



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**Análisis para la estimación de pendientes de talud frente a
parámetros de resistencia al corte**

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de:

INGENIERA CIVIL

Autor: Jadán Ríos, Arianna Carolina

Director: Esparza Villalba, Carmen Antonieta

LOJA

2022



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2022

Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular

Loja, 17 de febrero de 2022

Magíster

Belizario Amador Zárate Torres

Director de la carrera de Ingeniería Civil

Ciudad.-

De mi consideración:

El presente Trabajo de Integración Curricular denominado: (Análisis para la estimación de pendientes de talud frente a parámetros de resistencia al corte) realizado por Arianna Carolina Jadán Ríos, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Integración Curricular ha sido revisado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y no cuenta con porcentaje de coincidencia alguno.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Director: MSc. Carmen Antonieta Esparza Villalba.

C.I.: 1711239713

Correo electrónico: caesparza@utpl.edu.ec

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Arianna Carolina Jadán Ríos, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor (a) del Trabajo de Integración Curricular denominado: Análisis para la estimación de pendientes de talud frente a parámetros de resistencia al corte, de la carrera de Ingeniería Civil, específicamente de los contenidos comprendidos en: Introducción, Materiales y métodos, Análisis y resultados, y Conclusiones, siendo Carmen Antonieta Esparza Villalba, director (a) del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual de este trabajo.

Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”, en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja queda facultada para ingresar el presente trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

.....
Autor: Arianna Carolina Jadán Ríos

C.I.: 1104649841

Correo electrónico: acjadan@utpl.edu.ec

Dedicatoria

Dedico esta tesis con todo mi corazón a mis padres Lupe Ríos y Roberto Jadán, quienes me apoyaron y animaron a seguir adelante. Me inculcaron todos los valores que me han formado como persona de bien y motivaron a que nunca me rinda.

A mis hermanos Itati y Sebastián, pues me motivaron a cumplir mis metas y propósito en la vida, con la finalidad de dar un buen ejemplo siendo la mayor entre los tres, agradezco por confiar en mí y apoyarme en todo momento.

A toda mi familia conformada por mis abuelitos, tíos, tías, primos y primas, quienes son parte de mi vida y están ahí cuando los necesito.

A mis maestros y compañeros pasados y presentes, por compartir buenos y malos momentos conmigo, así como su conocimiento y cariño, sin su apoyo no hubiera conseguido lograr mis sueños.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme el valor para no rendirme en este proceso y por guiarme en la dirección correcta, permitiéndome vivir esta experiencia con mi familia y seres queridos.

Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos, a mis padres que me brindaron su apoyo y me permitieron convertirme en una profesional en busca de lograr muchas metas más, agradezco por su dedicación y paciencia con mi persona. Doy gracias a mi directora de tesis, por haberme compartido sus conocimientos y por el tiempo en que me ayudo para poder culminar con este propósito. A mis maestros y compañeros, les doy las gracias por las enseñanzas compartidas, por los consejos y palabras de aliento, por estar cuando los necesite y por ser parte en mi proceso de formación.

A todos quienes forman parte en mi vida, gracias por ser parte de ella y por compartir alegrías y tristezas conmigo, por las experiencias que he aprendido con todos los mencionados y por creer en mí y en mi esfuerzo.

Índice de contenido

Carátula.....	I
Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular	II
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	III
Dedicatoria.....	V
Agradecimiento	VI
Índice de contenido	VII
Resumen	1
Abstract.....	2
Introducción	3
Capítulo uno	6
Materiales y métodos	6
1.1 Zona de estudio	6
1.2 Datos y materiales	8
1.3 Metodología.....	10
Capítulo dos	16
Análisis y resultados.....	16
2.1 Factor de seguridad	16
2.1.1 <i>Perfil seleccionado</i>	19
2.2 Círculo de falla o masa de deslizamiento	20
2.3 Medida de mitigación adoptada.....	23
2.3.1 <i>Bermas</i>	24
2.3.2 <i>Cunetas de coronación</i>	25

2.4 Factor de seguridad y superficie de falla del talud con medida de mitigación	26
Conclusiones	31
Recomendaciones	34
Referencias.....	35

Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades de los suelos encontrados en el talud	8
Tabla 2 Métodos de equilibrio límite y sus características	11
Tabla 3 Coordenadas de referencia de los perfiles del talud.....	12
Tabla 4 Pendientes recomendadas para taludes en corte	15
Tabla 5 Factor de seguridad obtenido de los software geotécnicos para el perfil 1	18
Tabla 6 Factor de seguridad obtenido de los software geotécnicos para el perfil 2	19
Tabla 7 Factor de seguridad obtenido de los software geotécnicos para el perfil 3	19
Tabla 8 Factor de seguridad para el perfil 2 con cambio de pendiente	27

Índice de figuras

Figura 1 Imagen de la zona de estudio	7
Figura 2 Modelado del perfil 3 en el software de Roscience.....	13
Figura 3 Modelado del perfil 3 en el software de Bentley.....	14
Figura 4 Superficie de falla del perfil 3 generada en el software de Bentley	14
Figura 5 Imagen del perfil 1 del talud en análisis	17
Figura 6 Imagen del perfil 2 del talud en análisis	17
Figura 7 Imagen del perfil 3 del talud en análisis	18
Figura 8 Imagen de la superficie de falla generada con el método de elementos finitos	20

Figura 9 Imagen de la superficie de falla generada con el método de Spencer	21
Figura 10 Imagen de la superficie de falla generada con el método de Morgenster-Price	21
Figura 11 Imagen de la superficie de falla generada con el método de Janbú.....	22
Figura 12 Imagen de la superficie de falla generada con el método de Bishop	22
Figura 13 Imagen del perfil 2 con la nueva geometría	25
Figura 14 Imagen de la superficie de falla generada por el método de elementos finitos	28
Figura 15 Imagen de la simulación del deslizamiento en la nueva geometría del talud..	28
Figura 16 Imagen de la superficie de falla generada con el método de Spencer	29
Figura 17 Imagen de la superficie de falla generada con el método de Morgenster-Price	29
Figura 18 Imagen de la superficie de falla generada con el método de Janbú.....	30
Figura 19 Imagen de la superficie de falla generada con el método de Bishop	30

Resumen

El análisis de estabilidad de taludes corresponde a un tema esencial en el estudio de deslizamientos. Este proceso, puede ser realizado considerando varios métodos que han sido establecidos, estos métodos corresponden a equilibrio límite y métodos numéricos. El daño que provocan los deslizamientos de tierra puede ser contrareestado con el análisis de estabilidad de taludes, con esto se puede proponer medidas de mitigación como el cambio de pendientes en la geometría del talud basado en los parámetros de resistencia al corte de los suelos. La presente investigación se realizó en un sector de la ciudad de Loja, específicamente en la vía de integración barrial. En esta zona se presentan varios deslizamientos de tierra, por lo que se seleccionó un talud para analizar. Los parámetros de resistencia a corte fueron obtenidos de estudios geotécnicos realizados en la zona, con ello mediante software geotécnico de Roscience y Bentley, se analizó la estabilidad del talud considerando equilibrio límite y métodos numéricos, obteniéndose el FS del talud. De esta forma, se estimaron pendientes para la geometría del talud para mitigar el impacto de deslizamientos.

Palabras clave: talud, estabilidad, pendientes.

Abstract

Slope stability analysis is an essential topic in the study of landslides. This process can be performed considering several methods that have been established, such as limit equilibrium and numerical methods. The damage caused by landslides can be counteracted with the analysis of slope stability, with this we can propose mitigation measures such as changing slopes in the geometry of the slope based on the shear strength parameters of the soils. The present investigation was carried out in a sector of the city of Loja, specifically on "Vía de integración barrial". In this area there are several landslides, so a slope was selected for analysis. The shear strength parameters were obtained from geotechnical studies carried out in the area. Using Roscience and Bentley geotechnical software, the slope stability was analyzed considering limit equilibrium and numerical methods, obtaining the FS of the slope. In this way, slopes were estimated for the geometry of the embankment and to mitigate the impact of landslides.

Keywords: embankment, stability, slopes.

Introducción

La ONU, en su objetivo de ciudades y comunidades sostenibles señala que desde el 2007, la mayoría de la población mundial se encuentra viviendo en ciudades (Naciones Unidas, 2018). Frente a esto se busca que las ciudades sean adecuadas en todos los ámbitos para la población. Uno de los problemas que se enfrenta hoy en día corresponde a la inestabilidad de taludes, los cuales no han sido intervenidos (Suárez, 2019). Los datos de la OEA indican que el 90% de las pérdidas por deslizamientos de taludes podrían evitarse si se identifica la causa mediante estudios de susceptibilidad (Jiménez, 2015).

Una aplicación importante de la ingeniería geotécnica es el análisis geomecánico de taludes que comprende el diagnóstico de las condiciones de estabilidad de una ladera o talud artificial; la estabilidad de un talud depende en general de factores propios de los materiales constitutivos, y de todo un conjunto de circunstancias externas al propio talud o ambientales. El estudio de la estabilidad de las pendientes es, y continuará siendo, un tema muy relevante en la ingeniería geotécnica. Casi todos los proyectos de ingeniería que se construyen tienen relación, en menor o mayor medida, con el análisis de la estabilidad de las pendientes ya sean estas naturales o construidas por el hombre.

La estabilización de deslizamientos activos o potencialmente inestables, es un trabajo relativamente complejo que requiere métodos de diseño y construcción especializados (Suárez, 2012). Estos movimientos de tierra son capaces de causar grandes catástrofes si no son analizados a través de varias metodologías. Ante actividades de construcción y diseño, se requiere de una planificación adecuada, así sean pequeños movimientos. Jiménez (2015) menciona que en la ciudad de Loja existen estudios geológicos realizados a gran escala, lo cual ha imposibilitado conocer la topografía, litología y geomorfología de la zona. Por ello, resulta importante analizar zonas específicas de la ciudad de Loja que son propensas a movimientos en masa, en la vía de Integración Barrial se encuentran varios taludes que requieren de algunas investigaciones para garantizar la seguridad de la población.

El presente proyecto ha analizado la relación de estabilidad de un talud en relación de su pendiente frente a parámetros de resistencia. El análisis de los materiales del talud en el

área de estudio y sus propiedades mecánicas son un factor muy importante en la determinación de estabilidad de pendientes, además se toman en cuenta los factores incidentes y condicionantes que pueden llevar a la falla del talud, tales como procesos geomorfológicos y físicos como la lluvia, erosión, sedimentación, inundaciones, sismos entre otros. Conocer las características litológicas corresponde un aspecto muy importante, pues con esto se puede saber características físicas y químicas de las rocas que conforman el talud, así como también las propiedades mecánicas de estas. Sobre la base de lo mencionado se ha planteado la siguiente hipótesis: Los parámetros de resistencia al corte y la pendiente condicionan la estabilidad del talud ubicado en la vía de integración barrial de la ciudad de Loja.

El objetivo general de la investigación se centra en estimar la pendiente más favorable para diseño y estabilidad de taludes a partir de parámetros de resistencia al corte de suelos. Esto se desarrolla en base a objetivos específicos como son: evaluar las sollicitaciones de resistencia de un talud condicionada a su pendiente, luego modelar el talud de la zona de estudio con el uso de software geotécnico para determinar su factor de seguridad; por último, analizar los resultados obtenidos sobre la estabilidad del talud en relación a sus pendientes y sollicitaciones de resistencia, el modelado del talud en el software permite el análisis de este en base al método de equilibrio límite y métodos numéricos.

El estudio de estabilidad de taludes se basa en la interacción de dos fuerzas, las estabilizantes o resistentes y las inestabilizantes o movilizantes (Instituto Nacional de Vías, 1998). A la inestabilidad de un suelo de talud se la busca en tres condiciones de contorno, estas son cuando se presentan pendientes topográficas fuertes, quebradas cerca del relieve e información sobre la litología de los materiales (Rodríguez & Rosales, 2014). Los análisis de taludes requieren determinar pendientes que faciliten la construcción de los mismos de manera estable y segura, para evitar vuelcos, deslizamientos, desprendimientos, etc. (Mesa & Piusseaut, 2018). Existen diferentes métodos de análisis que pueden ser usados para el análisis de estabilidad de taludes, estos se dividen en 3 grupos: teóricos, simples y análisis numérico (Gurruchaga R. & Viscarra A., 2020). Los métodos de equilibrio límite son

empleados para calcular el factor de seguridad basándose en dos principios, uno es considerando la superficie de falla poligonal y otro corresponde a considerar la superficie de falla circular (Harabinová et al., 2021). Azorin (2014) menciona que la modelación numérica permite el análisis de estabilidad de talud, se considera importante los datos que se introducirán y la interpretación de los resultados obtenidos. La metodología que se empleó en el análisis de pendientes del talud corresponde a los métodos mencionados.

