

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La erosión acelerada por la intervención del hombre, sobre todo, en la apertura de vías de comunicación, es un problema con consecuencias graves a medida que pasa el tiempo, afecta de manera preocupante al medio ambiente, tornándose un problema ecológico. En la mayor parte de los lugares afectados, se realizan movimientos de tierras en volúmenes considerables, sin prever las consecuencias, al igual se va eliminando la cubierta vegetal natural. Cuando esto ocurre en áreas de fuerte pendiente y alta pluviosidad, se provoca un incremento en el proceso de erosión y riesgo de los materiales de los taludes que pierden estabilidad, por lo que deben buscarse acciones de refuerzo para eliminar o minimizar los riesgos. (ONU, 2022).

Para analizar y cuantificar estos procesos erosivos en los taludes y para llegar eventualmente a la instalación de las medidas de refuerzo más recomendables, se necesitan metodologías de análisis de manera que la estabilidad de los taludes a través de los refuerzos a realizarse pueda evitar los riesgos en el desprendimiento y deslizamiento de los taludes, lo cual depende de las características del suelo, de la pendiente, del tipo de cobertura vegetal y estabilidad. (NATURALES, 2008).

1.2. Situación Problemática

En la región es muy común observar que uno de los problemas que se deben solucionar es el deslizamiento de taludes, que pueden ser causados por diferentes motivos ya sean atmosféricos, geológicos, geométricos o por la acción del hombre, por este motivo es importante realizar análisis de estabilidad de taludes que nos permita brindar oportunamente alternativas de solución a problemas de inestabilidad y evitar pérdidas ocasionadas por deslizamientos.

La relevancia de este estudio de aplicación, radica en la necesidad de realizar un análisis de estabilidad de taludes y para ello poder determinar el factor de seguridad de cada talud y hacer una valoración de los resultados para establecer si los talud son estables o inestables, de esta manera plantear medidas correctivas de manera oportuna que nos ayuden a evitar un posible deslizamiento de los taludes ubicados en el tramo Saladito Timboy Tabasay y así evitar causales de mayor implicación como ser la accidentabilidad y transitabilidad en las carreteras a las zonas subtropicales de nuestro departamento.

1.3. Problema

¿De qué manera al realizar el Análisis de Estabilidad de taludes en el tramo Saladito Timboy Tabasay, se determinará los métodos de estabilidad para obtener el factor de seguridad utilizando el programa Slide?

1.4. Justificación

La inestabilidad de taludes es una de las causales de mayor implicación en la accidentabilidad y transpirabilidad en las carreteras a las zonas subtropicales de nuestro departamento.

Se aplicará para tener una vía segura, que evitará la pérdida de vidas humanas por accidentes, se garantiza el tráfico seguro y permanente de vehículos que permite el transporte de la producción agrícola y ganadera de la zona y el aprovisionamiento de insumos para la industria, el comercio y el turismo.

Por el trabajo que se realiza y la experiencia en la construcción de carreteras del departamento y resto del país se considera que es Factible realizarlo. Debido a la importancia de la vía, ésta no puede permanecer expuesta a los fenómenos de la naturaleza que la destruyen.

En esta aplicación, entre las alternativas para estabilizar el talud se escogerá la más segura y económica que indicaran los estudios geotécnicos, viales y financieros, como la modificación de la geometría, taludes con bermas, diseño apropiado de la inclinación de taludes utilizando el método sueco o de dovelas. (SCIELO, 2018).

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar la estabilidad de los taludes en el tramo Saladito Timboy Tabasay aplicando el programa computacional Slide.

1.5.2. Objetivos específicos

- Analizar modelos de estabilidad del talud, para conocer el factor de Seguridad utilizando la modelación del programa computacional Slide.
- Realizar mediciones de los taludes críticos en mencionado tramo con el fin de conocer las dimensiones de los mismos.
- Caracterizar los materiales componentes del talud, para identificar los diferentes tipos de suelos, que serán sometidas a ensayos de laboratorio con el fin de determinar sus características físicas y mecánicas.
- Determinar la estabilidad de los taludes utilizando el programa Slide, para obtener el factor de seguridad en cada talud de estudio.
- Aplicar los resultados de ensayo de la caracterización de los materiales componentes del talud, para determinar su estabilidad.
- Aportar con criterios técnicos para el mantenimiento adecuado de taludes y proponer medidas de mitigación, para proveer una posible solución a la problemática planteada.
- Establecer conclusiones y recomendación en base a los resultados obtenidos del análisis de estabilidad de taludes utilizando el programa Slide.

1.6. Hipótesis

Si aplico el estudio del análisis de estabilidad de taludes utilizando el programa Slide, que este consiste en la determinación del factor de seguridad ($FS \geq 1,5$), nos permitió determinar el grado de estabilidad de un talud, entonces podemos evaluar y afirmar si un talud es estable o inestable, que también nos dio como resultado múltiples valores de factores de seguridad por cada talud estudiado de manera que dicha información nos brinde seguridad y valoración por los resultados obtenidos.

1.6.1. Operacionalización de las variables

1.6.1.1. Variable independiente

Análisis de Estabilidad de Taludes en el tramo Saladito Timboy Tabasay

Tabla N° 1 Conceptualización de la variable independiente

Variable	Conceptualización	Indicador	Medición
Independiente Análisis de Estabilidad de Taludes en el tramo Saladito Timboy Tabasay	Taludes	Morfología	m2
		Altura	m
		Pendiente	grados sex.
	Geotecnia o propiedades de resistencia	Ángulo de fricción	grados sex
		Cohesión	KN/m2
		Peso unitario	KN/m3
	Topografía	Levantamiento	m2
		Perfil Transversales	Cada 10 m
		Replanteo	ml/ talud

Fuente: Elaboración propia.

1.6.1.2. Variable dependiente

Aplicación con el programa Slide

Tabla N° 2 Conceptualización de la variable independiente

Variable	Conceptualización	Indicador	Medición
Dependiente Aplicación con el programa Slide	Factor de Seguridad	$= 1$ Equilibrio < 1 inestables $= 1,25$ Equilibrio insipiente $\geq 1,5$ Estable a largo plazo	adimensional
	Metodología de Equilibrio Limite	Bishop Simplificado	F.S.
		Spencer	F.S.
		Morgenterm – Prince	F.S.

Fuente: Elaboración propia.

1.7. Diseño metodológico

1.7.1. Unidades de estudio

El presente proyecto tiene su enfoque principal en el análisis de estabilidad de Taludes, este mencionado análisis se llega a convertir en el objetivo principal como unidad de estudio, y para poder realizarlo, los taludes en estudio estarán ligados a una serie de análisis de muestreos geométricos, caracterización de los materiales componentes y por medio de técnicas experimentales y computacionales poder obtener los factores de seguridad, para finalmente bajo cálculos de gabinete llevar a cabo un análisis de resultados, donde se determinara los diferentes grados de estabilidad de los taludes del tramo carretero en estudio.

1.7.2. Población

Para el desarrollo del proyecto de Aplicación se toma como población, el análisis de estabilidad de taludes utilizando el programa Slide para la determinación de los factores de seguridad , para que con dicha metodología aplicada se pueda establecer resultados que nos brinden seguridad de los diferentes resultados y grados de estabilidad de los taludes estudiados, basándonos en el parámetro que, el factor de seguridad mínimo controla la falla por capacidad de carga de un terraplén o talud sobre un suelo blando, a corto plazo, debe ser ($FS \geq 1,5$).

1.7.3. Muestra

Se presenta como la muestra del proyecto El análisis de estabilidad de taludes y la determinación de los factores de seguridad utilizando el programa Slide en el tramo Saladito Timboy Tabasay de la red departamental de Tarija, ubicado en la provincia O'Connor, abarcando una extensión de tramo de 10,1 km. datos referenciales que fueron considerados como sección representativa.

