálicas instaladas directamente sobre bloques rocosos inestables representan una solución superficial de refuerzo que impide el desplazamiento de fragmentos en sectores fracturados. Estas estructuras, fabricadas comúnmente en acero galvanizado o con diseño de triple torsión, se fijan al terreno mediante pernos o cables, conformando una malla de contención que estabiliza el talud sin modificar su geometría. Su aplicación resulta especialmente eficaz en taludes rocosos con fracturamiento superficial, donde el riesgo está vinculado a elementos discretos más que a la masa completa (Universidad Técnica de Manabí, 2021).

2.12 Sistemas de Contención de Talud

Los sistemas de contención de taludes son soluciones geotécnicas diseñadas para prevenir o controlar deslizamientos, estabilizar pendientes y proteger infraestructuras en zonas vulnerables

Su función principal es resistir los empujes del terreno, controlar la erosión superficial y reducir la presión intersticial mediante soluciones de drenaje. El diseño de estos sistemas debe considerar las características del suelo, la geometría del talud, las condiciones hidrológicas y los factores sísmicos, integrando criterios de seguridad, durabilidad y adaptación al entorno (Valiente Sanz, Sobrecases Martí & Díaz Orrego, 2020; Centro Geotécnico Internacional, 2025).

2.12.1 Muro de contención

Son estructuras diseñadas para resistir el empuje lateral del terreno y evitar deslizamientos en taludes naturales o artificiales. Pueden ser de gravedad, reforzados con concreto armado, gaviones o tierra estabilizada. Su diseño debe considerar factores como el tipo de suelo, la presión activa y pasiva, el drenaje y las condiciones sísmicas. Estas soluciones son especialmente útiles en zonas urbanas o de infraestructura crítica, donde el espacio y la seguridad demandan estructuras robustas y duraderas (Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, 2019).

Figura 32 Muro de contención aplicado en estabilización de taludes



Fuente: ENCIVIL S.A.S. (2020).

2.12.2 Malla de triple torsión

La malla de triple torsión es una solución pasiva utilizada para el control de caída de rocas en taludes escarpados. Está compuesta por alambres de acero galvanizado entrelazados en forma hexagonal, lo que le otorga flexibilidad y resistencia mecánica.

Su función principal es contener fragmentos rocosos que se desprenden por meteorización o vibraciones, evitando que alcancen infraestructuras o vías. Se instala directamente sobre el talud y puede complementarse con anclajes, geotextiles o sistemas de drenaje (CONDESAN, 2021).

Figura 33 Aplicación de malla de triple torsión en taludes para control de caída de rocas



Fuente: (Yepes, 2021).

2.12.3 Barrera dinámica

Las barreras dinámicas son sistemas de protección diseñados para interceptar y disipar la energía de caída de rocas o flujos rápidos en taludes. Están compuestas por postes metálicos, cables de acero, amortiguadores y mallas flexibles que permiten absorber impactos sin colapsar. A diferencia de las soluciones rígidas, estas barreras se adaptan al terreno y al tipo de amenaza, siendo ideales en zonas montañosas o de tránsito vehicular. Su instalación requiere estudios de energía cinética, trayectoria de caída y frecuencia de eventos (Suárez Díaz, 2024).

Figura 34 Instalación de barrera dinámica para estabilización de taludes



Fuente: Vertikaless (2020).

2.13 Tipos de Suelos en Taludes

2.13.1 Suelos no cohesivos ($C = 0$)

Estos suelos, como las arenas limpias o gravas, carecen de cohesión entre partículas. Su resistencia al corte depende exclusivamente del ángulo de fricción interna. En taludes formados por estos materiales, la superficie de falla tiende a ser plana o rectilínea, y la estabilidad se logra si el ángulo del talud es menor que el ángulo de fricción del suelo.

Como señala Suárez Díaz (2024), “los suelos granulares presentan superficies de falla planas y su estabilidad depende del ángulo de fricción interna, siendo críticos cuando se superan los 30–35°”

2.13.2 Suelos cohesivos ($C \neq 0$)

Incluyen materiales como arcillas y limos, que presentan cohesión entre partículas y una resistencia al corte que depende tanto de la cohesión como del ángulo de fricción interna. En taludes compuestos por estos suelos, la superficie de falla suele ser curva o circular, lo que

implica un comportamiento más complejo frente a esfuerzos externos, especialmente bajo condiciones de humedad. Son altamente susceptibles a fallas por saturación, cambios en el contenido de agua o presión de poros, por lo que su análisis de estabilidad requiere métodos especializados como los de equilibrio límite (Bishop, Janbu, entre otros). Para garantizar su estabilidad, se recomiendan soluciones como drenajes profundos, muros estructurales, pilotes o pantallas ancladas, dependiendo de la geometría del talud y las condiciones del terreno (Benavides Castro, 2015; Tapia Chávez & Rivas Salazar, 2019; Carvajal & Ventura, 2022; Rodríguez, 2025).

2.13.3 Suelos residuales y tropicales

En zonas tropicales, los suelos residuales derivados de la meteorización de rocas presentan estructuras complejas, con capas heterogéneas y alta sensibilidad a la humedad. Su comportamiento puede variar entre cohesivo y no cohesivo, lo que complica el análisis de estabilidad. Estos suelos requieren un estudio detallado de sus propiedades geotécnicas, ya que la variabilidad en su estructura y la influencia de la humedad pueden generar condiciones críticas de inestabilidad (Ng et al., 2020; Rahardjo et al., 2021; Zhang et al., 2022).

2.14 Caracterización geotécnica de taludes

La estabilidad de un talud depende directamente de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que lo conforman. Estas propiedades determinan la resistencia al corte del suelo o roca frente a fuerzas desestabilizadoras como el peso propio, la saturación, las cargas externas y la actividad sísmica. Dichas propiedades se obtienen mediante ensayos de laboratorio y de campo, que permiten caracterizar parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción interna, la densidad y la permeabilidad. La caracterización geotécnica es, por tanto, un paso esencial para evaluar la seguridad y definir medidas de estabilización (Giler Cedeño, 2024; Escuela Politécnica Nacional, 2023).

2.15 Propiedades mecánicas

2.15.1 Cohesión (c)

La cohesión es la fuerza de atracción interna entre las partículas del suelo que permite que permanezcan unidas incluso en ausencia de presión normal. Es especialmente significativa en suelos finos como arcillas, donde las fuerzas interparticulares (electrostáticas y capilares) generan una resistencia adicional al corte. Este parámetro constituye uno de los componentes fundamentales de la resistencia al corte en el criterio de Mohr-Coulomb y resulta crítico en la evaluación de la estabilidad de taludes (Qualicon Latam, 2020; Angelone, 2020; Universidad Nacional de Colombia, 2021).

La cohesión se determina mediante ensayos de laboratorio como el corte directo o el triaxial, y se expresa en kilopascales (kPa). Suelos con alta cohesión pueden ser estables en condiciones secas, pero tienden a perder resistencia al saturarse, tal como señalan Zhou et al., (2021).

Suelos con alta cohesión (arcillas plásticas) pueden ser estables en seco, pero pierden resistencia al saturarse. Suelos sin cohesión (arenas limpias) dependen exclusivamente de la fricción interna.

Ecuación 1 Resistencia al corte (criterio de Mohr-Coulomb)

$$\tau = c + \sigma * \tan \varphi$$

Donde:

τ : resistencia al corte

c : cohesión

σ : esfuerzo normal

ϕ : ángulo de fricción

“La cohesión efectiva es un parámetro crítico en suelos arcillosos, especialmente bajo condiciones de saturación y carga dinámica” (Zhou et al., 2021, p. 5).

2.15.2 Ángulo de fricción interna (ϕ)

El ángulo de fricción interna (ϕ) expresa la capacidad del suelo para oponerse al deslizamiento, producto de la fricción generada entre sus partículas. Se trata de una propiedad esencial en suelos granulares como arenas y gravas, donde la resistencia al corte depende principalmente de la interacción mecánica entre partículas. Este parámetro se mide en grados y se obtiene mediante ensayos de laboratorio como el corte directo o el triaxial. Un mayor valor de ϕ se traduce en una mayor estabilidad del talud, especialmente en condiciones secas y sin cohesión (Zhang et al., 2022).

De acuerdo con Zhang et al. (2022), “el ángulo de fricción interna es el parámetro más sensible en el cálculo del factor de seguridad en suelos no cohesivos” (p. 12). Esta afirmación resalta la importancia de caracterizar con precisión dicho parámetro que garantizan la confiabilidad de la estabilidad.

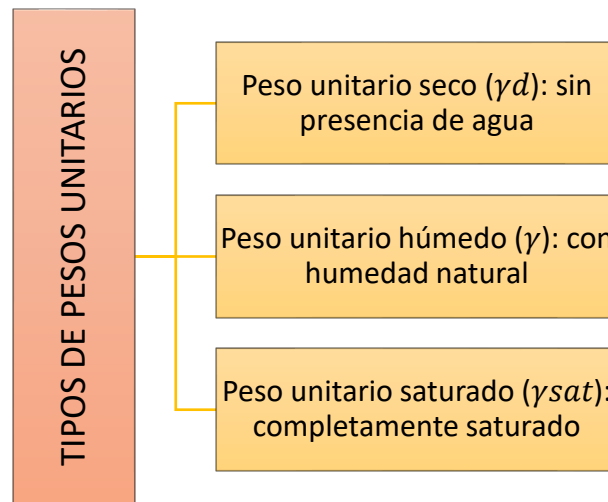
2.16 Propiedades físicas

2.16.1 Peso unitario (γ)

El peso unitario es la relación entre el peso del suelo y su volumen. Se expresa en kilonewtons por metro cúbico (kN/m^3) y representa la carga que el suelo ejerce sobre sí mismo y sobre las estructuras adyacentes.

En el análisis de estabilidad, el peso unitario influye en la fuerza gravitacional que actúa sobre el talud. Un mayor peso unitario implica mayores fuerzas desestabilizadoras, especialmente en taludes altos o saturados (Hussen et al., 2024)

Figura 35 Diagrama de los diferentes tipos de peso unitario



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con Hussen et al. (2024), “el peso unitario saturado incrementa significativamente la carga sobre la superficie de falla, reduciendo el factor de seguridad” (p. 9).

2.16.2 Permeabilidad

La permeabilidad se define como la propiedad del suelo que le permite facilitar el movimiento del agua a través de sus poros o espacios intergranulares. Se expresa en metros por segundo (m/s) y depende del tamaño de las partículas, la estructura del suelo y el grado de compactación.

En taludes, la permeabilidad controla el comportamiento del agua subterránea, la presión de poros y la velocidad de infiltración. Suelos de baja permeabilidad tienden a retener agua, aumentando la presión interna y reduciendo la resistencia al corte (Lu et al., 2024).

De acuerdo con Lu et al. (2024), “la acumulación de agua en suelos de baja permeabilidad genera zonas transitoriamente saturadas que reducen la estabilidad del talud” (p. 3).

2.16.3 Plasticidad

La plasticidad es la capacidad del suelo para deformarse sin romperse. Se relaciona con el contenido de arcilla y se evalúa mediante los límites de Atterberg:

- Límite líquido (LL): humedad a la que el suelo pasa de plástico a líquido.
- Límite plástico (LP): humedad a la que el suelo pasa de sólido a plástico.
- Índice de plasticidad (IP): diferencia entre LL y LP.

Ecuación 2 Índice de plasticidad

$$IP = LL - LP$$

Un índice de plasticidad (IP) alto indica un suelo muy plástico, con elevada capacidad de deformación, pero también con mayor susceptibilidad a experimentar cambios volumétricos y pérdida de resistencia al saturarse (Dai et al., 2023).

De acuerdo con Dai et al. (2023), “los suelos con alto índice de plasticidad presentan comportamiento no lineal bajo carga, lo que complica su análisis de estabilidad” (p. 7).

2.17 Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio constituyen una herramienta esencial para la determinación de los parámetros geotécnicos que sirven de base en el análisis de la estabilidad de taludes. Estos parámetros alimentan los modelos numéricos en el software Slide y son esenciales para aplicar el método de Spencer con precisión. A continuación, se describen los principales ensayos:

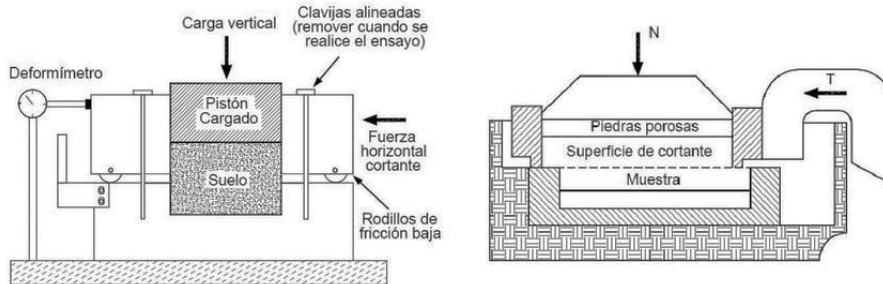
2.17.1 Corte directo

Este ensayo determina la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ) del suelo, mediante la aplicación de una carga normal y una fuerza cortante sobre una muestra confinada en una caja de corte. Es especialmente útil en suelos cohesivos y friccionantes, y se realiza en condiciones drenadas o no drenadas.

Este ensayo proporciona una representación directa del comportamiento del suelo frente al esfuerzo cortante, siendo ampliamente utilizado en estudios de estabilidad de taludes.

“El ensayo de corte directo es eficaz para evaluar la resistencia al corte en suelos con estructura natural, especialmente bajo condiciones de carga estática” (He et al., 2024).

Figura 36 Partes de la caja de corte



Fuente: Suarez (2022).

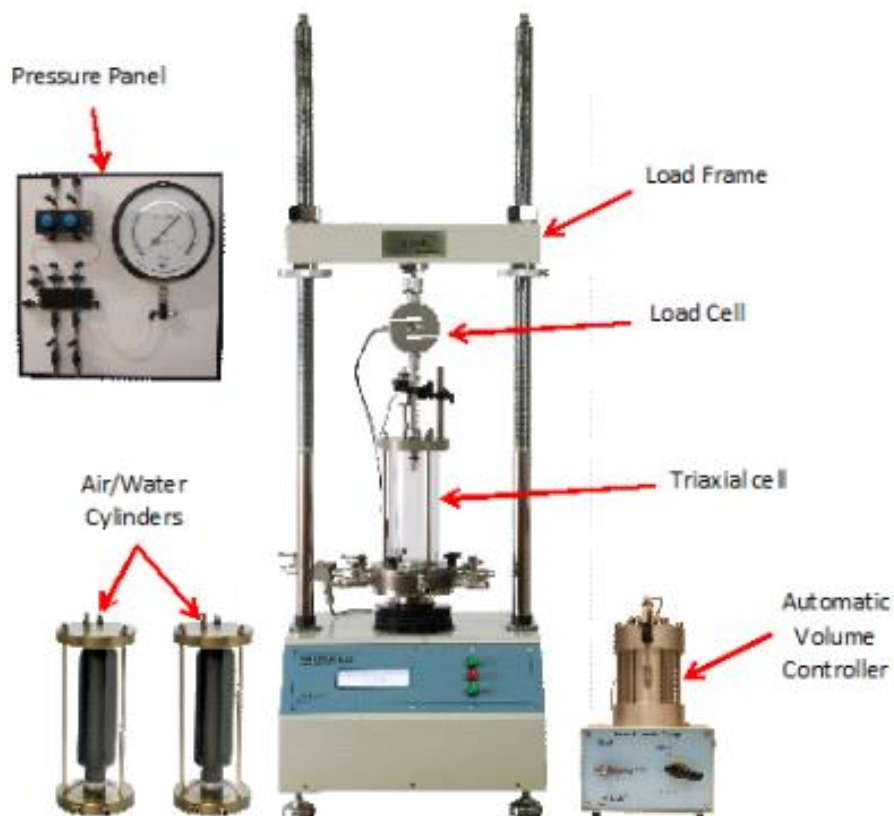
2.17.2 Triaxial

El ensayo triaxial constituye una técnica de laboratorio utilizada para determinar la resistencia del suelo bajo condiciones de confinamiento, reproduciendo escenarios de carga más próximos a los reales. El procedimiento consiste en aplicar una presión confinante alrededor de una muestra cilíndrica y posteriormente incrementar la carga axial hasta alcanzar la falla. Este método presenta distintas modalidades, como el triaxial consolidado-drenado (CD), consolidado-no drenado (CU) y no consolidado-no drenado (UU). A través de estas variantes es posible obtener parámetros fundamentales, tales como la cohesión efectiva y el ángulo de

fricción efectiva, presión de poros y deformación axial, siendo ideal para modelar taludes bajo condiciones dinámicas o saturadas.

Según Maurya (2022), “el ensayo triaxial CU permite simular condiciones de campo en suelos saturados, proporcionando parámetros efectivos para el análisis de estabilidad” (p. 215).

Figura 37 Sistema triaxial de aire comprimido



Fuente: Vjtech (2022).

2.17.3 Granulometría

La granulometría permite clasificar el tipo de suelo según el tamaño de sus partículas. Se realiza mediante tamizado (para suelos gruesos) y sedimentación (para suelos finos), y proporciona información sobre la distribución porcentual de grava, arena, limo y arcilla.

Este análisis es clave para determinar la textura del suelo, su permeabilidad, su comportamiento mecánico y su clasificación según sistemas como USCS o SUCS.

De acuerdo con Zhang et al. (2022), “la distribución granulométrica influye directamente en la permeabilidad y en la resistencia al corte del suelo, afectando la estabilidad del talud” (p. 93).

Figura 38 Equipamiento de laboratorio



Fuente: Universidad Politécnica de Madrid (2020).

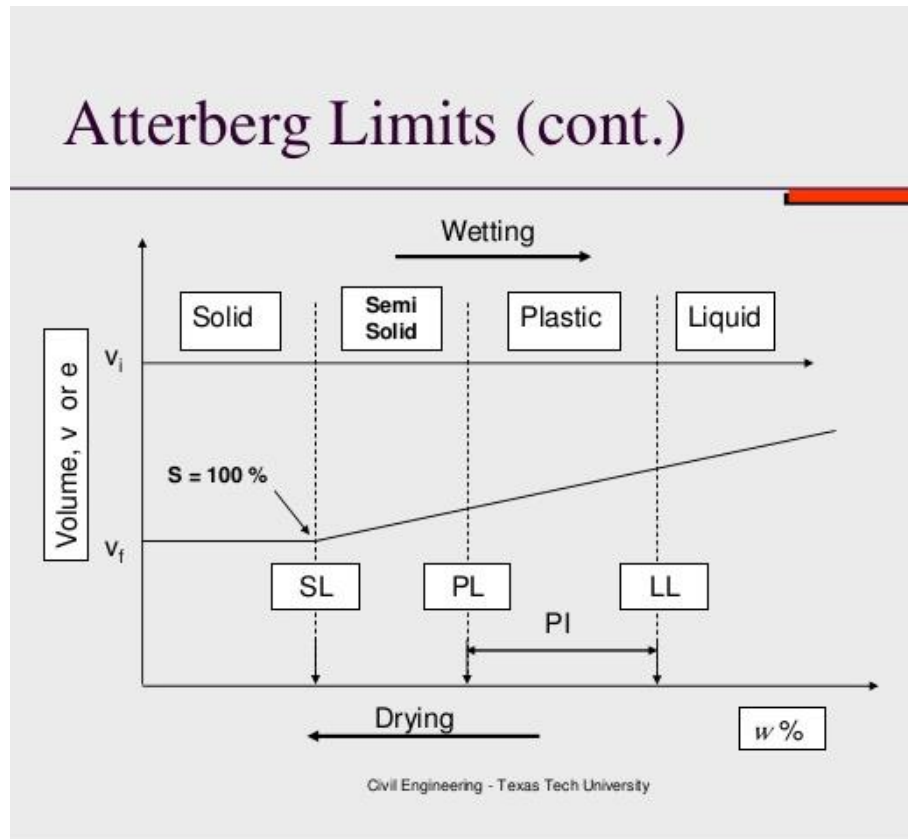
2.17.4 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg permiten evaluar la *plasticidad* del suelo, es decir, su capacidad de deformarse sin romperse.

Estos valores permiten clasificar el suelo como de baja, media o alta plasticidad, lo cual influye en su comportamiento frente a cargas, saturación y deformaciones.

“Los límites de Atterberg reflejan la sensibilidad del suelo a la humedad, siendo indicadores clave en la evaluación de su estabilidad” (He et al., 2024, p. 15).

Figura 39 límites de Atterberg de la clasificación de suelos



Fuente: AboutCivil (2020).

Tabla 2 Resumen de propiedades geotécnicas

Propiedad	Símbolo	Unidad	Método de ensayo	Influencia en estabilidad del talud
Cohesión	c	kPa	Corte directo, triaxial	Aumenta la resistencia al corte, especialmente en arcillas
Fricción interna	ϕ	grados	Corte directo, triaxial	Controla la resistencia en suelos granulares

Peso unitario	γ	kN/m^3	Ensayo de densidad	Afecta la carga gravitacional sobre el talud
Permeabilidad	k	m/s	Permeámetro, infiltración	Controla presión de poros y drenaje
Plasticidad	IP	%	Límites de Atterberg	Influye en deformabilidad y comportamiento volumétrico

Fuente: Elaboración propia.

Figura 40 Equipo de corte directo Humboldt HM-5750 utilizado en ensayos de laboratorio



Fuente: Valencia & Cortés (2022).

2.18 Ensayos de campo

Los ensayos de campo permiten obtener información directa sobre las condiciones geotécnicas del terreno in situ, complementando los datos obtenidos en laboratorio. Estos

ensayos son fundamentales para caracterizar la resistencia del suelo, su estratigrafía, y la geometría del talud, lo que permite alimentar modelos numéricos más precisos en el software Slide. A continuación, se describen los principales ensayos utilizados:

2.18.1 Standard Penetration Test (SPT)

El ensayo SPT (Standard Penetration Test) es uno de los procedimientos más utilizados en estudios geotécnicos. Consiste en introducir un muestreador estándar en el terreno mediante impactos de un martillo de 63,5 kg que cae desde una altura de 76 cm, registrando el número de golpes necesarios para lograr la penetración en tres intervalos de 15 cm. El valor obtenido, denominado N-SPT, se emplea como parámetro de correlación con la resistencia al corte, la densidad relativa y la compresibilidad del suelo.

Este ensayo es especialmente útil en suelos granulares y permite estimar parámetros como el ángulo de fricción interna y la capacidad portante.

“El SPT sigue siendo el ensayo más utilizado para caracterizar perfiles geotécnicos en campañas de campo, especialmente en zonas de difícil acceso” (Spyropoulos et al., 2021, p. 84).

Figura 41 Proceso del ensayo SPT



Fuente: Geotechnicsmyanmar (2020).

2.18.2 Cone Penetration Test (CPT)

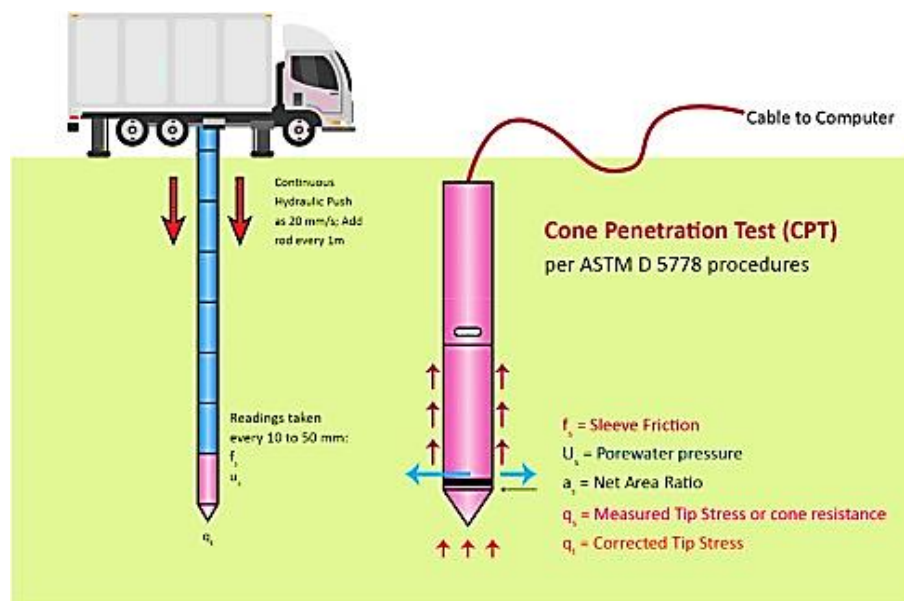
El ensayo CPT (Cone Penetration Test) consiste en introducir un cono metálico en el suelo a velocidad constante, registrando parámetros como la resistencia de punta, la fricción lateral y, en algunos casos, la presión de poros (piezocono). Este ensayo proporciona un perfil

continuo del terreno y permite clasificar el tipo de suelo, estimar la resistencia al corte no drenado y detectar capas blandas o saturadas.

Es especialmente útil en suelos finos, donde el SPT puede ser menos representativo.

“El CPT ofrece mayor resolución vertical que el SPT y permite correlaciones más precisas para diseño geotécnico en arenas y arcillas” (Ameratunga et al., 2021, p. 116).

Figura 42 Prueba de penetración de cono



Fuente: Sciencedirect (2021).

2.18.3 Penetrómetro de bolsillo

El penetrómetro de bolsillo es un instrumento portátil que permite estimar la resistencia al corte no drenado de suelos cohesivos en campo. Se aplica directamente sobre la superficie del suelo o sobre muestras inalteradas, proporcionando una lectura rápida en kilopascales (kPa).

Aunque no sustituye ensayos de laboratorio, es útil para obtener una primera aproximación de la resistencia en zonas críticas o de difícil acceso.

“El penetrómetro de bolsillo es una herramienta práctica para evaluar la resistencia superficial en taludes arcillosos, especialmente en estudios preliminares” (Zhou et al., 2023, p. 9).

Figura 43 Penetrómetro de bolsillo



Fuente: Oc instruments (2020).

2.18.4 Medidor láser de altura

El medidor láser permite obtener medidas precisas de altura, inclinación y distancia en campo, sin contacto directo con el talud. Se utiliza para definir la geometría del perfil, calcular el ángulo de inclinación y establecer la altura total del talud, datos esenciales para la modelación en Slide.

Su uso mejora la precisión del levantamiento topográfico y permite trabajar en condiciones de seguridad.

“Los dispositivos láser han mejorado significativamente la precisión del levantamiento geométrico en estudios de estabilidad de taludes” (Lu et al., 2024, p. 4).

Figura 44 Medición de perfiles de altura



Fuente: Leica (2021).

Tabla 3 Cuadro resumen – Ensayos de campo aplicados al análisis de taludes

Ensayo	Descripción técnica	Parámetros obtenidos	Aplicación en estabilidad de taludes
SPT (Standard Penetration Test)	Ensayo de penetración por golpeo con muestreador estándar. Se mide el número de golpes (N-SPT) para penetrar el suelo.	Resistencia al corte, densidad relativa, clasificación del suelo	Estimación de resistencia en suelos granulares y perfil estratigráfico
CPT (Cone Penetration Test)	Penetración continua de un cono metálico, midiendo resistencia de	Resistencia no drenada, tipo de	Identificación de capas blandas y saturadas,

	punta, fricción lateral y presión de poros.	suelo, presión de poros	clasificación detallada
Penetrómetro de bolsillo	Instrumento portátil para estimar la resistencia superficial en suelos cohesivos.	Resistencia no drenada (kPa)	Evaluación preliminar en campo, útil en zonas de difícil acceso
Medidor láser de altura	Dispositivo óptico para medir altura, inclinación y distancia sin contacto directo.	Geometría del talud (altura, ángulo)	Levantamiento topográfico preciso para modelación en Slide

Fuente: Elaboración propia.

2.19 Parámetros geotécnicos relevantes

2.19.1 Factor de seguridad en taludes

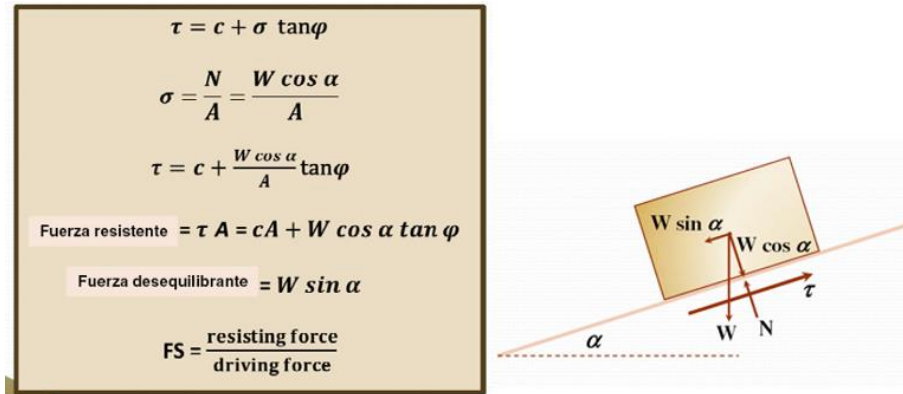
El factor de seguridad (FS) es un parámetro esencial en la ingeniería geotécnica que permite evaluar la estabilidad de un talud, expresando la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas que impulsan el movimiento. Un valor superior a uno indica condiciones estables, mientras que valores cercanos o inferiores a la unidad reflejan riesgo de falla. Su cálculo puede realizarse mediante métodos de equilibrio límite, análisis numéricos o modelaciones con software especializado, considerando variables como el ángulo de la pendiente, la cohesión, la fricción interna y el contenido de agua (Mesa Lavista, Álvarez Pérez & Chávez Gómez, 2020).

El incremento de la humedad y de la inclinación del talud disminuye el FS, mientras que mayores valores de cohesión y fricción aumentan la resistencia al corte y, por ende, la estabilidad. Sin embargo, los modelos simplificados no siempre capturan la complejidad de los suelos homogéneos ni las heterogeneidades a gran escala, como fracturas, juntas o variaciones de meteorización, que suelen controlar la localización de la falla. Por ello, los estudios recientes recomiendan complementar los cálculos con observaciones de campo y criterios de estabilidad más avanzados. (Vemba Mucuta, Lito, Cartaya Pires & Watson Quesada, 2020).