El talud analizado pertenece a la ciudad de Loja, específicamente en la vía de Integración Barrial, al sureste de la vía Loja-Malacatos. La zona de estudio cuenta principalmente con la presencia de conglomerado con matriz areno arcillosa, los granos son de medios a gruesos (Quezada, 2015). El talud cuenta con parámetros de resistencia específicos, el análisis de los mismos es importante, pues esto permite determinar las pendientes favorables para el talud en la zona de estudio, las cuales proporcionan estabilidad al mismo. La pendiente recomendada para el talud estudiado se centra en la información litológica compilada, correspondiente a la zona de estudio, a falta de ensayos de campo y laboratorio, sin que esto afecte o invalide las conclusiones y recomendaciones que se han dado para mitigar la inestabilidad del talud.

El documento está compuesto por un primer capítulo; el cual está enfocado en los materiales y métodos utilizados para este análisis, el mismo contiene el proceso que se llevó a cabo desde la recopilación de información hasta los métodos empleados para el análisis del talud, que en este caso corresponden a los métodos de equilibrio límite y métodos numéricos; el segundo capítulo contiene los resultados obtenidos con respecto a las pendientes impuestas para lograr la estabilidad del talud basándose en el modelado del talud en software geotécnico, este capítulo contiene el análisis de lo antes mencionado por medio del factor de seguridad que presenta el talud. Finalmente, se presentan las conclusiones a las que se llegaron en la presente investigación.

Capítulo uno

Materiales y métodos

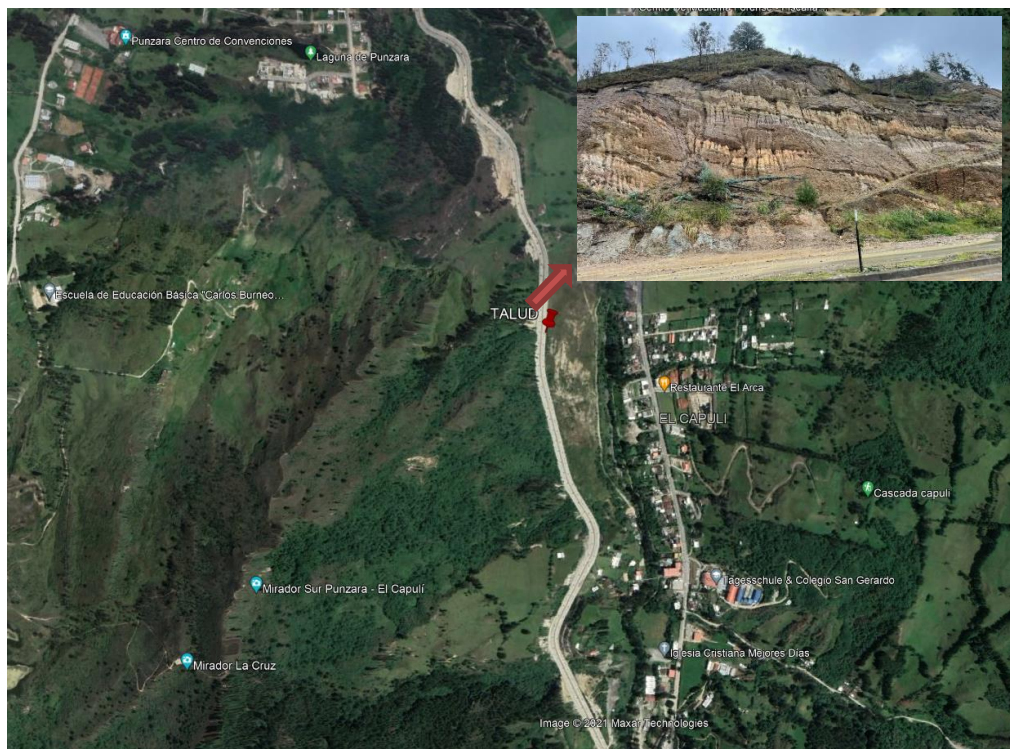
1.1 Zona de estudio

La cuenca de Loja se encuentra afectada por diversos deslizamientos de tierra, es necesario y relevante el estudio de estabilidad de en la vía de integración barrial, en el sureste de la vía Loja-Malacatos. Esta vía también conocida como paso lateral, se desarrolla por el oeste de la ciudad de Loja, en la dirección norte-sur, tiene su inicio en la intersección con la antigua vía a Cuenca (barrio Motupe) y su fin llega en la intersección con la carretera Loja-Vilcabamba (Cueva, 2017).

El cantón Loja tiene un clima Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo, los factores que dan origen a este clima corresponden a la latitud y relieve que afectan a la región andina, este cantón se encuentra a una altura de 2100 m.s.n.m (Municipio de Loja, 2014). En la zona de estudio el clima suele ser variado, desde templado a frío y con una altura que oscila los 2000 m.s.n.m., sujeto a aires que ascienden por los flancos de las cordilleras, el aire produce en las cimas lluvias, lloviznas, nubes (Estudios del paso lateral, 2014).

La precipitación en el cantón de Loja se ve marcada por temporadas, estas por lo general, inician en el mes de septiembre y se extienden hasta un pico máximo que corresponde al mes de marzo y culminan en el mes de mayo; la precipitación en la zona varía anualmente desde 500 a 2000 mm (Municipio de Loja, 2014). La humedad relativa media de la ciudad de Loja considerando un promedio es de 74.6% con una máxima de 82.8% y mínima de 69%, la menor humedad se da en los meses de julio a septiembre y mayor humedad se tiene en los meses de enero a junio (Quezada, 2015).

El talud analizado se encuentra ubicado en las coordenadas UTM 9552719S 699873E y entre las abscisas K16+400 y K16+500 de la vía. En la figura 1 se puede apreciar la zona de estudio del talud seleccionado apreciada desde el satélite de Google Earth. Al hablar de parámetros de resistencia del suelo de un talud, es necesario conocer aspectos relacionados con la litología de la zona de estudio.

Figura 1*Imagen de la zona de estudio*

Nota. Obtenida de Google Earth. El talud se encuentra ubicado entre las coordenadas UTM 699873E, 9552719S [Fotografía], por El autor, 2021.

Estudios geológicos del paso lateral (2014) mencionan que el tramo que comprende desde el K12+420 a K17+800, se caracteriza por ser una zona considerada como morfológicamente moderada, la cual está conformada por estratos de suelos arcillosos y por pequeños depósitos limo arenoso, estos a su vez están recubriendo a extensos depósitos de conglomerados en matriz arcillosa. La formación geológica que corresponde al tramo de vía de 12+420 a la 17+800 corresponde a la formación San Quillollaco, esta se destaca por contar con suelos arcillosos, con color café claro, son ligeramente plásticos, sueltos y secos; los suelos encontrados cuentan con componentes de cuarcita y esquistos sercíticos, hacia la superficie son tipo CL y hacia abajo se tiene gravas con pocos finos (GW con base en la SUCS).

En la ciudad de Loja, el suelo es utilizado para diversos fines, encontrando suelos sembrados con hortalizas, legumbres, cereales, y más; la zona de estudio con base en estudios tiene un total aproximado de 39.65ha, en las que se establecen infraestructura, zona

arbórea, pastizales, cultivos y erosionadas, la mayor parte es ocupada por pastizales naturales y zona arbórea con un 79.8% del área mencionada (Quezada, 2015).

1.2 Datos y materiales

Los parámetros de resistencia y características geológicas se obtuvieron de información recopilada sobre estudios realizados en la zona, en especial de un estudio de resistividad eléctrica y de sísmica de refracción. En el estudio de resistividad eléctrica se presentan los sondajes geoelectrónicos, el tipo de material y sus características; en el estudio de sísmica de refracción se encuentran los perfiles sísmicos que indican la velocidad sísmica según el tipo de material (Estudios del paso lateral, 2014). En la tabla 1 se puede apreciar los distintos parámetros de resistencia necesarios para el análisis de estabilidad del talud.

Tabla 1

Propiedades de los suelos encontrados en el talud

Características geológicas	Suelos		
	Suelo 1 (Conglomerado)	Suelo 2 (Arcilla)	Suelo 3 (Limo)
Peso específico (kN/m ³)	19	16.7	17
Peso específico saturado (kN/m ³)	21	18	19
Cohesión (kPa)	137	73	39
Ángulo de fricción (°)	37	6	27
Coefficiente de Poisson	0.4	0.35	0.3
Módulo de Young (kPa)	350000	5000	12000
Parámetro hidráulico ks (m/s)	1.1E-5	1.2E-10	1.2E-9

Nota. En esta tabla se observa los diferentes parámetros de resistencia de los suelos encontrados en el talud.

Ante la inestabilidad de taludes se han planteado diversos tipos de falla y sus causas, entre las más comunes se destacan las fallas rotacionales, traslacionales y por volteo (Domínguez, 2018). En cada categoría, los deslizamientos cuentan con características

reconocidas que por lo general son constantes, típicas del mecanismo que ocasionó la falla y que son útiles en la clasificación visual del terreno (Instituto Nacional de Vías, 1998).

En análisis de estabilidad de taludes, uno de los factores clave corresponde a la identificación del mecanismo detrás de la falla de pendiente (Roul et al., 2021). Para el análisis de estabilidad de un talud como se ha venido mencionando, se tienen varios métodos, estos son tanto de equilibrio límite como numéricos. El estudio realizado contempla 5 métodos principales, estos corresponden al de Janbú, Morgestern-Price, Bishop, Spencer y método numérico. La diferencia entre los diversos métodos de equilibrio límite radica en simplificar el mecanismo del mismo con la finalidad de reducir la indeterminación de las fuerzas que se generan entre dovelas (Mesa & Piusseaut, 2018).

El método de Janbú obtiene el factor de seguridad considerando la fuerza horizontal entre dovelas, pero no la fuerza que se genera por cortante entre estas (Domínguez, 2018). El método de Bishop corresponde a un método de cálculo por dovelas o también llamadas rebanadas, establece un equilibrio de momentos de la masa deslizante (Rodríguez & Rosales, 2014). El método de Morgestern Price satisface las ecuaciones de equilibrio, sin embargo, no se satisface para cada punto del suelo (Mesa & Piusseaut, 2018). El método de Spencer corresponde a aquel que satisface el equilibrio entre momentos y esfuerzos (Aguilar & Zuñiga, 2015). Por otra parte, los métodos numéricos son aquellos que además de la estática consideran deformaciones del terreno (Estrada & Soberanis, 2014).

Para el análisis de estabilidad del talud se utilizó software geotécnicos, en específico, Roscience y Bentley. Estas cadenas brindan las herramientas necesarias para obtener el factor de seguridad del talud empleando métodos de equilibrio límite y métodos numéricos. El primer programa pertenece a Roscience y se denomina Slide, este permite determinar el factor de seguridad con base en métodos de equilibrio límite. El segundo programa de Roscience corresponde a Phase 2, el cual permite obtener la superficie probable de deslizamiento a partir del mínimo valor del factor de seguridad. Por último, el software de Bentley llamado Plaxis, brinda un análisis mediante elementos finitos bidimensionales, fue

diseñado para analizar la deformación y estabilidad de problemas geotécnicos (Plaxis & Haag, 2004).

El modelado del talud en software geotécnico requirió del modelo de elevación digital del talud en la zona de estudio, este se lo obtuvo a partir de imágenes satelitales de GlobalMapper del año 2015.

1.3 Metodología

Los datos de los estudios de sísmica de refracción y resistividad eléctrica permitieron obtener las propiedades geológicas de los suelos que encontramos en el talud de análisis, estas se pueden observar en la tabla 1. Las visitas al lugar donde se encuentra ubicado el talud permitieron monitorear si se tuvieron cambios debido al cambio climático que se dio en la provincia de Loja, estos aspectos fueron considerados para el análisis y conclusiones del presente estudio. Basándose en las características observadas con respecto al movimiento del talud, se puede decir que corresponde a un deslizamiento traslacional.

En el presente estudio se utilizó el criterio de falla de Mohr Coulomb, este criterio está definido por:

$$\tau = c + \sigma \tan(\phi) \quad \text{Ec.1}$$

En donde τ corresponde al esfuerzo de corte al momento de falla, σ representa el esfuerzo normal efectivo, c la cohesión y ϕ corresponde al ángulo de fricción interna (Muñoz, 2012). La teoría es de las más utilizadas y se empleó para definir la resistencia al corte de los suelos considerando los esfuerzos efectivos de los mismos. Esta teoría se caracteriza por su simplicidad y por la facilidad de obtener los parámetros de resistencia al corte de un suelo (Oyola & Vaca, 2018).

En el análisis de pendientes para estabilidad de un talud se han dado diversos métodos. Los métodos de equilibrio límite se basan en la división de la masa de suelo en rebanadas o dovelas (Mesa & Piusseaut, 2018). Este análisis requiere de información sobre parámetros de la resistencia del suelo y no necesita sobre la relación esfuerzo-deformación (Suárez, 1998). Los métodos de equilibrio límite se basan en análisis estático que se genera entre fuerzas resistentes y actuantes sobre la masa del suelo del talud (Gurruchaga R. &

Viscarra A., 2020). En la tabla 2 se muestran las características de los métodos de equilibrio límite empleados. La aplicación de los métodos numéricos es compleja, el problema se estudia con la aplicación del método de elementos finitos u otros (Estrada & Soberanis, 2014).