1.7.4. Muestreo

El primer muestreo que fue realizado en el tramo de estudio definido se llevó a cabo para el análisis de estabilidad de taludes utilizando el programa Slide en 10,1 km, 10 taludes y la realizar la recolección de las muestras representativas del material, en pie, cuerpo y cabeza de cada uno de los diez taludes objeto de estudio.

en pie cuerpo y cabecera, y que estas mismas serán estudiadas en laboratorio. El número de ensayos en laboratorio se expresa en datos obteniendo como resultados la cohesión, ángulo de fricción y pesos unitarios, y caracterización de los diferentes tipos de suelos. Y para la segunda muestra está la toma la medición geométrica, obteniendo la forma adecuada de cada talud para luego representarlas en perfiles transversales y longitudinales, esta medición se realizará en 10 taludes distintos del tramo seleccionado.

1.8. Métodos y técnicas empleadas

1.8.1. Métodos

El método inductivo, como tal, sigue una serie de pasos. Inicia por la observación de determinados hechos, los cuales registra, analiza y compara. A continuación, clasifica la observación obtenida, establece patrones, hace generalizaciones para inferir de todo lo anterior una aplicación o teoría.

El método inductivo es una estrategia de razonamiento que se basa en la inducción para ello procede a partir de premisas particulares para generar conclusiones generales. En este sentido el método inductivo opera realizando generalizaciones amplias apoyándose en observaciones específicas. Esto es así porque en el razonamiento inductivo las premisas son las que proporcionan la evidencia que dota de veracidad con una conclusión.

Con este método ya definido en los párrafos anteriores se desarrollará el presente proyecto mediante la aplicación de acciones específicas, que va a regir en la toma de datos, que estará basado en la aplicación de la estabilidad de taludes utilizando el programa Slide para obtener los factores de seguridad, esta aplicación de estabilidad será en un tramo específico con características propias de la zona de la red departamental de Tarija, del cual se realizara la caracterización de los materiales componentes de cada talud en situ, para que con todas estas acciones se realice un análisis en laboratorio que estas permitirán realizarle un análisis de estabilidad de los taludes de dicho tramo en estudio, y para finalmente poder establecer conclusiones a cerca del análisis de estabilidad de taludes mediante el programa Slide.

1.8.2. Técnicas

Para el desarrollo del proyecto de aplicaciones distinguen dos técnicas la técnica experimentales, 1 técnica de medición y 1 técnica de diagnóstico.

1.9. Procesamiento de la información

- **Estadística descriptiva**

Es la técnica matemática que obtiene, organiza, presenta y describe un conjunto de datos con el propósito de facilitar el uso, generalmente con el apoyo de tablas, medidas numéricas o gráficas. Estas técnicas son utilizadas en el proceso de investigación, en la etapa donde el investigador necesita procesar y analizar los datos recolectados en dicho estudio.

- **Media aritmética**

La media se calcula sencillamente sumando los distintos valores de x y dividiendo por el número de datos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{N}$$

Donde:

\bar{x} = Valor de media aritmética

x_n = Valores de muestras obtenidas

N = Número de muestras

- **Mediana**

Una medida de centralización importante es la mediana Me. Se define ésta como una medida central tal que, con los datos ordenados de menor a mayor, el 50 % de los datos son inferiores a su valor y el 50 % de los datos tienen valores superiores. Es decir, la mediana divide en dos partes iguales la distribución de frecuencias.

- **Moda**

Se define la moda M_o de una muestra como aquel valor de la variable que tiene una frecuencia máxima. En otras palabras, es el valor que más se repite.

- **Media ponderada**

La media ponderada (MP) es una medida de centralización. Consiste en otorgar a cada observación del conjunto de datos (X_1, X_2, \dots, X_N) unos pesos (p_1, p_2, \dots, p_N) según la importancia de cada elemento. Cuanto más grande sea el peso de un elemento, más importante se considera que es este.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \frac{x_1 w_1 + x_2 w_2 + x_3 w_3 + \dots + x_n w_n}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n}$$

Donde:

\bar{x} = Valor de media ponderada

x_n = Valores de muestras obtenidas

w = Pesos

- **Desviación Estándar**

Es una medida de dispersión usada en estadística que nos dice cuanto tienden a alejarse los valores concretos del promedio en una distribución.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Donde:

S = Valor de la desviación estándar

\bar{x} = Valor de media aritmética

x_i = Valor de cada muestra obtenida

N = Número de muestras

1.10. Alcance del proyecto de aplicación

1.10.1. Alcance general

El proyecto del análisis de estabilidad de taludes utilizando el programa Slide, se divide en 2 partes principales, esta primera es la preparación previa a la parte práctica que será la recolección de todos los antecedentes que nos llevan a esta aplicación, identificado cual es problema principal y ante este justificar porque es necesario realizar un análisis de estabilidad de taludes en un tramo de la red departamental del departamento de Tarija.

Para poder llevar a cabo el proyecto se necesita conocer una justificación teórica de todo lo relacionado al análisis de estabilidad de taludes, toma de muestras, prácticas de laboratorio y determinación de los factores de seguridad de cada talud, porque con estos conceptos se puede establecer relaciones y conclusiones de los taludes estudiados.

La segunda etapa nos llevara a la determinación del análisis de estabilidad de taludes utilizando el programa Slide para poder determinar los factores de seguridad. Donde estas se desarrollarán aplicando técnicas de diagnóstico para realizar los cálculos respectivos y hacer una interpretación a estos resultados. Con esos finalmente llegar a la conclusión si nuestros objetivos fueron cumplidos.

1.10.2. Alcance por capítulos

En esta primera sección se realizará la exposición teórica del porque se quiere realizar el análisis de estabilidad de taludes utilizando el programa Slide. Empezando con características generales que enfoquen de manera global todo el trabajo, teniendo ya esto definido ir desglosando puntualmente que justificación se asume ante el proyecto identificando el problema principal que nos lleva a considerar esta aplicación como importante para el análisis de estabilidad de taludes en la red departamental de Tarija. Cada uno de estos puntos del capítulo arma esquemáticamente cuales son los factores influyentes, dependientes e independientes para elaborar finalmente un flujograma de aplicación.

Para poder realizar el proyecto de aplicación, es de mucha necesidad conocer de manera teórica, las características y aspectos que representen la forma y partes de un talud y así mismo conocer distintos factores que intervienen en la inestabilidad ya sea por deslizamientos, tipos de fallas, que estos pueden ser provocados por condiciones atmosféricas como ser principalmente por las lluvias las provocar erosiones y derrumbes, también es importante conocer los aspectos geológicos de la zona, debido a estos factores desfavorables es necesario realizar un análisis de estabilidad de taludes utilizando técnicas y software para así poder determinar los grados de estabilidad de los taludes mediante la obtención de los factores de seguridad, dicho análisis tendrá que estar ligado a una serie de métodos y cálculos respectivos para la obtención adecuada de los resultados.

Este capítulo es considerado el más importante de todo el proyecto de aplicación, aquí se desglosa de manera práctica todas nuestras técnicas establecidas en un inicio, donde el flujograma de aplicación se ejecuta paso a paso. Empieza en la elección del tramo, características generales de la zona, definiendo los taludes que se consideran representativos, y es aquí que mediante la caracterización y medición de cada talud realizamos los ensayos respectivos en laboratorio como ser ensayo de granulometría, peso unitario y ensayo de corte directo, que mediante un procedimiento secuencial de cálculos en base a resultados de laboratorio y técnicas de medición, desarrollar el análisis de estabilidad de taludes mediante el programa Slide para posteriormente concluir con un análisis de resultados.

Realizado el análisis de resultados se puede realizar las debidas conclusiones respecto a la aplicación del análisis de estabilidad de taludes, donde se dirá expresamente si el objetivo principal y los específicos fueron llevados a cabo, si la hipótesis planeada resulto verdadera o falsa, y finalmente establecer recomendaciones a futuro sobre las prácticas en campo y toma de muestras para realizar el laboratorio.