Las propiedades intrínsecas de los materiales cohesión y fricción interna son determinantes en el comportamiento de un talud. La cohesión representa la fuerza de resistencia por unidad de área y varía según el tipo de suelo o roca; mientras que la fricción interna se expresa como el ángulo de fricción (Φ), dependiente del tamaño y la naturaleza de los granos. Estas propiedades pueden determinarse en laboratorio mediante ensayos triaxiales o uniaxiales, aunque las discontinuidades a gran escala requieren metodologías complementarias para un análisis más realista (Camacho Macedo, 2021).

Los valores de c , ϕ y γ se utilizan en los métodos de equilibrio límite para calcular el factor de seguridad (FS). Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), se recomienda $FS \geq 1.3$ en condiciones estáticas y $FS \geq 1.1$ en condiciones sísmicas (MTOPI, 2022).

Figura 45 Deducción del factor de seguridad



Fuente: Obregón Mitma, C (2015).

Ecuación 3 Factor de seguridad

$$FS = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo cortante actuante}}$$

Figura 46 Valores del factor de estabilidad de un talud

Valores que determinan la estabilidad de un talud	
Factor de seguridad	Estabilidad
< 1	Inestable
1 – 1,20	Estabilidad cuestionable
1,20 – 1,50	Estable bajo condiciones estáticas
> 1,50	Estable bajo condiciones dinámicas

Fuente: MTC (2020).

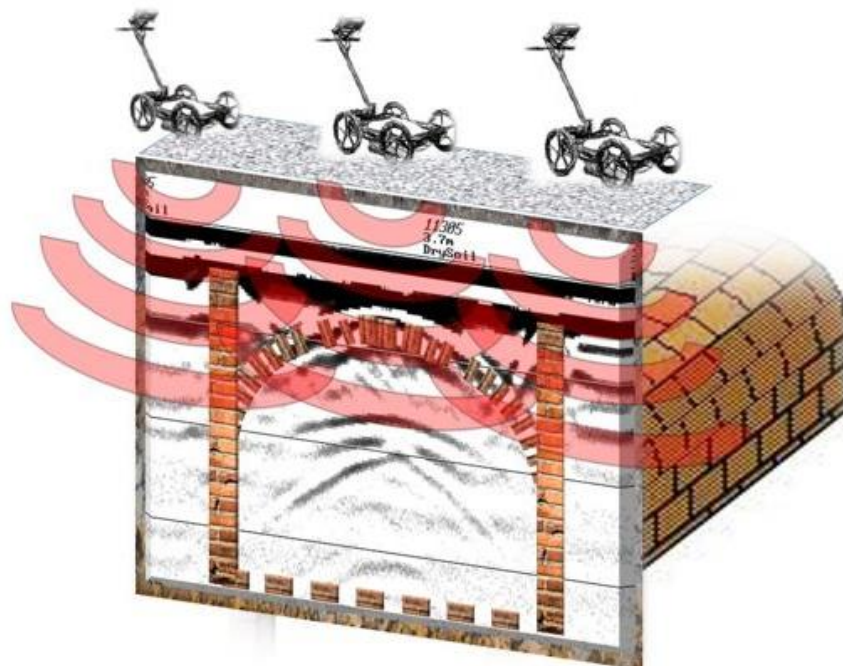
2.20 Métodos geofísicos aplicados a taludes

2.20.1 Georradar (GPR)

El georradar o Ground Penetrating Radar (GPR) es una técnica geofísica no invasiva que permite obtener imágenes del subsuelo mediante la emisión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Estas ondas se reflejan en interfaces con diferentes propiedades dieléctricas, permitiendo identificar capas de suelo, discontinuidades y zonas saturadas (Daniels, 2004).

El GPR es especialmente útil en zonas de difícil acceso o donde los métodos tradicionales de perforación son peligrosos. En estudios de taludes, se ha utilizado para detectar grietas internas, zonas de humedad y estructuras enterradas que pueden comprometer la estabilidad (Albán-Valenzuela et al., 2025).

Figura 47 Equipo GPR con antena blindada



Fuente: Utsi (2017).

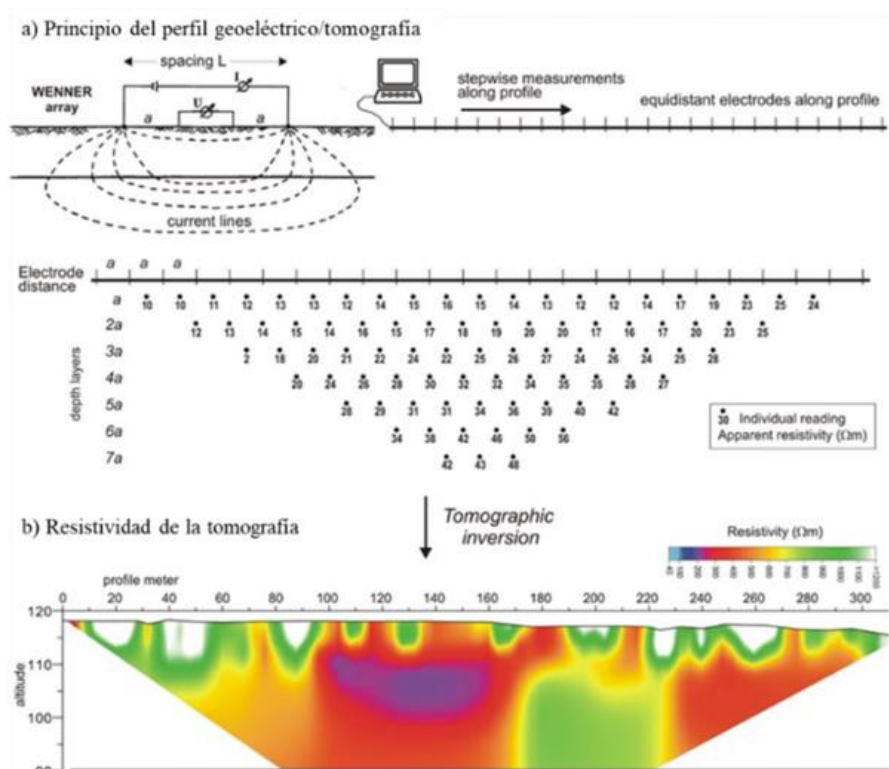
2.20.2 Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)

Es otra técnica geofísica ampliamente utilizada en estudios de estabilidad de taludes. Consiste en medir la resistencia eléctrica del subsuelo mediante electrodos dispuestos en línea

o matriz. Las zonas con mayor contenido de agua o materiales arcillosos presentan menor resistividad, lo que permite identificar áreas potencialmente inestables (Loke, 1999).

En el estudio de Calle C6ndor (2024), la ERT fue clave para detectar zonas saturadas en los taludes de Azogues-Cuenca y Matrama-Mazar, correlacionando los resultados con los perfiles geot6cnicos.

Figura 48 Perfilado de ERT



Fuente: ESPOL (2024).

2.20.3 Interpretaci6n de perfiles geofisicos

La interpretaci6n de los datos geofisicos requiere correlaci6n con ensayos geot6cnicos y observaciones de campo. Por ejemplo, una zona de baja resistividad detectada por ERT puede coincidir con un estrato arcilloso saturado identificado en laboratorio. De igual forma, los radargramas del GPR pueden mostrar reflejos que corresponden a grietas o interfaces entre materiales.

Tabla 4 Correlación entre métodos geofísicos y geotécnicos

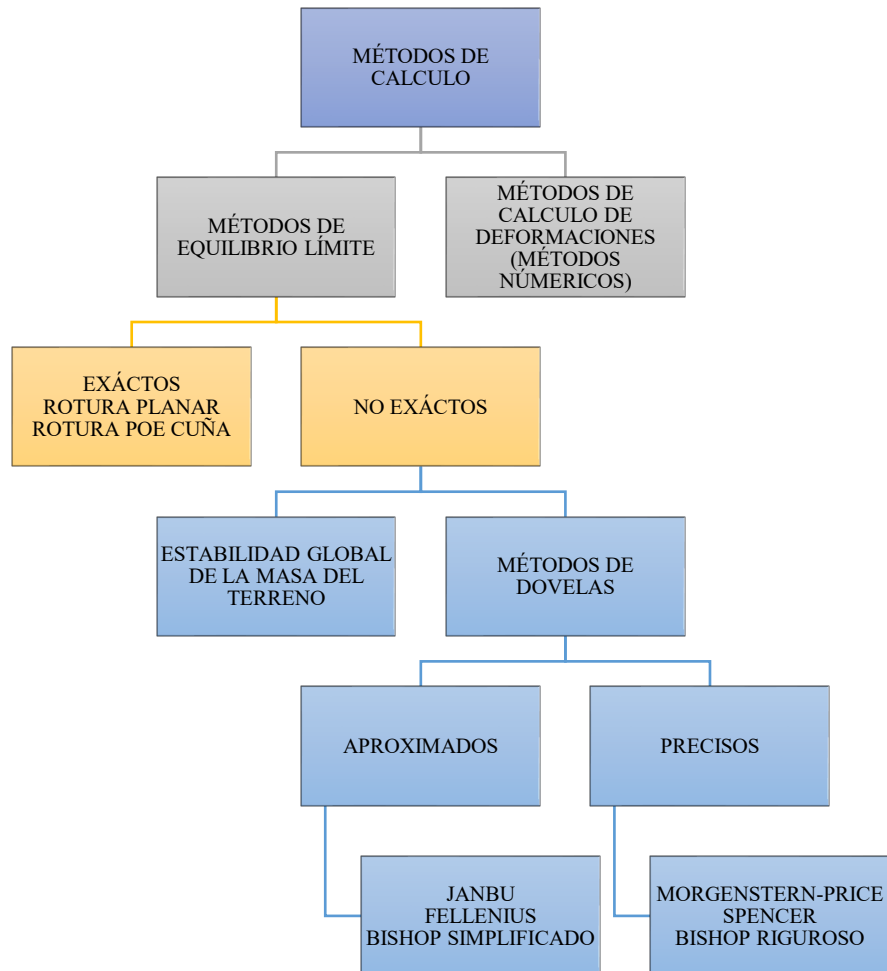
Método	Indicador	Interpretación geotécnica
geofísico		
GPR	Reflejo fuerte	Grieta o cambio de material
ERT	Baja resistividad	Zona saturada o arcillosa
GPR	Reflejo difuso	Material heterogéneo o fracturado

Fuente: Elaborado por autores.

2.21 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

El análisis de estabilidad de taludes tiene como finalidad establecer el nivel de seguridad frente a posibles fallas, mediante la comparación entre las fuerzas desestabilizadoras, como el peso propio, la presión de poros y las cargas externas, y las fuerzas resistentes, representadas por la cohesión y la fricción interna. Los procedimientos más empleados se dividen en dos grandes categorías: los métodos de equilibrio límite y los métodos numéricos de tipo tensodeformacional. En el presente trabajo se opta por los métodos de equilibrio límite, específicamente el método de Spencer, debido a su precisión y a su compatibilidad con el software Slide.

Figura 49 Diferentes métodos de cálculo



Fuente: Ilustre colegio oficial de geólogos (2003).

2.21.1 Método de equilibrio límite

El método de equilibrio límite se fundamenta en la subdivisión del talud en segmentos o dovelas, con el fin de evaluar el equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes a lo largo de una superficie de falla hipotética. Este procedimiento se apoya en el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb y permite determinar el factor de seguridad (FS), definido como la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras:

Ecuación 4 Factor de seguridad según el método de equilibrio límite (criterio de Mohr-Coulomb)

$$FS = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo cortante actuante}}$$

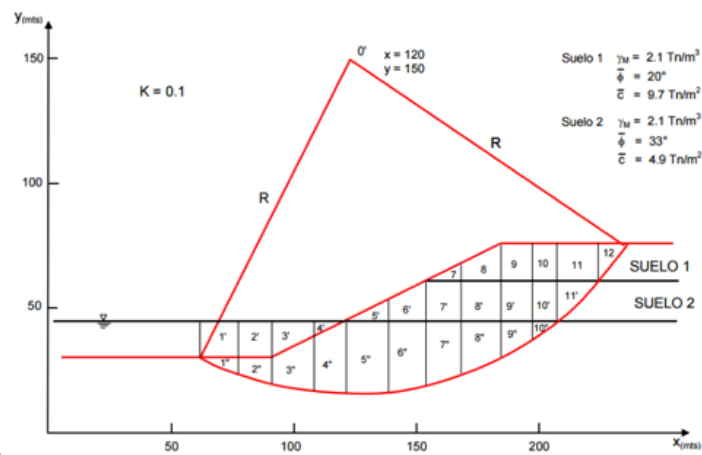
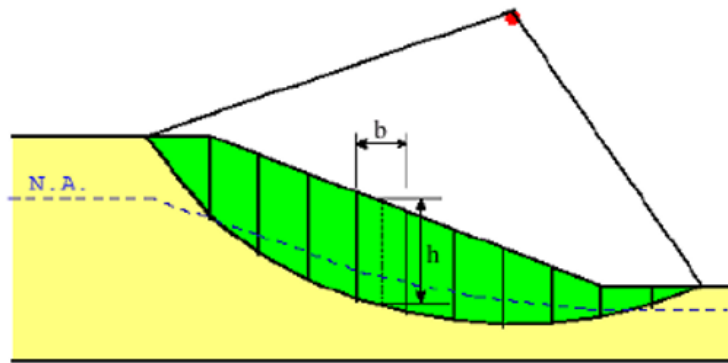
Este método se emplea de manera generalizada debido a su sencillez y adaptabilidad; sin embargo, exige la definición previa de una geometría de falla y de condiciones de carga determinadas para su correcta aplicación (Duncan & Wright, 2005).

Según Sanhueza y Rodríguez (2013), “los métodos de equilibrio límite permiten evaluar la estabilidad de taludes bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, siendo aplicables a suelos homogéneos y estratificados” (p. 27).

2.21.1.1 Técnicas de la Dovelas

“Este método es denominado así porque divide la masa del suelo encima de la superficie de ruptura en dovelas. En cada dovela están presentados los esfuerzos actuantes, donde se debe cumplir el equilibrio de fuerzas o de momentos, así como en forma conjunta.” (Obregón Mitma, 2015, p. 71)

Figura 50 Esquema de un talud dividido en dovelas sobre una superficie de falla curva.



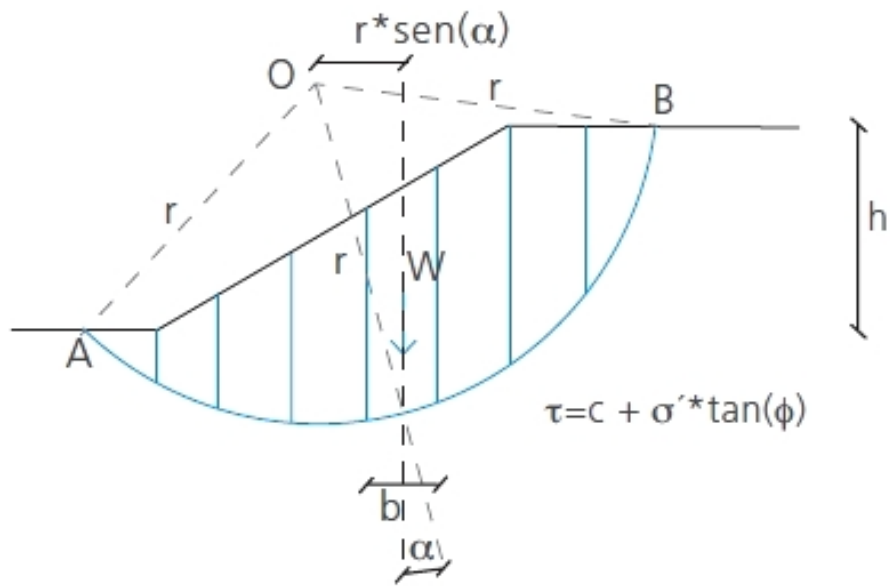
Fuente: Obregón Mitma, C (2015).

2.21.2 Método de Fellenius (Ordinary Method of Slices)

Este método considera únicamente el equilibrio de momentos respecto al centro de la superficie de falla circular. Es simple y útil para análisis preliminares, pero no contempla las fuerzas entre dovelas, lo que puede limitar su precisión.

“Fellenius es adecuado para superficies circulares simples, pero tiende a subestimar el FS en condiciones complejas” (Sanhueza & Rodríguez, 2013).

Figura 51 Esquema del análisis de estabilidad de taludes por el método de Fellenius



Fuente: Sanhueza & Rodriguez (2013).

Donde:

W: Peso total de la dovela

R: Fuerza de reacción en la base de la dovela

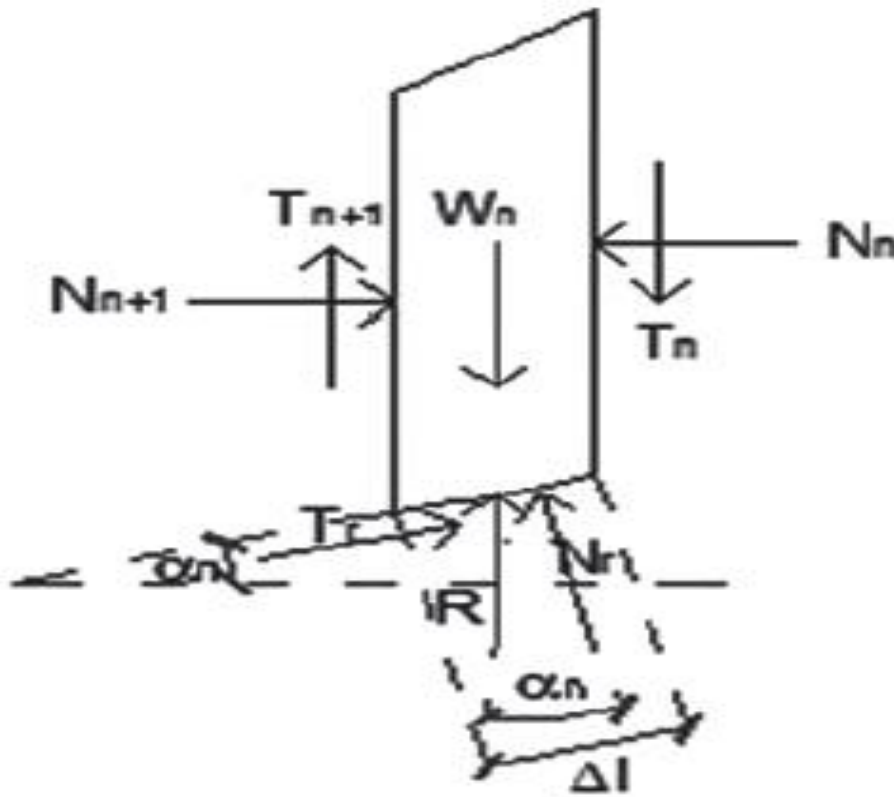
N_n y N_{n+1} : Fuerzas normales en los bordes izquierdo y derecho de la dovela

T_n y T_{n+1} : Fuerzas tangenciales en los bordes izquierdo y derecho de la dovela

N_r : Componente normal de la fuerza de reacción

$R \text{ Tr}$: Componente tangencial de la fuerza de reacción R_X

Figura 52 Esquema de las fuerzas que actúan en la ψ dovela, de acuerdo al método de Fellenius



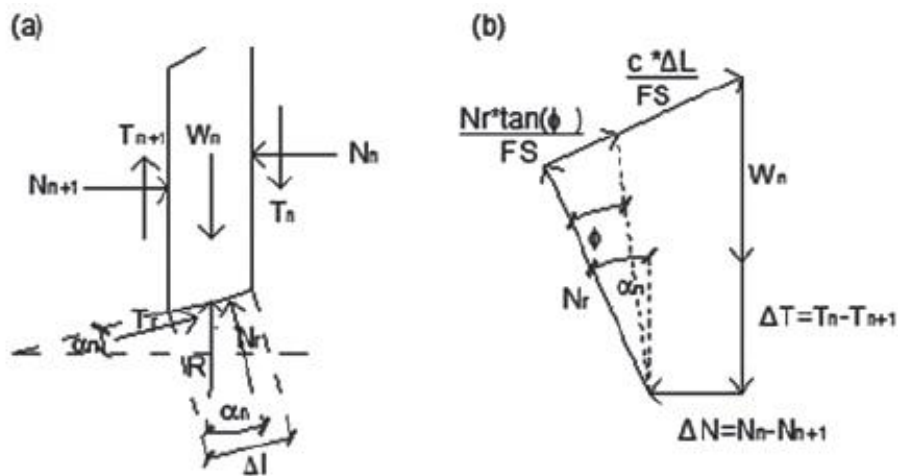
Fuente: Sanhueza & Rodríguez (2013).

2.21.3 Método de Bishop (Simplificado)

Propone el equilibrio de momentos verticales y considera parcialmente las fuerzas entre dovelas. Es más preciso que Fellenius y ampliamente utilizado en suelos cohesivos. Requiere un proceso iterativo para calcular el FS.

“El método de Bishop ofrece resultados conservadores y es especialmente útil en suelos arcillosos saturados” (Zhou et al., 2021).

Figura 53 Análisis de Estabilidad de Taludes por el Método de Bishop. (a) Esquema de las fuerzas que actúan en la dovela. (b) Diagrama de fuerzas en equilibrio de la n ma dovela



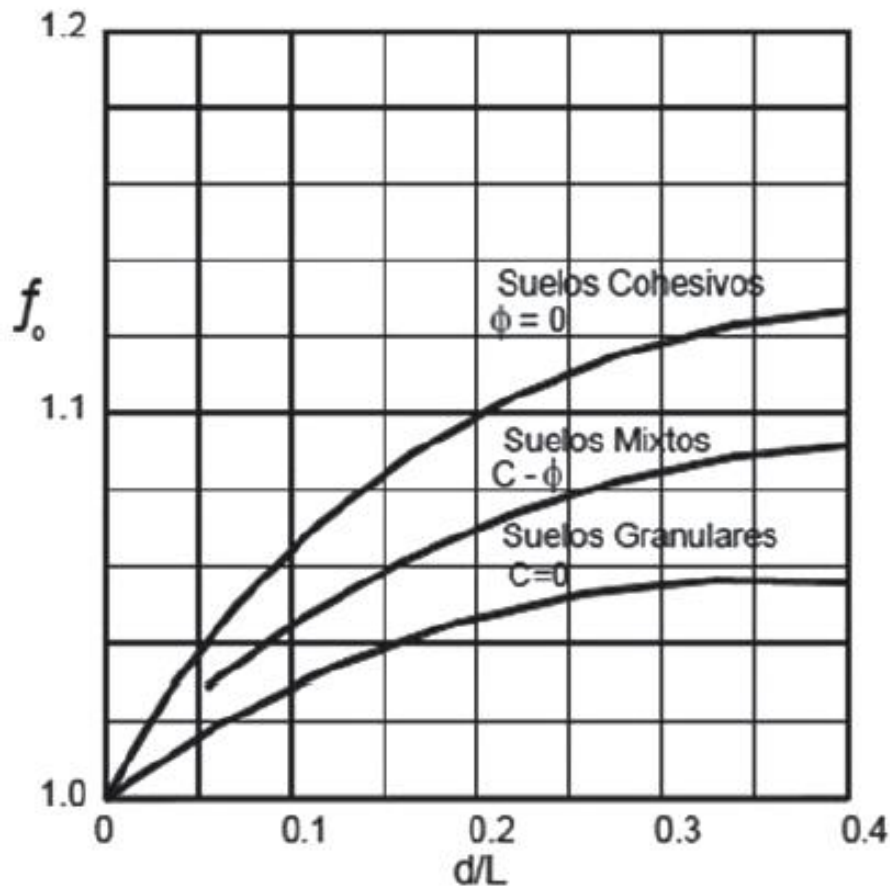
Fuente: Sanhueza & Rodríguez (2013).

2.21.4 Método de Janbu

Este método se basa en el equilibrio de fuerzas horizontales y permite analizar superficies de falla no circulares. Introduce un factor de corrección geométrica (f_0) para ajustar la curvatura de la superficie. Es útil en suelos friccionantes y en geometrías irregulares.

“Janbu es el único método que permite evaluar superficies de falla arbitrarias, siendo útil en taludes naturales con geometría compleja” (Sanhueza & Rodríguez, 2013).

Figura 54 Diagrama del factor f_0 utilizado en el método de Janbu



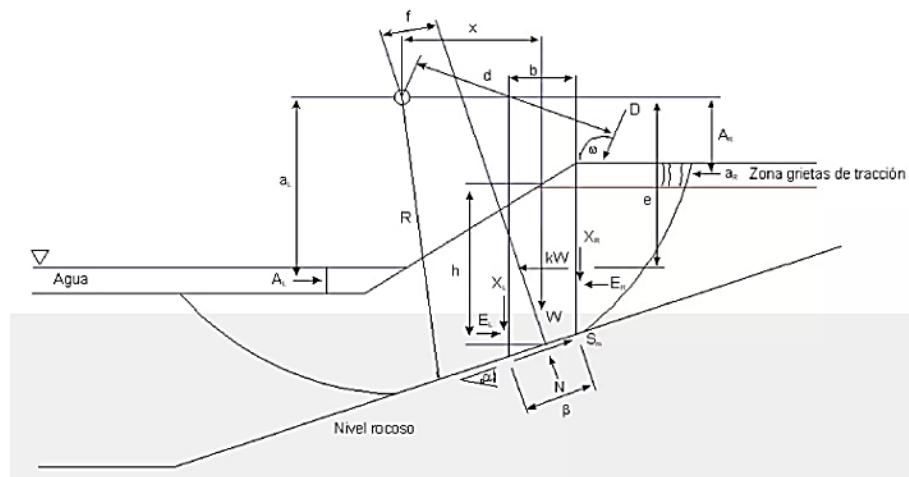
Fuente: Suarez (2011).

2.21.5 Método de Spencer

En 1967 Spencer desarrolló un método que constituye una técnica avanzada dentro del enfoque de equilibrio límite, ya que satisface de manera simultánea las condiciones de equilibrio de fuerzas y de momentos en cada dovela. A diferencia de métodos simplificados como los de Bishop o Janbu, no requiere establecer hipótesis sobre la dirección de las fuerzas intersegmentales, lo que le confiere un carácter más riguroso y preciso. Este procedimiento resulta especialmente adecuado en escenarios complejos, tales como suelos saturados, geometrías irregulares o situaciones con cargas sísmicas, y se implementa de forma eficiente en programas especializados como Slide v6.0 (Jiang & Yamagami, 2004).

“Spencer proporciona soluciones más precisas al evitar simplificaciones en el análisis de fuerzas intersegmentales, siendo ideal para modelaciones detalladas” (Zhang et al., 2022).

De acuerdo con Braja M. Das (2021), los métodos de equilibrio límite resultan adecuados para la evaluación de la estabilidad en taludes naturales y artificiales, particularmente cuando se cuenta con parámetros geotécnicos confiables y se requiere una solución expedita sin recurrir a modelaciones tensodeformacionales. Figura 55 Fuerzas actuantes sobre una rotura circular



Fuente: Valiente Sanz, R., Sobrecases Martí, S., & Díaz Orrego, A. (2015).

Las variables definidas se describen a continuación:

W = peso total de la rebanada, de ancho b y altura h .

N = fuerza total normal a la base de la rebanada.

S = fuerza de corte movilizada en la base de la rebanada.

E = fuerza normal horizontal entre rebanadas. Subíndices D "derecha" e I "izquierda" según el lado de la rebanada en el que actúa.

X = fuerza vertical de corte entre rebanadas. Subíndices D "derecha" e I "izquierda" según el lado de la rebanada en el que actúa.

D = línea externa de carga.

kW = carga sísmica horizontal aplicada en el centroide de cada rebanada.

R = radio de la superficie de deslizamiento.

f = perpendicular a la fuerza normal desde el centro de rotación o desde el centro de momentos.

x = distancia horizontal desde el centro de cada rebanada al centro de rotación o centro de momentos.

e = distancia vertical desde el centro de cada rebanada al centro de rotación o centro de momentos.

d = distancia perpendicular desde la línea de carga al centro de rotación o centro de momentos.

h = distancia vertical desde el centro de la base de cada rebanada a la línea más superior geoméricamente (generalmente la superficie topográfica).

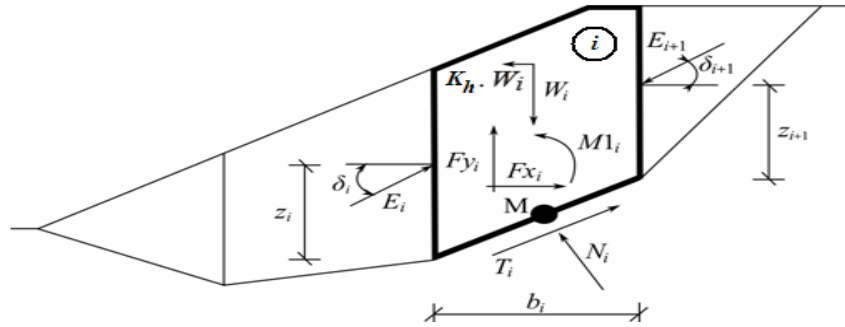
a = distancia perpendicular desde la resultante externa de la fuerza hidrostática al centro de rotación o centro de momentos. Subíndices D "derecha" e I "izquierda" según el lado del talud.

A = resultante externa de la fuerza hidrostática. Subíndices D "derecha" e I "izquierda" según el lado del talud.

ω =ángulo de la línea de carga con la horizontal. Este ángulo se mide según las agujas del reloj desde el eje X positivo.

α = ángulo entre la tangente del centro de cada rebanada y la horizontal.

Figura 56 Esquema estático del método de Spencer



Fuente: Spencer, E. (1967).