Tabla 2

Métodos de equilibrio límite y sus características

Método	Parámetros	Equilibrio	Superficie de falla	Características
Bishop	c, ϕ, r_u	Momentos	Circular	No se toma en cuenta las fuerzas de cortante, asume que las fuerzas entre estas son horizontales.
Janbú	c_u, c, ϕ, r_u	Fuerzas	Cualquier forma	Establece un factor de corrección f_o , el cual depende de la curvatura de la falla.
Morgenstern-Price	c, ϕ, r_u	Momentos y fuerzas	Cualquier forma	La función que relaciona las fuerzas de cortante y normales puede ser constante u otro tipo de función.
Spencer	c, ϕ, r_u	Momentos y fuerzas	Cualquier forma	Supone que las fuerzas entre dovelas son paralelas, unas con las otras, tienen mismo ángulo de inclinación.

Nota. Adaptada de Suárez, 1998.

El método numérico de elementos finitos requiere también de parámetros como la relación de Poisson y modulo elástico (Escobar & Escobar, 2017). El método es adecuado en cuanto a la modelización de fallos progresivos, este desarrolla el mecanismo de falla a lo largo de zonas donde el material no resiste las tensiones (Gurruchaga R. & Viscarra A., 2020). El método de elementos finitos divide al suelo en partículas que se interconectan por sus bordes predefinidos y en sus nodos. Este presenta un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente (Suárez, 1998).

Basándose en lo ya mencionado sobre los métodos de equilibrio límite y métodos numéricos a emplear en el análisis, se realizó el modelado del talud en software geotécnico. El modelado del talud consiste en el análisis de tres perfiles topográficos del talud, uno al principio, uno central y uno final. Las coordenadas tomadas en el pie del talud de cada perfil se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Coordenadas de referencia de los perfiles del talud

Perfiles	Coordenadas	
	X	Y
Perfil 1	699873	9552719
Perfil 2	699868	9552758
Perfil 3	699864	9552780

Nota. En esta tabla se observan las coordenadas del pie de talud de cada perfil

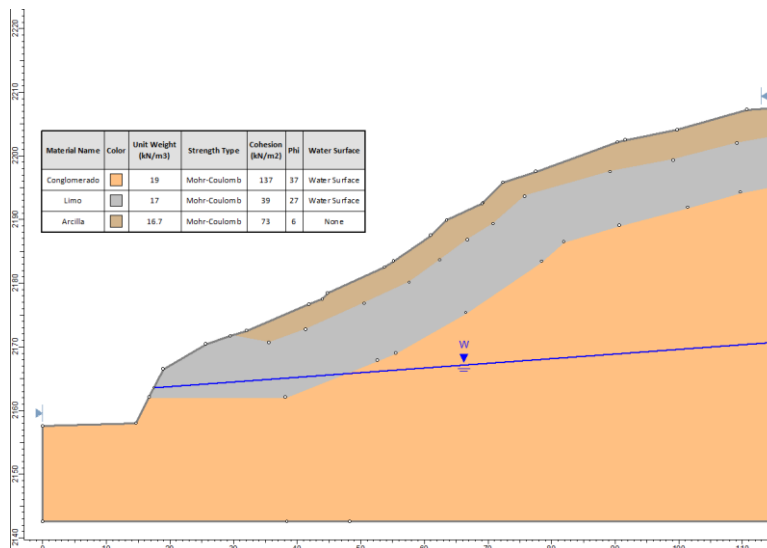
Al tener la ubicación de los perfiles, primero se determinaron las coordenadas de los mismos con el software Civil3D y se introdujo la geometría de estos en el primer software de Roscience. Cada perfil se dividió en los estratos de conglomerado, arcilla y limo, al definir los estratos, se asignó a cada suelo las características geomecánicas que se indicaron en la tabla 1. Posterior a ello, en el perfil 2 y 3 se consideró el nivel freático a una altura de 5m y 10m, respectivamente, considerada desde el eje de la vía; el nivel seguía una inclinación similar al perfil del talud. En el conglomerado se colocó que el nivel freático sea considerado en el análisis, ya que dicho suelo se encuentra bajo este.

El análisis de estabilidad del talud se realizó primeramente considerando el estado actual del mismo y las características geomecánicas de los suelos antes mencionados, se definieron dos fases para el cálculo del factor de seguridad, la primera es sin considerar carga sísmica y la segunda se realizó considerando carga sísmica con base en la zona sísmica del proyecto. En el programa se consideró una falla con tipo de superficie no circular y por el método de "Simulated Annealing". Los métodos con los que se trabajó en el programa son los de equilibrio límite, por lo que el resultado que se obtuvo para el factor de seguridad fueron

por Bishop, Janbú, Morgenstern Price y Spencer. La figura 3 muestra uno de los perfiles modelados en el programa.

Figura 2

Modelado del perfil 3 en el software de Roscience



Nota. Imagen del modelo del perfil 3 con su estratigrafía.

Luego, se realizó el modelado en Roscience considerando la metodología de elementos finitos, inicialmente, se introdujo los perfiles del talud junto con los estratos. En el caso de este análisis se requerían de otros datos geomecánicos de los suelos para el análisis por elementos finitos, por lo que a cada suelo se le agregó el módulo de Young y coeficiente de Poisson. El primer análisis se efectuó considerando el talud en su estado natural y en las dos fases antes mencionadas para el primer programa utilizado de Roscience. La superficie de falla fue similar a la obtenida en el anterior software.

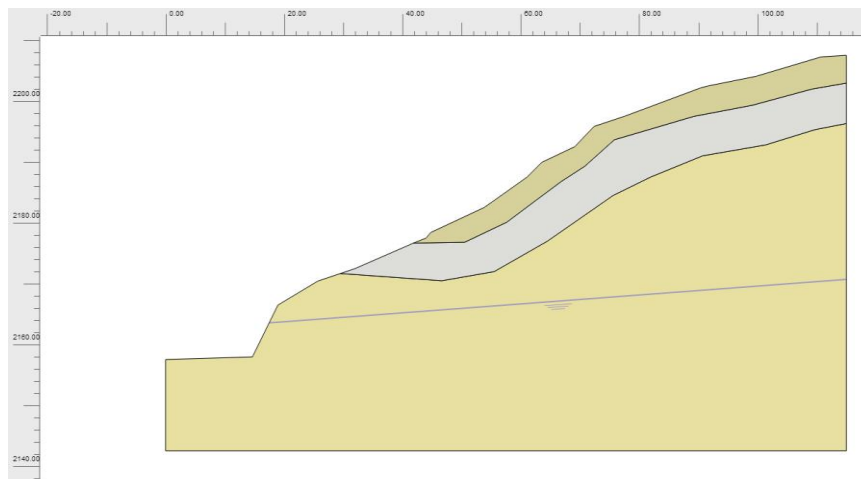
El último programa empleado para el análisis de estabilidad del talud corresponde al software de la plataforma Bentley, se inició con la colocación de los 3 perfiles del talud, bajo las mismas consideraciones de la estratigrafía presente para los modelos generados en Roscience. Al contar con la información de la geometría se introdujeron los suelos con los valores de sus parámetros de resistencia geomecánicos, se colocó también el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y parámetros hidráulicos k_s . Posterior a ello, con la herramienta "Mesh" se generó una malla de elementos finitos con refinamiento local y global, en el conglomerado se consideró un mallado mucho más denso, ya que las partículas son

mucho más grandes y los espacios entre poros son mayores, en el caso de la arcilla y limo se consideró un refinamiento medio de la malla.

Lo siguiente fue colocar el nivel freático de los perfiles 2 y 3, esto se realizó considerando las distancias antes mencionadas, y la profundidad se consideró de forma perpendicular para este caso. Al finalizar el modelo, se procedió a colocar las fases de análisis y se corrió el programa para obtener el factor de seguridad. En la figura 4 se puede observar el modelado del perfil 3 y en la figura 5 la superficie de falla del mismo.

Figura 3

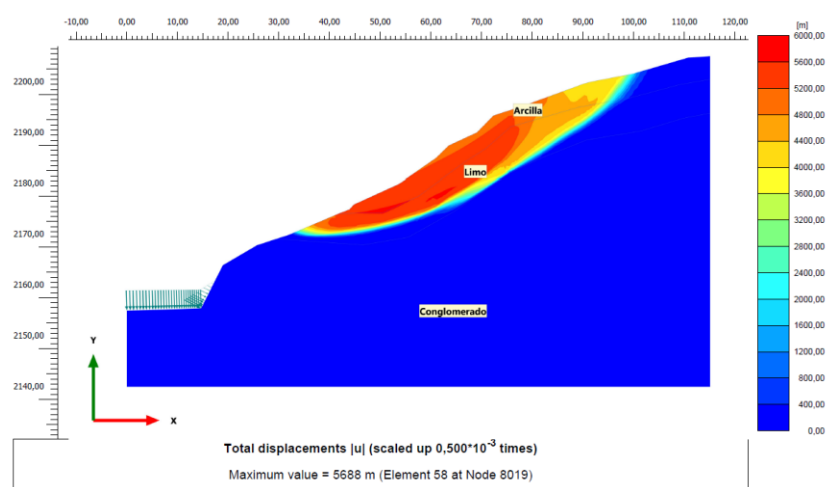
Modelado del perfil 3 en el software de Bentley



Nota. Perfil 3 con la estratigrafía y nivel freático correspondiente.

Figura 4

Superficie de falla del perfil 3 generada en el software de Bentley



Nota. Se observa como se generó la superficie de falla en el software de Bentley.

Una vez obtenidos los modelos de los perfiles, se tomó el más crítico para la evaluación de alternativas de solución para la estabilidad del talud. Al contar con el modelo, se procedió a cambiar la geometría de este considerando 3 cambios de pendiente y 4 terrazas, esto debido a los parámetros de resistencia con los que cuenta los suelos del talud de análisis. Los criterios para pendientes se consideran en función de la tabla 4.

Tabla 4

Pendientes recomendadas para taludes en corte

Material	Propiedades	Altura de corte	Pendiente sugerida
Roca dura			0.3H:1V a 0.8H:1V
Roca blanda			0.5H:1V a 1.2H:1V
Arena	Poco densa		1.5H:1V a 2H:1V
	Denso	Menos de 5	0.8H:1V a 1H:1V
		5 a 10	1H:1V a 1.2H:1V
Suelo arenoso	Poco denso	Menos de 5	1H:1V a 1.2H:1V
		5 a 10	1.2H:1V a 1.5H:1V
	Densa	Menos de 10	0.8H:1V a 1H:1V
		10 a 15	1H:1V a 1.2H:1V
Mezcla de arena con grava o masas de roca	Poco densa	Menos de 10	1H:1V a 1.2H:1V
		10 a 15	1.2H:1V a 1.5H:1V
Suelos cohesivos		0 a 10	0.8H:1V a 1.2H:1V
Suelos cohesivos mezclados con masa de roca o bloque		Menos de 5	1H:1V a 1.2H:1V
		5 a 10	1.2H:1V a 1.5H:1V

Nota. Adaptado de Suárez, 1998.

En función de los resultados encontrados por los 3 perfiles seleccionados de la zona de estudio, se realizará la combinación de pendientes en función de la estratigrafía presente en el talud de estudio, considerando alturas de corte y pendientes sugeridas sobre la base de la tabla 4.

Capítulo dos

Análisis y resultados

2.1 Factor de seguridad

El software geotécnico fue una herramienta esencial para la obtención del factor de seguridad por distintos métodos de análisis. Según Gurruchaga & Viscarra (2020), el factor de seguridad se utiliza con la finalidad de determinar el nivel de amenaza de las pendientes por las que está conformado un talud. Los métodos empleados para obtener el factor de seguridad se han basado en el criterio de falla de Coulomb, el cual pretende satisfacer el equilibrio a lo largo de una superficie de falla, dada según los parámetros de resistencia al corte del suelo.

Los valores mínimos de FS según la normativa ecuatoriana, tienen un valor de 1.5 en diseño y 1.3 en construcción (NEC-SE-GC Geotecnia y Cimentaciones, 2014). Los resultados de FS que se obtuvieron en el análisis de estabilidad del talud son inferiores a los establecidos por la norma, presentan la posibilidad de que la pendiente colapse, con ello se evidencia la necesidad de una medida de mitigación que proporcione una inclinación de talud que esté definida por un FS superior a los valores mínimos o sea mayor a 1.