CAPÍTULO II

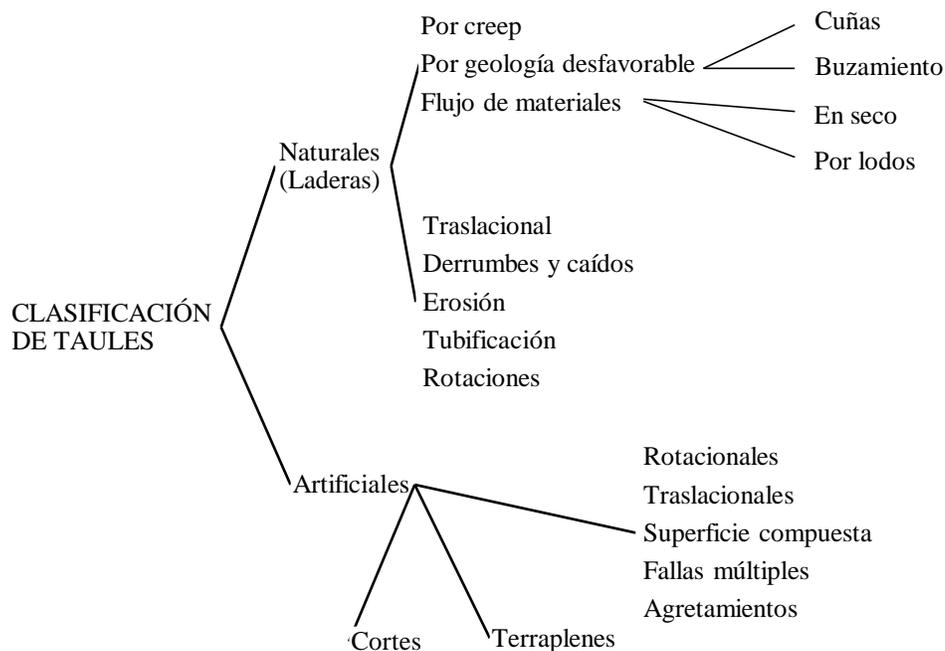
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Definición de talud

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente. Desde este punto de vista los taludes se dividen en naturales (laderas) o artificiales (cortes y terraplenes).

Los taludes o laderas que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad. Es necesario establecer una clasificación de taludes adecuada.

Gráfico N° 1 Clasificación de los taludes

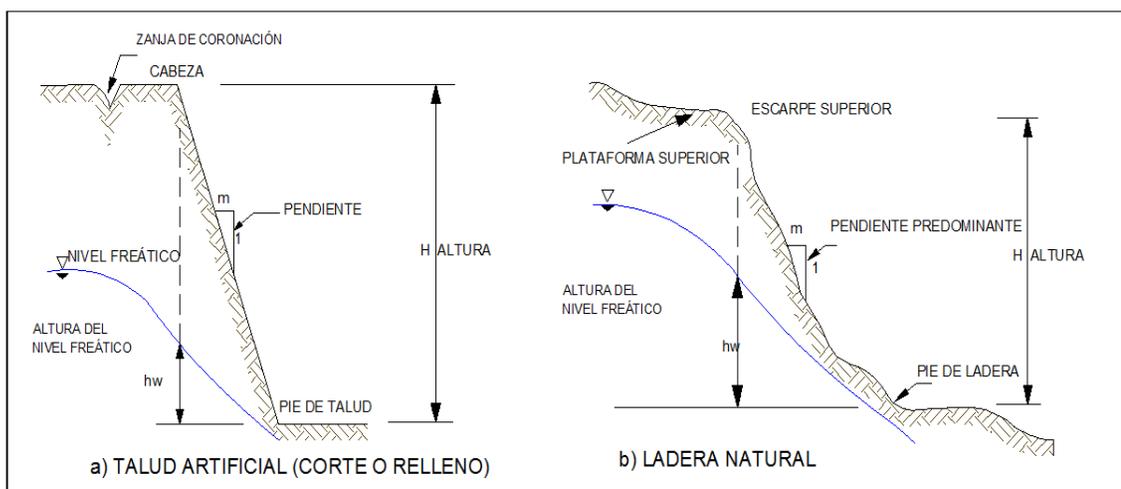


Fuente: Morales y Monrroy, R. (2008)

2.2. Partes de un talud

Existen algunos términos para definir las partes de un talud. El talud comprende una parte alta o superior convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe, donde se presentan procesos de erosión; una parte intermedia semi-recta y una parte baja o inferior cóncava con un pie o base.

Figura N° 1 Partes que conforman un talud inestable



Fuente: Armas-Zagoya

En el talud o ladera se definieron los siguientes elementos constitutivos:

2.2.1. Cabeza, cresta, cima o escarpe

Cabeza se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera. Cuando la pendiente de este punto hacia abajo es semi- vertical o de alta pendiente, se le denomina Escarpe. Los escarpes pueden coincidir con coronas de deslizamientos. La forma de la cabeza generalmente es convexa.

2.2.2. Pie o base

El pie corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. La forma del pie de una ladera es generalmente cóncava.

2.2.3. Altura

Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza generalmente no son accidentes topográficos bien marcados.

2.2.4. Altura de nivel freático

Es la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua (la presión en el agua es igual a la presión atmosférica). La altura del nivel freático se acostumbra medirla debajo de la cabeza del talud.

2.2.5. Pendiente

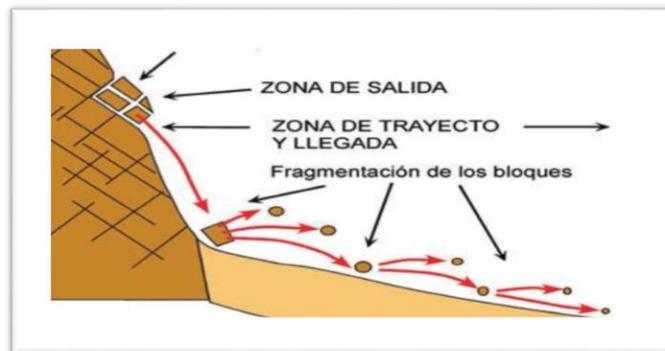
Es la medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m:1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo: $45^\circ = 100\% = 1H:1V$. Los suelos o rocas más resistentes generalmente forman laderas de mayor pendiente y los materiales de baja resistencia o blandos, tienden a formar laderas de baja pendiente.

2.3. Clasificación de movimientos en masa

2.3.1. Desprendimientos

Un desprendimiento (*rockfall* en inglés) es una masa rocosa, o de tierra, que se separa de una vertiente casi vertical y cae libremente a través del aire. La masa inestabilizada impacta en el terreno fragmentándose en porciones más pequeñas que siguen una trayectoria particular. Los volúmenes de los desprendimientos son extremadamente variables, desde las frecuentes caídas de bloques de pocos metros cúbicos, hasta la caída de grandes partes de una montaña que se manifiestan en casos muy excepcionales.

Figura N° 2 Desprendimientos



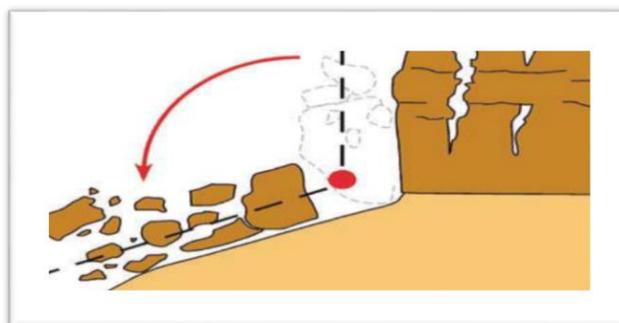
Fuente: Copons Llorens & Tallada, 2009

2.3.2. Volcamiento

Los vuelcos (*topple* en inglés) son columnas rocosas, o de tierras, que muestran un movimiento de rotación hacia delante y hacia el exterior de una ladera alrededor de un eje situado por debajo de su centro de gravedad (Cruden y Varnes, 1996).

Los vuelcos se producen principalmente en escarpes en donde existen fracturas verticales en el terreno que son las causantes de separar las columnas rocosas, o de tierras, susceptibles al vuelco. Las velocidades son, en su inicio lentas, pero suelen acelerarse hasta ser extremadamente rápidas. Los efectos destructivos son similares al desprendimiento.

Figura N° 3 Esquema del vuelco de una masa rocosa desprendida del sustrato rocoso



Fuente: Copons Llorens & Tallada, 2009

2.4. Existen tres tipos de volcamiento

2.4.1. Volcamiento a flexión

Columnas continuas se rompen y separan unas de otras en flexión a medida que se inclinan hacia adelante.