En cada bloque se considera una aportación proveniente de las siguientes fuerzas:

Tabla 5 Simbología del método de Spencer

Símbolo	Definición	Observaciones
W_i	Peso del bloque, incluyendo material de sobrecarga y la influencia del coeficiente sísmico vertical (K_v).	Actúa como fuerza desestabilizadora principal.
$K_h \cdot W_i$	Fuerza de inercia horizontal generada por el coeficiente sísmico horizontal (K_h).	Representa el efecto del sismo sobre el bloque.
N_i	Fuerza normal sobre la superficie de deslizamiento.	Contribuye a la resistencia por fricción.
T_i	Fuerza de corte actuando en la superficie de deslizamiento.	Asociada a la resistencia al deslizamiento.
E_i, E_{i+1}	Fuerzas ejercidas por los bloques vecinos, inclinadas respecto al plano horizontal en un ángulo δ .	Representan las interacciones intersegmentales.
F_{xi}, F_{yi}	Otras fuerzas horizontales y verticales actuando en el bloque.	Pueden incluir cargas externas o efectos adicionales.
M_{1i}	Momento de las fuerzas F_{xi}, F_{yi} respecto al punto M , centro del segmento de falla i .	Considerado en el equilibrio de momentos.
U_i	Presión de poro en el segmento de la superficie de deslizamiento i .	Reduce la resistencia efectiva del suelo.

Fuente: Elaborado por autores

2.21.6 Método de Morgenstern-Price

El método de Morgenstern-Price es una técnica avanzada de equilibrio límite que satisface simultáneamente el equilibrio de fuerzas y momentos en cada dovela del talud. Fue desarrollado por Morgenstern y Price en 1965 como una generalización de otros métodos, permitiendo definir libremente la función de distribución de las fuerzas intersegmentales.

El método de Morgenstern-Price no impone restricciones sobre la dirección de las fuerzas entre dovelas, sino que introduce una función de inclinación $f(x)$ que puede ser constante, lineal, parabólica, exponencial, entre otras. Esto permite adaptar el análisis a condiciones reales del terreno.

“El método de Morgenstern-Price ofrece una solución más flexible y precisa al incorporar funciones de distribución de fuerzas intersegmentales” (Zhang et al., 2022).

Ecuación 5 Factor de seguridad general según el método de Morgenstern-Price (criterio de Mohr-Coulomb)

$$FS = \frac{\sum [c' \cdot l + (N - u \cdot l) \cdot \tan(\phi')]}{\sum S}$$

Donde:

c' : cohesiones efectivas

ϕ' : ángulo de fricción interna

u : presión de poros

l : longitud de la base

N : fuerza normal

S : esfuerzo cortante actuante

La solución se obtiene mediante un proceso iterativo ajustando λ y la función $f(x)$ hasta que se satisfacen ambos equilibrios.

2.22 Criterio de Mohr-Coulomb

El criterio de Mohr-Coulomb establece que la resistencia al corte de un material geotécnico puede expresarse como una función lineal de la tensión normal efectiva. Este modelo constituye una de las bases más utilizadas en el análisis de estabilidad de taludes, así como en el diseño de cimentaciones y estructuras de contención.

Este criterio establece que la falla ocurre cuando la tensión cortante τ en un plano alcanza un valor crítico definido por:

Ecuación 6 Resistencia al corte según el criterio de Mohr-Coulomb

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\phi')$$

Donde:

τ : tensión cortante en el plano de falla

c' : cohesión efectiva del suelo

σ' : tensión normal efectiva

ϕ' : ángulo de fricción interna

“El modelo de Mohr-Coulomb permite representar de forma simple el comportamiento resistente de suelos y rocas, siendo la base de la mayoría de los métodos de equilibrio límite” (Rodríguez, 2025).

En el análisis de taludes, el criterio de Mohr-Coulomb se aplica en la base de cada dovela o segmento de la masa deslizante. La resistencia al corte se compara con el esfuerzo cortante actuante para calcular el factor de seguridad (FS):

Ecuación 7 Factor de seguridad en dovelas según el criterio de Mohr-Coulomb

$$FS = \frac{c' \cdot l + (\sigma' - u) \cdot \tan(\phi')}{\tau}$$

Donde:

l: longitud de la base de la dovela

u: presión de poros

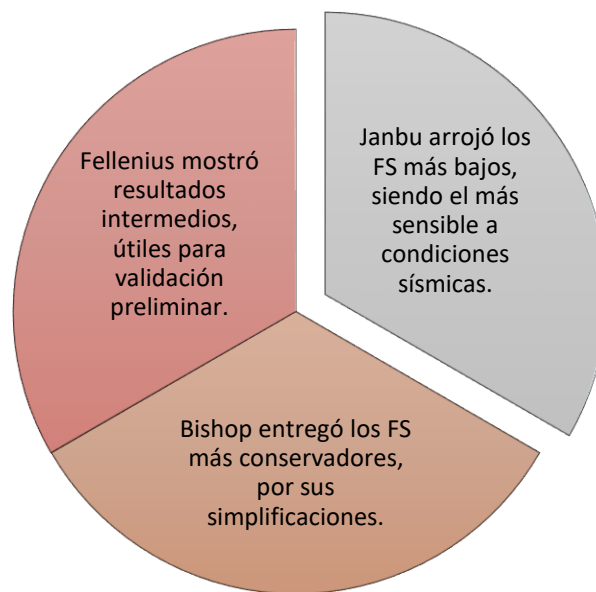
Este enfoque permite evaluar la estabilidad bajo diferentes condiciones de carga, saturación y geometría.

“A pesar de su simplicidad, el criterio de Mohr-Coulomb sigue siendo una herramienta válida para análisis preliminares, aunque debe complementarse con ensayos triaxiales y modelos más avanzados en casos complejos” (Centro Geotécnico Internacional, 2025, p. 6).

2.23 Comparación entre métodos

Según el estudio desarrollado por Sanhueza y Rodríguez (2013), aplicado a taludes naturales en Chile bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, se concluyó que los métodos de análisis presentan diferencias significativas en cuanto a sensibilidad sísmica y confiabilidad como se puede evidenciar en la figura 57.

Figura 57 Evaluación comparativa de métodos de análisis de estabilidad en condiciones estáticas y pseudoestáticas



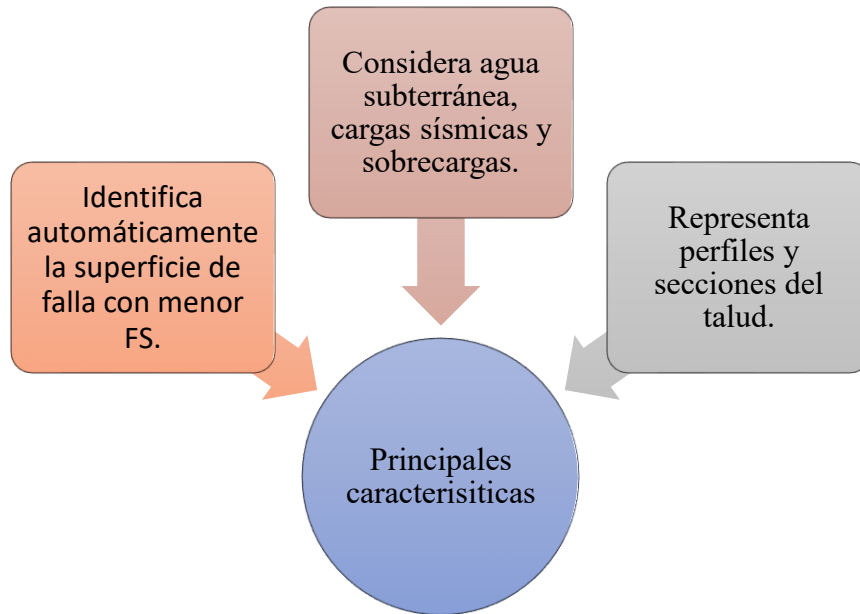
Fuente: Elaboración por autores.

2.24 Software Slide v6.0 para análisis de taludes

2.24.1 Características del software

Slide, desarrollado por Rocscience Inc., es un software especializado ampliamente empleado en ingeniería geotécnica para el análisis de estabilidad de taludes mediante métodos de equilibrio límite. Su diseño intuitivo y sus funcionalidades avanzadas permiten representar condiciones reales del terreno, incorporar cargas externas y evaluar el nivel de seguridad frente a posibles deslizamientos.

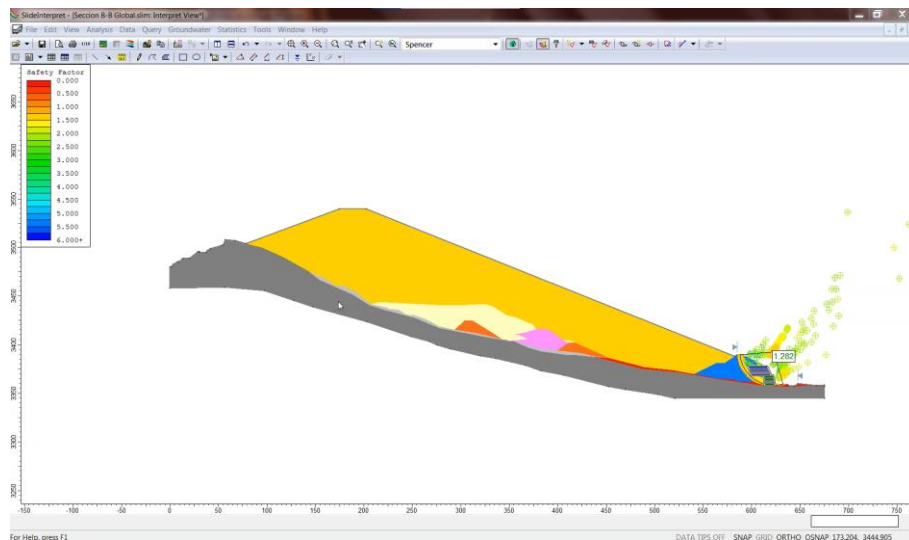
Figura 58 Principales características del Software Slide v6.0



Fuente: Elaboración por autores.

“Slide ofrece una solución integral para el análisis de estabilidad de taludes, integrando métodos clásicos con herramientas de visualización avanzada y análisis probabilístico” (Rocscience, 2025).

Figura 59 Interfaz del software Slide

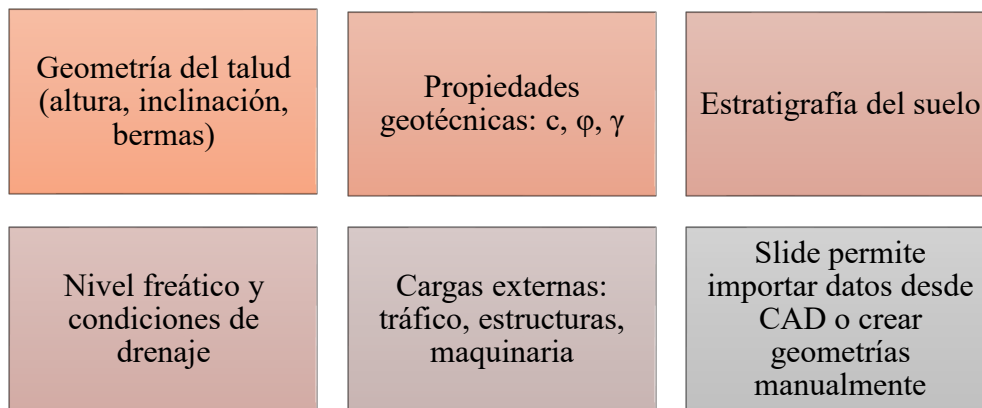


Fuente: Elaboración por autores.

2.24.2 Modelado de geometría y materiales

El proceso comienza con la definición de la geometría del talud y la caracterización de los materiales que lo componen. En esta etapa, el usuario puede configurar diversos parámetros fundamentales, tales como:

Figura 60 Elementos clave en el modelado de geometría y materiales en Slide v6.0



Fuente: Elaboración por autores.

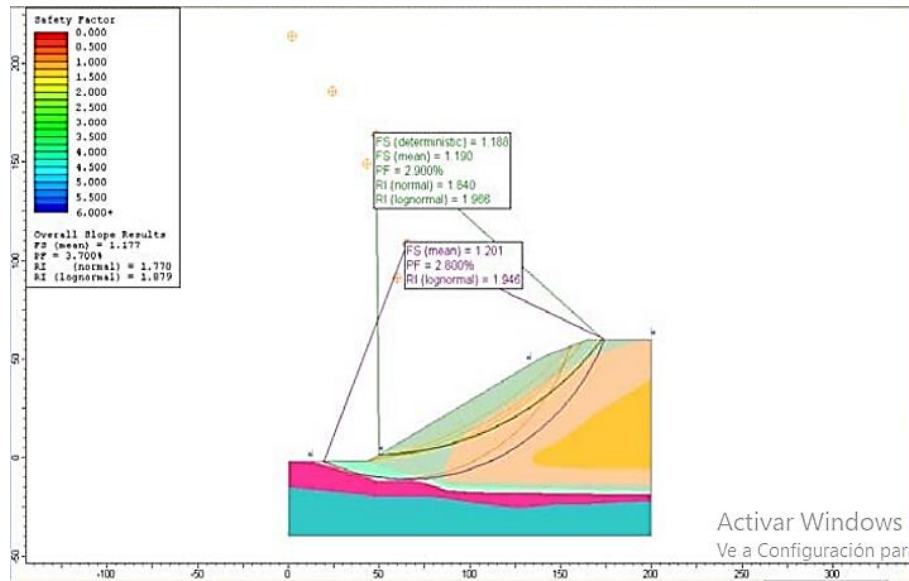
Slide permite además definir condiciones de borde, aplicar restricciones geométricas y realizar análisis bajo diferentes escenarios de carga y saturación.

“La flexibilidad en la definición de materiales y geometría permite simular condiciones reales de terreno, facilitando el diseño de medidas de estabilización” (Geoengineer.org, 2025).

2.24.3 Cálculo del factor de seguridad

Slide emplea algoritmos de búsqueda para identificar la superficie crítica de falla. El método de Spencer se implementa a través de la discretización en dovelas y la resolución simultánea de las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos. Como resultado, el software proporciona el valor del factor de seguridad (FS) y la localización de la superficie de falla más crítica.

Figura 61 Superficie de falla crítica en Slide



Fuente: Rocscience Inc. Tutorial 11 – Fiabilidad global del talud (2020).

2.24.4 Ejemplos de aplicación

En estudios como el de Mucuta-Lito et al. (2020), Slide fue utilizado para analizar taludes en el yacimiento Castellano, obteniendo factores de seguridad entre 0.281 y 0.444, lo que evidenció inestabilidad y necesidad de medidas de mitigación.

2.24.5 Normativa ecuatoriana

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) establece valores mínimos del factor de seguridad (FS) para distintos escenarios de diseño, con el objetivo de garantizar la seguridad estructural y geotécnica en obras civiles. Dichos valores se encuentran especificados en el capítulo NEC-SE-GC, correspondiente a Geotecnia y Cimentaciones, así como en las disposiciones técnicas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP).

Tabla 6 Valores mínimos de FS según NEC

Condición	FS mínimo
Estática	1.30
Dinámica (sismo)	1.10
Taludes temporales	1.20
Taludes permanentes	1.50

Fuente: MTOP (2022).

“El FS mínimo debe ajustarse según la condición de carga, el tipo de suelo y la función estructural del talud” (MTOP, 2022; NEC-SE-GC, 2023).

2.25 Aplicaciones del método de Spencer en estudios reales

2.25.1 Casos documentados en Ecuador

2.25.1.1 Estudio de la calle Cóndor

En el estudio de Calle Cóndor (2024), se aplicó el método de Spencer mediante el software Slide v6.0 para analizar tres taludes críticos en la provincia de Cañar: Azogues-Cuenca, La Ramada y El Zhall. Los resultados mostraron factores de seguridad por debajo de los valores mínimos establecidos por la NEC, especialmente en condiciones de escorrentía.

Tabla 7 Resultados de FS en taludes analizados

Sector	FS estático	FS dinámico	Condición del talud
Azogues-Cuenca	1.02	0.81	Inestable
La Ramada	1.15	0.89	Parcialmente estable
El Zhall	0.98	0.76	Inestable

Fuente: MTOP (2022); Calle Cóndor (2024).

Adicionalmente se compararon los resultados del método de Spencer con los obtenidos mediante Bishop y Janbu. Se observó que Spencer proporciona valores más conservadores y superficies de falla más profundas, lo que permite una evaluación más rigurosa.

2.25.1.2 Vía Loja–Zamora (UTPL, 2017)

El análisis realizado en la vía Loja–Zamora (Curipoma Viteri, 2017), donde se evaluaron perfiles de taludes en condiciones naturales y saturadas mediante el software Slide v6.0. El estudio permitió comparar los factores de seguridad obtenidos con diferentes métodos, destacando Spencer por su capacidad de integrar simultáneamente el equilibrio de fuerzas y momentos, lo que lo hace más preciso en geometrías complejas.

Tabla 8 Resultados del análisis de estabilidad de talud mediante el método de Spencer

Condición del talud	Factor de Seguridad (FS)	Estado de estabilidad
Seco, sin carga externa	1.52	Estable
Saturado, sin carga externa	1.18	Límite de estabilidad
Saturado, con carga externa	0.94	Inestable (riesgo alto)
Con drenaje superficial	1.36	Estable (mejorado)

Fuente: Curipoma Viteri (2017)

2.25.1.3 Sector Cuyuja, vía Papallacta–Baeza (EPN, 2023)

En el sector Cuyuja, caracterizado por suelos volcánicos y alta pluviosidad, se aplicó el método de Spencer para evaluar la estabilidad de taludes en condiciones estáticas y dinámicas. El análisis mostró que, bajo condiciones sísmicas, el factor de seguridad disminuye por debajo de los valores mínimos establecidos en la normativa ecuatoriana, lo que evidencia un riesgo elevado de deslizamiento.

Tabla 9 Resultados del análisis de estabilidad de talud en Cuyuja mediante el método de Spencer

Condición del talud	Factor de Seguridad (FS)	Estado de estabilidad
Estático	1.10	Cercano al límite
Dinámico (sísmico)	0.85	Inestable

Fuente: Escuela Politécnica Nacional (2023).

2.25.1.4 Autopista General Rumiñahui, Conocoto (UPS, 2024)

En un talud urbano de la autopista General Rumiñahui se aplicó el método de Spencer para evaluar la estabilidad en condiciones naturales y reforzadas. El análisis demostró que el talud presentaba un factor de seguridad cercano al límite de inestabilidad, pero mediante la implementación de geomallas y drenaje superficial se logró incrementar el FS a valores aceptables, garantizando la seguridad de la infraestructura vial.

Tabla 10 Resultados del análisis de estabilidad de talud en la autopista General Rumiñahui mediante el método de Spencer

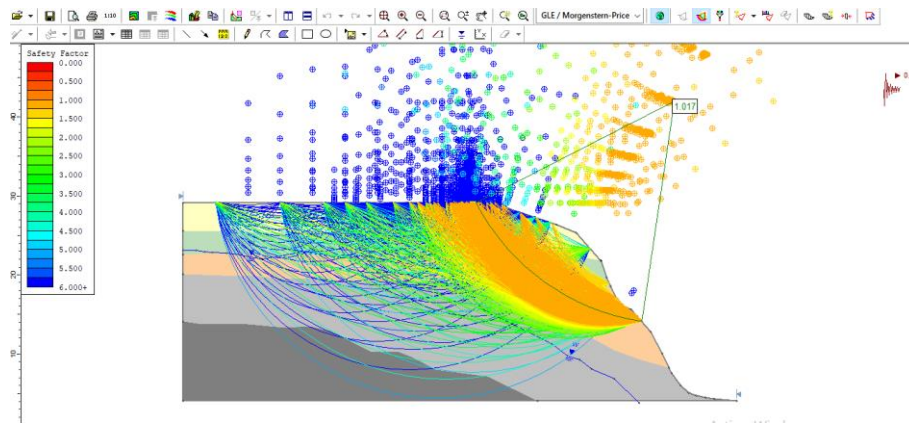
Condición del talud	Factor de Seguridad (FS)	Estado de estabilidad
Sin intervención	1.02	Inestable
Con geomalla y drenaje	1.41	Estable

Fuente: Oña Santillán, J. A. (2024).

2.25.2 Aplicación de programación dinámica

La programación dinámica permite explorar cientos de posibles superficies de falla mediante curvas generadas aleatoriamente. El algoritmo selecciona la superficie con el FS más bajo, optimizando el análisis tridimensional.

Figura 62 Curvas de búsqueda en programación dinámica Slide V6.0



Fuente: Elaboración por autores.

2.26 Consideraciones sísmicas en el análisis de taludes

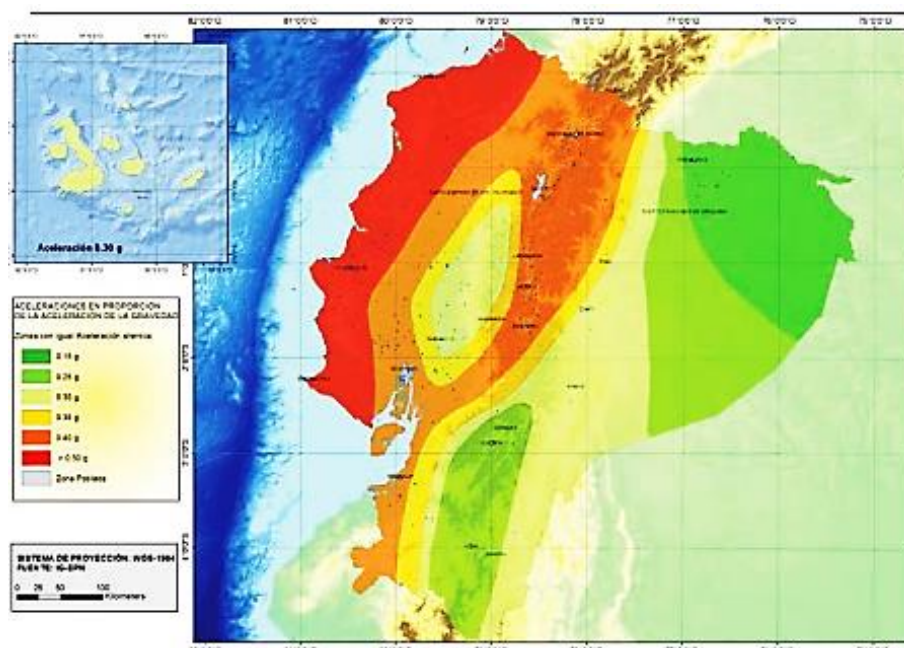
2.26.1 Coeficiente sísmico

El coeficiente sísmico se define como la aceleración horizontal prevista durante un evento sísmico, expresada en términos de una fracción de la aceleración de la gravedad. Este

parámetro constituye un factor fundamental en los análisis de estabilidad de taludes y en el diseño geotécnico bajo condiciones sísmicas. En Ecuador, según la norma NC 46-2012 del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIS), este coeficiente varía por región.

Este parámetro se incorpora en el análisis para hacer una simulación condiciones dinámicas, afectando directamente el factor de seguridad.

Figura 63 Zonificación sísmica y factor Z

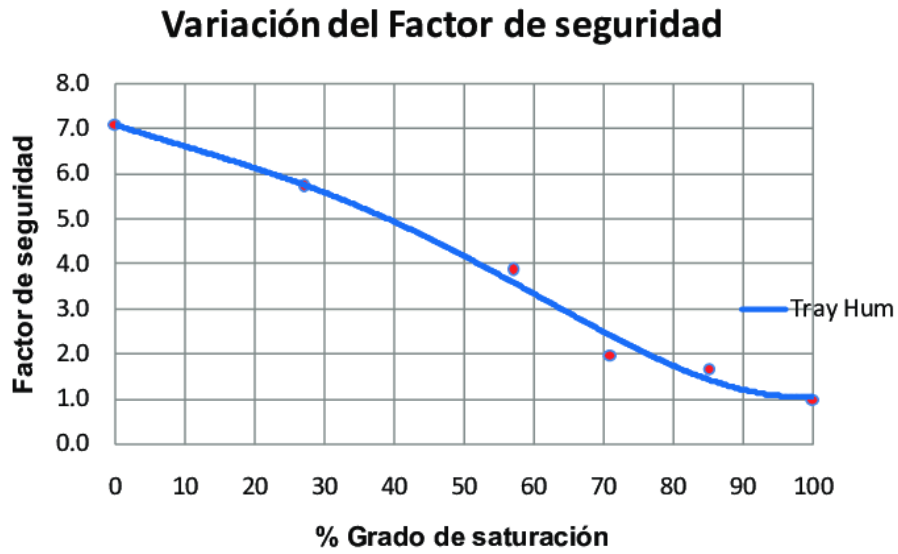


Fuente: NEC (2014).

2.26.2 Efectos de saturación y presión de poros

La presión de poros reduce la resistencia al corte, debido a lluvias intensas y eventos sísmicos. En taludes coluviales, la saturación puede disminuir el FS hasta en un 46.76% (Hussen et al., 2024). La Figura 64 muestra cómo varía el FS según el nivel de saturación.

Figura 64 Cuadro FS vs % saturación



Fuente: ResearchGate (2014).

2.26.3 Modelación en Slide bajo condiciones dinámicas

El software Slide permite incorporar el coeficiente sísmico en el análisis. En el estudio de Calle Córdor (2024), se observó que los taludes analizados presentaban $FS < 1.0$ bajo condiciones dinámicas, lo que evidenció la necesidad de medidas de estabilización.

Tabla 11 FS bajo condiciones sísmicas

Talud	FS estático	FS dinámico	Coef. sísmico
Azogues-Cuenca	1.02	0.81	0.25
La Ramada	1.15	0.89	0.25
El Zhall	0.98	0.76	0.25

Fuente: Elaborado por autores

3 Marco metodológico

Nuestra investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en la recopilación de parámetros geotécnicos, la modelación numérica y el cálculo de factores de seguridad mediante métodos de equilibrio límite. Se trata de una investigación de carácter aplicado, orientada a resolver un problema real de riesgo geotécnico en el sector de La Gasca, Quito, afectado por procesos de remoción en masa. Asimismo, posee un componente descriptivo, al caracterizar las condiciones del suelo y la geometría del talud, y un componente explicativo, al analizar las causas de la inestabilidad y evaluar escenarios de falla.

El diseño de investigación corresponde a un estudio de caso, centrado en un talud crítico, cuya vulnerabilidad se evidenció en el aluvión ocurrido en 2022. La metodología combina caracterización geotécnica y modelación computacional, integrando tanto datos primarios: ensayos SPT, triaxial, ortofotos; como secundarios: tesis académicas, estudios del IG-EPN e IGM. El método de análisis es de tipo experimental - simulativo, mediante el uso del software Slide v6.0, y comparativo, al contrastar factores de seguridad en escenarios estáticos y pseudoestáticos.

En este marco, nuestra investigación se estructurará en fases sucesivas, como podremos observar en la figura 65 que resume todo el proceso que llevaremos a cabo.

Figura 65 Fases de la investigación



Fuente: Elaborado por autores.

3.1 Ubicación del proyecto

El presente estudio se desarrolla en el sector de La Gasca, ubicado al norte de la ciudad de Quito, dentro del Distrito Metropolitano. Esta zona presenta condiciones topográficas y geotécnicas complejas, con antecedentes de movimientos en masa que justifican la evaluación detallada de la estabilidad del talud. Para efectos de modelación y georreferenciación, se establecieron puntos de control con coordenadas en el sistema UTM, que permitieron delimitar con precisión el área de intervención.

Tabla 12 Ubicación del proyecto

Puntos de control	Coordenadas		Elevación
	WGS84/Zona 17 S		
	X	Y	
BM-1	776690.40	9978903.48	2967.73
BM-2	776788.41	9978927.25	2968.60

Fuente. Elaborado por autores.

3.2 Selección del área crítica de estudio

En el inicio de esta etapa se logró determinar la zona de mayor vulnerabilidad en el sector de La Gasca, tomando en cuenta tanto la geometría del talud como los antecedentes registrados durante el evento ocurrido en 2022, por medio de la visita a la zona y a la consulta de los habitantes. Se emplearon inspecciones visuales, registros fotográficos y se realizó el levantamiento topográfico mediante RTK y Dron complementados con ortofotos georreferenciadas propias y obtenidas del IGM.

Figura 66 Ortofoto georreferenciada de La Gasca



Fuente: Instituto geográfico militar (2024).

Se presenta una ortofoto del sector La Gasca, elaborada como parte del proceso de selección del área crítica de estudio. Esta herramienta cartográfica permite visualizar con precisión los elementos urbanos y naturales afectados por el aluvión, facilitando el análisis técnico y la planificación de medidas correctivas.

Figura 67 Quebrada El Tejado con la zona de afectación



Fuente: Arianna Perin (2024).

La imagen muestra el recorrido de la quebrada El Tejado, identificada como la zona con mayor afectación dentro del sector de La Gasca, debido a su pendiente pronunciada, longitud significativa y cercanía a áreas urbanas vulnerables.