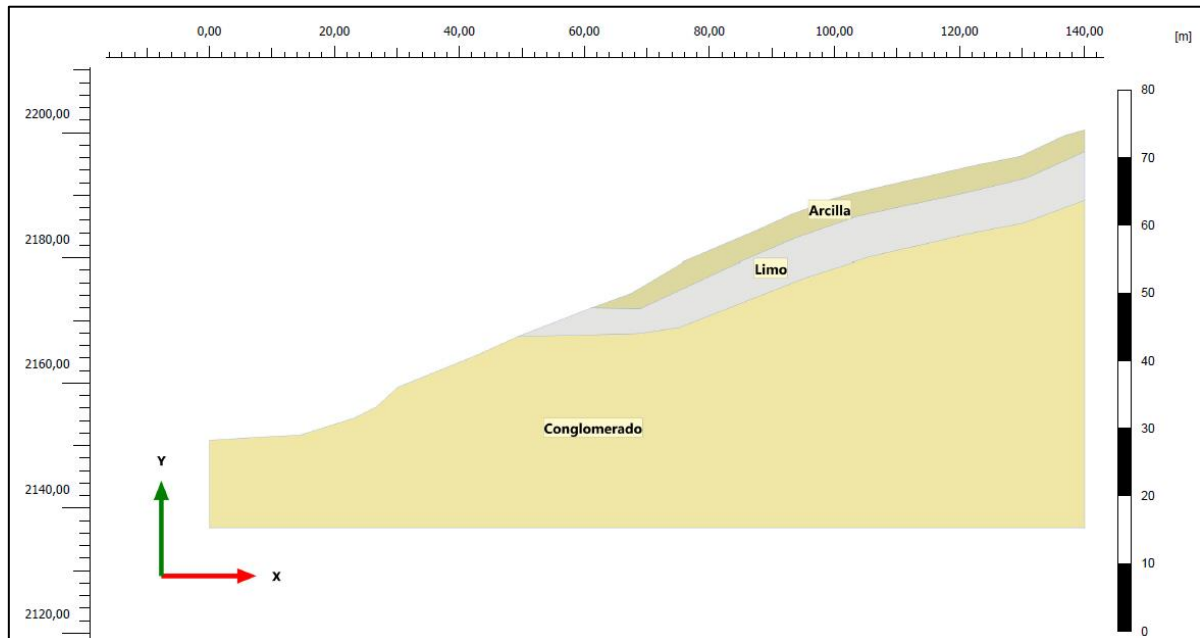
Con el monitoreo realizado en el talud de análisis se ha podido observar que conforme pasa el tiempo y se producen lluvias, este ha presentado un comportamiento que demuestra como se incrementa el deslizamiento y la falla del mismo, generando escombros y peligro en la zona que se encuentra, además, afecta al tránsito de la vía de integración barrial. Frente a lo mencionado es de gran importancia las medidas de mitigación que permitan estabilizar el talud.

La figura 5, 6 y 7 presentan la geometría y estratificación del perfil 1, 2 y 3, respectivamente, los modelos presentados corresponden a los obtenidos en el programa de Bentley. Luego de haber colocado las propiedades de los suelos presentes en el talud y considerar las fases para el cálculo de factor de seguridad, se obtuvieron los resultados del factor de seguridad para cada perfil. En la fase dinámica (con sismo) se consideró una aceleración de 0.25 g, valor tomado de la norma ecuatoriana y que corresponde a la zona

sísmica de la provincia de Loja (NEC-SE-DS: Peligro Sísmico. Diseño Sismo Resistente, 2014).

Figura 5

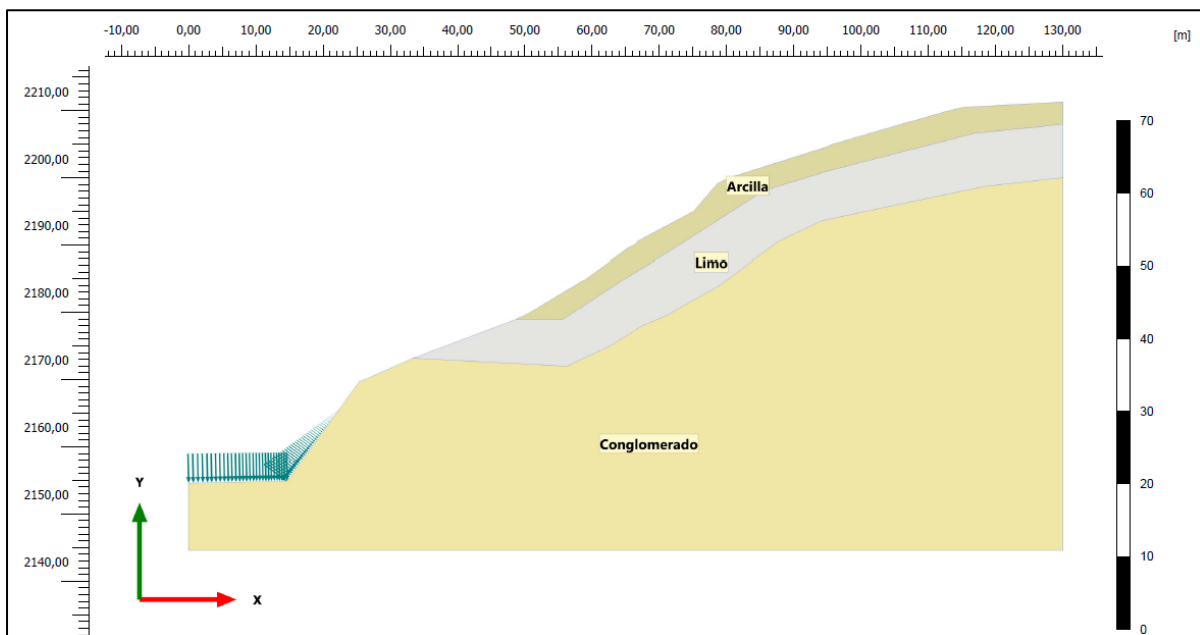
Imagen del perfil 1 del talud en análisis



Nota. Perfil 1 modelado en el software geotécnico de Bentley, con la estratigrafía del mismo.

Figura 6

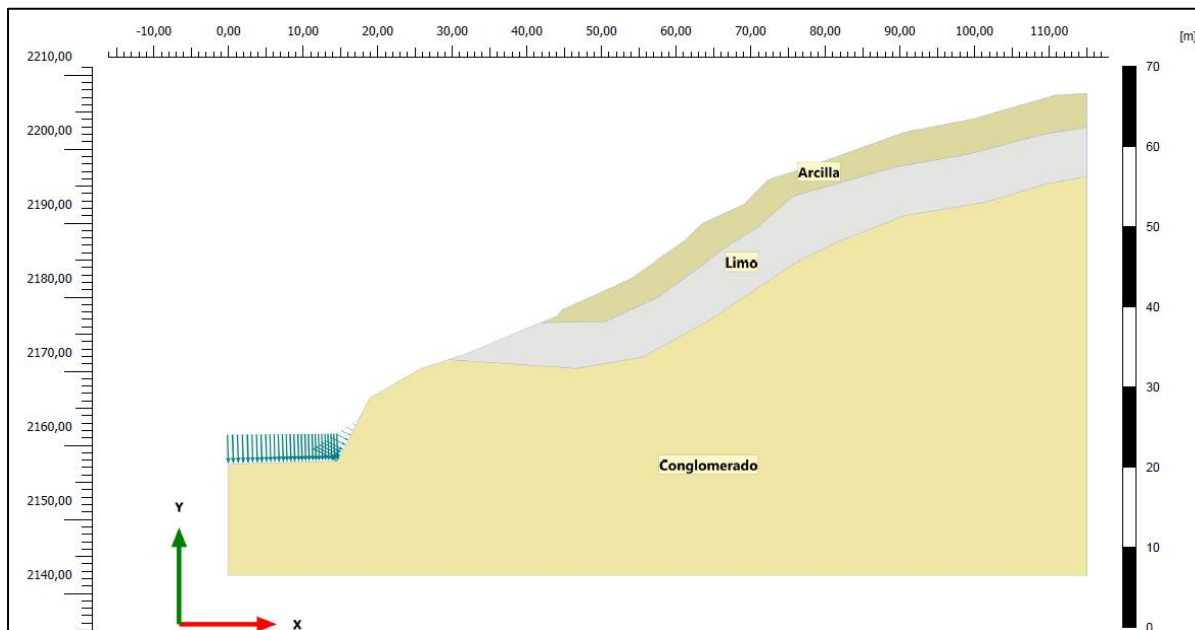
Imagen del perfil 2 del talud en análisis



Nota. Perfil 2 modelado en el software geotécnico de Bentley, con la estratigrafía del mismo.

Figura 7

Imagen del perfil 3 del talud en análisis



Nota. Perfil 3 modelado en el software geotécnico de Bentley, con la estratigrafía del mismo.

La tabla 5, 6 y 7 presentan los factores de seguridad que se obtuvieron del talud en su estado natural y considerando cada perfil de análisis. Los valores que se extrajeron son menores a los mínimos propuestos por la norma, en el caso del perfil 1 el menor valor se obtuvo considerando fuerzas sísmicas, este valor de FS fue de 0.89, para el perfil 2 y perfil 3, igualmente considerando cargas sísmicas, los menores valores obtenidos de FS fueron de 0.70 y 0.75, respectivamente.

Tabla 5

Factor de seguridad obtenido de los software geotécnicos para el perfil 1

Método	Con sismo			Sin sismo		
	Roscience 1	Roscience 2	Bentley	Roscience 1	Roscience 2	Bentley
Spencer	0.993	-	-	1.540	-	-
Morgenster-Price	1.002	-	-	1.551	-	-
Janbú	0.982	-	-	1.522	-	-
Bishop	1.007	-	-	1.546	-	-
Métodos numéricos	-	0.89	0.938	-	1.44	1.541

Nota. Esta tabla presenta los factores de seguridad obtenidos para el perfil 1 en su estado natural.

Tabla 6

Factor de seguridad obtenido de los software geotécnicos para el perfil 2

Método	Con sismo			Sin sismo		
	Roscience	Roscience	Bentley	Roscience	Roscience	Bentley
	1	2		1	2	
Spencer	0.806	-	-	1.161	-	-
Morgenster-Price	0.812	-	-	1.168	-	-
Janbú	0.778	-	-	1.133	-	-
Bishop	0.803	-	-	1.155	-	-
Métodos numéricos	-	0.70	0.751	-	1.07	1.139

Nota. Esta tabla presenta los factores de seguridad obtenidos para el perfil 2 en su estado natural.

Tabla 7

Factor de seguridad obtenido de los software geotécnicos para el perfil 3

Método	Con sismo			Sin sismo		
	Roscience	Roscience	Bentley	Roscience	Roscience	Bentley
	1	2		1	2	
Spencer	0.834	-	-	1.207	-	-
Morgenster-Price	0.834	-	-	1.214	-	-
Janbú	0.806	-	-	1.181	-	-
Bishop	0.829	-	-	1.202	-	-
Métodos numéricos	-	0.75	0.805	-	1.12	1.217

Nota. Esta tabla presenta los factores de seguridad obtenidos para el perfil 3 en su estado natural.

Los valores de FS señalan que si el talud permanece en el estado que se analizó, este no sería capaz de resistir fuerzas actuantes, como son cargas sísmicas, cargas ejercidas por la lluvia, viento, entre otras; esto conduciría a que se produzca un mayor deslizamiento y con ello afectaría a los sectores aledaños y la comunidad.

2.1.1 Perfil seleccionado

Los resultados obtenidos permiten observar un comportamiento similar de falla en el perfil 2 y 3, sin embargo, el caso más crítico en cuanto a los factores de seguridad corresponden al perfil 2. Se mostró que en el caso del perfil 1, los factores de seguridad mantienen valores mayores, en este lado del talud la masa de suelo se encuentra mucho más desplazada, debido a ello se da un aumento en el factor de seguridad.

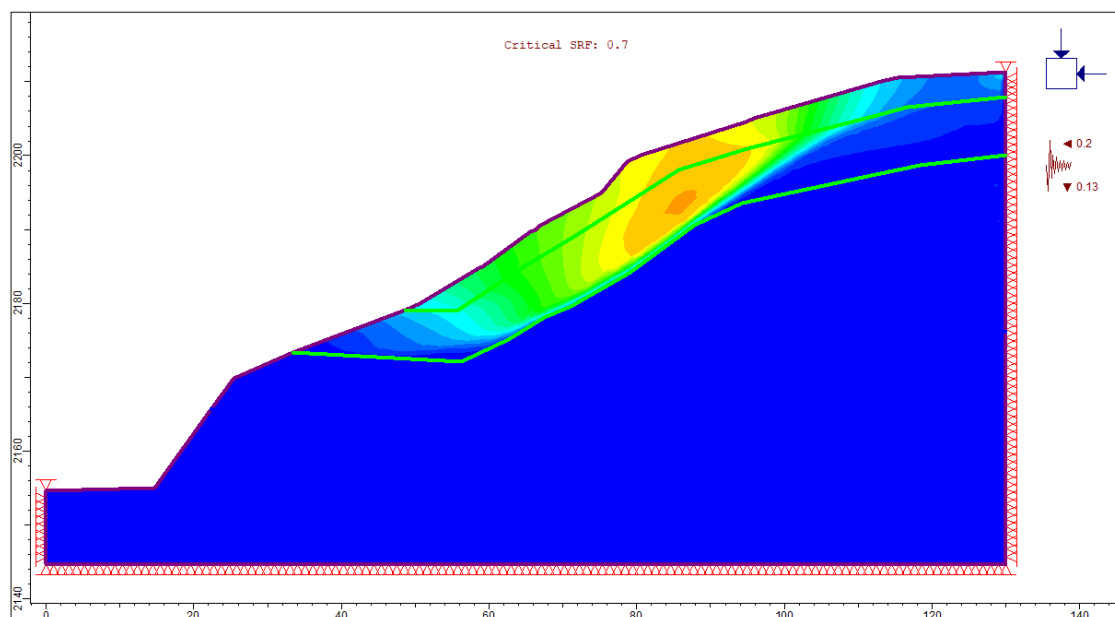
Al ser el perfil 2, la zona del talud en el que se obtuvieron menores valores en el factor de seguridad, este fue seleccionado para considerar un cambio en la geometría del talud como medida de mitigación tomando en cuenta las pendientes recomendadas en la tabla 5 y la estratigrafía del talud. Los parámetros de resistencia al corte fueron esenciales para establecer las nuevas pendientes en la geometría del perfil 2.