2.4.2. Volcamiento en v invertida

Consiste en la inclinación múltiple de una serie de bloques con centro de giro en la superficie inferior del sistema de volcamiento, el cual puede convertirse en una superficie de falla.

2.4.3. Flexión en bloque

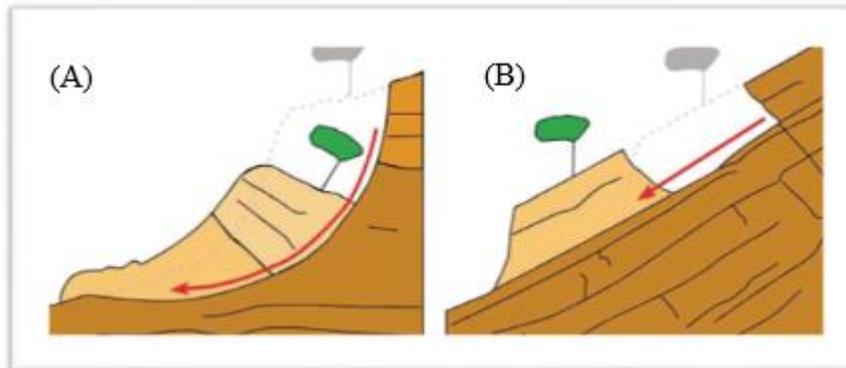
Flexión continua de columnas largas a través de desplazamientos acumulados a lo largo de las numerosas juntas.

2.5. Deslizamiento

Un deslizamiento (*slide* en inglés) es el movimiento de una porción de terreno a través de una superficie de rotura neta con la preservación general de la estructura interna original. Se puede diferenciar dos tipos de deslizamientos: los deslizamientos rotacionales en donde la superficie de rotura es circular, a modo de cuchara y los deslizamientos traslacionales donde la superficie de rotura es totalmente plana (Cruden y Varnes, 1996).

Los deslizamientos son especialmente frecuentes en laderas inclinadas, entre 20 y 50 grados, y con formaciones geológicas poco resistentes y cohesivas (lutitas arcillosas, margas, etc.). También son frecuentes en laderas formadas por rocas estratificadas con intercalaciones de capas delgadas de arcillas o lignitos. Es también la inestabilidad más frecuente en terraplenes antrópicos (Copons, 2007).

Figura N° 4 Esquema de deslizamiento rotacional (A) y traslacional (B)

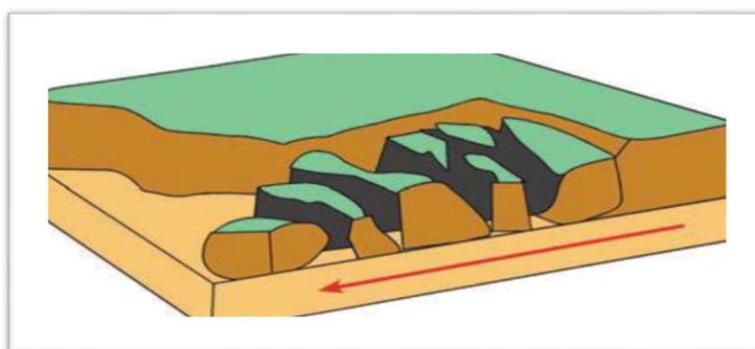


Fuente: Copons Llorens & Tallada, 2009

2.6. Expansión lateral

La expansión lateral (*lateral spread* en inglés) es un fenómeno caracterizado por el desplazamiento lateral de una vertiente combinado con la subsidencia de la cima. Las expansiones laterales más habituales se manifiestan en formaciones geológicas en donde existen formaciones duras situadas encima de una formación arcillosa propensa a la licuefacción. Como licuefacción se entiende a la transformación de un sedimento granular saturado en agua, poco consolidado y de una cierta consistencia, en una masa con las propiedades de un fluido debido a la vibración causada, por ejemplo, por un sismo, (Cruden y Varnes, 1996).

Figura N° 5 Esquema simplificado de una expansión lateral



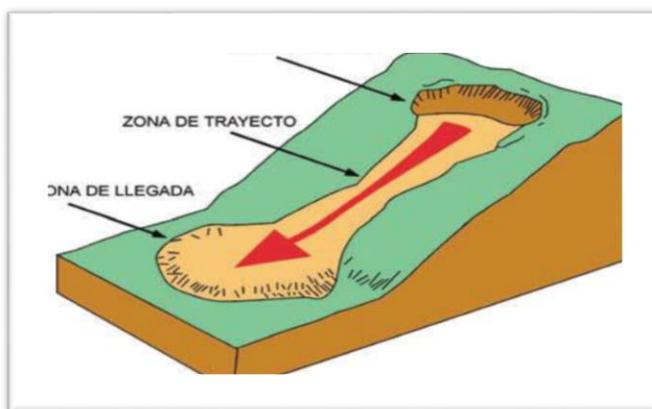
Fuente: Copons Llorens & Tallada, 2009

2.7. Flujos

Un flujo (*flow* en inglés) es un movimiento continuo, similar a un líquido viscoso, que no preserva la estructura interna original del material desplazado, sino que adopta la morfología de la vertiente por la que discurre.

La colada fangosa (*earthflow* en inglés) tiene lugar en materiales finos y cohesivos como son los limos y las arcillas. Se generan en vertientes moderadamente inclinadas, entre 20 y 50 grados, y sus velocidades son relativamente rápidas siendo normalmente del orden de metros/día hasta kilómetros/hora. Sus dimensiones son muy variables desde metros cuadrados hasta varios kilómetros cuadrados.

Figura N° 6 Esquema de una colada fangosa

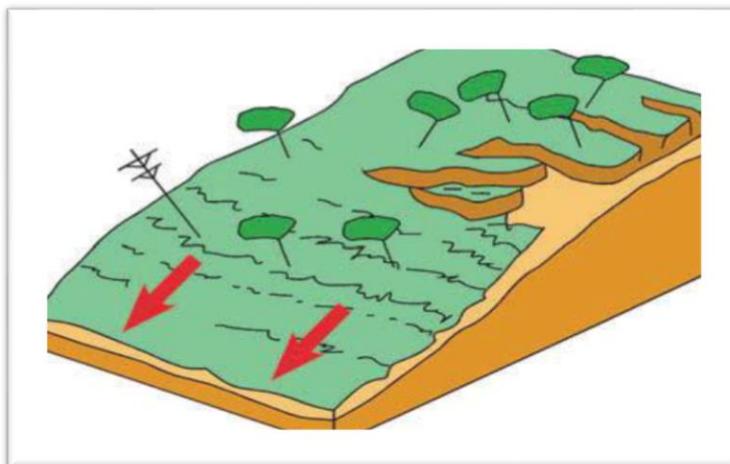


Fuente: Copons Llorens & Tallada, 2009

2.8. La reptación superficial

Es la inestabilidad de la parte más superficial del terreno (de decímetros a pocos metros de grosor) y que se desplaza mediante velocidades muy lentas (del orden de mm/año a dm/año). Es el tipo de movimiento de ladera más habitual y puede afectar a toda una vertiente, Su efecto destructivo es bajo, pero puede causar daños moderados en estructuras que suelen tener reparación.

Figura N° 7 Esquema de reptación superficial en una ladera



Fuente: Copons Llorens & Tallada, 2009

2.9. Principales fallas en taludes

2.9.1. Tipo geológico

Laderas posiblemente inestables, orografía acusada, estratificación, meteorización, etc.

2.9.2. Variación del nivel freático

Situaciones estacionales, u obras realizadas por el hombre.

2.9.3. Falla por deslizamiento superficial

Cualquier talud está sujeto a fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas y porciones del suelo próximas a su frontera se deslicen hacia abajo; el fenómeno es más intenso cerca de la superficie inclinada del talud a causa de la falta de presión confinante que allí existe.

2.9.4. Falla por movimiento del cuerpo del talud

En contraste con los movimientos superficiales lentos, descritos en el inciso anterior, pueden ocurrir en los taludes movimientos bruscos que afectan a masas considerables de

suelo, con superficies de falla que penetran profundamente en su cuerpo. Estos fenómenos reciben comúnmente el nombre de deslizamiento de tierras.