Figura 68 Ortofotos y la curva de nivel del talud

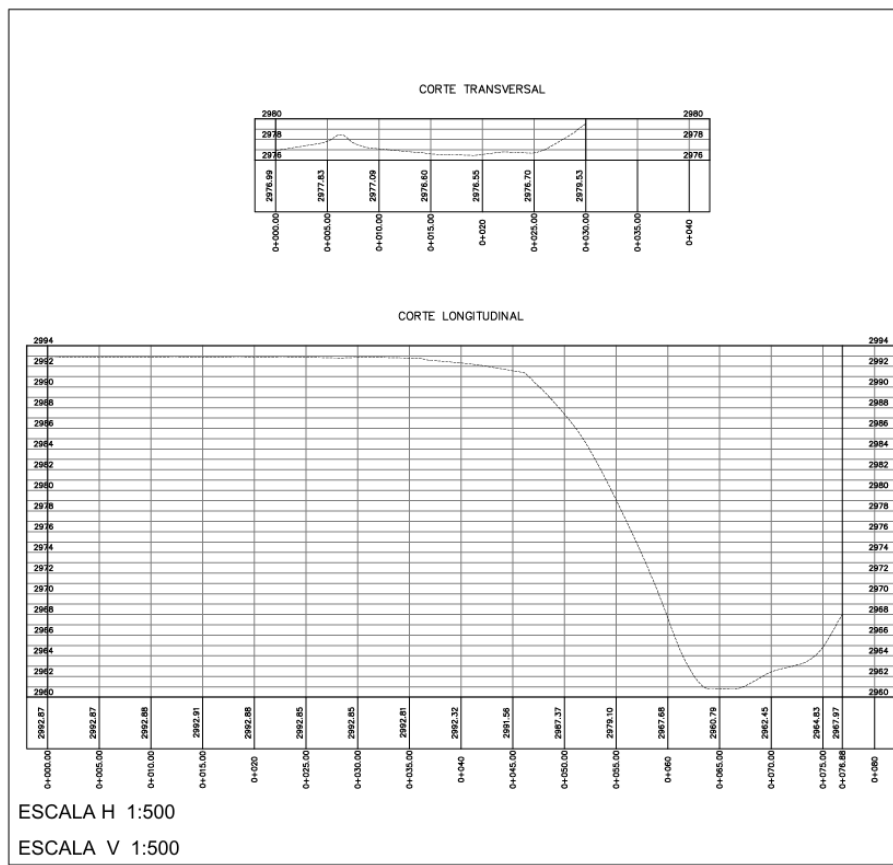


Fuente: Elaborado por Autores

Tras efectuar el levantamiento topográfico con tecnología RTK y apoyo de dron, se generaron las curvas de nivel correspondientes al talud, para poder representar el relieve del terreno en un plano bidimensional, mostrando las diferencias de altura y pendiente. Con ellas se pueden identificar zonas críticas de inclinación

Con la ayuda de las curvas de nivel también se obtuvo los perfiles longitudinales y transversales permite analizar la geometría natural y proyectada del suelo o macizo rocoso. El perfil longitudinal muestra la variación de elevaciones a lo largo del eje del proyecto, mientras que el perfil transversal representa cortes perpendiculares a dicho eje, revelando la forma lateral del terreno

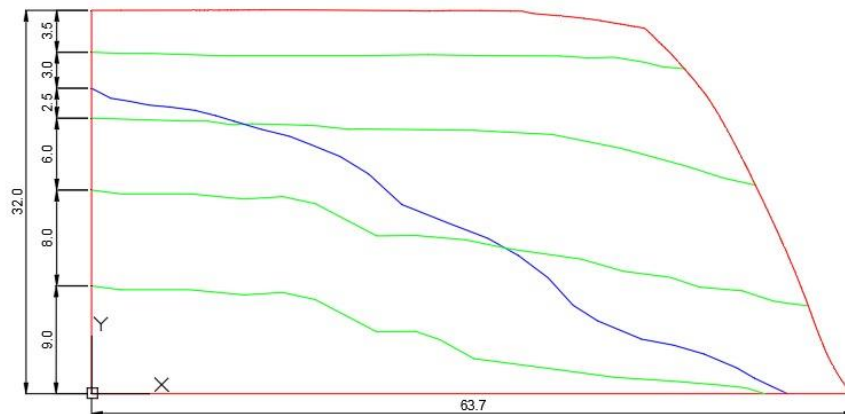
Figura 69 Perfil longitudinal y transversal del talud



Fuente: Elaborado por autores.

La información obtenida nos permitió delimitar el área de análisis y definir la sección crítica para la modelación en AutoCAD que luego será utilizada en el programa Slide, visualizada en la figura 70

Figura 70 Dimensionamiento del Talud

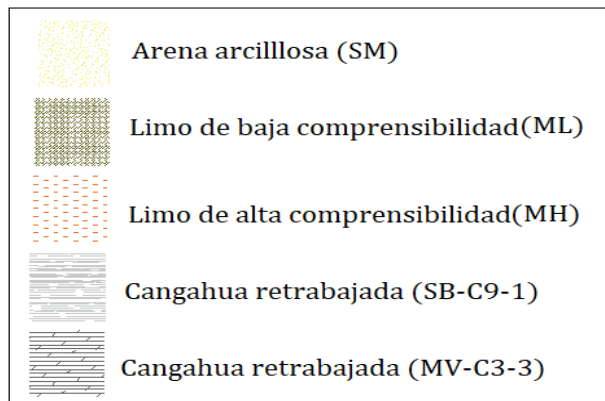
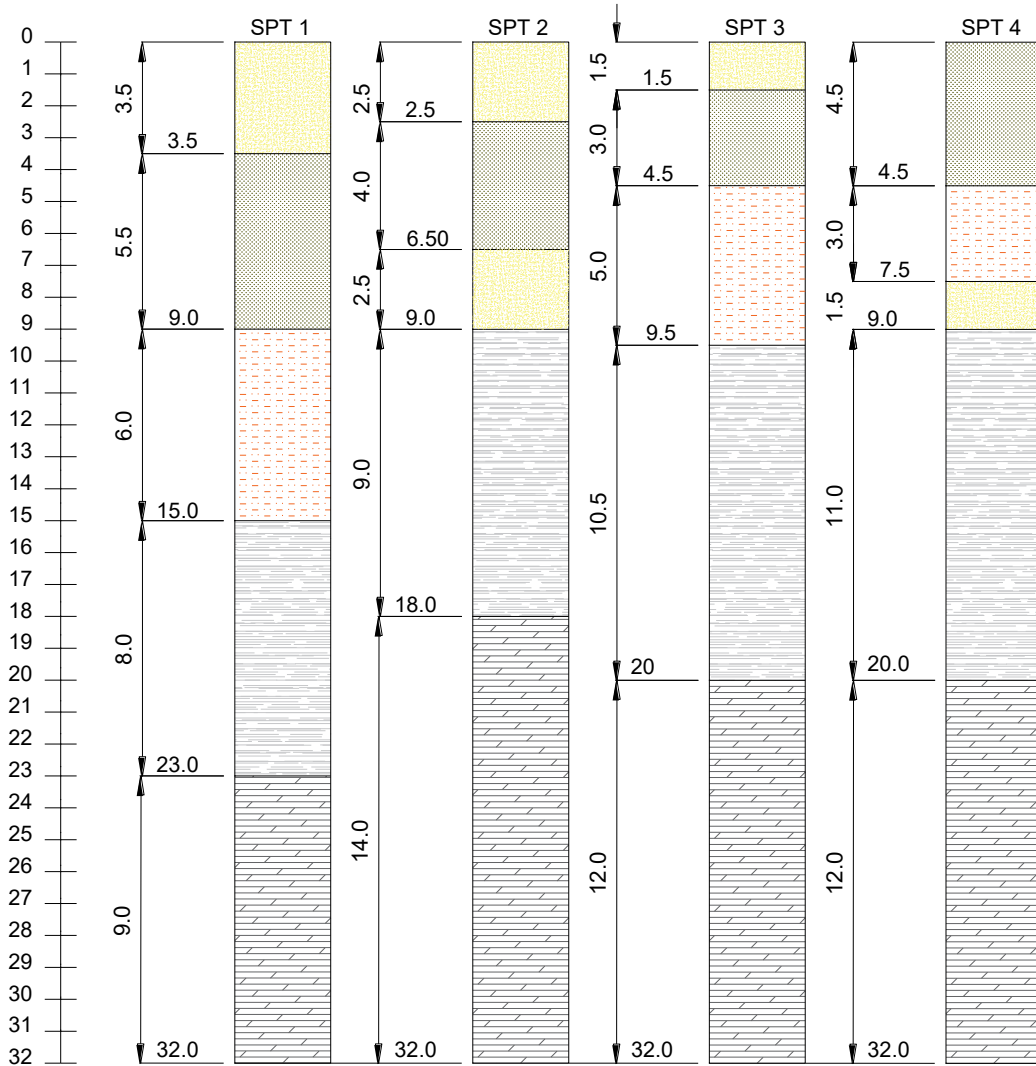


Fuente: Elaborado por autores.

3.3 Caracterización geotécnica del suelo

Se efectuó mediante la realización de ensayos SPT y triaxiales, a partir de los cuales se obtuvieron parámetros fundamentales como la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y la resistencia al corte en la zona de estudio. Estos valores constituyen la base necesaria para la aplicación del criterio de Mohr-Coulomb dentro del software Slide, permitiendo evaluar la estabilidad del talud con rigor técnico. Se determinó que el área de estudio se asienta sobre una unidad de cangahua superpuesta a los depósitos volcánicos del Pichincha, originados durante el Cuaternario. Estos materiales están conformados principalmente por cenizas de tonalidades habano. Asimismo, en el sitio se identificaron suelos correspondientes a limos de baja (ML) y alta compresibilidad (MH), además de arena fina limosa (SM) con presencia de agua a los 6.5 m de profundidad (Geotest, 2023).

Figura 71 Perfil estratigráfico del sitio



Fuente: Geotest (2023).

Se escogerá los parámetros del SPT1 que denota lo siguiente: Hasta una profundidad de 3.50 m está compuesto por arena fina limosa (SM), hasta los 6.50 m limo de baja compresibilidad (ML) y hasta los 9.50 m de profundidad se caracteriza por un limo de alta compresibilidad (MH) y en menor porción arena fina limosa (SM) según (Geotest, 2023). Entonces, sintetizando toda esta información los parámetros del suelo con los que vamos a realizar los cálculos serán expuestos en la siguiente tabla.

Tabla 13 Parámetros obtenidos de los ensayos suelo

Estratos	Límites de estratos (m)		Espesor estrato (m)	SUCS	Tipo de suelo	Peso Unitario (KN/m ³)	Cohesión (KN/m ²)	φ (°)
1	0.00	3.50	3.50	SM	Arena fina limosa	15.29	29.50	15.17
2	3.50	9.00	5.50	ML	Limo de Baja compresibilidad	16.00	18.00	26.00
3	9.00	15.00	6.00	MH	Limo de Alta compresibilidad	15.30	22.00	24.00
4	15.00	23.00	8.00		Cangahua retrabajada (SB-C9-1)	14.21	32.36	46.67
5	23.00	32.00	9.00		Cangahua retrabajada (MV-C3-3)	15.78	72.57	35.75

Fuente: Elaborado por autores.

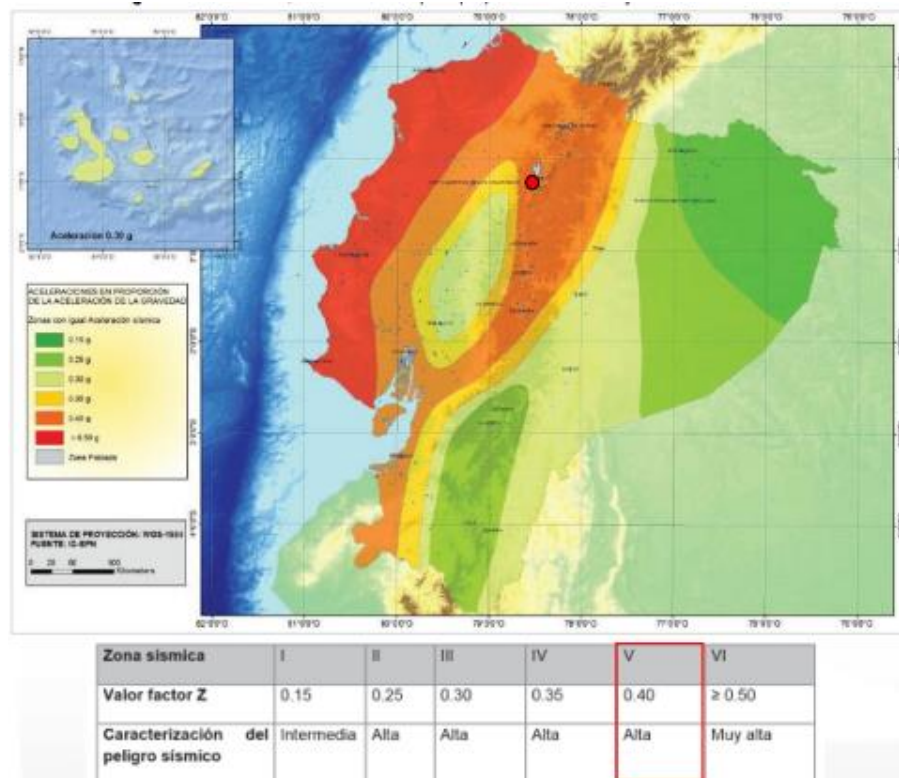
La cangahua tiene una alta cohesión de aproximadamente 76.96 Kpa, humedad baja y ángulo de fricción alto de 39° aproximadamente por lo que sus características de estabilidad son buenas en condiciones secas, por lo contrario, si incrementa su humedad debido a las precipitaciones constantes esta pierde sus características volviéndose susceptible a deslizamientos (Montatixe & Chango, 2018).

La zona centro norte de Quito está determinada por estratos compuestos de cangahua que varían de entre los 10 cm a 12 m de espesor. (Montatixe & Chango, 2018).

3.4 Modelación computacional

La modelación se llevará a cabo en Slide, simulando la geometría del talud y aplicando diferentes métodos de equilibrio límite (Bishop, Janbu, Spencer y Morgenstern-Price) que son los más representativos. Se analizarán escenarios en condiciones estáticas y pseudoestáticas, incorporando la acción sísmica de acuerdo con la normativa ecuatoriana (NEC-SE-DS).

Figura 72 Valores del Factor Z según la zona sísmica



Fuente: NEC (2016).

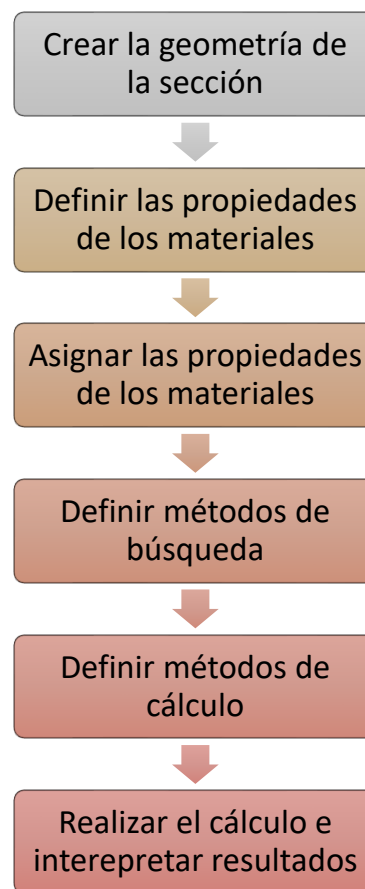
En la figura 72, se aprecia el valor Z que identifica la zona sísmica, para nuestra tesis utilizaremos el coeficiente $Z=0.4$ correspondiente a una zona V. Este valor es clave para realizar el análisis pseudoestático más adelante.

Asimismo, se evaluará la variabilidad del nivel freático, con el fin de calcular el factor de seguridad (FS) en distintos estados de carga. En esta fase lo principal es identificar las

superficies críticas de falla y cuantificar el grado de estabilidad del talud bajo diferentes condiciones. También se realizará un análisis de sensibilidad para conocer la capacidad de carga máxima y como afecta al factor de seguridad.

A continuación, se representará los pasos a seguir para poder modelar, analizar y calcular las superficies críticas del talud, mediante la figura 73

Figura 73 Flujograma de los pasos a seguir en Slide



Fuente: Elaborado por autores.

3.4.1 Crear la geometría de la sección

Existen dos maneras para crear la geometría del talud, la primera consiste en crear el perfil del talud directamente por coordenadas, estas deberán ser ingresadas directamente en Slide, formando polígonos por medio de los puntos hasta tener el perfil del talud. De la otra

manera, es la más recomendable, que consiste en crear el perfil en AutoCAD y exportarlo a Slide. Pero antes, se deberá asignar a cada una de las polilíneas capas para que se importen correctamente.

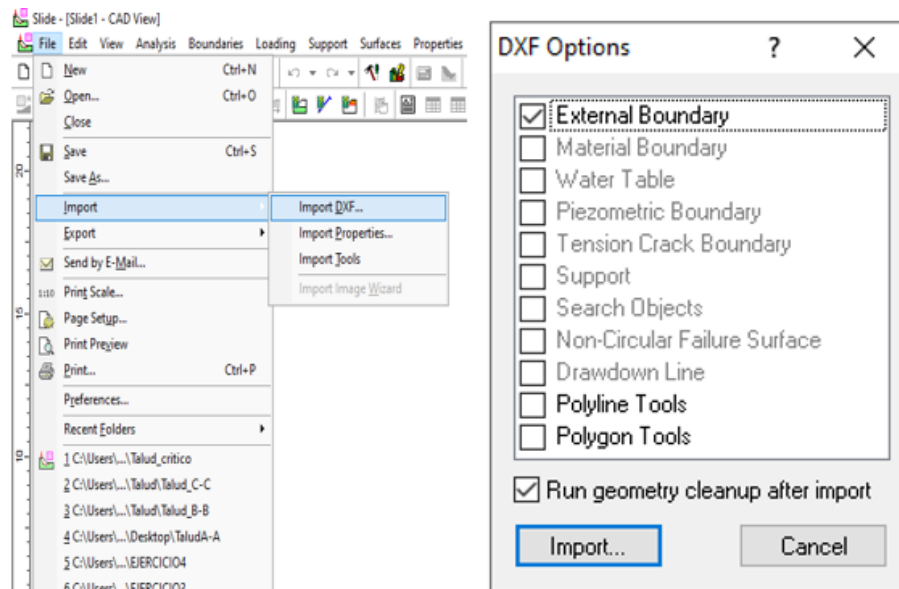
Figura 74 Representación de polilíneas por medio de capas



Fuente: Elaborado por autores.

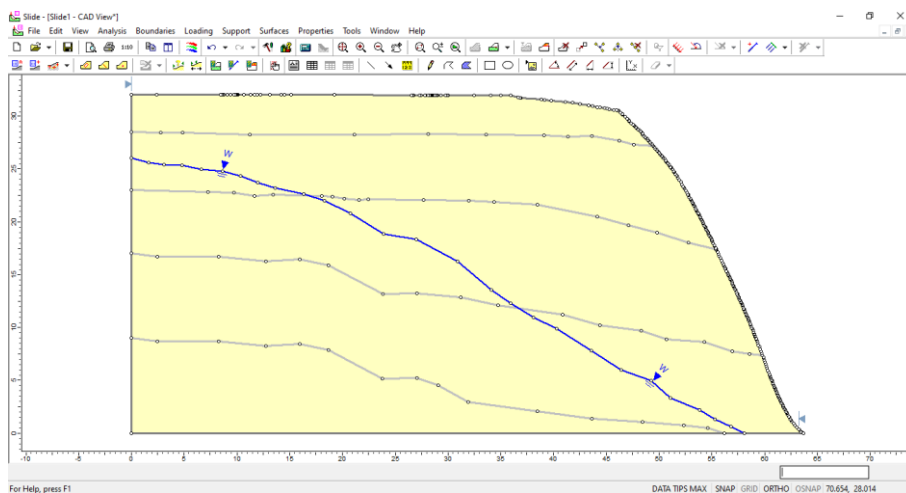
En la figura 74 se observa la existencia de tres capas: la primera llamada EXTERNAL_BOUNDARY, representa el perfil externo del talud. MATERIAL_BOUNDARY representa las distintas capas del suelo y WATER_TABLE es la línea de agua para representar el nivel freático. Es muy importante aclarar que deben ser escritas tal y como se visualizan. Se guarda este archivo en formato DXF y se comienza a importar capa por capa a Slide hasta tener el talud completamente definido.

Figura 75 Importar DXF de AutoCAD



Fuente: Elaborado por autores.

Figura 76 Perfil importado correctamente en Slide



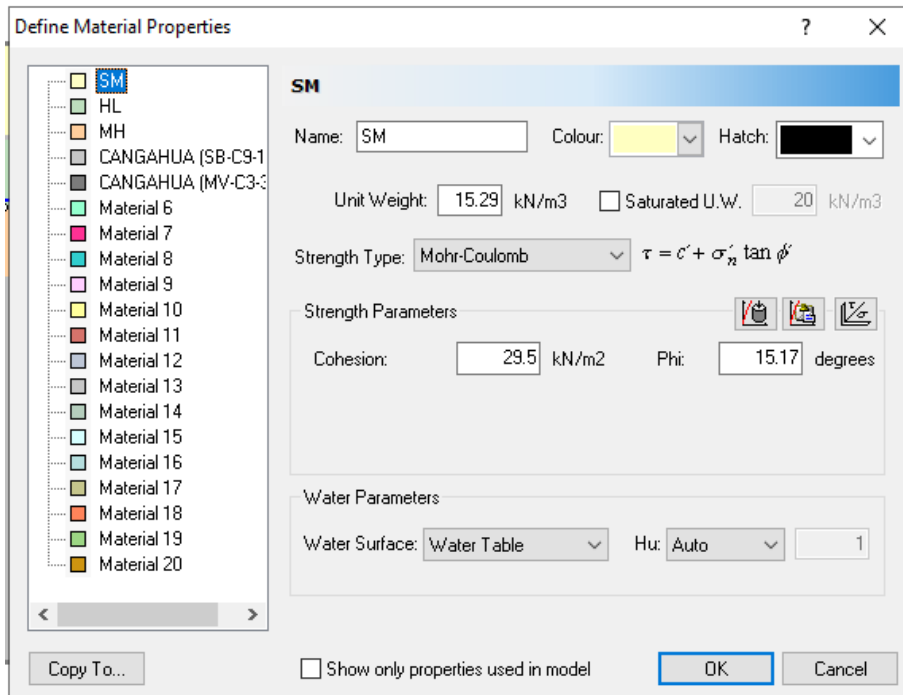
Fuente: Elaborado por autores.

3.4.2 Definir las propiedades de los materiales

Para definir los materiales ubicamos la pestaña properties y seleccionamos Define materials. Colocamos los datos: Nombre del suelo, peso unitario, cohesión, ángulo de fricción

y wáter table y dejamos en Auto. Y así con todos los tipos de suelo existentes, el programa nos permite utilizar hasta 20 tipos de suelo.

Figura 77 Definir materiales que conforman el suelo

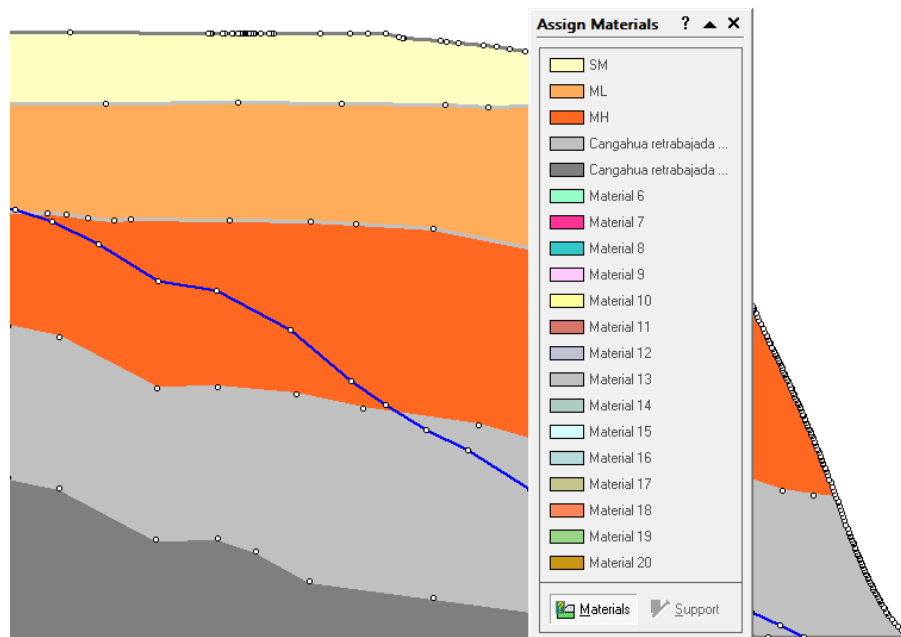


Fuente: Elaborado por autores.

3.4.3 Asignar las propiedades de los materiales

Esto no es otra cosa que darle los parámetros correspondientes a cada uno de los materiales. Nos ubicamos en Properties y luego en Assign Properties. Cada capa de diferente color tendrá las propiedades que previamente ingresamos.

Figura 78 Asignar materiales a cada estrato

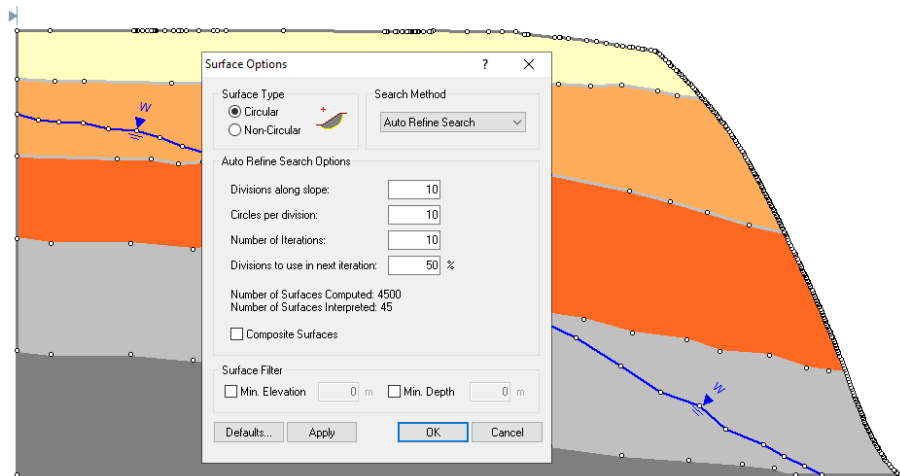


Fuente: Elaborado por autores.

3.4.4 Definir los métodos de búsqueda

La superficie de falla que generalmente los taludes sufren son del tipo circular, por ello se tiene que especificar al programa este punto. Seleccionamos Surfaces y luego Surface options, elegimos la falla circular y en métodos de búsqueda elegimos Auto Refine Search. Lo que hará el programa es crear una grilla automática de todos los puntos que representan una superficie de falla.

Figura 79 Superficie de falla

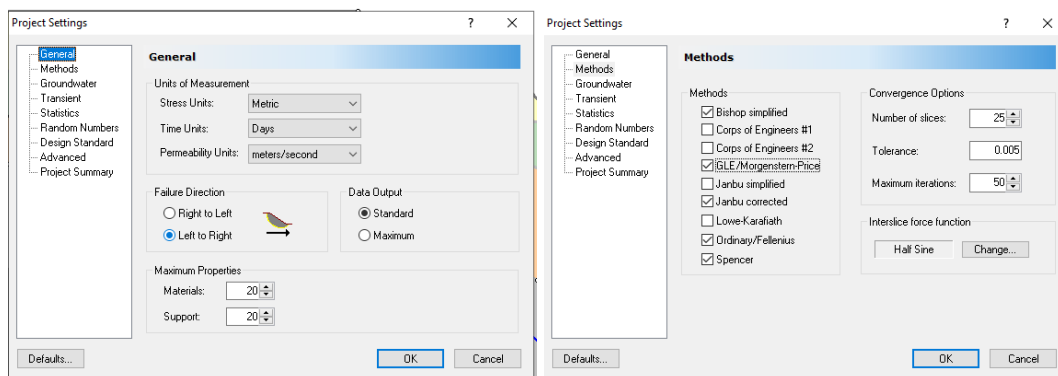


Fuente: Elaborado por autores.

3.4.5 Definir métodos de cálculo

Slide permite el cálculo del factor de seguridad con diferentes métodos como se observa en la figura 80. También es importante verificar la dirección del talud en nuestro caso está de izquierda a derecha.

Figura 80 Cálculo del FS bajo diferentes métodos



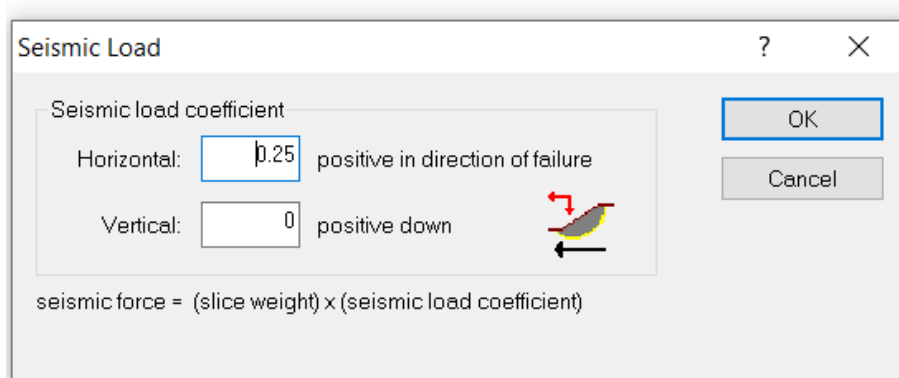
Fuente: Elaborado por autores.

Antes de ir al último paso, hay recordar que nuestro talud va a hacer analizado también bajo cargas sísmicas. Por lo tanto, hay que ingresar ese dato a Slide, nuestro factor de zona $Z=0.4$, para trabajar esta carga en Slide se tiene usar un 60% de este valor debido a que el

programa solo realiza análisis pseudoestático que es una simplificación del análisis dinámico, basándose en la segunda la de Newton, donde la fuerza es directamente proporcional a la masa por la aceleración. Usando este principio en análisis sísmico obtenemos que la fuerza sísmica es directamente proporcional a la masa deslizante por aceleración sísmica, esta aceleración sísmica es igual al 60% de Z, por lo tanto, el coeficiente de carga sísmico que ingresaremos al Slide es 0.25

Para agregar este valor nos ubicamos en la pestaña Loading y luego en Seismic Load y procedemos a ingresar este valor como se muestra en la figura 81.

Figura 81 Coeficiente de carga sísmica



Fuente: Elaborado por autores.