2.2 Círculo de falla o masa de deslizamiento

Los software geotécnicos muestran la masa de la superficie de deslizamiento que se genera en los perfiles, esto basado en los parámetros de resistencia al corte de los suelos que conforman los mismos. Para cada método se generó un círculo de falla en cada perfil, en los métodos de equilibrio límite son bastante similares a los que se produce con el método de elementos finitos. La superficie de deslizamiento generada en el perfil seleccionado para aplicar la medida de mitigación se puede observar en la figura 8, esta se generó en el software de Roscience 2, el cual aplica el método de elementos finitos. La figura 9, figura 10, figura 11 y figura 12 muestran la superficie de falla generada en el software de Roscience 1 para los métodos de Spencer, Morgenster-Price, Janbú y Bishop, respectivamente.

Figura 8

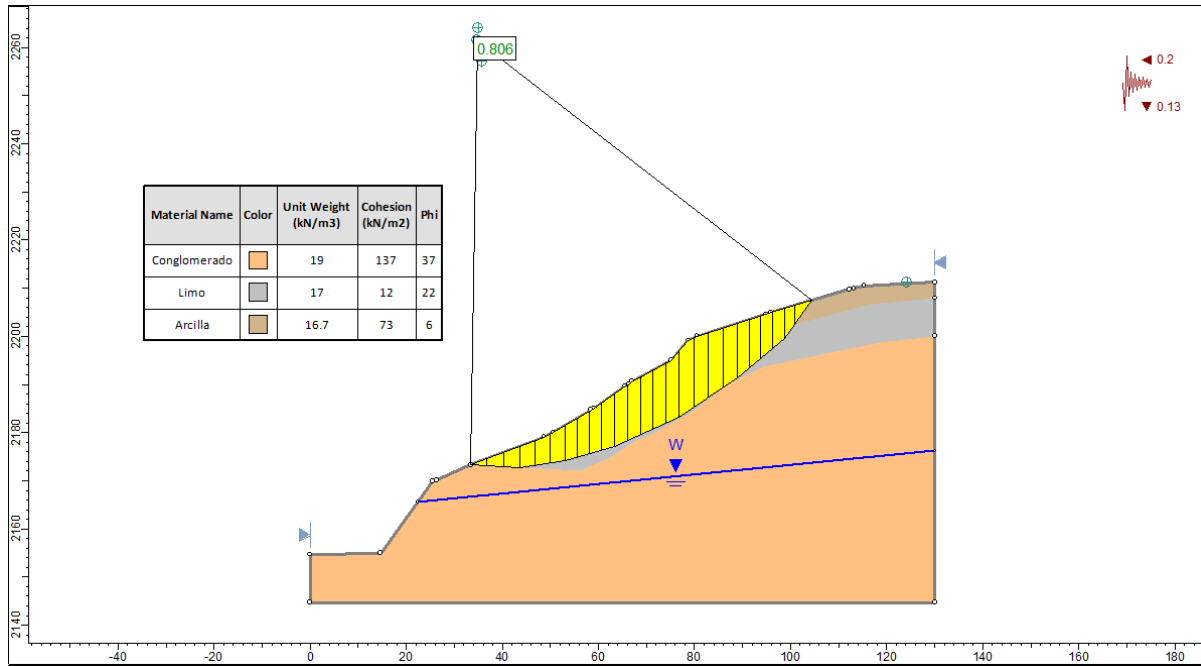
Imagen de la superficie de falla generada con el método de elementos finitos



Nota. Círculo de falla generada con el software de Roscience 2 para perfil 2, considerando la fase sísmica.

Figura 9

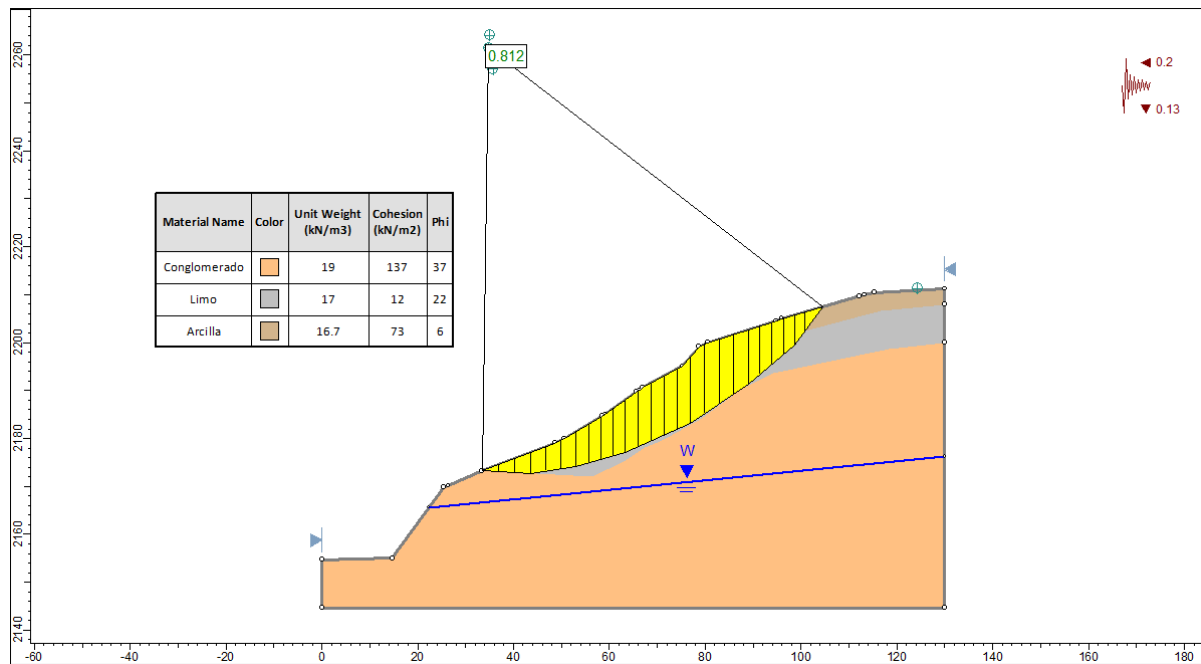
Imagen de la superficie de falla generada con el método de Spencer



Nota. Círculo de falla generado con el software de Roscience 1 para perfil 2, considerando la fase sísmica.

Figura 10

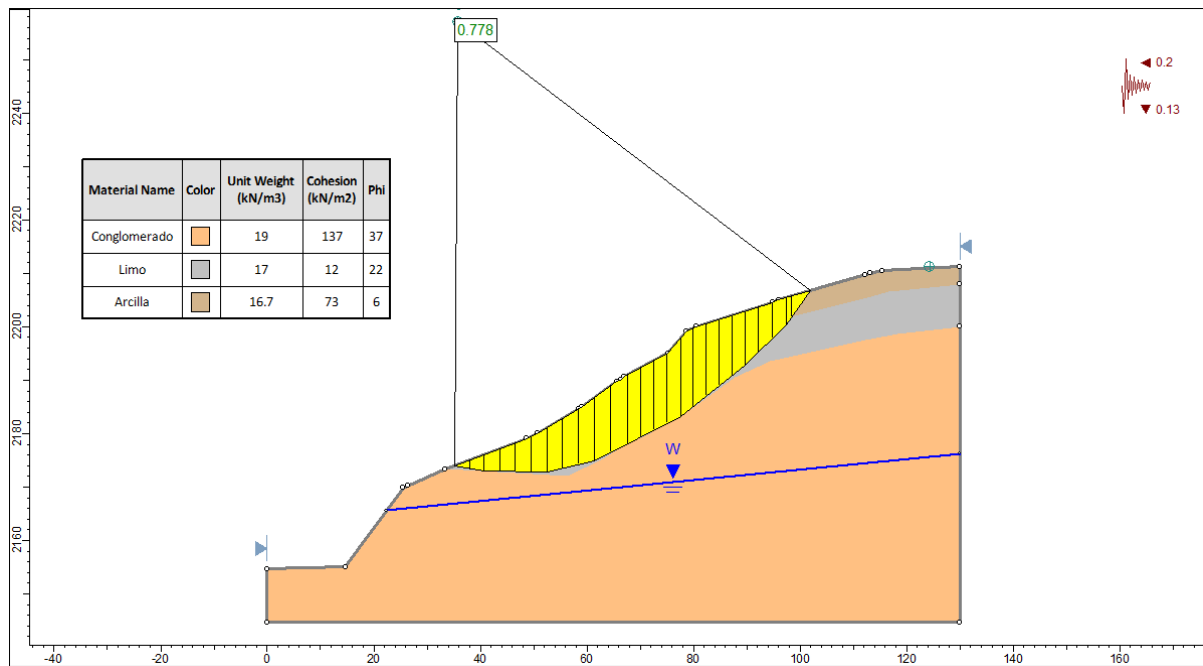
Imagen de la superficie de falla generada con el método de Morgenster-Price



Nota. Círculo de falla generado con el software de Roscience 1 para perfil 2, considerando la fase sísmica.

Figura 11

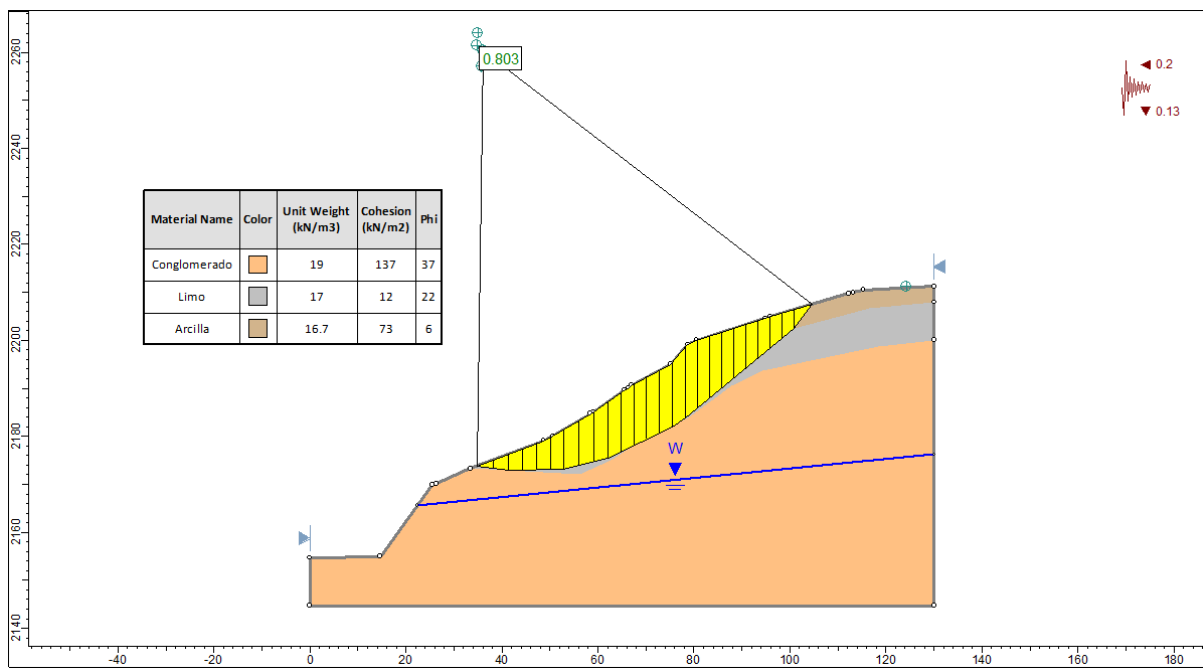
Imagen de la superficie de falla generada con el método de Janbú



Nota. Círculo de falla generado con el software de Roscience 1 para perfil 2, considerando la fase sísmica.

Figura 12

Imagen de la superficie de falla generada con el método de Bishop



Nota. Círculo de falla generado con el software de Roscience 1 para perfil 2, considerando la fase sísmica.