2.9.5. Fallas por licuación

Éstas fallas ocurren cuando en la zona de deslizamiento el suelo pasa rápidamente de una condición más o menos firme a la correspondiente a una suspensión con pérdida casi total de resistencia al esfuerzo cortante.

2.9.6. Fallas por erosión

Éstas son también fallas del tipo superficial provocadas por arrastre del viento, agua, etc., en los taludes. Este fenómeno se hace más notorio, entre más empinadas sean las laderas de los taludes. La erosión es el desprendimiento, transporte y denostación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento de agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos o cárcavas.

2.10. Tipos de erosión

2.10.1. Erosión laminar

El proceso de erosión laminar se inicia por el impacto de las gotas de agua de lluvia contra la superficie del suelo, complementada por la fuerza de la escorrentía produciendo un lavado de la superficie del terreno como un todo, sin formar canales definidos.

Al caer las gotas de lluvia levantan las partículas de suelo y las reparten sobre la superficie del terreno. La velocidad de las gotas de lluvia puede alcanzar valores hasta 10 metros por segundo y su efecto es muy grande sobre las superficies de talud expuestos y sin cubierta vegetal. El proceso es particularmente grave cuando la pendiente del talud es grande, como es el caso de los taludes de corte en obras viales.

2.10.2. Erosión en cárcavas

Las cárcavas constituyen el estado más avanzado de erosión y se caracterizan por su profundidad, que facilita el avance lateral y frontal por medio de desprendimientos de

masas de material en los taludes de pendiente alta que conforman el perímetro de la cárcava.

2.10.3. Erosión eólica

La fuerza ejercida por el viento sobre la superficie del terreno produce un movimiento de partículas, que son transportados por saltación, deslizamiento superficial o suspensión, dependiendo del tamaño de las partículas, la duración, la velocidad y la turbulencia del viento.

De esta forma el suelo es sacado de su lugar de origen y depositado en las depresiones naturales del terreno, que generalmente son las zonas bajas y planas de las micro cuencas hidrográficas.

2.10.4. Erosión en surcos

Los surcos de erosión se forman por la concentración del flujo del agua en caminos preferenciales, arrastrando las partículas y dejando canales de poca profundidad generalmente, paralelos.

El agua de escorrentía fluye sobre la superficie del talud y a su paso va levantando y arrastrando partículas de suelo, formando surcos.

2.10.5. Erosión interna

El agua al fluir por ductos concentrados dentro del suelo produce erosión interna, la cual da origen a derrumbamientos o colapsos que pueden generar un hundimiento del terreno o la formación de una cárcava.

2.10.6. Erosión por afloramiento de agua

Un caso de erosión puede ocurrir en los sitios de afloramiento de agua, formando pequeñas cavernas y/o taludes negativos, los cuales a su vez pueden producir desprendimientos de masas de suelos.

2.11. Análisis de estabilidad de taludes

“La inestabilidad de taludes es una noción general que se refiere a lo propenso de ocurrencia de cierto grado o intensidad de movimiento masivo de un talud. En términos geomorfológicos, se considera la inestabilidad como un mecanismo de transformación de la forma de la tierra. Por el cual los materiales que constituyen un talud ajustan su altura y ángulo de reposo a los cambios de las nuevas condiciones hidro-climáticas, geomorfológicas y bióticas. En la ingeniería, **la estabilidad** de un talud se considera como grado y frecuencia de movimiento de una masa de suelo que hace peligrar el desarrollo normal de estructura y de la actividad humana.” (Blázquez, 1986).

2.12. Método de equilibrio límite

El método del equilibrio límite consiste en estudiar el equilibrio de un cuerpo rígido, constituido por el talud y por una superficie de deslizamiento de cualquier forma (línea recta, arco circular, espiral logarítmica). Con tal equilibrio se calculan las tensiones de corte (τ) y se comparan con la resistencia disponible (τ_f), calculada según el criterio de rotura de Coulomb: De tal comparación deriva la primera indicación de estabilidad, con el coeficiente de seguridad

$$F = \tau_f / \tau$$

2.13. Esfuerzo de resistencia cortante

La modelación o representación matemática del fenómeno de falla al cortante en un deslizamiento se realiza utilizando las teorías de la resistencia de materiales. Las rocas y los suelos al fallar al corte se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada de Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \text{Tan } \phi' \text{ (Para suelos saturados)}$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \text{Tan } \phi' + (\mu - \mu_a) \text{Tan } \phi' \text{ (para suelos parcialmente saturados)}$$

Donde:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte

c' = Cohesión o cementación efectiva

σ = Esfuerzo normal total

μ = Presión del agua intersticial o de poros

μ_a = Presión del aire intersticial

ϕ' = Ángulo de fricción interna del material

ϕ'' = Ángulo de fricción del material no saturado.

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere predefinir los parámetros, ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo. La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo dependiendo de las presiones internas o de poros de acuerdo a la ecuación de Coulomb, en la cual el factor u está restando al valor de la presión normal. La presión resultante se le conoce con el nombre de presión efectiva σ'

σ' (Presión efectiva) = $\sigma - \mu$

ϕ' = Angulo de fricción para presiones efectivas.

c' = Cohesión para presiones efectivas.

2.14. Esfuerzo efectivo

El esfuerzo efectivo en cualquier dirección está definido como la diferencia entre el esfuerzo total en dicha dirección y la presión del agua que existe en los vacíos del suelo. El esfuerzo efectivo es por lo tanto una diferencia de esfuerzos.

2.14.1. Naturaleza del esfuerzo efectivo

El suelo es una estructura semejante a un esqueleto de partículas sólidas en contacto, formando un sistema intersticial de vacíos intercomunicados. Los vacíos del suelo están total o parcialmente llenos de agua. La interacción entre la estructura del suelo y el fluido de los vacíos determina el comportamiento, desde el punto de vista de la ingeniería, único y dependiente del tiempo, de la masa del suelo. La compresibilidad de un suelo sujeto a carga o descarga, es principalmente su capacidad de deformación de vacíos, usualmente por desplazamiento de agua. La resistencia de un suelo es su capacidad última de resistencia a tal carga. Los esfuerzos cortantes sólo pueden ser resistidos por la estructura de las partículas sólidas, pues el agua no tiene resistencia cortante. Por otro lado, el esfuerzo normal en cualquier plano es la suma de dos componentes: una debida a la carga transmitida por las partículas sólidas de la estructura del suelo, y la otra, una presión del fluido en los espacios vacíos.

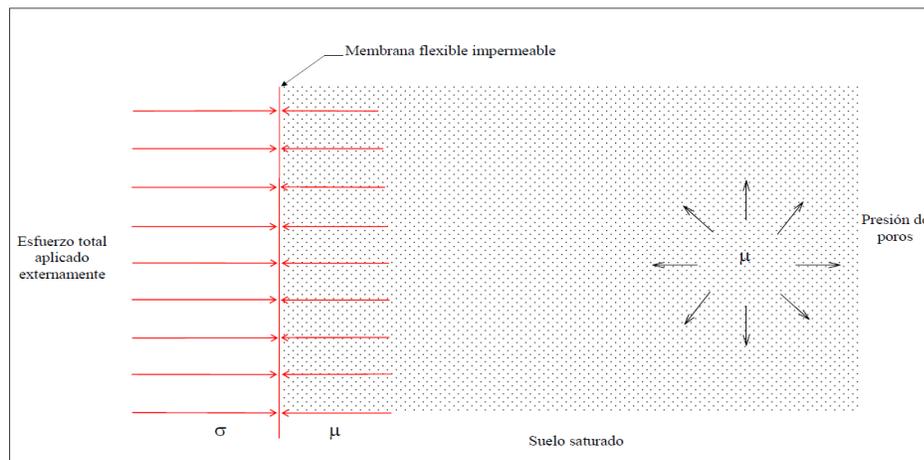
La compresibilidad y la resistencia de un suelo dependen de la diferencia entre el esfuerzo total debido a la carga externa, σ , y la presión de poros, μ . Esta diferencia se denomina esfuerzo efectivo, y se expresa por:

Ec. Esfuerzo efectivo

$$\sigma = (\sigma - \mu) \quad (1)$$

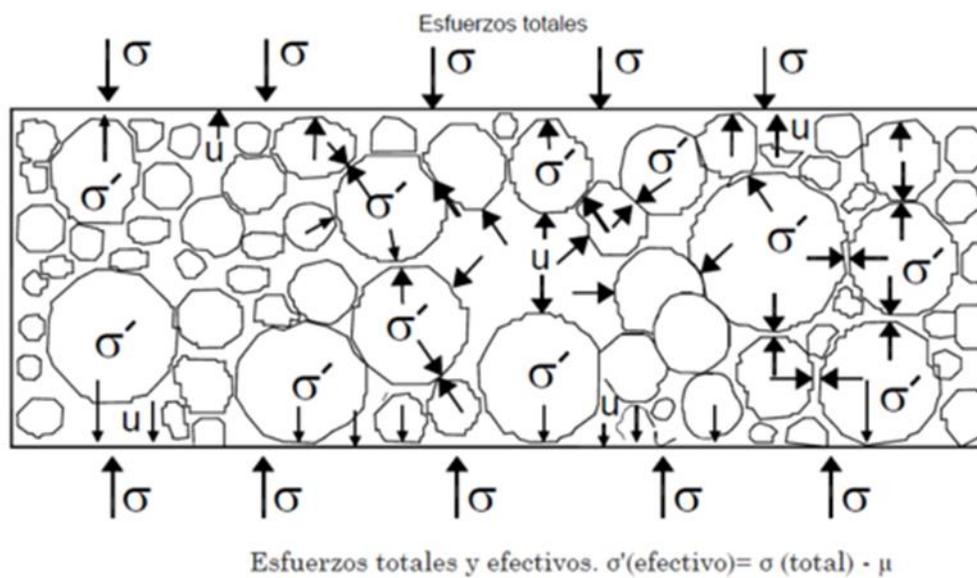
La naturaleza física de este parámetro puede entenderse intuitivamente considerando a un suelo saturado limitado por una membrana flexible impermeable, tal como se muestra en la Figura N°8, El esfuerzo total debido a la carga aplicada es σ , que es perpendicular a la membrana. La presión de poros es μ ($\mu < \sigma$), la cual, por ser una presión hidrostática, tiene igual intensidad en todas las direcciones. La presión de poros es perpendicular a la membrana y tiene el valor de μ . Examinando los esfuerzos normales a la membrana, se puede apreciar que la diferencia de esfuerzos ($\sigma - \mu$) se transmite a la estructura del suelo a través de la membrana, para una situación de equilibrio. Entonces, el esfuerzo efectivo ($\sigma - \mu$) es una medida de la carga transmitida por la estructura del suelo.

Figura N° 8 Esquematización intuitiva de la naturaleza de los esfuerzos totales y presión de poros



Fuente: Fratelli. 1993

Figura N° 9 Dirección de los esfuerzos



Fuente: Fratelli. 1993

2.15. Esfuerzos totales y efectivos

los problemas de estabilidad de taludes pueden analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. En principio, siempre es posible analizar la estabilidad de un

talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada; sin embargo, en la práctica es virtualmente imposible determinar con precisión cuáles son los excesos de presión de poros que se van a generar por los cambios en las cargas (excavaciones, colocación de rellenos o cambios en el nivel de agua).

Debido a esto, no es posible desarrollar análisis precisos de estabilidad en estas condiciones, utilizando procedimientos de esfuerzos efectivos. No obstante, se puede trabajar todo el análisis usando presiones efectivas, sin que se requiera especificar los valores de los excesos de poros en las condiciones no drenadas. La mayoría de los modelos de análisis trabajan con base en las presiones efectivas.

2.16. Presión de poros

En general, la presión de poros consiste en la presión en el agua dentro de los poros del suelo y se identifica con la letra “ μ ”. La presión de poros disminuye los esfuerzos normales efectivos entre las partículas, trata de separarlas y disminuye la resistencia a la fricción, al colocar una carga se puede producir un cambio en la presión de poros que se denomina como $\Delta\mu$ (exceso de presión de poros) o deficiencia de presión de poros inducidos por las condiciones de carga.

Si el agua en el suelo no está en movimiento, la altura del agua genera un fenómeno de presión hidrostática:

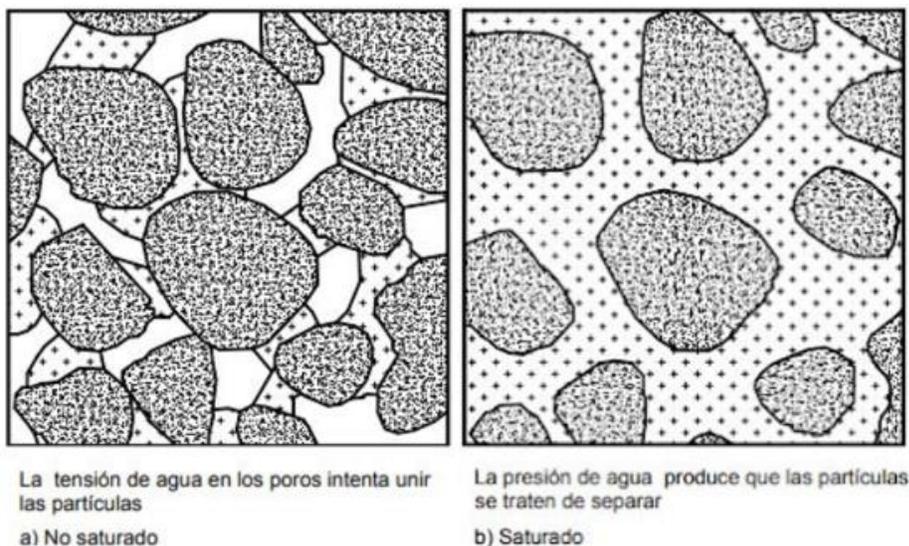
$$\mu = \gamma_w \cdot Z_w$$

Donde:

γ_w = Peso unitario del agua

Z_w = Profundidad vertical del punto por debajo del nivel de agua freática.

Figura N° 10 Presión del agua en una masa de suelo



Fuente: Fratelli. 1993

La presión de poros trata de separar las partículas y de esta forma, se disminuye la resistencia a la fricción

La presión de poros aumenta en los taludes en temporadas de lluvias y disminuye en temporadas de sequía. Es muy importante entender y cuantificar la variación temporal y espacial de la presión de poros en los taludes. La variabilidad es mayor en la cuesta que en el pie del talud.

2.17. Ángulo de fricción

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física: $\text{Coeficiente de rozamiento} = \tan \phi$

El ángulo de fricción depende de varios factores (Bilz, 1995) entre ellos algunos de los más importantes

son:

- a. Tamaño de los granos
- b. Forma de los granos

c. Distribución de los tamaños de granos

d. Densidad

Tabla N° 3 Ángulo de fricción interna de algunos suelos

Tipo de suelo	Ángulo de fricción interna grados (°)
Arena con granos redondeados suelta	27 – 30
Arena con granos redondeados media	30 – 35
Arena con granos redondeados densa	35 – 38
Arena con granos angulares suelta	30 – 35
Arena con granos angulares media	35 – 40
Arena con granos angulares densa	40 – 45
Grava con algo de arena	34 – 48
Arcillas consolidadas	20 – 30
Arcilla arenosa	16 – 20
Limos	26 – 35

Fuente: Braja Das. 2013

2.18. Cohesión (KN/m²)

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión. En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y a estos suelos se les denomina Suelos no Cohesivos.

Tabla N° 4 Cohesión de algunos suelos.

Tipo de suelo	Cohesión kg/cm2
Gravas	-
Arenas	-
Arcilla blanda	0,05 – 0,10
Arcilla mediana	0,25 – 0,50
Arcilla firme	0,60 – 0,80
Arcilla muy firme	0,80 – 1,00
Arcilla dura y compacta	1,00 – 1,20
Arcilla arenosa densa	0,40 – 0,60
Arcilla arenosa suelta	0,10
Limo	0,10 – 0,30

Fuente: Fratelli. 1993.

2.18.1. Cohesión aparente

En los suelos no saturados el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación

2.19. Pesos unitarios (KN/m³)

El peso unitario de un suelo es el peso por unidad de volumen lo cual contempla las todas sus fases del suelo, fase sólida, gaseosa y líquida en una sola muestra.