3.4.6 Cálculo e interpretación de resultados

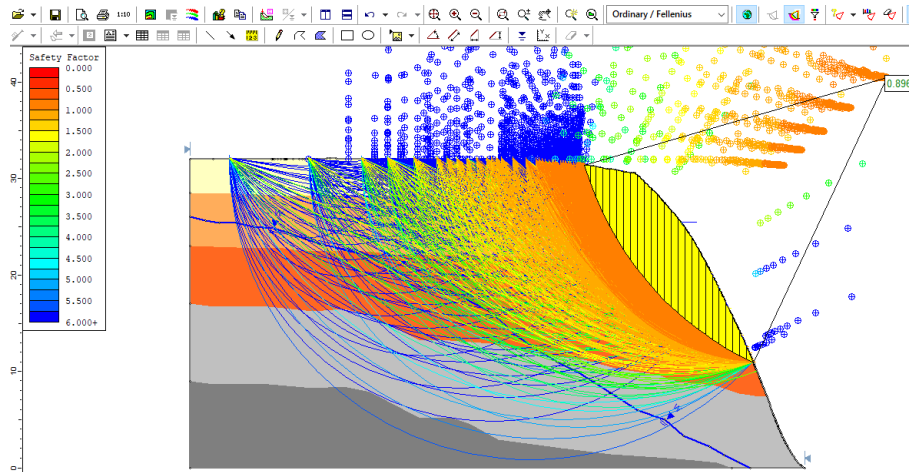
Una vez realizado todo este proceso, nuestro último paso es calcular el factor de seguridad con las superficies de fallas encontradas. Nos dirigimos a la pestaña Analysis y luego a Compute, el programa comienza a calcular las superficies de falla, una vez termina nos colocamos en Intepret para poder visualizar los cálculos.

3.5 Interpretación de resultados del talud en estado natural

Los cálculos realizados bajo diferentes métodos y en diferentes condiciones que son los siguientes:

3.5.1 Talud en estado natural considerando condiciones estáticas

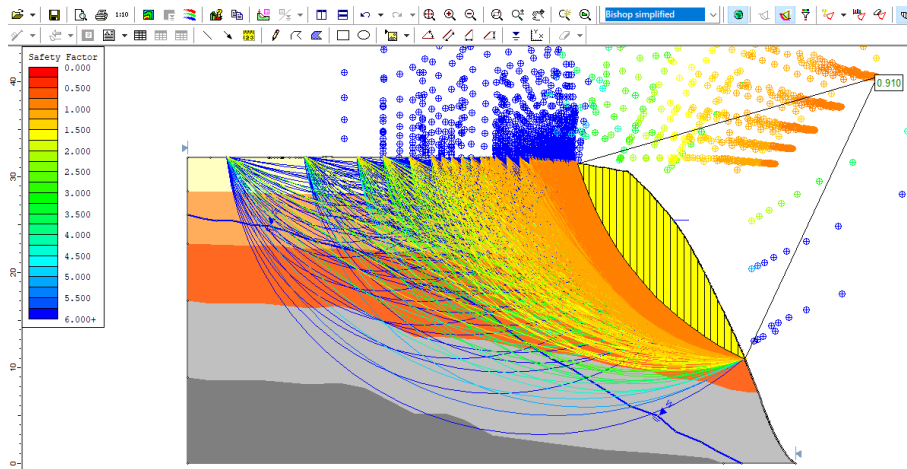
Figura 82 FS Fellenius



Fuente: Elaborado por autores.

La figura 82 presenta el resultado del análisis de estabilidad de un talud natural, realizado mediante el método de Fellenius (Ordinary Method of Slices) en condiciones estáticas, La superficie crítica de falla se muestra en color amarillo-anaranjado con líneas diagonales, indicando que es la más susceptible al deslizamiento. Esta superficie presentó un factor de seguridad de 0.896, lo que sugiere una condición de inestabilidad bajo las condiciones analizadas. Este valor es inferior al umbral mínimo recomendado ($FS \geq 1.0$), por lo que se considera que el talud requiere medidas de estabilización o revisión de parámetros geotécnicos.

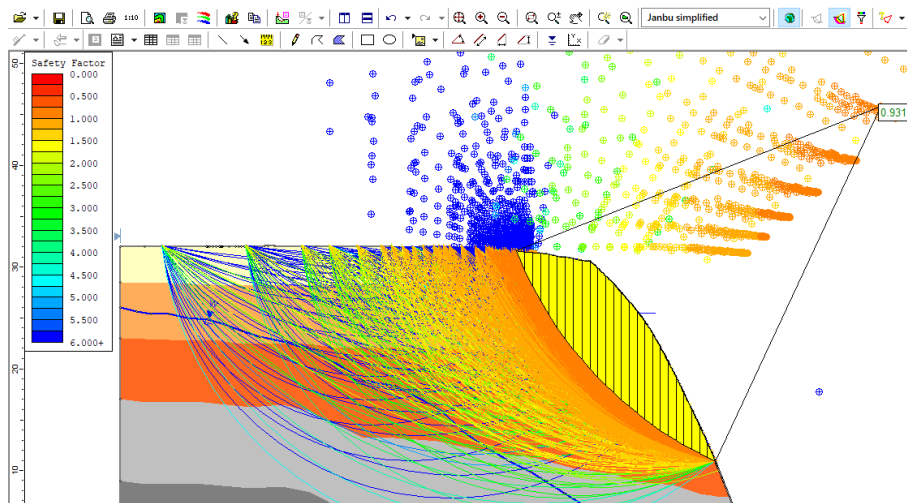
Figura 83 FS Bishop Simplificado



Fuente: Elaborado por autores.

El análisis con el método de Bishop Simplificado arrojó un factor de seguridad de 0.910, ligeramente superior al obtenido con Fellenius, pero aún insuficiente para garantizar la estabilidad del talud. Este resultado confirma que, aunque el método de Bishop incorpora un análisis más riguroso del equilibrio de fuerzas, el talud sigue presentando riesgo de falla bajo las condiciones actuales.

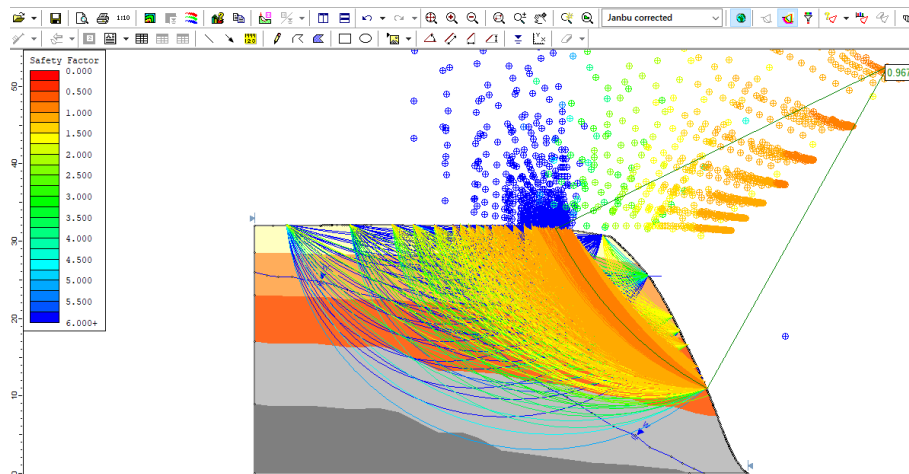
Figura 84 FS Janbu simplificado



Fuente: Elaborado por autores.

Se analizó el talud con el método de Janbu simplificado arrojando un factor de seguridad crítico de 0.931, indicando una condición de inestabilidad marginal en el talud. La superficie de falla más probable se localizó en el estrato medio, con trayectorias curvas evaluadas por equilibrio de fuerzas horizontales.

Figura 85 FS Janbu corregido

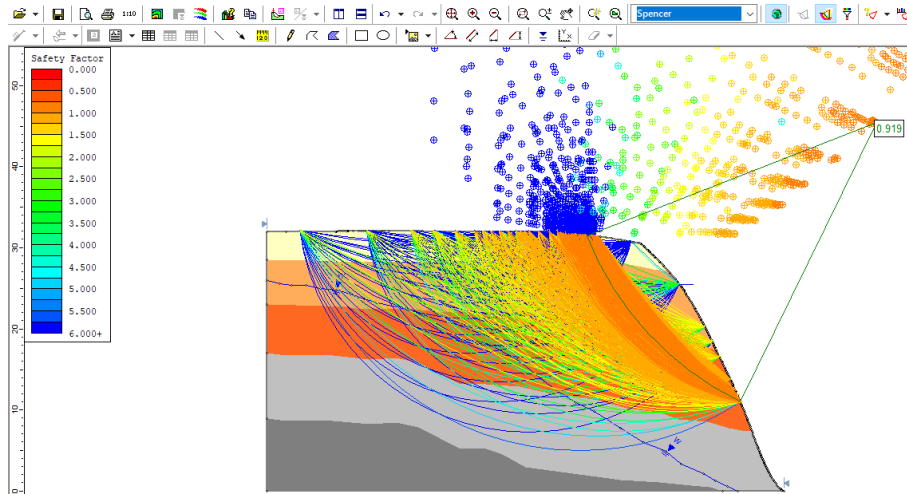


Fuente: Elaborado por autores.

Al aplicar el método de Janbu Corregido, obtuve un FS de 0.967, lo que me indicó que el talud se encuentra en una zona de transición entre estabilidad y riesgo.

Este método, al centrarse en el equilibrio de fuerzas sin considerar momentos, me permitió identificar cómo la geometría y la presión de poros afectan la resistencia al corte. Aunque el FS se acercó al valor mínimo aceptable

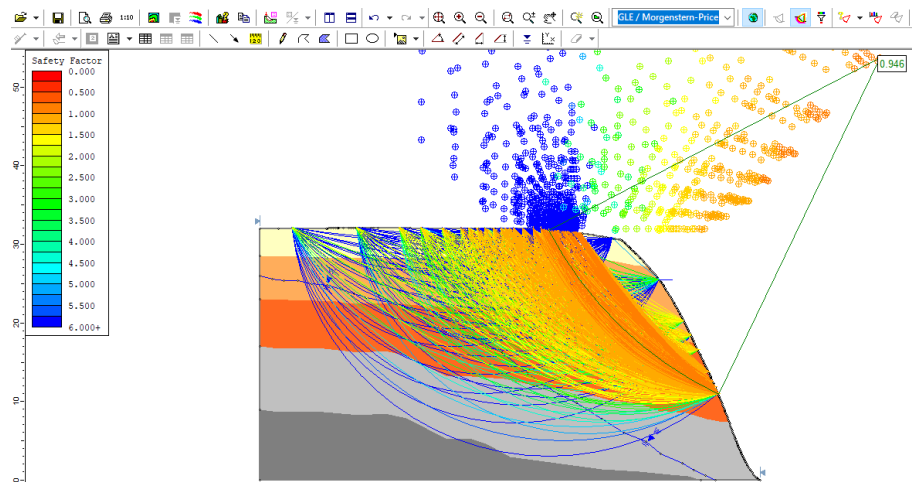
Figura 86 FS Spencer



Fuente: Elaborado por autores.

Mediante el método de Spencer permitió evaluar la estabilidad del talud considerando el equilibrio completo de fuerzas y momentos. Se obtuvo un factor de seguridad crítico de 0.919, lo cual reflejó una condición de inestabilidad moderada.

Figura 87 FS Morgenstern-Price



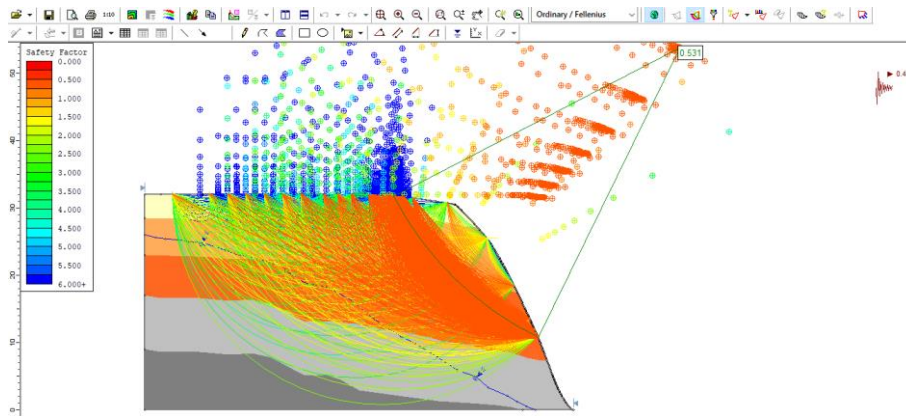
Fuente: Elaborado por autores.

El análisis arrojó un factor de seguridad de 0.946, lo que reflejó una condición de estabilidad comprometida, cercana al umbral mínimo aceptable.

3.5.2 Talud en estado natural considerando condiciones pseudoestáticas

Los cálculos de los factores de seguridad con diferentes métodos y bajo condiciones sísmicas o pseudotestáticas son las siguientes:

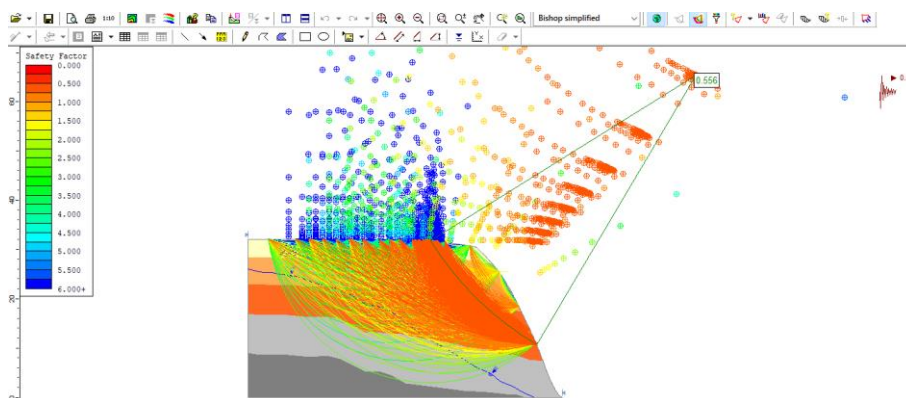
Figura 88 FS Sísmico Fellenius



Fuente: Elaborado por autores.

En la figura 88 se puede ver que mediante el análisis del método de Fellenius bajo condiciones pseudotestáticas, se obtuvo un factor de seguridad crítico de 0.531, lo cual evidenció una pérdida significativa de estabilidad respecto al escenario estático.

Figura 89 FS Sísmico Bishop

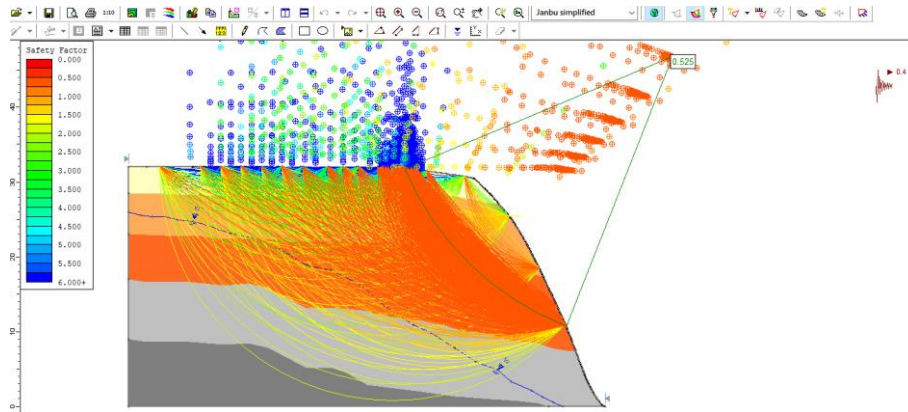


Fuente: Elaborado por autores.

El modelo pseudoestático aplicado mediante el método de Bishop Simplificado nos dio como resultado un factor de seguridad de 0.556, Este comportamiento evidenció que el talud,

bajo solicitaciones sísmicas, se encontraba en un estado límite, lo cual justificó la necesidad de incorporar soluciones de refuerzo o rediseño estructural.

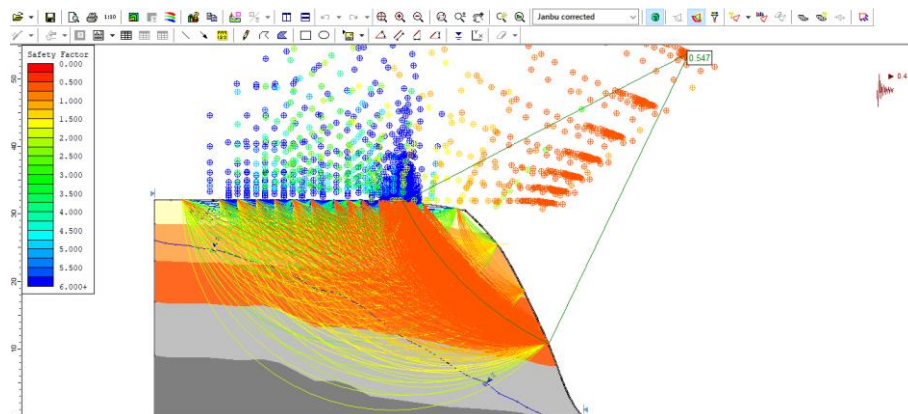
Figura 90 FS Sísmico Janbu simplificado



Fuente: Elaborado por autores.

El método de Janbu Simplificado bajo solicitación sísmica arrojó un $FS = 0.525$, presentando riesgo significativo de falla bajo condiciones sísmicas

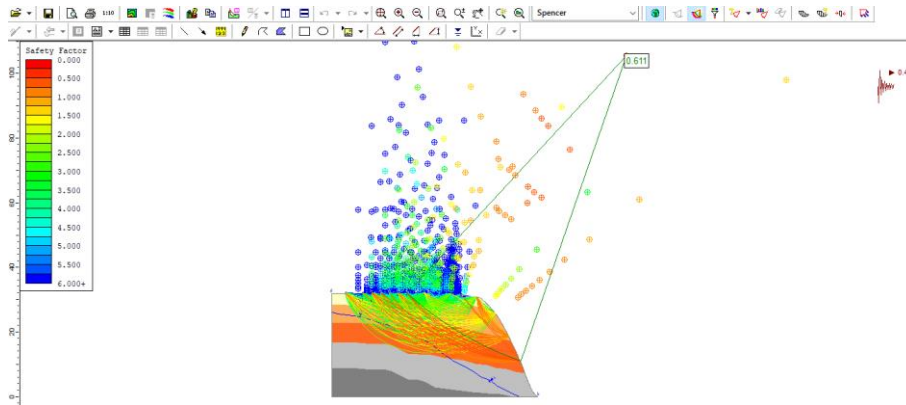
Figura 91 FS Janbu corregido



Fuente: Elaborado por autores.

El análisis de estabilidad del talud mediante el método Janbu corregido revela un factor de seguridad de 0.547, lo cual indica que aún está en condición crítica de inestabilidad y se debe de seguir mejorando.

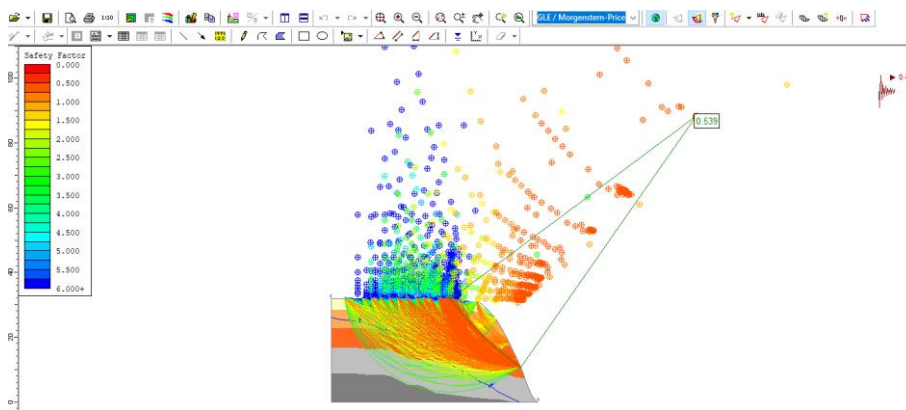
Figura 92 Sísmico Spencer



Fuente: Elaborado por autores.

El análisis pseudoestático del talud mediante el método Spencer arroja un factor de seguridad de 0.611, lo que indica una condición de inestabilidad significativa frente a solicitaciones sísmicas.

Figura 93 FS Sísmico Morgenstern-Price



Fuente: Elaborado por autores.

En la figura 93 se puede ver que mediante el análisis del método de Morgenstern-Price bajo condiciones pseudotestáticas, se obtuvo un factor de seguridad crítico de 0.539.

Con los datos obtenidos verificamos la inestabilidad del talud a través del factor de seguridad tanto para el análisis estático y pseudoestático. El talud no es estable, porque la norma

nos indica que se debe cumplir $FS > 1$. En la siguiente tabla resume los datos obtenidos de los cálculos realizados.

Tabla 14 Factores de seguridad del talud en estado natural considerando cargas estáticas y pseudoestáticas

Método de Cálculo	Factor de seguridad		Porcentaje de reducción
	Estático	Pseudoestático	
Fellenius	0.896	0.531	41%
Bishop Simplificado	0.910	0.556	39%
Janbu Simplificado	0.931	0.525	44%
Janbu Corregido	0.967	0.547	43%
Spencer	0.919	0.611	34%
Morgenstern-Price	0.946	0.539	43%

Fuente: Elaborado por autores.

4 Evaluación de resultados y propuesta de medidas de estabilización

Como se evidencia en la tabla 13, el talud es inestable para todos los métodos calculados estáticos y pseudoestáticos, en este estudio es de relevancia centrarse en el método de Spencer, ya que es el más exacto y confiable. El factor de seguridad estático es de 0.919 y el pseudoestático 0.611, valores que no están dentro de los rangos de estabilidad. Lo recomendable es tener $FS \geq 1.3$ en condiciones estáticas y $FS \geq 1.1$ en condiciones pseudoestáticas. Por lo que hay que proponer las mejoras correspondientes para cumplir con los factores de seguridad establecidos.

4.1 Propuesta 1: Modificación geométrica

La Norma Ecuatoriana de la Construcción, sección Geotecnia y Cimentaciones (NEC-SE-GC) establece lineamientos técnicos para la investigación del subsuelo, la evaluación de la estabilidad de taludes y la aplicación de medidas correctivas cuando el factor de seguridad no cumple con los valores mínimos exigidos. Sin embargo, la normativa no prescribe pendientes, ángulos tampoco dimensiones específicas para el diseño de taludes, ya que estos deben definirse en función de las características geotécnicas del terreno, las condiciones hidrogeológicas y el uso previsto del área intervenida. Por tanto, cualquier modificación geométrica debe ser diseñada caso por caso, justificada técnicamente mediante modelación que garantice la estabilidad estructural y funcional del talud.

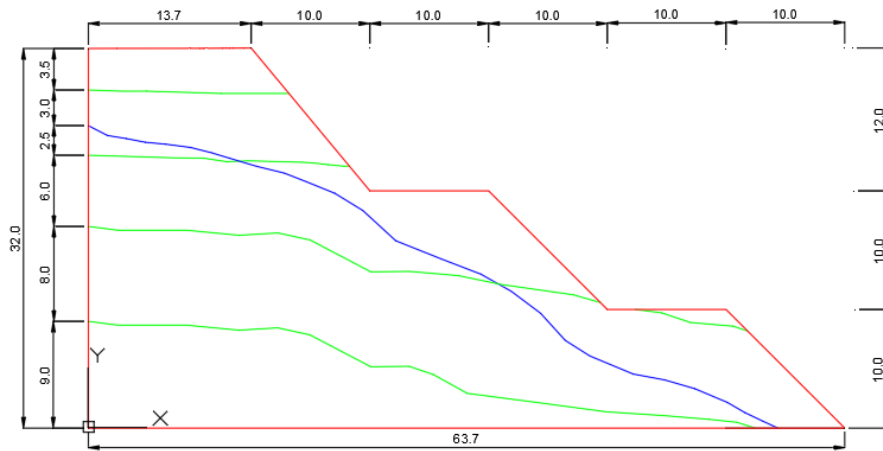
Se plantea la modificación geométrica del talud, orientada a mejorar el factor de seguridad. La propuesta consiste en reperfilear la pendiente principal hacia valores más tendidos, ajustando la relación horizontal–vertical, de acuerdo con las características de los suelos finos y cementados presentes en La Gasca.

Se realizaron varias modificaciones al talud, analizadas con Slide, dando resultados de inestabilidad, esto es debido a las características y geometría del talud. De entre todos estos casos se seleccionaron dos, caso A y caso B.

4.1.1 Caso A

Es un talud con factores de seguridad muy cercanos 1, que consta de una varias pendientes 1H1V, con alturas entre bermas de 10 a 12 m y bermas de 10 m.

Figura 94 Talud artificial 1H:1V

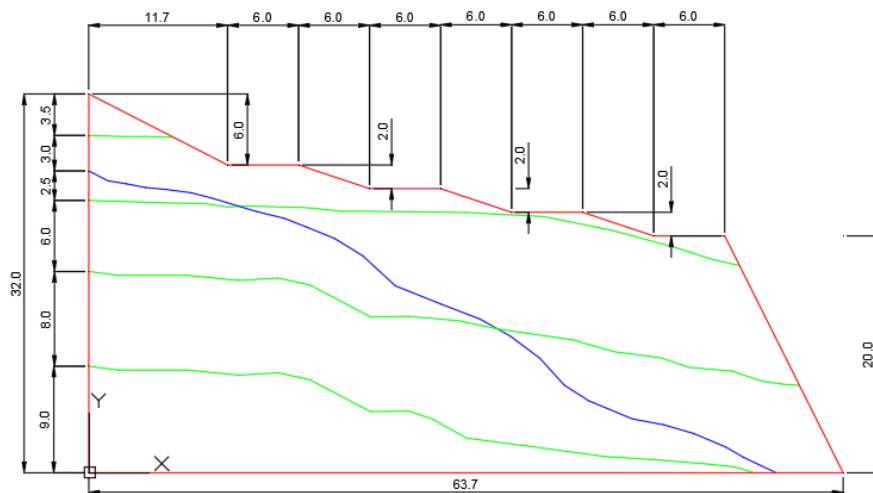


Fuente: Elaborado por autores.

4.1.2 Caso B

Es un talud que cumple con la norma del factor de seguridad, ya que obtuvo valores mayores a 1. Consta de un talud inicial de 1H2V con una altura de 20 m, luego se incluyeron taludes con menos inclinación con pendientes 3H1V, con bermas de 6m.

Figura 95 Talud artificial 3H:1V

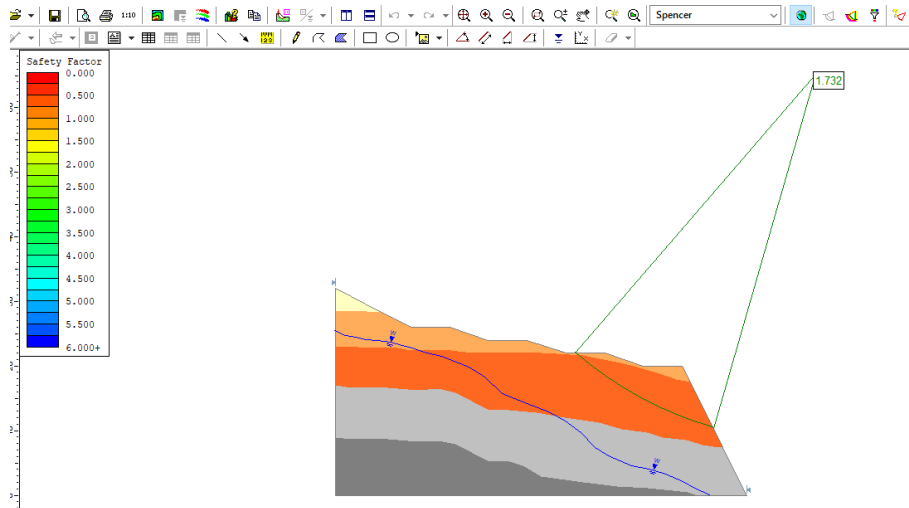


Fuente: Elaborado por autores.

El talud fue evaluado mediante el método Spencer en condiciones estáticas, obteniendo un factor de seguridad estático de 1.732, valor que supera ampliamente el mínimo normativo

requerido para estabilidad. La superficie crítica de falla identificada atraviesa zonas de baja vulnerabilidad, lo que confirma que la geometría tendida y la distribución de bermas contribuyen eficazmente a la disipación de esfuerzos y al control del deslizamiento.

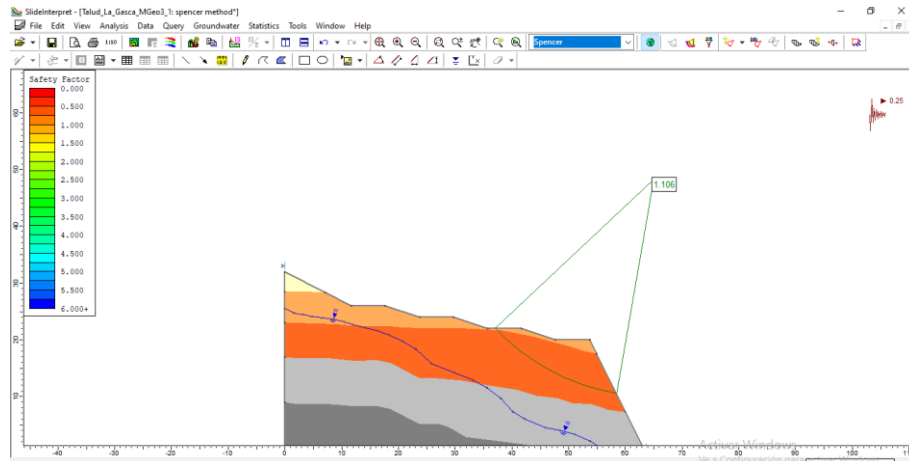
Figura 96 Factor de seguridad estable bajo condiciones estáticas



Fuente: Elaborado por autores.