Se observó que la superficie de deslizamiento se genera en los estratos de limo y arcilla presentes en el talud. La superficie de rotura es un buen indicador sobre los movimientos que se producen en los taludes. El perfil 2 representa el caso más crítico y en este se puede observar que es un gran volumen de masa que se llegaría a deslizar si no se realiza un cambio de pendientes a la geometría del talud; los suelos con características de resistencia al corte más desfavorables corresponden al limo y la arcilla. El estrato de conglomerado por el que está conformado el talud tiene buenas propiedades geotécnicas, las cuales le permiten estar mucho más estable que los otros suelos.

Las propiedades como cohesión y ángulo de fricción de los suelos, establecen el modo de falla que se tendrá, el movimiento que podría suceder en el caso de que no se tomará una medida preventiva seguiría dándose por deslizamiento traslacional, este tipo de movimiento se analizó conforme se monitoreaba el talud. Debido a las lluvias, el suelo del talud se va lavando, lo cual ha generado que se generen escombros en las vías.

2.3 Medida de mitigación adoptada

Frente a los problemas presentes en la vía de integración barrial por los deslizamientos de los taludes, se requiere un método de estabilización. Los métodos más adecuados corresponden a aquellos que logran estabilidad de taludes con eficiencia económica, uno de estos corresponde al cambio de pendientes en la geometría del talud. Para el talud en análisis, basándose en el tipo de suelo presente, se han tomado pendientes y alturas de corte sugeridas.

La parte del talud en la que se realizarán los cambios de pendiente, corresponde al área generada como superficie de falla. Esta zona del talud cuenta con suelos arcillosos y limosos, considerando la tabla 4 de recomendaciones de pendiente para suelos cohesivos y rocas, se ha tomado altura de corte de 10m y con ello se han establecido pendientes que van desde 0.5H:1V a 0.8H:1V. En la corona del talud se consideró una zona estable, debido al asentamiento que presenta en el perfil y que se ha podido observar con el monitoreo de la zona del talud de análisis.

Para remediar todo el talud, estas pendientes se irán acoplando a las otras zonas como son el perfil 1 y 2, con base en la geometría se efectuarían los cortes para formar las terrazas del retaluzado. Es decir sobre la base del tipo de suelo se ejecutarán rellenos y cortes considerando las pendientes ya establecidas. El cambio de geometría de todo el talud contará con armonía, de forma que el cambio de pendientes en las zonas de los perfiles, se conecten y en conjunto brinden estabilidad al talud de la zona de análisis. Con el cambio de pendientes se analizó nuevamente el talud y los resultados obtenidos fueron mucho más altos, estos se presentan más adelante.

2.3.1 Bermas

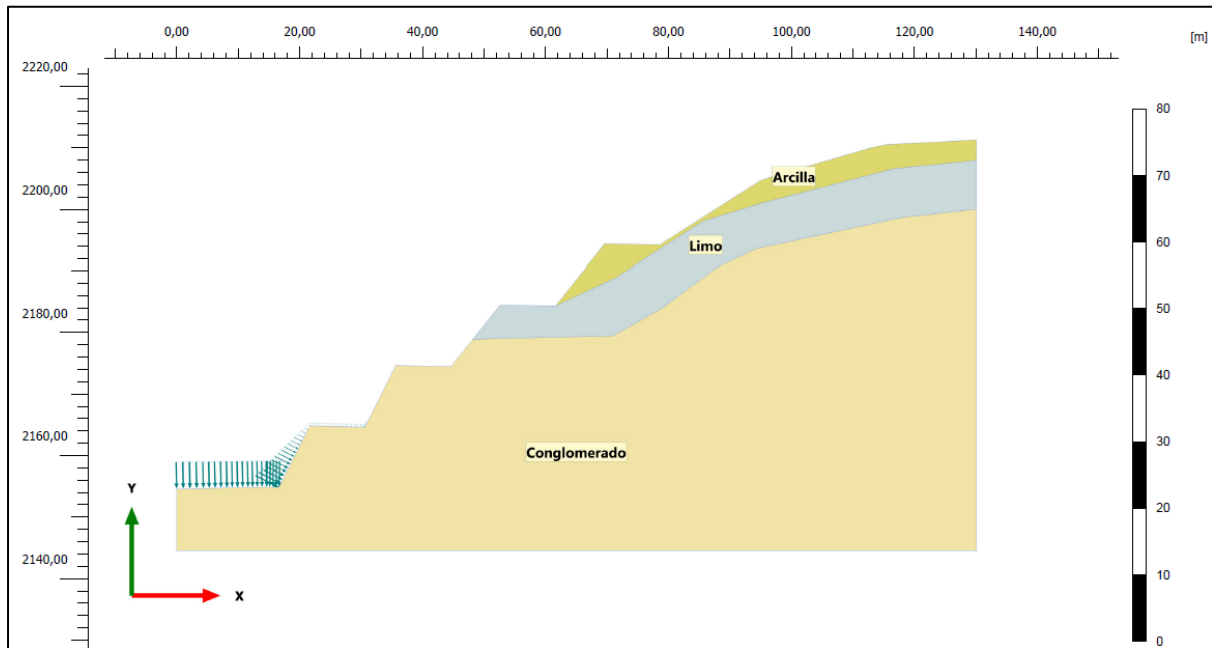
El empleo de bermas es necesario al momento de retaluzar. Las bermas corresponden a elementos estabilizadores para taludes, sirven para protección por erosión pluvial, para canalización de aguas y con ello se aumenta la seguridad ante fallos de las gradas que se encuentren en una parte más alta. Información recopilada recomienda una pendiente de berma de 2 a 10% hacia dentro del talud, esto con la finalidad de poder considerar medidas de drenaje como cunetas en la parte inferior, lo cual permitirá tener control de las aguas de escorrentía.

Las bermas consideradas para el talud de análisis son de 10 metros en todas las terrazas que conforman el talud. La pendiente considerada para las bermas son de 2%, ya que es necesario que las aguas de escorrentía caigan a las cunetas que se considerarán como medida preventiva de drenaje. La colocación de bermas se estableció para cada una de las gradas con la finalidad de que en caso de que ocurra un pequeño deslizamiento de las gradas superiores, la masa de suelo sea retenida en la berma de la grada inferior.

Combinar pendientes y bermas basándose en recomendaciones permitió reducir el círculo de falla que se produce en el talud, la estabilidad del mismo se evidencia con esta nueva superficie de falla, ya que con una medida de remediación, este se reduce considerablemente y aumenta el factor de seguridad en el talud. La figura 13 muestra el retaluzado que se estableció para el perfil 2, tomando en cuenta lo antes mencionado.

Figura 13

Imagen del perfil 2 con la nueva geometría



Nota. Retaluzado del perfil 2 en el software de Bentley, considerando pendientes y alturas de corte recomendadas.

2.3.2 Cunetas de coronación

Una medida adicional para la estabilidad del talud corresponde a considerar cunetas de coronación en las terrazas, como se mencionó las bermas cuentan con cierta pendiente hacia el talud, para que el agua producto de la lluvia caiga hacia las cunetas. La precipitación que cae por ciertas temporadas en la zona, hasta la actualidad ha desestabilizado en gran medida al talud, esto se ha observado con el monitoreo del mismo. Se evidencia la falta de un sistema de drenaje, esto ha provocado que el agua se infiltre en los suelos arcillosos y limosos, y ha generado deslizamiento del talud.

Las cunetas de coronación corresponden a un factor muy importante a tomar en cuenta para el talud, estas drenarían el agua que cae de la precipitación hacia canales que conecten con las cunetas de la vía, además, de esta forma no se generaría una gran presión de poros en los suelos. La presión de poros es un buen indicador de la fuerza que el agua genera en el suelo y como esta puede disminuir la resistencia de los materiales que conforman el talud de análisis.

2.4 Factor de seguridad y superficie de falla del talud con medida de mitigación

El análisis del talud con cambio de pendientes se realizó por los mismos métodos antes considerados. Los métodos de equilibrio límite son importantes en esencial por dos razones, una es que estos son fiables para evaluar la estabilidad de pendientes y otra es que requieren datos de entrada limitados (Prajapati & Maheshwari, 2016). Los métodos numéricos tomados para este análisis son mucho más precisos, pues consideran propiedades hidráulicas de los suelos, además de los parámetros de resistencia al corte. El perfil 2 del talud con la nueva geometría se analizó en las 2 fases previamente mencionadas, las cuales son considerando sismo y sin sismo.

En investigación de estabilidad de pendientes de taludes, el principal criterio para aceptar que la geometría del talud es adecuada, corresponde al factor de seguridad contra la falla que se genera a lo largo de una superficie de deslizamiento (Di et al., 2021). Las nuevas pendientes establecidas para el talud han permitido que el factor de seguridad aumente, alcanzando y sobrepasando los valores mínimos establecidos en normativa. Para este análisis se buscó que el factor de seguridad pase de 1 o 1.3 en la fase sísmica y no sísmica, esto tomando en cuenta lo recomendado en normativa y recomendaciones para que un talud sea estable. Un factor importante en el análisis para la fase sísmica es considerar la misma aceleración máxima en roca de 0.25 g, que se tomo en cuenta para el análisis de perfiles, esta aceleración está dada con base en zonas sísmicas de Ecuador (NEC-SE-DS: Peligro Sísmico. Diseño Sismo Resistente, 2014).

La tabla 8 muestra los resultados de factor de seguridad obtenido con los distintos software geotécnicos, en la primera columna de esta se presenta el método empleado y en las otras se muestra el software utilizado considerando la fase de análisis. En todos los casos se ha tenido una mejora del factor de seguridad, si se compara la tabla 6 que corresponde a los factores de seguridad del perfil 2 en su estado natural con la tabla 8, se puede observar la gran diferencia existente de los FS. Las pendientes consideradas en el análisis permitieron estabilizar el talud, en función del tipo de suelo por el que está conformado. El software

empleado permitió observar los mecanismos de falla y la distribución de parámetros que se consideran en la superficie de deslizamiento para obtener el factor de seguridad.

Tabla 8

Factor de seguridad para el perfil 2 con cambio de pendiente

Método	Con sismo			Sin sismo		
	Roscience	Roscience	Bentley	Roscience	Roscience	Bentley
	1	2		1	2	
Spencer	0.9	-	-	1.354	-	-
Morgenster-Price	0.904	-	-	1.362	-	-
Janbú	0.901	-	-	1.353	-	-
Bishop	0.913	-	-	1.360	-	-
Métodos numéricos	-	1.0	1.0	-	1.21	1.162

Nota. En esta tabla se presenta los factores de seguridad obtenidos para el perfil 2 en su con cambio de pendiente.

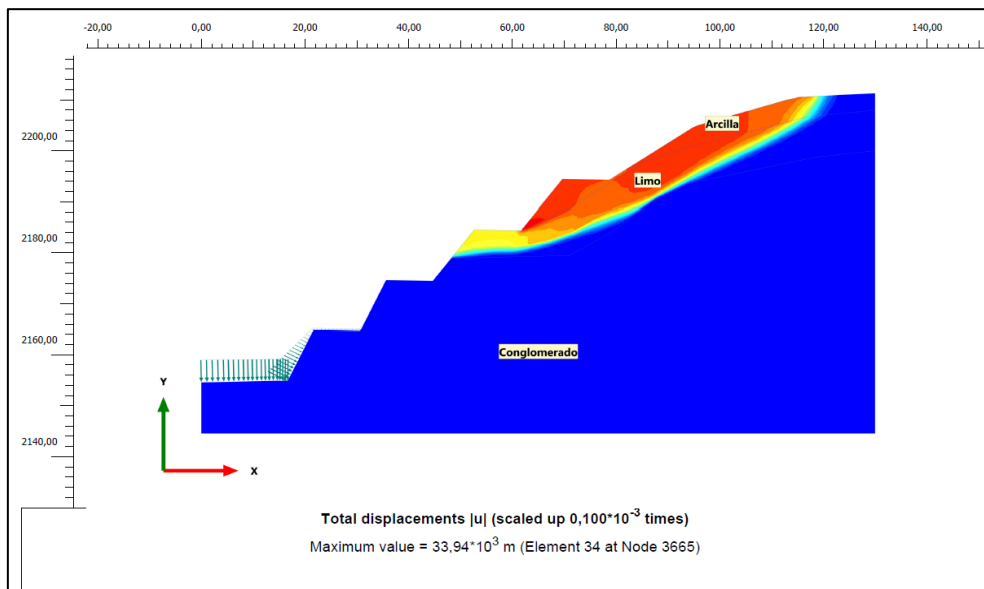
Al aumentar el factor de seguridad, se tiene una menor superficie de deslizamiento en el talud, esto se evidencia con los resultados obtenidos en los software. La superficie de falla se genera aún en los suelos que corresponden al limo y arcilla, esto debido a las propiedades geotécnicas de los mismos. La figura 14 presenta la superficie de falla obtenida con el software de Bentley y con el método de elementos finitos, la figura 15 presenta una simulación de como sería el deslizamiento en caso de que se llegue a producir por los distintos factores del medio ambiente, la figura 16, 17, 18 y 19 presentan la superficie de deslizamiento obtenida con el software de Roscience 1 para los otros métodos. La superficie de falla generada con los métodos de elementos finitos es igual debido a que esta fue generada con Auto Grid, la diferencia son las fuerzas que los métodos consideran en el análisis.