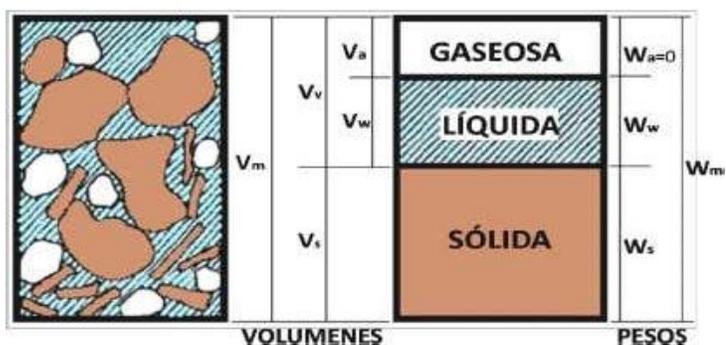
$$y = \frac{Wm}{Vm}$$

Donde:

Wm = Peso de la masa de suelo

Vm = Volumen de la masa de suelo

Figura N° 11 Fases del suelo



Fuente: Fratelli. 1993.

El peso unitario es tal vez el parámetro más sencillo de medir para el análisis de estabilidad de los taludes, es el que influye menos en el factor de seguridad. Los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático y saturados por debajo de éste nivel. En el caso de que se utilicen pesos sumergidos, se debe ignorar la presencia de nivel freático.

Tabla N° 5 Peso específico de sólidos de algunos suelos.

Tipo de suelo	Peso específico gr/cm ³
Grava	2,65 – 2,68
Arena	2,65 – 2,68
Arcilla inorgánica	2,68 – 2,75
Arcilla orgánica	2,58 – 2,65
Limo inorgánico	2,62 – 2,68

Fuente: Fratelli. 1993.

Tabla N° 6 Peso específicos de sólidos de algunos suelos.

Tipo de suelo	Peso específico
Arena de cuarzo	2,64 – 2,66
Limo	2,67 – 2,73
Arcilla	2,70 – 2,90
Yeso	2,60 – 2,75
Loes	2,65 – 2,73
Turbo	1,30 – 1,90

Fuente: Braja Das. 2013.

2.20. Factor de seguridad

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla: (Jaime Suarez Deslizamientos: Análisis Geotécnicos)

$$F.S. = \frac{\textit{Resistencia al cortante disponible}}{\textit{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

En las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S. = \frac{\textit{Momento resistente disponible}}{\textit{Momento actuante}}$$

La condición de equilibrio límite existe cuando el F.S es igual a 1. Cuando el talud es estable, las fuerzas resistentes serán mayores que las fuerzas actuantes y cuando el talud

es inestable ocurrirá el caso contrario. Por lo tanto, el FS es un índice que define la estabilidad o inestabilidad de un talud.

Cuando $F_s = 1$ el talud o ladera está en un estado de falla incipiente. Generalmente el valor del factor de seguridad para el diseño de un talud se encuentra entre el rango de 1,25 a 1,5. Un $F_s = 1,5$ con respecto a la resistencia es aceptable en el diseño de un talud estable y para la estabilidad de una ladera.

Valores de factores de seguridad

- = 1 Equilibrio, tiende a fallar con el tiempo
- < 1 inestable
- 1,25 seguridad relativa
- = 1,5 Satisfactorio para taludes

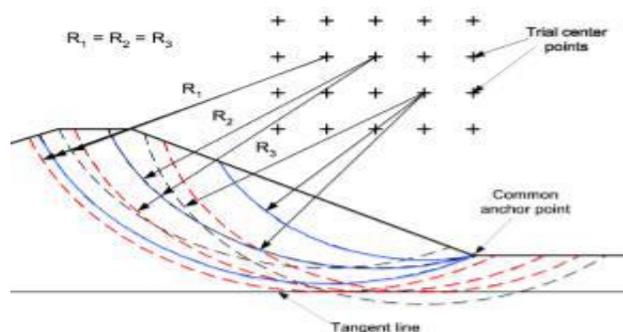
2.21. Superficie de falla

El término superficie de falla se emplea para referirse a una superficie supuesta a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la falla del talud. En los métodos de equilibrio límite, el F.S. se asume igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla y este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie. Si la falla ocurre, los esfuerzos de cortante serían iguales en todos los puntos a todo lo largo de la superficie de falla.

Generalmente, se considera un gran número de superficies de falla para encontrar la superficie de falla con el **valor mínimo de factor de seguridad, la cual se denomina “superficie de falla crítica”**. Esta superficie es la más probable para que se produzca el **deslizamiento**; no obstante, pueden existir otras superficies de falla con factores de seguridad ligeramente mayores, que requiere tenerse en cuenta para el análisis.

El trazo de los círculos de falla se puede realizar considerando alguno de los siguientes criterios a) círculos de igual diámetro, b) círculos que pasan por un mismo punto, y c) círculos tangentes a una o varias líneas determinadas. (U.S. Army Corps of Engineers, 2003):

Figura N° 12 Superficies de falla circular en un talud



Fuente: Inestabilidad en laderas y taludes, Alfredo Coliente Tlaxcalteca.

El factor de seguridad en un punto del talud depende del plano de falla considerado y el factor de a lo largo de una superficie de falla es el que toma en cuenta la tensión cortante disponible y la tensión cortante al equilibrio, es decir la suma de todas las fuerzas actuantes.

2.22. Métodos exactos

La aplicación de las leyes de la estática proporciona una solución exacta del problema con la única salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite (ausencia de deformaciones, factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura, etc.). Esto sólo es posible en taludes de geometría sencilla, como por ejemplo la rotura planar y la rotura por cuñas.

2.23. Métodos no exactos

En la mayor parte de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las leyes de la estática. El problema es hiperestático y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución. Se pueden considerar así los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, hoy en desuso, y los métodos de las dovelas o rebanadas, que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales.

Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos:

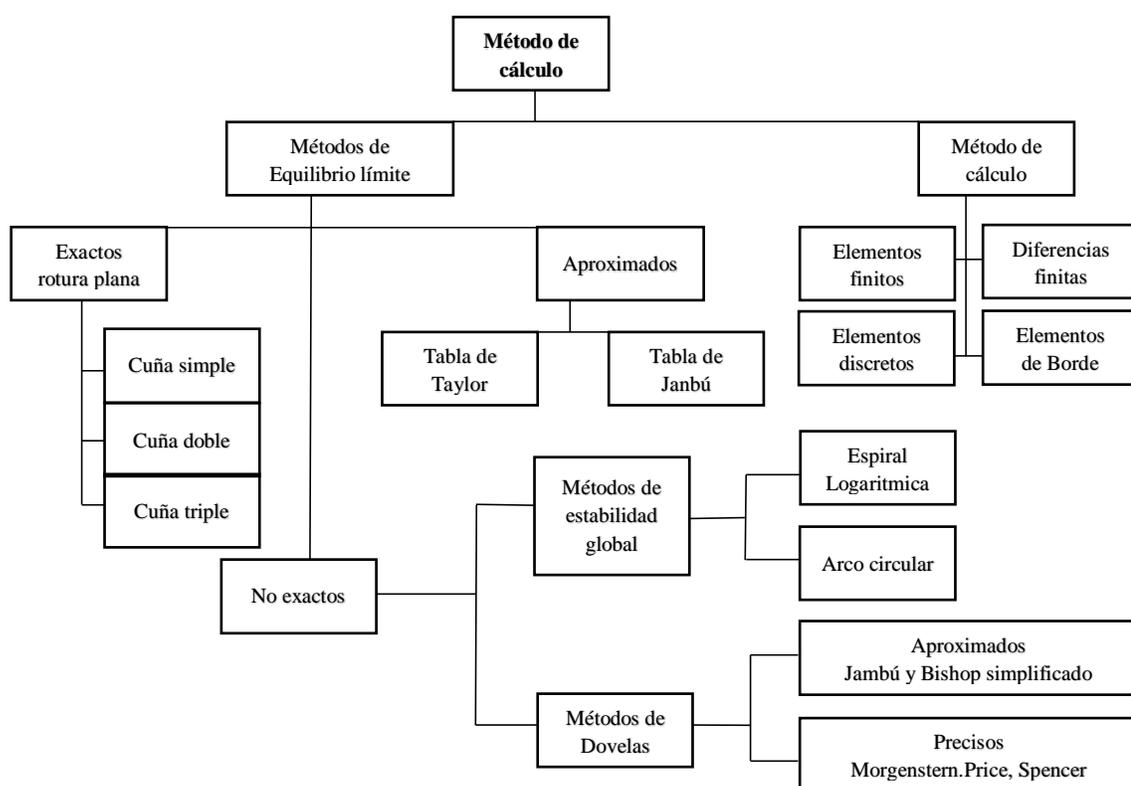
2.24. Métodos aproximados

No cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar por ejemplo los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado.