La Figura 97 muestra el resultado del análisis pseudoestático del talud artificial con pendiente 3H:1V, correspondiente al segundo caso de modificación geométrica. Aplicando el método Spencer bajo condiciones sísmicas, se obtuvo un factor de seguridad de 1.106, valor que cumple con el mínimo normativo requerido para estabilidad en escenarios de carga sísmica.

Figura 97 Factor de seguridad estable bajo condiciones sísmicas



Fuente: Elaborado por autores.

La modificación geométrica del talud permitió alcanzar los factores de seguridad requeridos en condiciones estáticas y, aunque en el análisis pseudoestático los valores obtenidos bajo el método de Spencer se ubicaron apenas dentro del rango mínimo aceptable, la intervención demostró ser una alternativa eficaz para mejorar la estabilidad global. No obstante, considerando la sensibilidad del terreno frente a la acción sísmica y la presencia de niveles freáticos variables, resulta necesario complementar esta solución con medidas adicionales de drenaje y control hidráulico que refuercen la seguridad del talud y aseguren su desempeño a largo plazo.

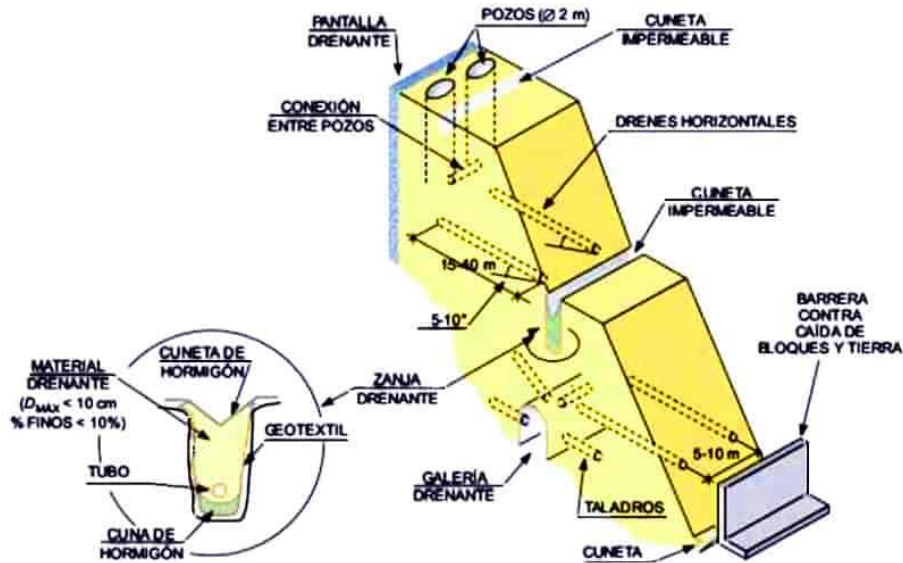
4.2 Propuesta 2: Sistema de drenaje

El agua subterránea y la infiltración superficial constituyen uno de los principales factores de inestabilidad en taludes, ya que incrementan las presiones de poros, reducen la resistencia efectiva del suelo y favorecen la aparición de superficies de falla. Por ello, la implementación de sistemas de drenaje resulta fundamental para garantizar la estabilidad.

Dentro del programa Slide el drenaje se representará mediante la reducción del nivel freático (wáter table). La modelación del drenaje en el talud contará con diversas medidas

hidráulicas, tales como drenes horizontales profundos para reducir la presión de poros en la zona media, cunetas y canales superficiales que desvían la escorrentía y evitan la infiltración en la coronación, y bermas con pendiente interna que facilitan la evacuación controlada del agua hacia el pie del talud.

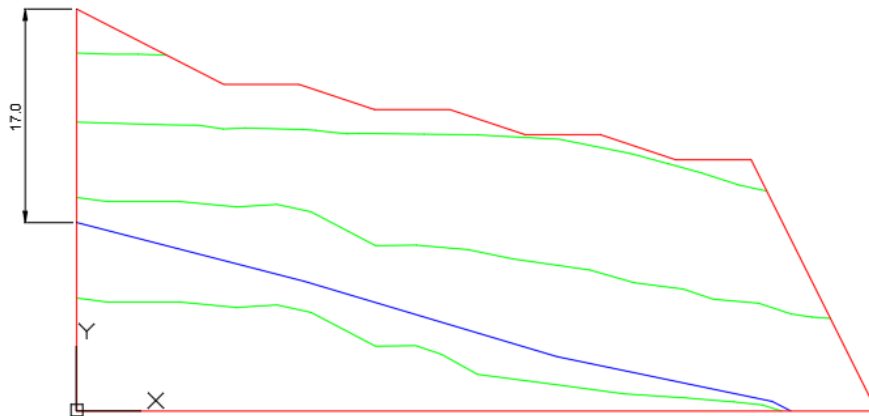
Figura 98 Sistema de drenaje y protección en un talud



Fuente: Uriel (1991).

Para realizar el análisis representando un sistema de drenaje, el wáter table tiene que estar a una mayor profundidad, para nuestro caso 17 m y debe ser linealmente en sentido del pie del talud.

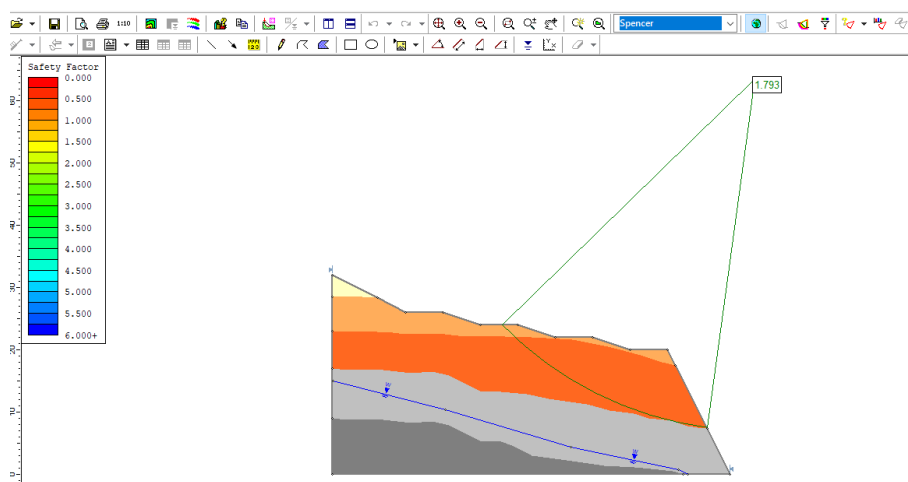
Figura 99 Simulación del sistema drenaje en Slide



Fuente: Elaborado por autores.

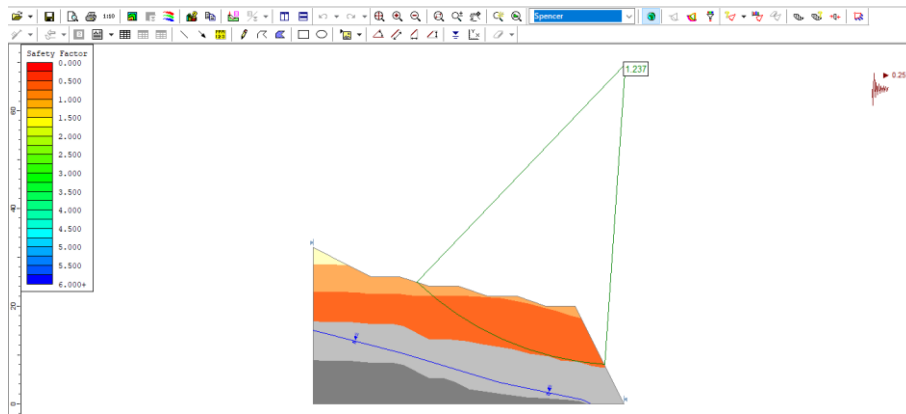
La combinación de la modificación geométrica del talud con la implementación de medidas de drenaje permitió incrementar el factor de seguridad, alcanzando los valores mínimos exigidos por la normativa por el método de Spencer, en condiciones estáticas el factor de seguridad subió a 1.793 mientras que en condiciones pseudoestáticas el factor de seguridad es de 1.237.

Figura 100 Factor de seguridad estático con sistema de drenes



Fuente: Elaborado por autores.

Figura 101 Factor de seguridad pseudoestático con sistema de drenes



Fuente: Elaborado por autores.

4.3 Propuesta 3: Muros y refuerzos

4.3.1 Muros por gravedad y muros en voladizo

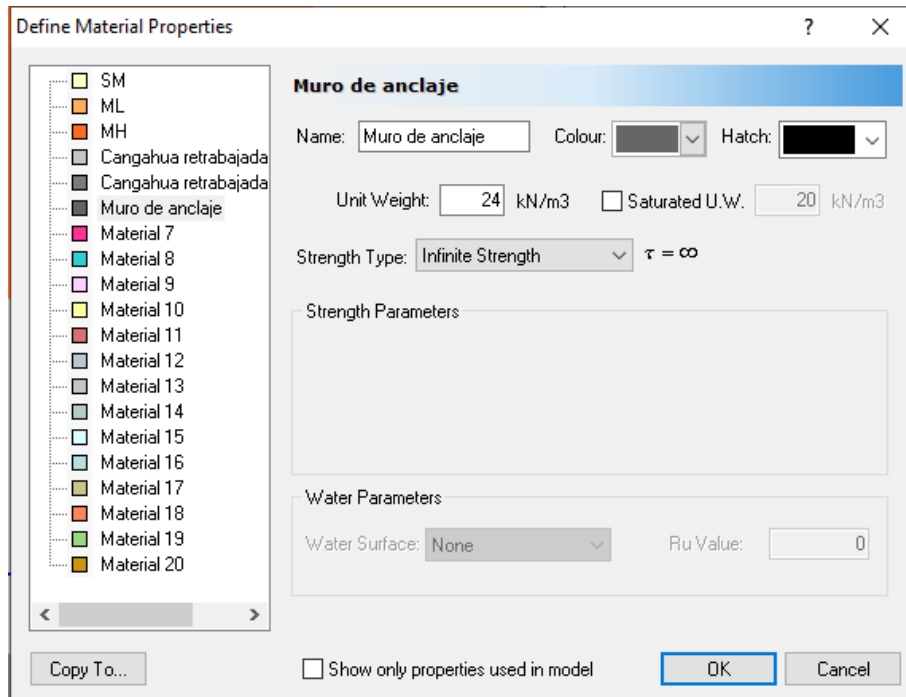
Los muros de gravedad y en voladizo presentan limitaciones técnicas que impiden su aplicación en taludes de gran altura como el de La Gasca con una altura de 32 m. Diversos autores señalan que los muros en voladizo están diseñados para contener alturas reducidas, generalmente menores a 6 m, ya que dependen exclusivamente de la rigidez de la sección y del peso propio para resistir los empujes laterales. En el caso de los muros de gravedad, su desempeño se vuelve antieconómico y voluminoso en alturas grandes, requiriendo secciones de concreto excesivas. Además, normativas internacionales como el Eurocódigo 7 y el CTE DB-SE-C (Documento Básico de Seguridad Estructural – Cimentaciones) enfatizan que estas tipologías deben verificar estabilidad frente a deslizamiento, vuelco y hundimiento, condiciones que se tornan críticas en zonas sísmicas y con presencia de niveles freáticos variables. Por ello, se descartan como alternativa de estabilización. En su lugar, se plantea la implementación de un muro anclado, capaz de trabajar en conjunto con el terreno mediante elementos de refuerzo activos, interceptando la superficie crítica de falla y proporcionando la resistencia adicional necesaria para garantizar la estabilidad global del talud.

4.3.2 Muro anclado

El empleo de muros anclados constituye una solución técnica adecuada para la estabilización de taludes de gran altura, como el caso de La Gasca en Quito. A diferencia de los muros de gravedad o en voladizo, cuya aplicación práctica se restringe a alturas reducidas, los muros anclados permiten trabajar en conjunto con el terreno mediante la instalación de elementos de refuerzo activos que interceptan la superficie crítica de falla y transfieren las cargas hacia estratos competentes. Diversos estudios señalan que esta tipología ofrece mayor capacidad de estabilización y desempeño sísmico en obras de infraestructura urbana y vial (Cabellos Gavidia, 2013). Asimismo, guías técnicas de protección de taludes destacan que los muros anclados, complementados con concreto lanzado y drenaje, resultan más convenientes frente a los empujes de suelos en taludes altos, garantizando factores de seguridad superiores y una mejor respuesta frente a sollicitaciones extremas (Panaweb, 2023).

Para la modelación del muro anclado se asignaron propiedades representativas del concreto armado, considerando un peso unitario $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$, cohesión equivalente $c = 150 \text{ kPa}$ y ángulo de fricción $\phi' = 40^\circ$, valores típicos empleados en análisis geotécnicos para simular materiales rígidos. Aunque, en Slide estos valores no son tomados en cuenta solo el peso unitario, y se debe a que el programa utiliza un artificio para que todas las superficies de falla que se calculen ninguna corte o atraviesen el muro, por lo tanto, ya no se usaría el criterio de Mohr-Coulomb, se aplicaría el criterio de Infinite Strength al momento de asignar las propiedades.

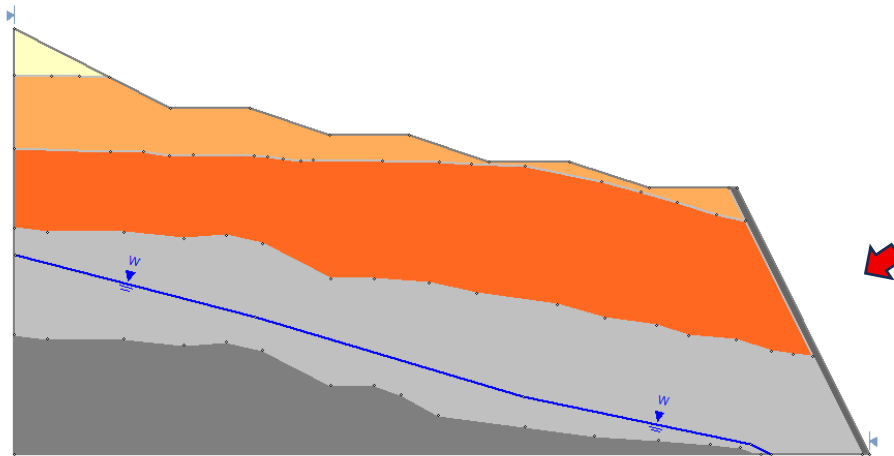
Figura 102 Propiedades del muro de anclaje



Fuente: Elaborado por autores.

En cuanto a la resistencia característica del concreto, se adoptó un $f'c = 30$ MPa conforme a la NEC-SE-HM, proponiéndose un incremento a 35 MPa para garantizar seguridad y durabilidad frente a las solicitaciones sísmicas propias de la zona de Quito. En muros anclados, el espesor del paramento suele estar entre 0.40 y 0.80 m, rango suficiente para transmitir las cargas de los anclajes y garantizar rigidez estructural (Subía Loayza, 2002). En zonas sísmicas se recomienda 0.60 m para controlar fisuración y asegurar durabilidad (CTE DB-SE-C).

Figura 103 Muro de anclaje en el talud



Fuente: Elaborado por autores.

4.3.3 Anclaje tipo Grouted Tieback

Para el diseño del sistema de anclajes se consideraron parámetros típicos técnicos, con longitudes totales de 8 a 15 m y bulbos adheridos de 3 a 6 m en estratos competentes. Los anclajes se dispusieron con inclinación de 10–20° bajo la horizontal, en hileras separadas cada 2.0–3.0 m tanto en sentido vertical como horizontal, lo que permite una adecuada distribución de esfuerzos en el paramento. La capacidad de carga adoptada por anclaje se encuentra en el rango de 150–300 kN, valores recomendados en manuales de diseño y guías internacionales para obras de estabilización de taludes, (Subía Loayza, 2002).

En la tabla 14, se define los parámetros a usar, que serán introducidos en Slide.

Tabla 15 Parámetros de diseño de anclajes – Talud La Gasca

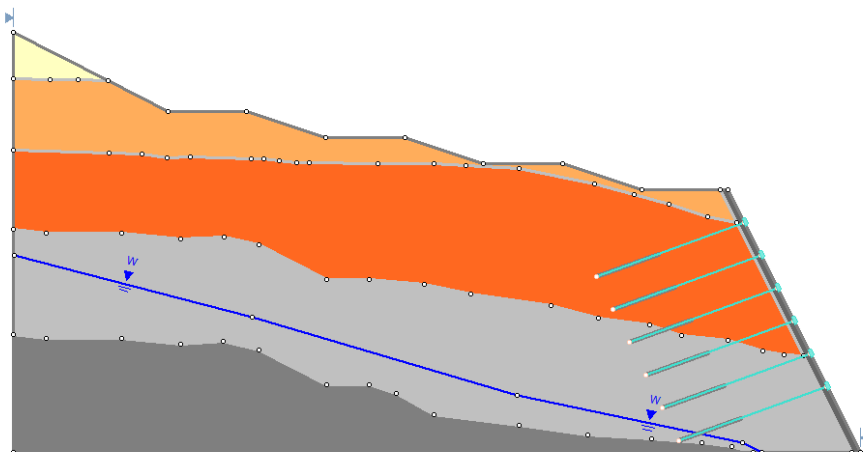
Parámetro	Valor adoptado	Justificación
Tipo de anclaje	Grouted Tieback	Activo, con longitud libre y bulbo adherido, recomendado para taludes altos.
Longitud total	12 m	Permite interceptar la superficie de falla a 20 m de profundidad.

Parámetro	Valor adoptado	Justificación
Longitud del bulbo	5 m	Ubicado en estrato competente, asegura transferencia de carga.
Longitud libre	7 m	Facilita pretensado y transmisión de esfuerzos hacia el bulbo.
Inclinación	20 ° bajo la horizontal	Óptima para penetración y capacidad de carga.
Espaciamiento horizontal	2.5 m	Distribución uniforme de esfuerzos en el paramento.
Espaciamiento vertical	2.5 m	Dos hileras principales para cubrir la altura crítica del talud.
Capacidad por anclaje	250 kN	Dentro del rango recomendado para obras urbanas en zonas sísmicas.

Fuente: Elaborado por autores.

La introducción de los anclajes tipo Grouted Tieback en el modelo de estabilidad se realizó importando el DXF desde AutoCAD, las polilíneas deberán estar en capas con el nombre de support.

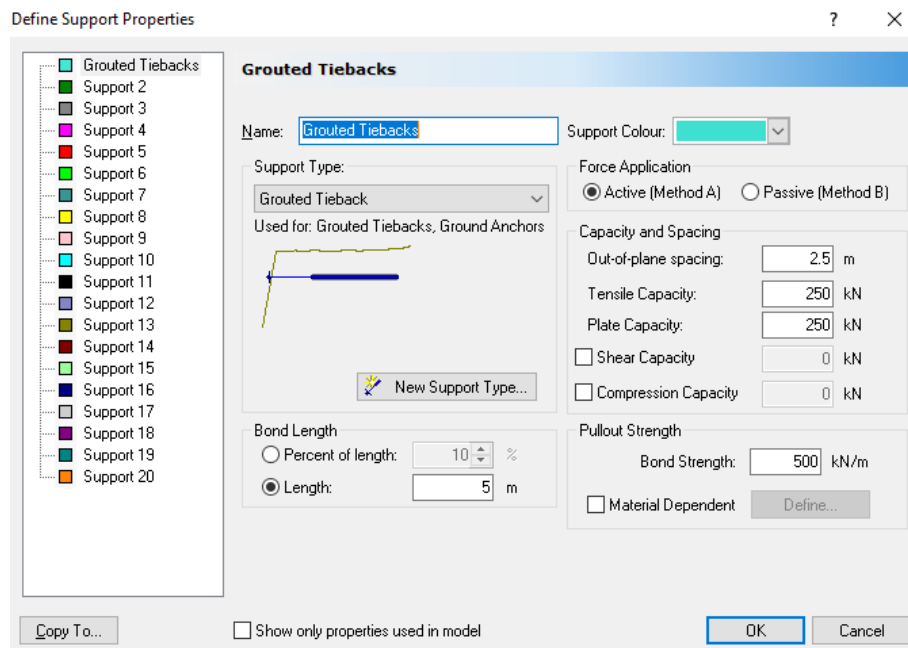
Figura 104 Muro con 6 anclajes tipo grouted tieback a lo alto del talud



Fuente: Elaborado por autores.

Después creamos el tipo de soporte y asignamos sus características resumidas en la tabla 14. La resistencia de adherencia se fijó en 500 kN/m, valor típico para lechadas en suelos competentes. (Rocscience, 2023).

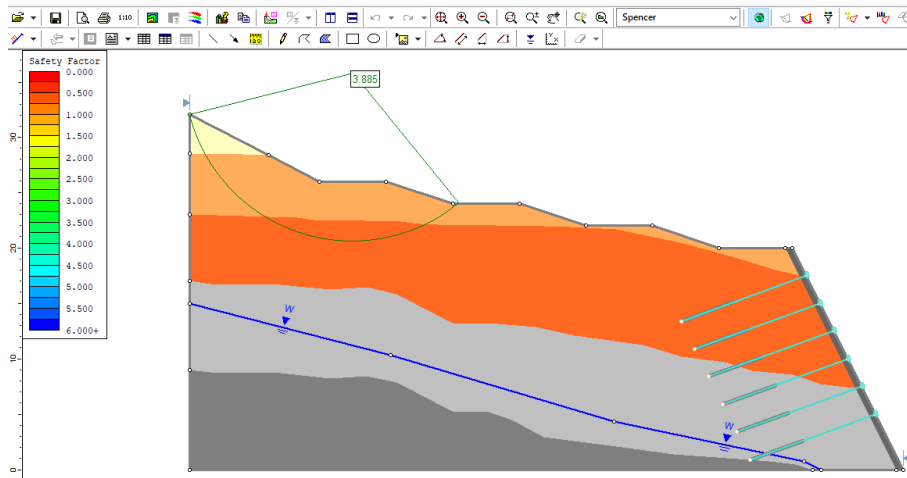
Figura 105 características del anclaje



Fuente: Elaborado por autores.

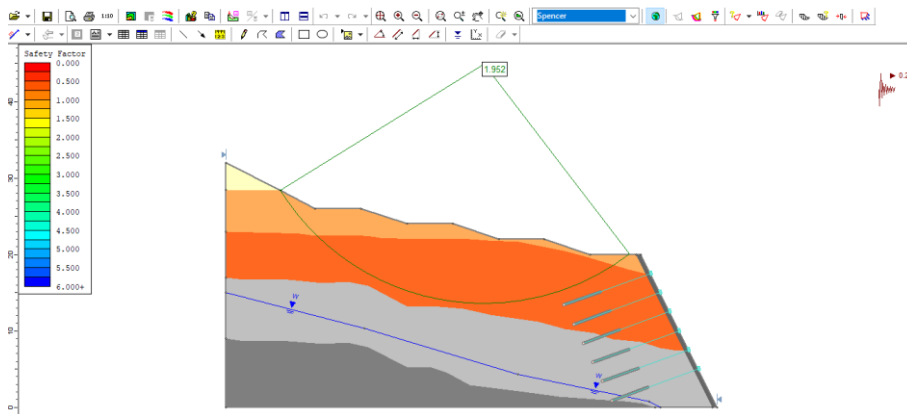
La incorporación de anclajes tipo *Grouted Tieback* en el talud de La Gasca permitió tener un factor de seguridad alto con el método de Spencer en condiciones estáticas de 3.885 y en condiciones pseudoestáticas se incrementó a 1.952, al interceptar la superficie de falla crítica y transferir las cargas hacia estratos competentes. Este sistema activo, constituye una solución eficaz para obras en zonas sísmicas, garantizando tanto la estabilidad global como el control de desprendimientos superficiales (Rocscience, 2023).

Figura 106 Factor de seguridad estático con muros de anclaje



Fuente: Elaborado por autores.

Figura 107 Factor de seguridad pseudoestático con muros de anclaje



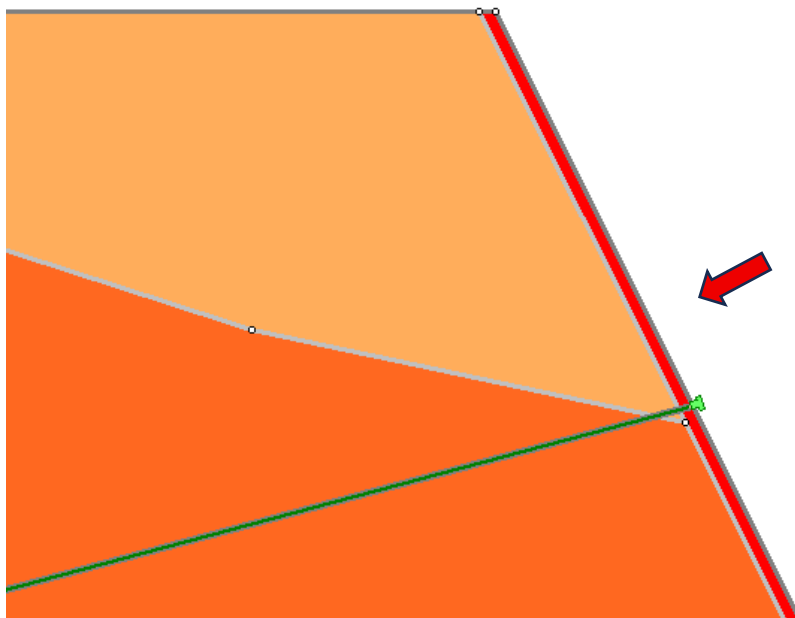
Fuente: Elaborado por autores.

4.4 Propuesta 4: Anclaje tipo Soils Nails

Los Soil Nails o técnica de clavado de suelo, son barras de acero instaladas en el terreno, sin pretensado, que trabajan pasivamente por fricción y cohesión con el suelo circundante. Se colocan en taludes o excavaciones por etapas y se complementan con un facing superficial (shotcrete + malla), formando un sistema de refuerzo que estabiliza la masa de suelo.

Estos elementos pasivos se configuraron con longitudes de 6 a 8 m, dispuestos en hileras separadas cada 2.0 a 2.5 m, con inclinación de 10 a 20° bajo la horizontal, siguiendo las recomendaciones del Rocscience (2023). En el modelo, se complementaron con un shotcrete de 0.10 m, lo que permitió mejorar la estabilidad superficial del talud y reducir el riesgo de desprendimientos menores, aportando un refuerzo adicional al sistema principal de anclajes activos (Subía Loayza, 2002). A continuación, definimos los parámetros a usar en la tabla 15.

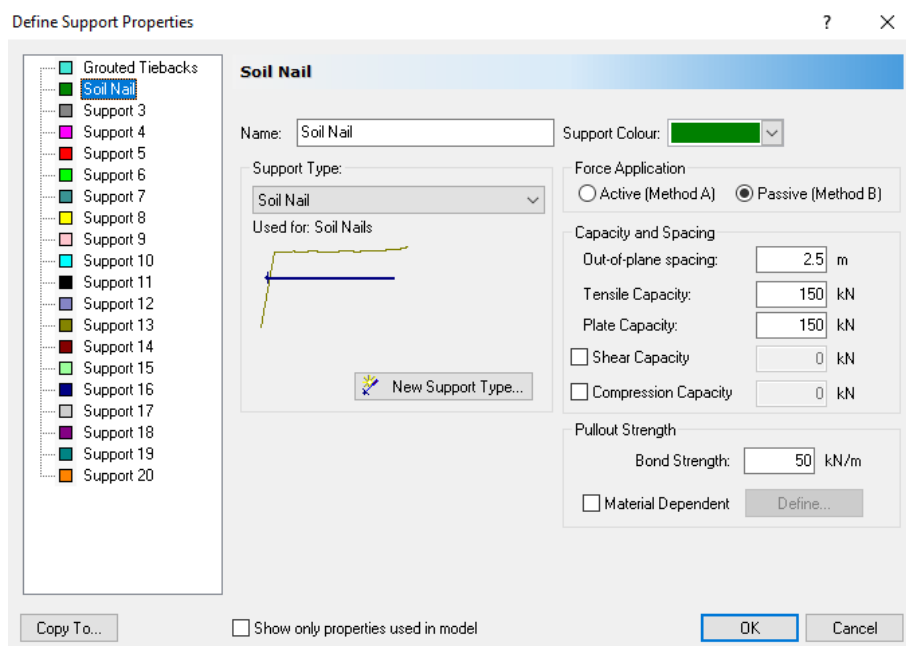
Figura 108 Shotcrete o concreto proyectado con una capa de 0.1 m



Fuente: Elaborado por autores.

Para diseñar el soporte tipo Soils Nails en Slide se repite el proceso que se realizó con el anclaje tipo Grouted Tieback, se debe importar el archivo DXF ya dimensionado desde AutoCAD, así mismo creamos las polilíneas en capas con el nombre de support. La diferencia está en definir o asignar el tipo de soporte con sus datos que están expuestos en la tabla 15.

Figura 109 Parámetros ingresados en Slide para el soporte tipo soil nail



Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 16 Parámetros de diseño de clavos de suelo (Soil Nails) – Talud La Gasca

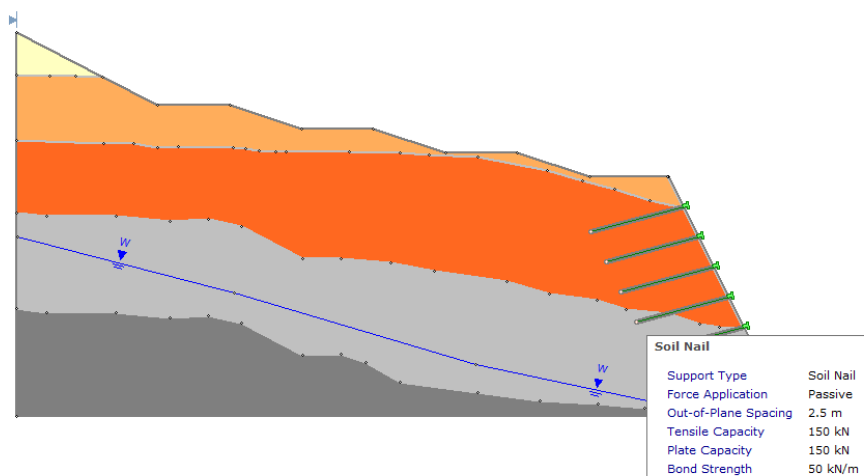
Parámetro	Valor adoptado	Justificación
Tipo de soporte	Soil Nail	Pasivo, trabaja por fricción y cohesión, ideal para refuerzo superficial.
Longitud total	8 m	Refuerza la zona superficial del talud, sin interferir con los tiebacks.
Inclinación	15° bajo la horizontal	Mejora penetración y contacto con el terreno.
Espaciamiento horizontal	2.5 m	Distribución uniforme en el paramento superficial.
Espaciamiento vertical	2.5 m	Refuerzo superficial en dos o más hileras.
Capacidad por clavo	150 kN	Valor típico para barras pasivas en suelos cohesivos.