Frente a lo presentado, se evidencia que el factor de seguridad aumenta y pasa de 1, por lo que se considera estable con las nuevas pendientes tomadas en consideración. La superficie de rotura se redujo considerablemente, en caso de que se llegue a producir un pequeño deslizamiento, el material será retenido en las terrazas inferiores del talud. Optar por el cambio de pendientes en el talud de análisis corresponde a una medida satisfactoria que permite estabilizar el talud y de esta forma brindar un mejor espacio a la comunidad. Los

métodos que se aplicaron para el análisis del talud son fiables y permitieron corroborar que el cambio de pendientes es una buena medida, pues con esto se consiguieron factores de seguridad mucho más altos.

Figura 14

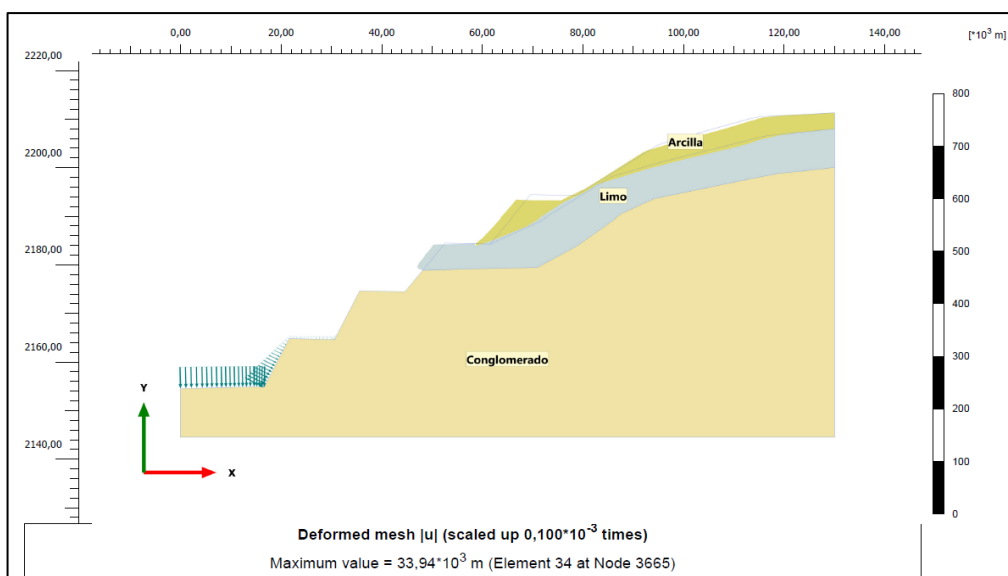
Imagen de la superficie de falla generada por el método de elementos finitos



Nota. Círculo de falla generado con el software de Bentley para perfil 2 con su nueva geometría.

necFigura 15

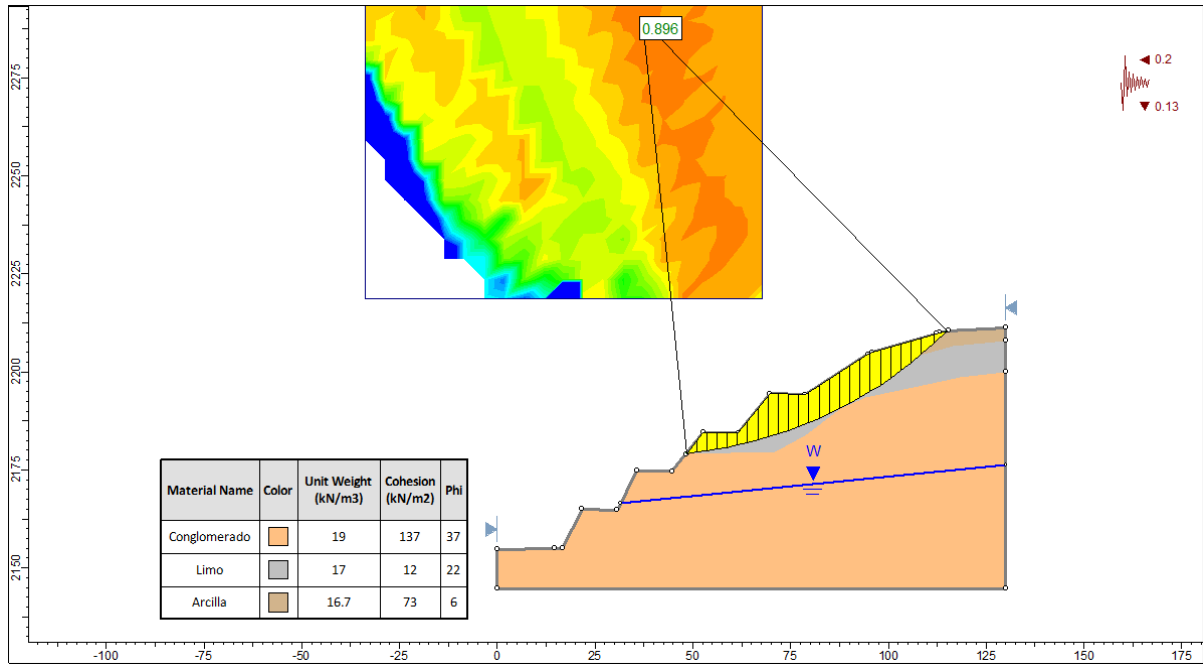
Imagen de la simulación del deslizamiento en la nueva geometría del talud



Nota. Pequeño deslizamiento que podría producirse en el talud con nuevas pendientes del perfil 2.

Figura 16

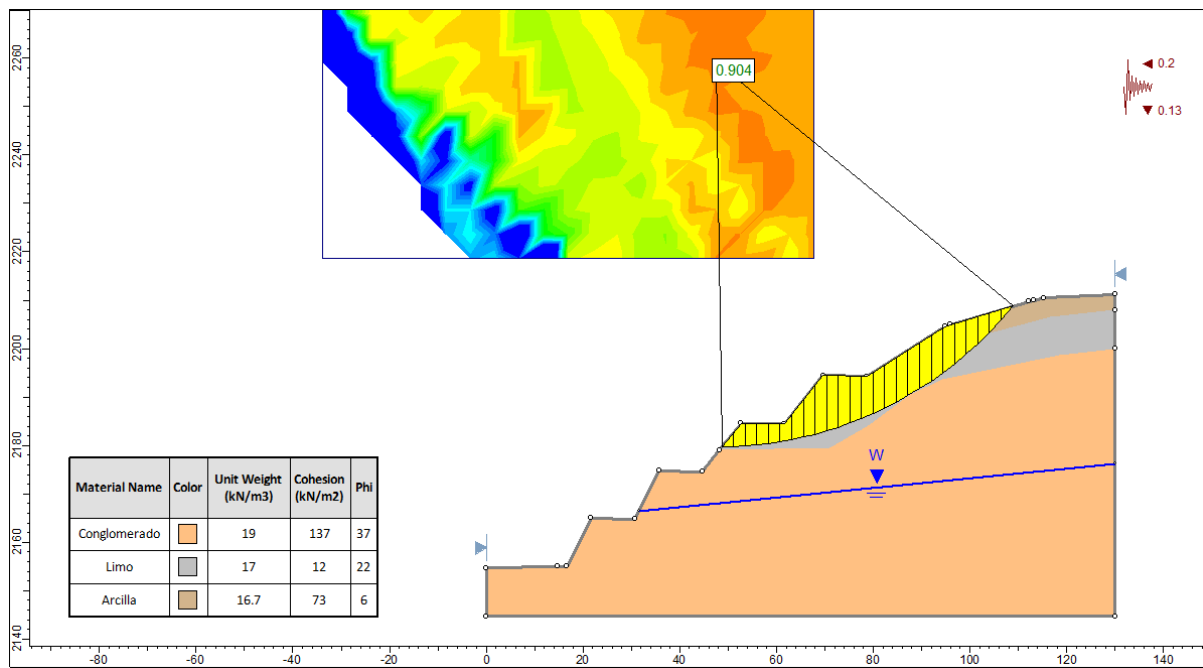
Imagen de la superficie de falla generada con el método de Spencer



Nota. Círculo de falla generado con el software de Roscience 1 para perfil 2 con nueva geometría, considerando la fase sísmica.

Figura 17

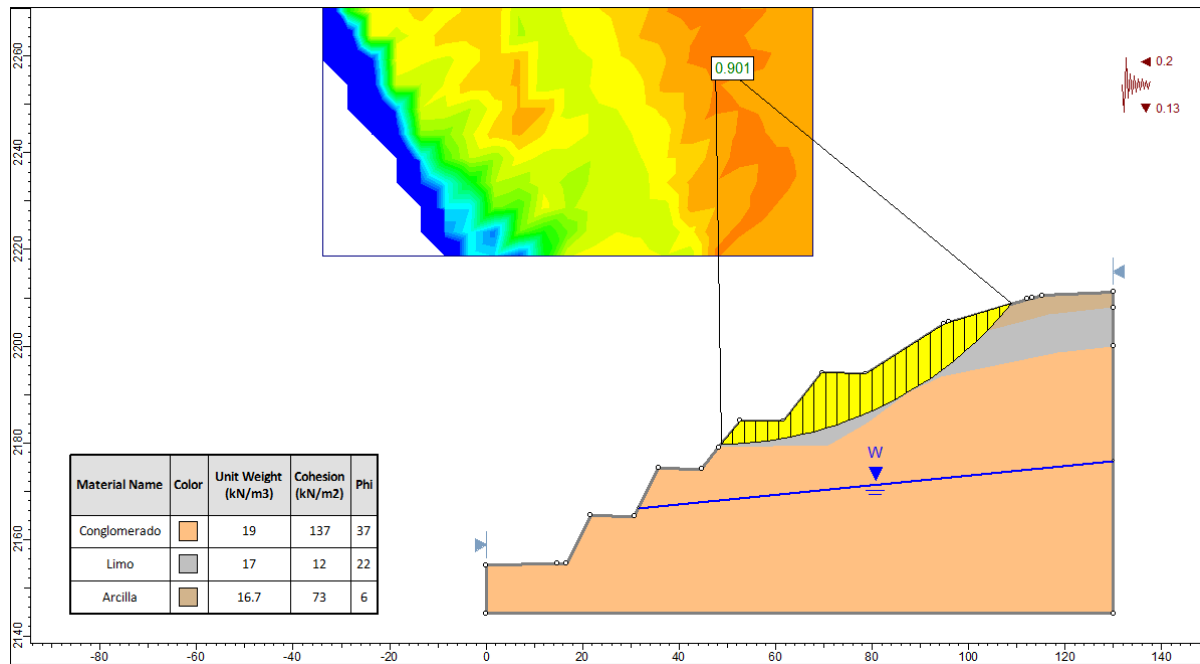
Imagen de la superficie de falla generada con el método de Morgenster-Price



Nota. Círculo de falla generado con el software de Roscience 1 para perfil 2 con nueva geometría, considerando la fase sísmica.

Figura 18

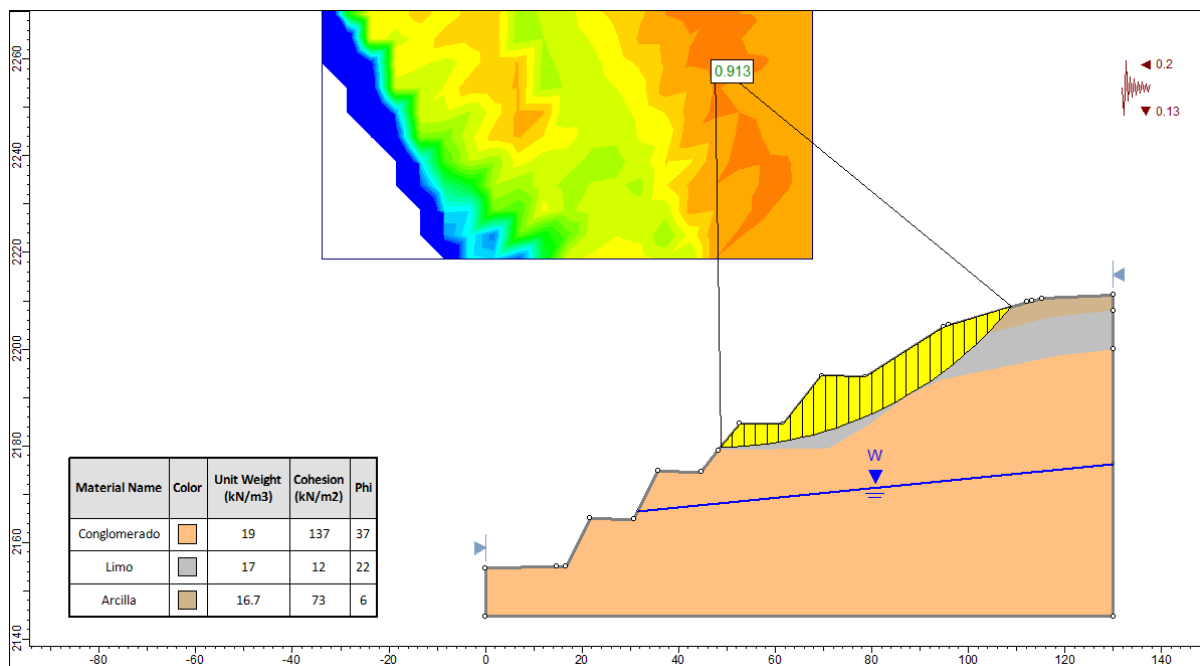
Imagen de la superficie de falla generada con el método de Janbú



Nota. Círculo de falla generado con el software de Roscience 1 para perfil 2 con nueva geometría, considerando la fase sísmica.

Figura 19

Imagen de la superficie de falla generada con el método de Bishop



Nota. Círculo de falla generado con el software de Roscience 1 para perfil 2 con nueva geometría, considerando la fase sísmica.

Conclusiones

El análisis de estabilidad de pendientes de un talud es una gran forma para poder evitar daños por deslizamientos de tierra. Los deslizamientos causados en la vía de integración barrial por diversos factores del medio ambiente, han generado grandes molestias al tránsito de la vía y a la comunidad. Estimar pendientes para el cambio de la geometría del talud basándose en los parámetros de resistencia al corte de los suelos que lo componen, corresponde a una buena medida de mitigación con la que se puede aumentar el factor de seguridad.

Los estudios geotécnicos realizados en la zona permiten estimar las propiedades de los suelos que se encontraron en el talud. El monitoreo del área de estudio permitió efectuar un reconocimiento en campo de los suelos y establecer la estratigrafía presente en el análisis del talud, se encontró que el talud está conformado por conglomerado, limo y arcilla. El modo de falla del talud corresponde a deslizamiento traslacional, la superficie de falla generada en los software geotécnicos fue coincidente a lo observado en el monitoreo del mismo. En el tiempo de monitoreo, las precipitaciones que se produjeron en la zona han generado más inestabilidad en el talud, por ende, mayor cantidad de escombros en la vía.

El análisis del talud fue elemental para considerar un perfil crítico, que corresponde al perfil en el que los resultados del factor de seguridad es menor. El perfil crítico es importante para el cambio de pendiente del talud. Para ello, es necesario que dependiendo de las propiedades de los suelos, se asuman ciertos criterios de comportamiento frente a factores ambientales externos como las precipitaciones y sismos, con la finalidad de obtener una superficie de falla similar a la que se producía en ese punto de análisis.

Se aplicó el análisis con métodos de equilibrio límite y métodos numéricos para el talud localizado en la vía de integración barrial. Con respecto a los métodos de equilibrio límite, la diferencia entre estos radica en las fuerzas que se consideran en las dovelas generadas en la superficie de falla. El método de equilibrio límite es un buen indicador para el análisis de estabilidad de taludes y de gran utilidad en diversos estudios de diferentes zonas. El método de Morgenster Price, Bishop y Spencer tienen resultados mayores de FS

al método de Janbú, su relación se debe a que estos tres métodos analizan momentos entre las dovelas, mientras que Janbú solo considera las fuerzas de corte producidas entre las dovelas.

El método numérico aplicado corresponde al análisis de elementos finitos, este se distingue por considerar la teoría de tensión-deformación, por ello, es uno de los métodos más utilizados para el análisis de estabilidad. Los parámetros necesarios para el análisis en los métodos de equilibrio límite y elementos finitos corresponden al peso específico del suelo, la cohesión, ángulo de fricción, peso específico del suelo saturado. El método de elementos finitos emplea dos parámetros adicionales para el análisis, estos corresponden al módulo de Poisson y módulo de Young (módulo de elasticidad). Los resultados obtenidos con el método de elementos finitos son menores a los obtenidos con los métodos de equilibrio límite, esto se debe a la precisión del método.

Los métodos empleados en el análisis de estabilidad de taludes han sido desarrollados en diferentes software geotécnicos. Los software geotécnicos como son Roscience y Bentley han proporcionado una manera más comprensible de observar las fuerzas que actúan en los métodos y de esta forma analizar la superficie de falla que se genera en el talud. La precisión de los resultados depende de la superficie de falla que se genere. Los software geotécnicos dan los resultados de factor de seguridad, basándose en la estratigrafía de los perfiles del talud y de los parámetros de resistencia al corte que caracterizan a los suelos del talud.

Los resultados obtenidos de factor de seguridad al analizar el talud en su estado natural y con la fase sísmica, fueron menores a un FS de 1, en el caso del perfil 2 y 3, con ello se evidencia la inestabilidad del talud. El perfil 1 presenta valores de FS mayores a 1, esto se debe a que en dicha zona del talud se ha producido un efecto de "lavado", lo cual ha generado que este lado se encuentre estable. Existe evidencia de una disminución en los resultados de FS para todos los modelos cuando se agrega sismo, por lo que se toma esta fase para comparar los perfiles y de esta forma tomar el menor valor de factor de seguridad para diseño de una obra o análisis de medida de mitigación.

Estudios realizados en los suelos han permitido que se den recomendaciones para pendientes y alturas de corte. Información bibliográfica sobre la estabilidad de taludes y pendientes recomendadas, permitió establecer un cambio en la geometría del talud. Sobre la base de la potencia de los estratos de suelo encontrados en el talud, específicamente de limo y arcilla, los cuales cuentan con características deficientes, se efectuó un modelo con nuevas pendientes para el perfil 2. Las relaciones de pendientes fueron 0.5H:1V a 0.8H:1V según el tipo de suelo del estrato, las alturas de corte fueron de 10 m, con este cambio se lograron obtener mejores resultados en el factor de seguridad. Un aspecto muy importante a considerar en el cambio de geometría son las bermas de las terrazas, pues la inclinación de estas permite que el agua superficial sea llevada hacia el sistema de drenaje, esta medida adicional permite generar mayor estabilidad del talud.

Los resultados con cambio de pendientes en el talud fueron mayores a un FS de 1 considerando la fase sin sismo, mientras que considerando la fase sísmica se obtuvieron valores cercanos a 1, esto es permisible porque, después del evento sísmico, deformaciones permanentes se pueden presentar y lograr la estabilidad del talud. El factor de seguridad obtenido con el método de elementos finitos en software de Bentley teniendo en cuenta la fase sin sismo fue de 1.16, lo que indica que las pendientes estimadas para dicho talud producirían estabilidad en el mismo. Las obras de mitigación para estabilidad de taludes son de gran importancia para garantizar la seguridad de la comunidad cercana a los taludes con problemas, toda obra de ingeniería tiene relación con el análisis de estabilidad de pendientes, por ello la ejecución de dicho análisis es esencial en los proyectos de ingeniería.

Recomendaciones

La cantidad de masa deslizada durante el periodo de estudio debe ser considerada en el análisis de estabilidad de taludes, el monitoreo del área colindante al talud permite observar el tipo de movimiento generado y con ello establecer si hay riesgo de movimiento en masa o si esta se encuentra estable.

Para estudios que requieran trabajos de estabilidad de taludes, es recomendable realizar un estudio geotécnico detallado del suelo, con la finalidad de obtener la información necesaria para los métodos de análisis descritos en este documento, esto incluye identificar el perfil crítico o zona crítica del talud, pues esto depende de los parámetros geotécnicos obtenidos de los sondeos.

Es recomendable determinar el factor de seguridad del talud en diferentes escenarios, con ello se plantean las medidas de mitigación necesarias para la estabilidad del talud en el escenario más crítico. En la mayoría de casos, los escenarios más importantes corresponden a la fase de análisis sísmico.

Las medidas de mitigación deben tomar en cuenta la escorrentía superficial y drenaje en la zona del talud, esto permite obtener mayor estabilidad del talud frente a factores externos como la precipitación. Las bermas de las terrazas son de gran interés para el control de la escorrentía superficial.

En el caso de que se ejecuten construcciones civiles en la zona de estudio se debe tener especial interés en estudios geotécnicos de los suelos, así como también el cumplimiento de normas de la construcción vigentes en el país.

Referencias

- Acosta, G. (2014). *Estudios del paso lateral*.
- Aguilar, O. A., & Zuñiga, C. E. (2015). *Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas aledañas al cerro de la Popa, Casco Urbano de Cartagena* [Tesis de grado, Universidad de Cartagena].
<https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>
- Azorin, R. (2014). *Análisis de Estabilidad de Taludes mediante técnicas de modelación numérica en 3D utilizando Plaxis 3D Foundation* [Tesis de grado]. Universidad Central “Marta Abrell” de las Villas.
- Cueva, M. F. (2017). *Análisis del sistema de construcción de la vía de integración barrial de la ciudad de Loja* [Tesis de maestría]. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Di, B., Stamatopoulos, C. A., Stamatopoulos, A. C., Liu, E., & Balla, L. (2021). Proposal, application and partial validation of a simplified expression evaluating the stability of sandy slopes under rainfall conditions. *Geomorphology*, 395, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107966>
- Domínguez, M. (2018). *Análisis de taludes por el método de Bishop* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Escobar, C., & Escobar, G. (2017). Análisis De Estabilidad De Taludes. *Geotecnia para el trópico andino*, 167–235. <http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/>
- Estrada, V., & Soberanis, J. (2014). *Estabilidad de Taludes en Suelos* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gurruchaga R., D., & Viscarra A., F. (2020). Slope stability analysis by finite elements: a case study in La Paz-Bolivia. *Investigacion & Desarrollo*, 20(1), 99–111.
<https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-8i>
- Harabinová, S., Kotrasová, K., Kormaníková, E., & Hegedüsová, I. (2021). Analysis of Slope Stability. *Civil and Environmental Engineering*, 17(1), 192–199.
<https://doi.org/10.2478/cee-2021-0020>
- Instituto Nacional de Vías. (1998). *Manual de Estabilidad de Taludes*.

- Jiménez, B. C. (2015). “ *Susceptibilidad a deslizamientos en la vía de Integración Barrial desde el KM 5 + 400 m hasta el KM 6 + 300 m en el sector Occidental del cantón Loja* ” [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Loja.
- Mesa, M., & Piusseaut, E. (2018). Análisis de la estabilidad de taludes en terraplenes mediante los métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos. *Revista Cubana de Ingeniería*, IX(1), 49–56.
- Municipio de Loja. (2014). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Loja*.
- Muñoz, V. (2012). *Modelación numérica de procesos geológicos* [Tesis de grado, Universidad Austral de Chile].
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov.myaccess.library.utoronto.ca/pubmed/11720961>
- Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible. In *Revista de Derecho Ambiental* (Issue 10). <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2018.52077>
- NEC. (2014). *NEC-SE-DS: Peligro sísmico. Diseño sismo resistente*.
- NEC. (2014). *NEC-SE-GC Geotecnia y cimentaciones*.
- Oyola, R., & Vaca, L. (2018). Uso de la teoría de Mohr-Coulomb para explicar el mejoramiento de suelos mediante el proceso de compactación. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 12, 1–11.
- Plaxis, & Haag, D. O. C. Den. (2004). *PLAXIS Reference manual Spanish*.
 papers3://publication/uuid/4BFC9BD8-4833-4800-AD8A-842E2B6D99AD
- Prajapati, S., & Maheshwari, B. K. (2016). Slope Stability Evaluation by Different Limit Equilibrium Methods. *INDOROCK*, 41, 1–23.
- Quezada, G. (2015). “*Susceptibilidad a deslizamientos en la zona de influencia de la vía de integración barrial, desde la ciudadela Julio Ordoñez hasta el barrio Capulí, perteneciente a la ciudad de Loja*” [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Loja.
- Rodriguez, E. E., & Rosales, I. M. (2014). “*Evaluación de estabilidad de talud en carreteras de Cacaopera-Corinto, tramos 1+450 y 1+690*” [Tesis de grado]. Universidad de El Salvador.

- Roul, A. R., Pradhan, S. P., & Mohanty, D. P. (2021). Investigation to slope instability along railway cut slopes in Eastern Ghats mountain range, India: A comparative study based on slope mass rating, finite element modelling and probabilistic methods. *Journal of Earth System Science*, 130(206). <https://doi.org/10.1007/s12040-021-01711-1>
- Suárez, J. (2012). Métodos de Manejo y Estabilización. *Deslizamientos: Técnicas de Remediación*, 1–46.
- Suárez, J. (1998). Modelos de Análisis de Estabilidad 4.1. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, 117–150.
- Suárez, Y. R. R. (2019). *Análisis de estabilidad de taludes aplicando técnicas de revegetalización* [Tesis de Maestría]. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.