Parámetro	Valor adoptado	Justificación
Facing superficial	Shotcrete 0.10 m + malla metálica	Control de desprendimientos y distribución de cargas superficiales.

Fuente: Rocscience (2023).

Una vez ingresado todos los parámetros del soporte, se puede verificar en imagen 110 que sus datos están correctos. Con el espaciamiento usado, se colocaron 6 soportes a lo alto del talud.

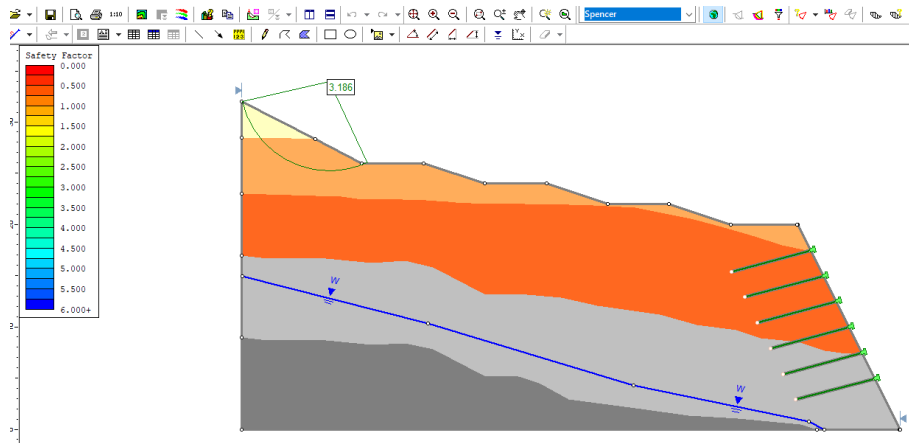
Figura 110 Soportes tipo soil nail en el talud



Fuente: Elaborado por autores.

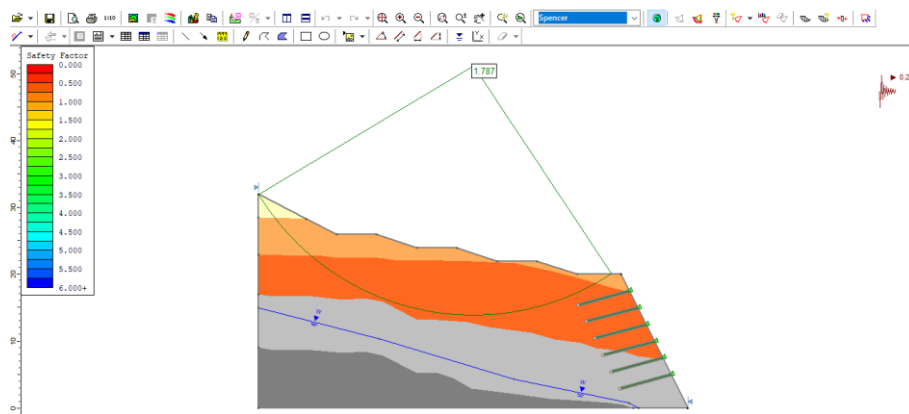
El reemplazo del muro de concreto por un recubrimiento de concreto proyectado de 0.10 m, reforzado mediante clavos de suelo (Soil Nails), garantizó la estabilidad del talud de La Gasca sin afectar el factor de seguridad. Los resultados obtenidos en el análisis estático y pseudoestático coincidieron, lo que confirma que este sistema pasivo de refuerzo superficial, diseñado y dispuesto adecuadamente controla las deformaciones y aporta a la estabilidad general del talud.

Figura 111 Factor de seguridad estático con muros de anclaje



Fuente: Elaborado por autores.

Figura 112 Factor de seguridad pseudoestático con muros de anclaje



Fuente: Elaborado por autores.

4.5 Geotextiles

En el caso del talud de La Gasca, se evaluó la posibilidad de emplear geotextiles como refuerzo superficial, sin embargo, se determinó que su aplicación es limitada frente a las condiciones geométricas y sísmicas del sitio. Los geotextiles, de acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-GC: Geotecnia y Cimentaciones), se consideran elementos auxiliares en obras de estabilización y control de erosión, principalmente en rellenos, suelos granulares y estructuras de contención de baja altura. Por ello, se priorizó el uso de

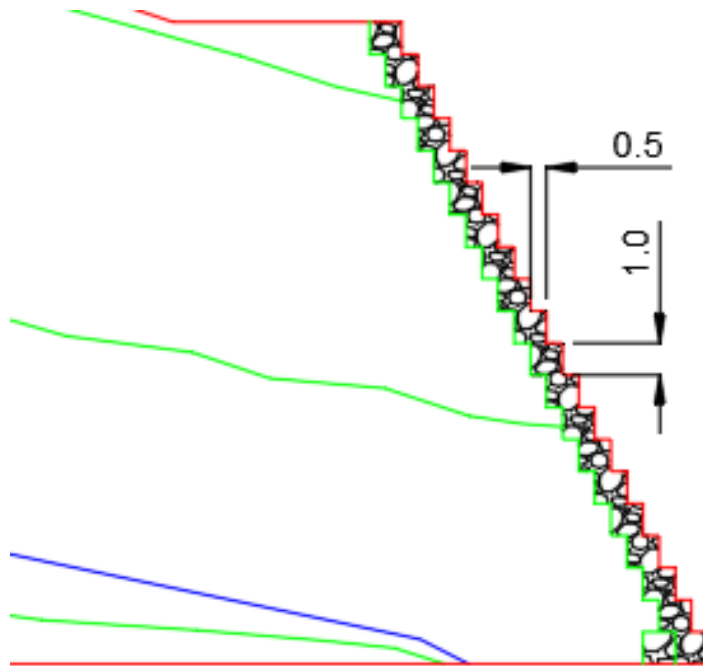
sistemas activos como los Grouted Tiebacks y pasivos como los Soil Nails, que sí garantizan la estabilidad global conforme a la normativa ecuatoriana.

4.6 Propuesta 5 :Gaviones

El diseño con gaviones se presenta como una solución eficaz para estabilizar. Estas estructuras, conformadas por cestas metálicas rellenas con piedra, funcionan como sistemas de contención flexibles y drenantes, capaces de acomodarse a deformaciones del terreno, disipar esfuerzos y mitigar la erosión. Su aplicación en el talud de La Gasca integra estabilidad, constructibilidad y compatibilidad ambiental, favoreciendo el drenaje. Además, su empleo está alineado con criterios técnicos reconocidos por normativas como la NEC-SE-GC, que los consideran adecuados para obras de protección y sostenimiento en condiciones sísmicas y de alta pluviosidad.

De manera complementaria, el Manual de Obras de Protección contra Inundaciones y Erosión del MIDUVI sugiere el uso de módulos estándar de $2.0 \times 1.0 \times 1.0$ m, rellenos con roca angular entre 100 a 200 mm, lo que garantiza estabilidad y un adecuado comportamiento hidráulico.

Figura 113 Modelado de los gaviones en AutoCAD en el talud de La Gasca



Fuente: Elaborado por autores.

Estas directrices coinciden con las recomendaciones del Federal Highway Administration (1999), que destacan a los gaviones como soluciones apropiadas en entornos sísmicos y con alta pluviosidad, al combinar resistencia estructural, flexibilidad y eficiencia constructiva. En consecuencia, la adopción de estos parámetros de diseño, sustentados en normativa nacional e internacional, asegura que la propuesta cumpla con los estándares de seguridad y funcionalidad requeridos para el contexto urbano de La Gasca. Los valores de los parámetros estarán definidos en la tabla 16.

Tabla 17 Parámetros de diseño de gaviones para talud La Gasca

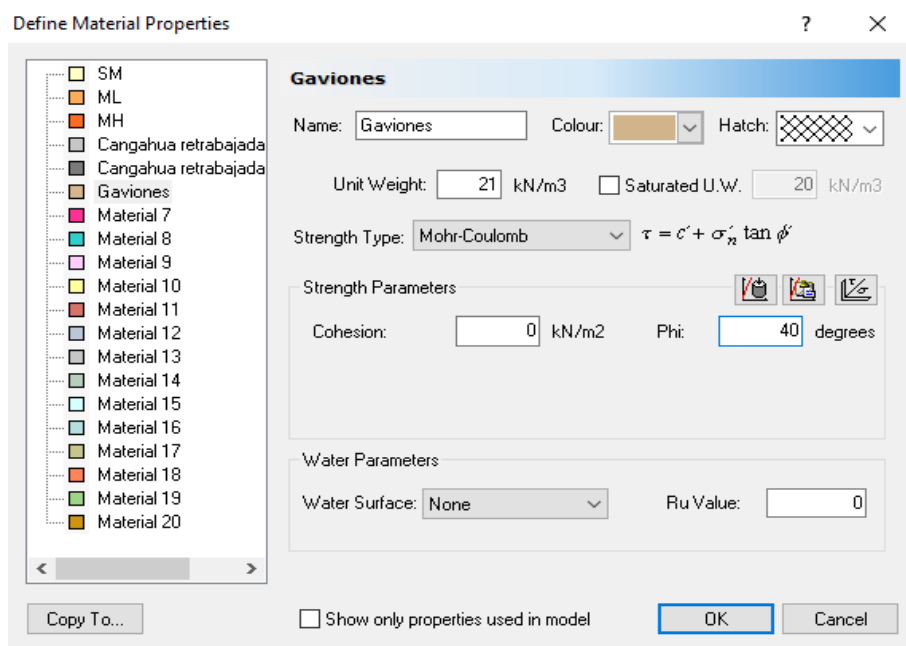
Parámetro	Valor adoptado	Justificación
Tipo de sistema	Muro de gaviones escalonado (banquetas)	Flexibilidad y capacidad drenante; adecuado para taludes altos con control de erosión.

Parámetro	Valor adoptado	Justificación
Dimensiones de caja	2.0 × 1.0 × 1.0 m (L×A×H)	Módulo estándar que optimiza montaje y estabilidad global.
Malla	Galvanizada + recubrimiento PVC, 8×10 cm, alambre Ø 3–4 mm	Durabilidad frente a corrosión y pluviosidad; control de deformaciones.
Relleno pétreo	Roca angular 100–200 mm, Peso unitario de 21 KN/m ³	Drenaje eficiente; reduce presión hidrostática.
Ángulo de fricción del relleno (ϕ)	38°–42° (roca angular 100–200 mm)	Inter trabado alto y drenaje eficiente en gaviones
Anclajes/llaves	Amarre entre cajas y llaves de pie en primera hilera	Aumenta integridad del conjunto y resistencia al vuelco/deslizamiento.
Acabado superficial	Vegetación y protección contra erosión en bermas	Integración paisajística y reducción de erosión superficial.

Fuente: Manual de Obras de Protección contra Inundaciones y Erosión del MIDUVI (2019).

Importamos el archivo DXF como ya se ha trabajado antes, y luego se procede ingresar los parámetros del gavión con los datos determinados en la tabla 16.

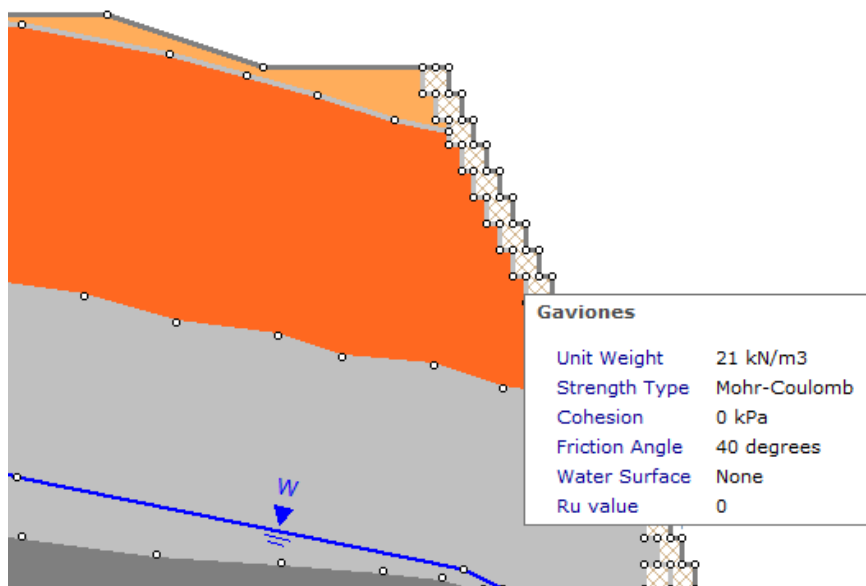
Figura 114 Propiedades asignadas al gavión



Fuente: Elaborado por autores.

Algo importante que hay que tener en cuenta es que en los gaviones no existe cohesión. Por último, asignamos las propiedades en la parte que se compone de gaviones en el talud. El diseño, con sus parámetros son observables en la figura 115.

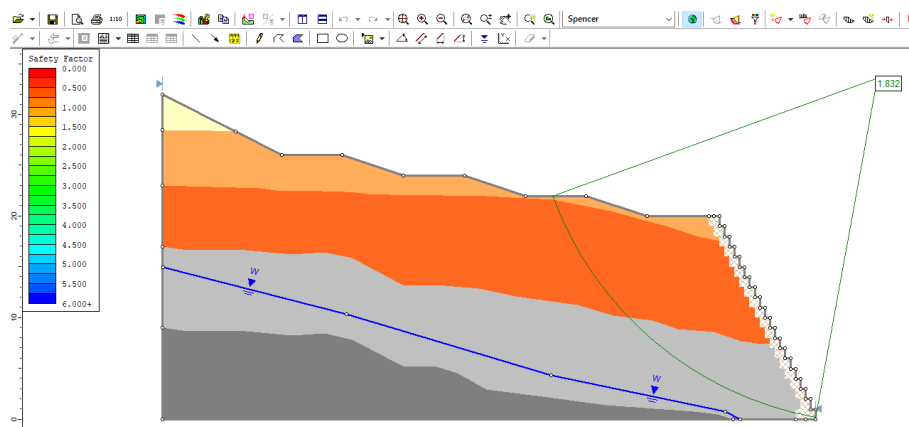
Figura 115 Datos asignados al gavión



Fuente: Elaborado por autores.

El estudio del talud estabilizado con gaviones mostró factores de seguridad de 1.832 en condición estática y 1.306 en condición pseudoestática. Aunque estos valores resultan ligeramente menores en comparación con los obtenidos mediante un muro de contención rígido, cumplen con los requisitos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Esto confirma que los gaviones representan una alternativa confiable para garantizar la estabilidad global del talud en escenarios urbanos y sísmicos como el de La Gasca. Además, su naturaleza flexible y drenante aporta beneficios adicionales en términos de adaptabilidad, control de erosión y facilidad constructiva, consolidándose como una solución integral que satisface las exigencias normativas de seguridad y funcionalidad.

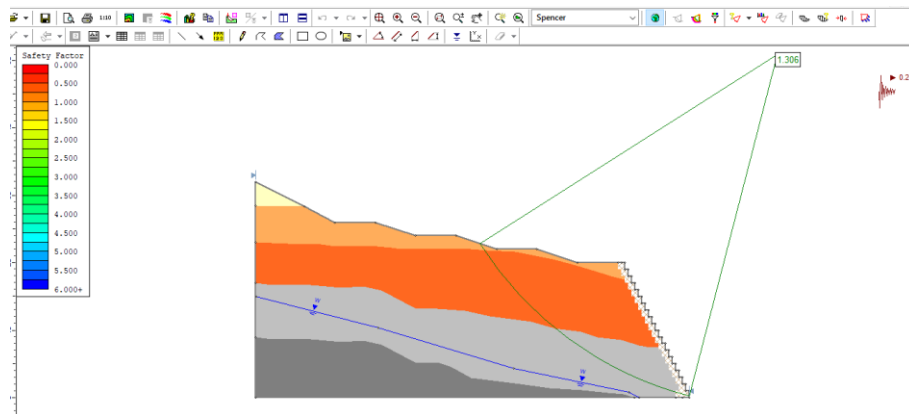
Figura 116 Factor de seguridad estático del talud con gaviones



Fuente: Elaborado por autores.

La Figura 116 muestra el resultado del análisis de estabilidad del talud modificado mediante la implementación de gaviones como sistema de contención, evaluado bajo condiciones estáticas con el método Spencer, arrojando un factor de seguridad de 1.832, valor que cumple con el mínimo exigido por la normativa.

Figura 117 Factor de seguridad pseudoestático del talud con gaviones



Fuente: Elaborado por autores.

El análisis arroja un factor de seguridad de 1.306, superando el umbral mínimo exigido por la normativa para escenarios pseudoestáticos. Los gaviones funcionan como estructuras de contención pasiva, reforzando la base del talud, disminuyendo la deformación y limitando la propagación de la superficie crítica de falla.

5 Análisis de resultados

El análisis comparativo de las alternativas de estabilización aplicadas al talud de La Gasca demuestra que cada técnica aporta beneficios y limitaciones específicas, determinadas por la geometría del terreno, las condiciones geotécnicas y los criterios de la NEC-SE-GC.

Tabla 18 Variación del factor de seguridad para diferentes tipos de mejoramiento

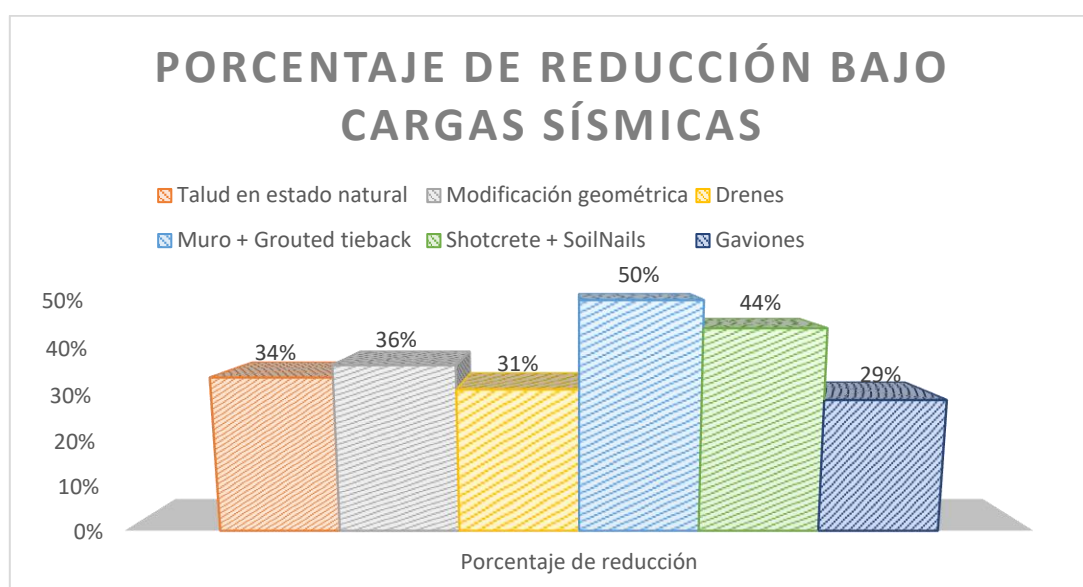
Tipo de mejoramiento	Factor de seguridad		Porcentaje de reducción
	Estático	Pseudoestático	
Talud en estado natural	0.919	0.611	34%
Modificación geométrica	1.732	1.106	36%
Drenes	1.793	1.237	31%
Muro + Grouted tieback	3.885	1.952	50%

Shotcrete + SoilNails	3.186	1.787	44%
Gaviones	1.832	1.306	29%

Fuente: Elaborado por autores.

En el siguiente gráfico se ilustra el porcentaje de reducción del factor de seguridad, debido a la acción sísmica, para cada técnica de intervención, permitiendo apreciar su efecto relativo en cada mejora de la estabilización.

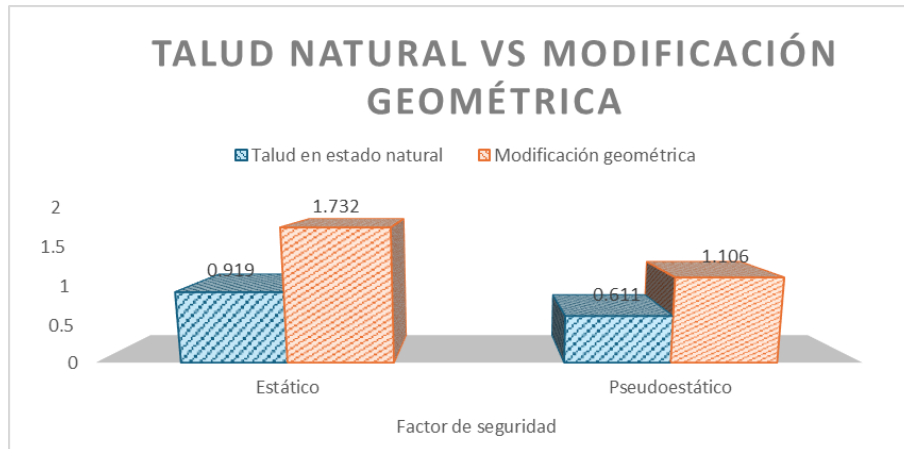
Figura 118 Reducción del factor de seguridad bajo cargas sísmicas



Fuente: Elaborado por autores.

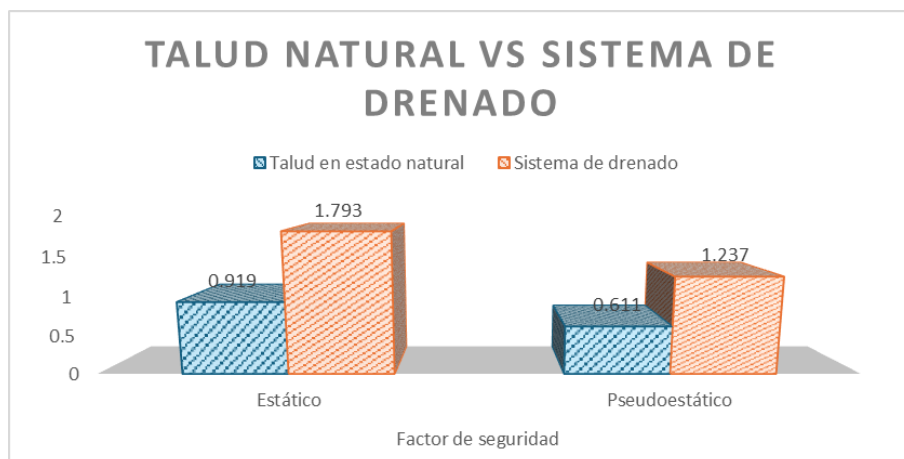
La modificación geométrica mejoró el factor de seguridad estático a 1.732 y pseudoestático a 1.106, si agregamos el drenaje incrementa el factor de seguridad estático a 1.793 y pseudoestático a 1.237, constituyendo la base de cualquier intervención. No obstante, estas soluciones requieren ser reforzadas con sistemas estructurales para asegurar un desempeño confiable frente a la acción sísmica y la variabilidad hidrogeológica.

Figura 119 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus modificación geométrica



Fuente: Elaborado por autores.

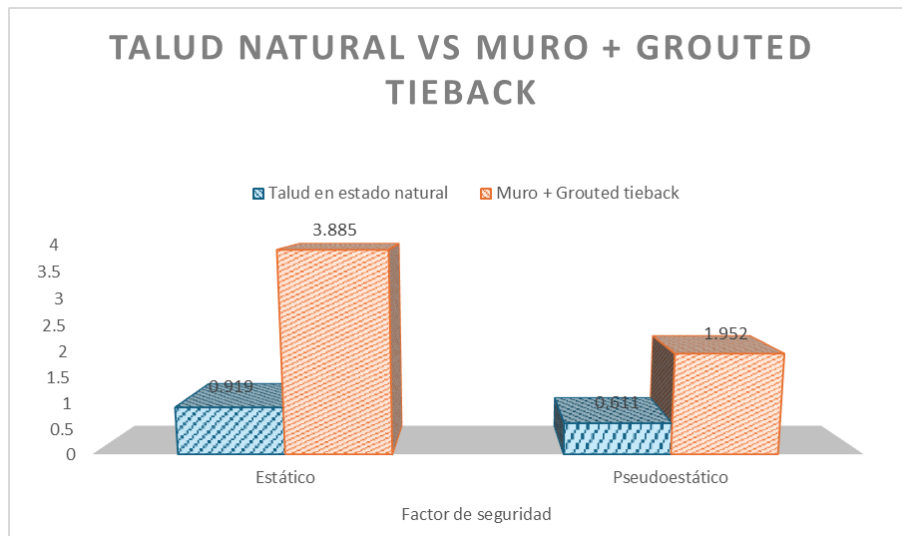
Figura 120 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus sistema de drenado



Fuente: Elaborado por autores.

Los muros anclados con Grouted Tiebacks alcanzaron los mayores factores de seguridad, 3.885 estático y pseudoestático 1.952, al interceptar la superficie crítica de falla y transferir esfuerzos hacia estratos competentes, consolidándose como la opción más robusta para taludes altos en áreas urbanas.

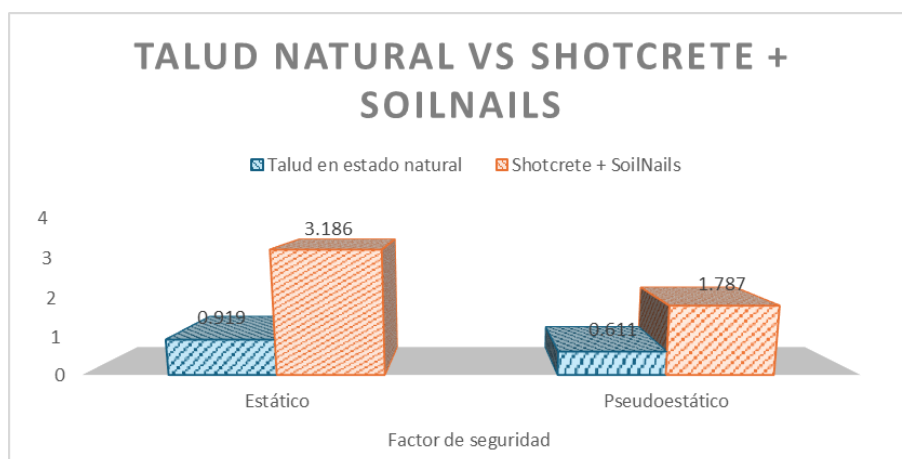
Figura 121 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus muro + grouted tieback



Fuente: Elaborado por autores.

En contraste, los Soil Nails con recubrimiento de shotcrete de 0.10 m mostraron resultados levemente inferiores en análisis estático de 3.186 y pseudoestático de 1.787, confirmando su utilidad como refuerzo pasivo para controlar deformaciones y desprendimientos superficiales.

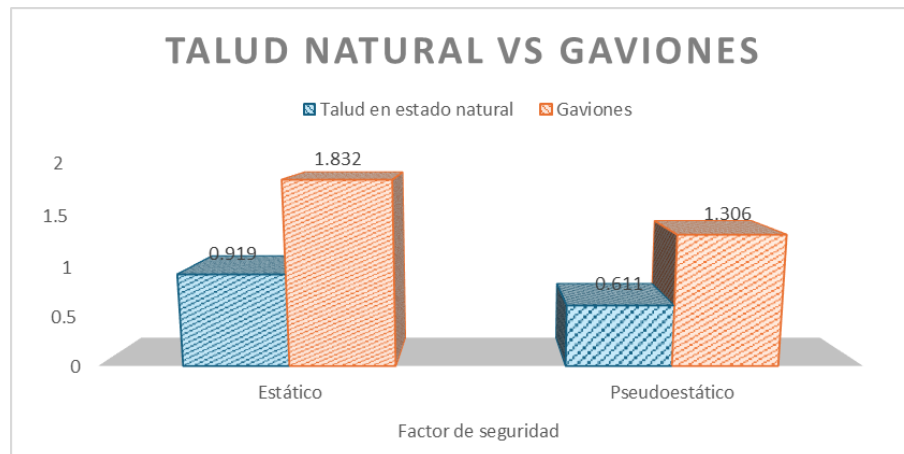
Figura 122 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus shotcrete + soilnails



Fuente: Elaborado por autores.

Finalmente, los gaviones alcanzaron factores de seguridad aceptables, estático 1.832 y pseudoestático 1.306, ofreciendo una solución flexible y drenante, con ventajas ambientales y constructivas, aunque con valores algo menores respecto a sistemas rígidos.

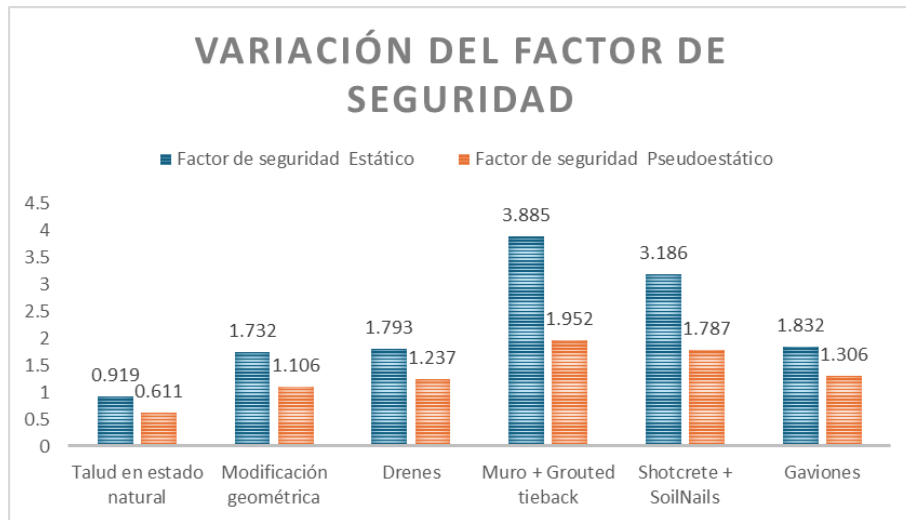
Figura 123 Comparativa del factor de seguridad del talud en condición natural versus gaviones



Fuente: Elaborado por autores.

La intervención de las cargas sísmicas desde el análisis del talud en estado natural incluyendo a cada uno de los mejoramientos realizados, demostraron como este influye considerablemente en el factor de seguridad. A continuación, se presentan resumidos en la figura 124.

Figura 124 Diagrama de barras de la variación del factor de seguridad



Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 19 Incremento del factor de seguridad influenciado por cada propuesta de mejoramiento

Tipo de mejoramiento	Factor de seguridad	
	Estático	Pseudoestático
Talud en estado natural	0.919	0.611
Modificación geométrica	1.732	1.106
Sistema de drenado	1.793	1.237
Muro + Grouted tieback	3.885	1.952
Shotcrete + SoilNails	3.186	1.787
Gaviones	1.832	1.306

Fuente: Elaborado por autores

6 Cronograma de actividades

Figura 125 Cronograma de actividades realizadas

Nº	Actividad	nov-25				dic-25				ene-26				feb-26			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Elaboración del anteproyecto	■	■														
2	Revisión del anteproyecto			■													
3	Sustentación del anteproyecto			■													
4	Desarrollo de la metodología			■	■												
5	Recopilación de parámetros geotécnicos certificados					■	■										
6	Modelación inicial en Slide v6.0						■	■	■								
7	Simulación dinámica y análisis sísmico							■	■	■							
8	Propuesta de medidas de estabilización										■						
9	Redacción del documento final										■	■	■	■			
10	Sustentación del proyecto de titulación														■		

Fuente: elaborado por autores

7 Presupuesto

Tabla 20 Presupuesto para elaboración de la tesis

Rubro	Detalle	Costo estimado (USD)
Materiales de apoyo	Impresiones, diagramas, mapas topográficos, papelería	100
Equipos de computo	adquisición de computadoras	1700
Transporte y logística	Traslados a la zona de estudio (La Gasca – Quito), visitas técnicas, coordinación con instituciones.	250
Ensayos de campo	Levantamiento topografico	500
Alimentación/Hospedaje	alojamiento de dos días incluida la alimentación.	150
Presentación final	Impresión y encuadernación del documento, elaboración de diapositivas y material visual	100
		2,800

Fuente: elaborado por autores

8 Conclusiones

1. Se comprobó por medio del análisis realizado con el software Slide v6.0 con el método de Spencer, que el talud de La Gasca, en su estado natural, presenta factores de seguridad insuficientes, tanto para los resultados estático $FS = 0.919$ y pseudoestático $FS = 0.611$, confirmando la condición crítica de la zona y la necesidad de implementar medidas de estabilización.
2. Considerando la geometría del talud y los antecedentes de inestabilidad registrados en el sector, se seleccionó la zona crítica que permitió delimitar un escenario representativo para la aplicación de medidas de estabilización.
3. La caracterización geotécnica del suelo, mediante ensayos SPT y triaxiales complementarios, permitió definir parámetros de resistencia y deformabilidad confiables. Estos valores fueron esenciales para la modelación numérica.
4. La evaluación de estabilidad con métodos de equilibrio límite (LEM) evidenció que las soluciones estructurales activas, ofrecen los mayores incrementos en seguridad, llegando hasta un 3.885 en análisis estático y un 1.952 en análisis pseudoestático, superando ampliamente los mínimos exigidos por la normativa NEC-SE-GC.
5. El análisis comparativo demostró que ninguna técnica aplicada de manera aislada asegura por sí sola la estabilidad global del talud, demostrada en la propuesta de muro con grouted tieback que logró incrementar el factor de seguridad estático hasta 3.885 y pseudoestático hasta 1.952. Esto hace énfasis en la necesidad de adoptar un enfoque integral y combinado, en el que las medidas como modificación geométrica y drenaje se complementen con sistemas estructurales de refuerzo ya sea muros anclados, soil nails y gaviones; logrando así una solución más robusta y confiable.

9 Recomendaciones

1. Implementar soluciones integrales de estabilización que garanticen la estabilidad global del talud. Se recomienda un enfoque combinado que integre medidas superficiales, como la modificación geométrica y el drenaje, con sistemas estructurales de refuerzo, logrando un control eficaz de la geometría, el flujo de agua y la superficie crítica de falla.
2. Se recomienda priorizar soluciones como muros con Grouted Tiebacks y el sistema de Shotcrete con Soil en taludes de gran altura y en zonas urbanas críticas, donde la seguridad de la población es prioritaria.
3. Se sugiere un mantenimiento periódico de los sistemas de drenaje y estructuras de contención, garantizando la durabilidad y efectividad de las soluciones aplicadas.
4. Se recomienda ampliar la profundidad de los ensayos de campo y laboratorio en taludes superiores a 30 m, con el fin de obtener parámetros más representativos de las capas profundas. La integración de métodos geofísicos y análisis de eventos pasados puede mejorar la confiabilidad de los modelos de estabilidad.
5. Es necesario que las autoridades locales y organismos técnicos establezcan lineamientos claros para la estabilización de taludes en zonas urbanas críticas. La aplicación rigurosa de la normativa vigente (NEC-SE-GC) y la actualización periódica de estándares permitirá garantizar que los proyectos cumplan con criterios de seguridad, funcionalidad y responsabilidad social.

10 Bibliografia

1. Dai, W., Zhang, Y., & Lu, N. (2023). Influence of plasticity on slope failure mechanisms in expansive soils. *Geotechnical Engineering Journal*, 59(2), 5–15.
2. Hussen, H. M., Tadele, E., & Jilo, N. Z. (2024). Slope stability analysis of colluvial deposits along the Muketuri-Alem Ketema Road. *Quaternary Science Advances*, 16, 100239.
3. Lu, N., Zhou, J., & Dai, W. (2024). Transient saturation effects on slope stability under rainfall infiltration. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129(1), 1–12.
4. Zhang, Y., Liu, H., & Chen, X. (2022). Sensitivity analysis of shear strength parameters in slope stability modeling. *International Journal of Geomechanics*, 22(4), 04022015.
5. Zhou, J., Lu, N., & Zhang, Y. (2021). Effective cohesion and its role in slope stability under dynamic loading. *Soils and Foundations*, 61(6), 1321–1334.
6. Spyropoulos, E., Touma, J. F., Ahmed, H.-u.-R., & Waheed, M. A. (2021). CPT and SPT as complementary tests for the formulation of geotechnical design profiles. In *Advanced Tunneling Techniques and Information Modeling of Underground Infrastructure* (pp. 83–92). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79672-3_6
7. Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2021). Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering. Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2629-1_5
8. Zhou, J., Lu, N., & Zhang, Y. (2023). Field evaluation of undrained shear strength using pocket penetrometer in cohesive soils. *Geotechnical Testing Journal*, 46(2), 1–10. <https://doi.org/10.1520/GTJ20230045>

9. Lu, N., Zhou, F., & Dai, W. (2024). Advances in laser-based topographic profiling for slope stability analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 150(3), 04024012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002954](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002954)
10. Jhinkwan, V. S., Chore, H. S., & Agnihotri, A. K. (2025). Application of Electrical Resistivity Tomography (ERT) for the Evaluation of Slope Susceptibility: A Review. In *Sustainable Infrastructures* (pp. 215–224). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8393-9_20
11. Pasierb, B., Grodecki, M., & Gwózdź, R. (2019). Geophysical and geotechnical approach to a landslide stability assessment: a case study. *Acta Geophysica*, 67, 1823–1834. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00338-7>
12. Singh, V. S., Chore, H. S., & Agnihotri, A. K. (2025). Integrated geophysical approaches for slope failure detection. In *Sustainable Infrastructures* (pp. 215–224). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8393-9_20
13. Sepúlveda, S. A., & Murphy, W. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Ingeniería de Construcción*, 28(1), 5–20. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2013000100003&script=sci_arttext
14. Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
15. Jiang, M., & Yamagami, T. (2004). Spencer method for slope stability analysis under seismic loading. *Soils and Foundations*, 44(6), 1–9.
16. Sanhueza, C., & Rodríguez, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, 12(1), 5–18. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003>

17. Zhang, Y., Liu, H., & Chen, X. (2022). Sensitivity analysis of shear strength parameters in slope stability modeling. *International Journal of Geomechanics*, 22(4), 04022015.
18. Zhou, J., Lu, N., & Zhang, Y. (2021). Effective cohesion and its role in slope stability under dynamic loading. *Soils and Foundations*, 61(6), 1321–1334.
19. SlideShare. (2014). *Estabilidad de taludes – Método de Spencer* [Presentación en línea]. SlideShare. <https://es.slideshare.net/slideshow/estabilidad-de-taludes-spencer/35146691>
20. Valiente Sanz, R., Sobrecases Martí, S., & Díaz Orrego, A. (2015). Estabilidad de taludes: conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. *Revista Civilízate*, (7), 50–54. Universidad Politécnica de Valencia. <https://www.udea.edu.co>
21. Fine Software. (2025). Método de Spencer – GEO5 Ayuda en línea. <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/es/spencer-01/>
22. Rocscience Inc. (2025). Slide v6.0 – Slope Stability Analysis Software. <https://www.rocscience.com/software/slide>
23. Geoengineer.org. (2025). Slope Stability Software Overview. <https://www.geoengineer.org/software/slide>
24. Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP). (2022). Especificaciones técnicas generales para construcción de obras civiles. Quito, Ecuador.
25. MIDUVI. (2023). Norma Ecuatoriana de la Construcción – NEC-SE-GC: Geotecnia y Cimentaciones. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
26. Fernández-Lavín, A., & Chamorro-Zurita, C. (2023). Update proposal of the Ecuadorian Construction Standard: Geotechnics and Foundations. *Revista de Investigación e*

<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/download/2964/2383/11926>

27. Zhou, J., Lu, N., & Zhang, Y. (2021). Effective cohesion and its role in slope stability under dynamic loading. *Soils and Foundations*, 61(6), 1321–1334. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.09.002>
28. Zeng, Y., Zhang, J., & Wang, L. (2020). Influence of pore water pressure on slope failure mechanisms. *Engineering Geology*, 272, 105603. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105603>
29. Zhang, Y., Liu, H., & Chen, X. (2022). Sensitivity analysis of slope geometry and soil parameters. *International Journal of Geomechanics*, 22(4), 04022015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002220](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002220)
30. Singh, V. S., Chore, H. S., & Agnihotri, A. K. (2025). Integrated geotechnical solutions for slope stabilization in urban settings. In *Sustainable Infrastructures* (pp. 215–224). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8393-9_20
31. Jhinkwan, V. S., Chore, H. S., & Agnihotri, A. K. (2025). Application of bioengineering techniques in slope stabilization. In *Sustainable Infrastructures* (pp. 225–234). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8393-9_21
32. Zhang, Y., Liu, H., & Chen, X. (2022). Sensitivity analysis of shear strength parameters in slope stability modeling. *International Journal of Geomechanics*, 22(4), 04022015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002220](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002220)
33. Feng, M., Su, A., & Wang, J. (2021). Comparative study of limit equilibrium methods for slope stability analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(6), 4701–4715. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01784-2>

34. Rocscience Inc. (2025). Slide v6.0 – Morgenstern-Price Method Overview. <https://www.rocscience.com/help/slide/methods/morgenstern-price-method>
35. Espol. (2023). Análisis de estabilidad de taludes en la vía Penipe-Baños, aplicando métodos empíricos, análisis cinemático y técnicas remotas-fotogrametría [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/63647>
36. Espol. (2021). Propuesta metodológica para la aplicación del slope mass rating continuo (SMR-C) mediante un sistema de información geográfica en los taludes de la vía La Moya-Achupallas [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/32267>
37. Espol. (2023). Análisis de estabilidad de taludes en la autopista Azogues-Cuenca y en la vía Matrama-Mazaren, provincia de Cañar [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/63117>
38. Espol. (2020). Estudio de la estabilidad de taludes de la vía Garrapata-Santa María, entre las abscisas 7+900 y 63+040, provincia de Manabí, Ecuador [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53845>
39. Espol. (2020). Comparativa entre los métodos pseudoestático y dinámico para la estabilidad de taludes mediante el método de elementos finitos. Caso de estudio: terremoto de Bahía de Caráquez (2016) [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53978>
40. Sepúlveda, S. A., & Murphy, W. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. Ingeniería de Construcción, 28(1), 5–20. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003>

41. Mucuta-Lito, H. V., Cartaya-Pires, M., & Watson-Quesada, R. L. (2020). Evaluación de estabilidad en taludes del yacimiento Castellano mediante el cálculo del factor de seguridad. *Minería y Geología*, 36(4), 441–450. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122020000400441&lng=es&tlng=es
42. Valiente Sanz, R., Sobrecases Martí, S., & Díaz Orrego, A. (2016). Estabilidad de taludes: conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. *Revista Civilízate*, 7, 50–54. <https://riunet.upv.es/handle/10251/76781>
43. Jiang, M., & Yamagami, T. (2004). Three-dimensional slope stability analysis using an extended Spencer method. *Soils and Foundations*, 44(4), 127–136. https://doi.org/10.3208/sandf.44.4_127
44. Taye, M., & Alemu, G. (2024). Slope stability analysis of colluvial deposits along the Muketuri-Alem Ketema Road, Northern Ethiopia. *Quaternary Science Advances*, 100239. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100239>
45. Su, A., Feng, M., Dong, S., Zou, Z., & Wang, J. (2025). Approaches to the stability analysis of slopes subjected to seismic loading: A review. *Results in Engineering*, 105362. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105362>
46. ResearchGate. (2014). Figura 17. Variación del factor de seguridad en función del grado de saturación [Imagen]. En artículo disponible en ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-17-Variacion-del-factor-de-seguridad-en-funcion-del-grado-de-saturacion_fig3_262712514
47. Garnica Anguas, P., Ramírez Culebro, J. A., & Pérez García, C. (2021). Propuesta de indicadores para la gestión de taludes de corte y de terraplén. Premio Innovación Carreteras JAFC. <https://premioinnovacioncarreterasjafc.org/monograficos/6.pdf>

48. Flores Berenguer, I., González Haramboure, Y., & García Tristán, J. (2022). Estabilidad de taludes en presas de tierra considerando el ángulo de succión del suelo no saturado. *Ingeniería y Desarrollo*, 40(1), 71–91. Fundación Universidad del Norte. <https://www.redalyc.org/journal/852/85273159004/>
49. Mecánica de Suelos. (2023). Estabilidad de taludes: definición, tipos y análisis geotécnico. Recuperado de <https://mecanicadesuelos.org/estabilidad-taludes>
50. Garnica Anguas, P., Ramírez Culebro, J. A., & Pérez García, C. (2021). Propuesta de indicadores para la gestión de taludes de corte y de terraplén. Premio Innovación Carreteras JAFC. <https://premioinnovacioncarreterasjafc.org/monograficos/6.pdf>
51. Flores Berenguer, I., González Haramboure, Y., & García Tristán, J. (2020). Estabilidad de taludes durante un desembalse rápido en presas de tierra con suelos parcialmente saturados. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 13–31. Fundación Universidad del Norte. <https://www.redalyc.org/journal/852/85270674002/>
52. Revista Ingeniería. (s.f.). Estudio geológico-geotécnico para la estabilidad de taludes en el municipio de San Salvador. Universidad de El Salvador. <https://revistaingenieria.org/index.php/revistaingenieria/article/view/25/42>
53. LACCEI. (2017). Análisis de los factores de estabilidad de taludes del canal de acceso al Puerto Marítimo de Guayaquil. https://laccei.org/LACCEI2017-BocaRaton/full_papers/FP421.pdf
54. Universidad Técnica de Manabí. (2021). Estabilización de taludes en el río Portoviejo, Ecuador. Redalyc. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223515948003.pdf>
55. CONDESAN – AICCA Ecuador. (2021). Diseño definitivo de obra civil para estabilización de taludes en Hidrovictoria. <https://condesan.org/wp->

[content/uploads/2021/03/AICCA-Ecuador-TdR-Dise%C3%B1o-de-taludes-y-SAT-Hidrovia_Hidrovia_DQ06032021_Final.pdf](#)

56. Universidad Técnica de Manabí. (2021). Estabilización de taludes en el río Portoviejo, Ecuador. Redalyc. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223515948003.pdf>
57. Cámara Panameña de la Construcción. (2022). Micropilotes: uso en obras civiles y edificaciones. <https://capac.org/wp-content/uploads/2022/12/Micropilotes-uso-en-obras-civiles-y-edificaciones.pdf>
58. Universidad Técnica de Manabí. (2021). Estabilización de taludes en el río Portoviejo, Ecuador. Redalyc. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223515948003.pdf>
59. Cámara Panameña de la Construcción. (2022). Micropilotes: uso en obras civiles y edificaciones. <https://capac.org/wp-content/uploads/2022/12/Micropilotes-uso-en-obras-civiles-y-edificaciones.pdf>
60. Castro Solórzano, F. (2023). Atenuadores de escorrentía para la Quebrada Cañitas, Parroquia Charapotó, Manabí, utilizando herramientas SIG. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(4). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.6841
61. Flores Berenguer, I., González Haramboure, Y., & García Tristán, J. (2020). Estabilidad de taludes durante un desembalse rápido en presas de tierra con suelos parcialmente saturados. Ingeniería y Desarrollo, 38(1), 13–31. <https://www.redalyc.org/journal/852/85270674002/>
62. CONDESAN – AICCA Ecuador. (2021). Diseño definitivo de obra civil para estabilización de taludes en Hidrovia. https://condesan.org/wp-content/uploads/2021/03/AICCA-Ecuador-TdR-Dise%C3%B1o-de-taludes-y-SAT-Hidrovia_Hidrovia_DQ06032021_Final.pdf

63. De Blasio, F. V. (2011). Introduction to the physics of landslides: Lecture notes on the dynamics of mass wasting. Springer.
64. Koloski, J. W., Lawton, E. J., & Rad, N. S. (1989). Geotechnical properties of glacial soils. Washington State Department of Transportation.
65. Camacho Macedo, G. M. (2021). Determinación del factor de seguridad para comparar técnicas de estabilización de taludes utilizando GEO5: Caso Parque El Milagro, Huaraz, Áncash. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60818>
66. Mesa Lavista, M., Álvarez Pérez, J., & Chávez Gómez, J. H. (2020). Evaluación del factor de seguridad en taludes de terraplenes carreteros altos ante carga sísmica. Ingeniería Sísmica, (103), 1–20. <https://doi.org/10.18867/ris.103.489>
67. Flores Berenguer, I., González Haramboure, Y., & García Tristá, J. (2022). Estabilidad de taludes en presas de tierra considerando el ángulo de succión del suelo no saturado. Ingeniería y Desarrollo, 40(1), 71–91. <https://www.redalyc.org/journal/852/85273159004/>
68. Suárez Díaz, J. (2024). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Internet Archive. <https://archive.org/details/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales-jaime-suarez-diaz>
69. Taliosa Taliosa. (2025). Estabilizar un talud: métodos y técnicas. Taliosa. <https://www.taliosa.com/estabilizar-un-talud-metodos-y-tecnicas/>
70. Repositorio UNAM – Dirección General de Bibliotecas Valiente Sanz, R., Sobrecases Martí, S., & Díaz Orrego, A. (2015). Estabilidad de taludes: conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo [PDF]. Universidad Nacional Autónoma de México, Repositorio Universitario.

<https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/bfa1ed21-edd3-4adf-868a-9e8c7f408e4c/content>

71. Ensayo triaxial – VJ Tech VJ Tech. (n.d.). An introduction to triaxial testing. VJ Tech. <https://www.vjtech.co.uk/an-introduction-to-triaxial-testing>
72. Caja de corte directo – ResearchGate ResearchGate. (2020). Figura 9. Detalle de la caja de corte directo y movimiento de los anillos. En artículo disponible en ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Detalle-de-la-caja-de-corte-directo-y-movimiento-de-los-anillos-Fuente_fig1_344926569
73. Ensayo SPT – Geotechnics Myanmar Geotechnics Myanmar. (n.d.). Standard Penetration Test (SPT). Geotechnics Myanmar. <https://www.geotechnicsmyanmar.com/index.php/professional-services/field-investigation-services/20-our-professional-services/field-investigation-services/59-standard-penetration-test-spt>
74. Ensayo CPT – ScienceDirect ScienceDirect. (n.d.). Cone penetration test. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cone-penetration-test>
75. Amelia Rueda. (2025, noviembre 12). Globalvia inicia reparación de taludes con peligro potencial en Costa Rica. AmeliaRueda.com. <https://ameliarueda.com/nota/globalvia-reparacion-taludes-peligro-potencial-noticias-costa-rica>
76. Das, B. M. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica (8.^a ed.). Cengage Learning.
77. Geocontacto Geocontacto. (2023, marzo 28). Medidas o métodos de estabilización de taludes. Geocontacto. <https://geocontacto.com/2023/03/28/medidas-o-metodos-de-estabilizacion-de-taludes/#page-content>
78. Montoya Orozco, J. (2015). Estabilidad de taludes: análisis y métodos de cálculo [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio UNAM.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3476/mo ntoyaorozco.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

79. Tumuro. (n.d.). Sistemas de contención flexibles. Tumuro. <http://www.tumuro.com/sistemas-de-contencion-flexibles.html>
80. Nuestro Diario. (2025, octubre 1). Carreteras quichelenses resultan afectadas por derrumbes. Nuestro Diario. <https://www.nuestrodiario.com/tu-comunidad/20251001/59678331/carreteras-quichelenses-resultan-afectadas-por-derrumbes>
81. GeoTest Ecuador Cía. Ltda. (2023). Informe del estudio de mecánica de suelos— Estabilidad de taludes [Informe técnico]. Quito, Ecuador.
82. Solutioma. (n.d.). Geomalla para taludes. Solutioma. <https://solutioma.com/control-erosion/geomalla-para-taludes/>
83. Montatixe Chicaiza, E. C., & Chango Álvarez, D. F. (2018). Análisis de estabilidad de taludes en un tramo de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, Distrito Metropolitano de Quito [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19971/1/CD-9341.pdf>
84. Encivil. (n.d.). Taludes y muros. Encivil. <https://encivil.com.co/servicios/taludes-y-muros/>
85. Yepes, V. (2013, octubre 19). Aplicación de malla de triple torsión en taludes para control de caída de rocas. Blog de Víctor Yepes. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/10/19/>
86. Vertikaless. (n.d.). Geotecnia: barreras dinámicas para estabilización de taludes. Vertikaless. <https://vertikaless.es/geotecnia/>

87. Ng, C. W. W., Zhan, L. T., & Bao, C. G. (2020). Rainfall-induced slope failures in tropical residual soils: mechanisms and mitigation. *Engineering Geology*, 272, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105618>
88. Rahardjo, H., Satyanaga, A., & Leong, E. C. (2021). Stability of slopes in tropical residual soils under climate change scenarios. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 52(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/SEAGS.2021.52.1>
89. Zhang, L., Chen, R., & Li, H. (2022). Hydro-mechanical behavior of tropical residual soils and implications for slope stability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(7), 2765–2780. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02234-9>
90. Zhang, X., Liu, X., Chen, C., Xu, Y., & Liu, H. (2022). Evolution of disintegration properties of granite residual soil with microstructure alteration due to wetting and drying cycles. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81, 93. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02602-5>
91. Maurya, S. (2022). Assessment of effective shear strength parameters in triaxial CU shear test. En *Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering* (pp. 213–225). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4739-1_14
92. He, Y., Wang, J., & Liu, Z. (2024). Atterberg limits and their implications for soil plasticity and slope stability. *Engineering Geology*, 325, 106–135. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.106135>

93. Zhou, W., Li, J., & Zhang, Y. (2023). Field evaluation of undrained shear strength using pocket penetrometers in cohesive slopes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-02115-7>
94. Giampaolo, V., Rizzo, E., & Capozzoli, L. (2021). Integration of ERT and GPR data for landslide characterization. *Remote Sensing*, 13(4), 745. <https://doi.org/10.3390/rs13040745>
95. Revil, A., & Karaoulis, M. (2022). Advances in geoelectrical methods for hydrogeological and geotechnical applications. *Surveys in Geophysics*, 43(2), 321–356. <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09688-4>
96. Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. Wiley.
97. Sanhueza Plaza, C., & Rodríguez Cifuentes, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, 12(1), 17–29. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003>
98. Sanhueza Plaza, C., & Rodríguez Cifuentes, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, 12(1), 17–29. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003>

11 Anexos









CÓDIGO	HUMEDAD	DENSIDAD	PESO UNITARIO	COHESIÓN		ANGULO FRICCIÓN
	%	gr/cm3	kN/m3	kg/cm2	kN/m2	°
MV-C2-1	21.11	1.73	16.95	0.86	84.34	29.90
MV-C2-3	6.58	1.57	15.39	0.99	97.09	56.66
MV-C3-2	15.35	1.53	14.99	0.97	95.13	40.36
MV-C3-3	21.94	1.61	15.78	0.74	72.57	35.75
SB-C7-1	17.36	1.66	16.27	0.78	76.49	35.75
SB-C9-1	23.44	1.45	14.21	0.33	32.36	46.67
SB-C10-1	27.43	1.76	17.25	1.30	127.49	34.22

CODIGO MUESTRA	LITOLOGÍA	TIPO DE ENSAYO			
		TRIAxIAL CU	TRIAxIAL UU	DENSIDAD DE MUESTRA	SUCS
MV_C1_1	Depósitos de caída			X	X
MV_C1_2	Cangahua retrabajada	X			X
MV_C2_1	Cangahua retrabajada		X		X
MV_C2_2	Depósitos de caída			X	X
MV_C2_3	Cangahua retrabajada		X		X
MV_C3_1	Depósitos de caída			X	X
MV_C3_2	Cangahua retrabajada		X		X
MV_C3_3	Cangahua retrabajada		X		X
MV_C4_1	Cangahua retrabajada	X			X
SB_C6_1	Depósitos de caída			X	X
SB_C6_2	Cangahua retrabajada	X			X
SB_C6_3	Depósitos de caída			X	X
SB_C7_1	Cangahua retrabajada		X		X
SB_C9_1	Cangahua retrabajada		X		X
SB_C9_2	Cangahua retrabajada	X			X
SB_C10_1	Cangahua retrabajada		X		X

4.2.3. COEFICIENTES DE PERFIL DEL SUELO

La norma antes mencionada establece los valores para los coeficientes del perfil del suelo, mismos que permiten representar la respuesta elástica (Espectro de aceleraciones) de la estructura analizada; información indispensable para el análisis de peligro sísmico de un proyecto.

Existen tres (3) tipos de coeficientes, mismos que son obtenidos en base al tipo de perfil del suelo y de la zona sísmica donde se localiza el proyecto; así se tiene que para un perfil tipo D y en la zona "V" los siguientes valores:

- Fa: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto: **Fa = 1.20**
- Fd: desplazamientos para diseño en roca: **Fd = 1.19**
- Fs: comportamiento no lineal de los suelos: **Fs = 1.28**

5. NATURALEZA Y DISTRIBUCIÓN DE UNIDADES GEOTÉCNICAS

A partir de los resultados de campo y laboratorio obtenidos, se pudo identificar la existencia de tres (3) unidades geotécnicas o estratos de subsuelo de similares características geomecánicas, hasta la profundidad sondeada (-15.00 m), en donde se determinó lo siguiente:

Sondeo No. 01: presencia de tres unidades geotécnicas claramente identificadas.

- Unidad Geotécnica No. 1:** Estrato entre 0.00m a -3.50m: Está constituido por un suelo de grano fino a grueso, tipo cohesivo - friccionante, caracterizado por **ARENA FINA LIMOSA (SM)** con fragmentos de grava TNM. 3/8" y clastos de piedra pómez (pumita) de color blancuzco, según la clasificación SUCS; su olor característico – inorgánico, de color café claro a oscuro, tonalidad amarillenta, de compacidad muy suelta a firme, plasticidad baja a nula, humedad media ($w = < 30.00 \%$).
- Unidad Geotécnica No. 2:** Estrato entre -3.50m a -9.00m: Está constituido por un suelo de grano fino, tipo cohesivo - friccionante, caracterizado por **LIMO DE BAJA COMPRESIBILIDAD (ML)** con fragmentos de grava TNM. 1/2" a 3/8" y presencia de arena, según la clasificación SUCS; su olor característico – inorgánico, de color café claro, tonalidad amarillenta, de consistencia media a muy firme, plasticidad baja, humedad media ($w = < 30.00 \%$).
- Unidad Geotécnica No. 3:** Estrato entre -9.00m a -15.00m: Está constituido por un suelo de grano fino a grueso, tipo cohesivo - friccionante, caracterizado por **ARENA FINA LIMOSA (SM)** con fragmentos de grava TNM. 1" a 3/8", según la clasificación SUCS; su olor característico – inorgánico, de color café claro a oscuro, tonalidad amarillenta, de compacidad densa a muy densa, plasticidad baja a nula, humedad media ($w = < 30.00 \%$).

• Geología • Geotecnia • Laboratorio • Trabajos In Situ
• Topografía • Ing. Vial • Ing. Ambiental • Consultoría
• j.villarroel.gts@hotmail.com • 0998268546 / 022589994 • Quito - Ecuador