2.25. Métodos precisos o completos

Cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop riguroso.

Gráfico N° 2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes



Fuente: Deslizamientos, Análisis Geotécnicos. Jaime Suarez.

2.25.1. Método de bishop simplificado

Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las Dovelas.

La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo a la expresión:

$$F.S. = \frac{\sum [C'b + (W - ub)\tan\alpha]}{\sum W\sin\alpha}$$

Luego:

$$ma = \cos\alpha \left(1 + \frac{\tan\alpha \tan\phi}{F.S.} \right)$$

Donde:

b = Ancho de la dovela

W = Peso de cada dovela

C', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w \times h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela

Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela. (Suarez Díaz Jaime, Deslizamiento y Estabilidad de Taludes en zonas tropicales, 2002).

2.25.2. Método de Spencer

El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación.

La inclinación específica de estas fuerzas entre partículas, es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Spencer

inicialmente propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender fácilmente a superficies no circulares. Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad F y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas θ .

Para resolver las ecuaciones F y θ , se utiliza un sistema de ensayo y error donde se asumen los valores de estos factores (en forma repetitiva) hasta que se alcanza un nivel aceptable de error. Una vez se obtienen los valores de F y θ se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad. (Suarez Díaz Jaime, Deslizamiento y Estabilidad de Taludes en zonas tropicales, 2002).

2.25.3. Método de Morgenstern y Price

El método de Morgenstern y Price (1965) asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas.

Esta función puede considerarse constante, como en el caso del método de Spencer, o puede considerarse otro tipo de función. La posibilidad de suponer una determinada función para determinar los valores de las fuerzas entre dovelas, lo hace un método más riguroso que el de Spencer.

Sin embargo, esta suposición de funciones diferentes tiene muy poco efecto sobre el cálculo de factor de seguridad cuando se satisface el equilibrio estático y hay muy poca diferencia entre los resultados del método de Spencer y el de Morgenstern y Price. El método de Morgenstern y Price, al igual que el de Spencer, es un método muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo. (Suarez Díaz Jaime, Deslizamiento y Estabilidad de Taludes en zonas tropicales, 2002).

$$FS_m = \frac{\sum \{c\beta + (N - uL)R\tan\phi\}}{\sum W_x - \sum N_f \pm \sum D_d}$$

$$FS_f = \frac{\sum \{c\beta + (N - u)\tan\phi\cos\alpha\}}{\sum N\sin\alpha - \sum D\cos\alpha}$$

Donde:

FS_m = Factor de seguridad con respecto al equilibrio de momentos

FS_f = Factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerzas

β = Longitud de la superficie de falla

W = Peso de la dovela

α = Inclinación de la superficie de falla

N = Fuerza normal entre dovelas

x = Fuerza tangencial entre dovelas

2.26. Slide v6.0 (software)

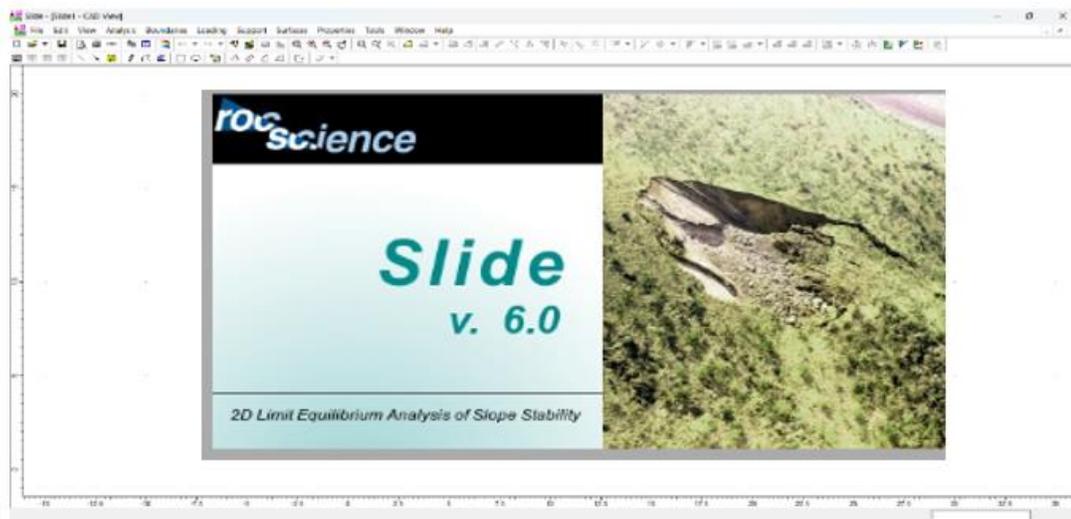
Fundada en 1996, Rocscience es líder mundial en el desarrollo de software 2D y 3D para ingenieros civiles, mineros y geotécnicos. Como ingenieros, sabemos la importancia de tener un software confiable y fácil de usar. Es por eso que constantemente desarrollamos y refinamos nuestros programas para crear soluciones expertas que funcionen para usted.

Debido a la creciente demanda de software, Rocscience una empresa derivada de la Universidad de Toronto para manejar la mayor distribución en todo el mundo.

Slide es un software de análisis de estabilidad de taludes en 2D utilizado por la ABC, que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad. Su ámbito de aplicación en minería y obra civil es muy variado, permitiendo evaluar un gran número de problemáticas geotécnicas, tales como estabilidad de terraplenes, presas, taludes en

excavaciones mineras o en edificaciones, efectos de cargas externas, sísmicas, eficiencia de elementos de refuerzo, etc.

Figura N° 13 Ventana de cálculo del programa Slide



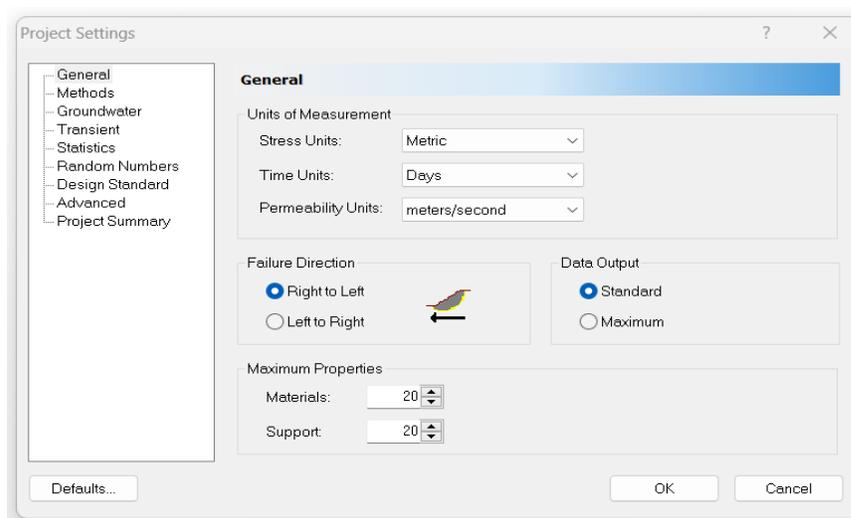
Fuente: Elaboración propia.

2.26.1. Características

- Métodos de búsqueda de superficies críticas para superficies de deslizamiento circulares o no circulares Los métodos de análisis incluyen Bishop, Janbu, Spencer, GLE / Morgenstern-Price
- Múltiples materiales diferentes tipos de estratos de suelos
- Soporte: clavos para suelo, amarres, geotextiles, pilotes. Zonas de fuerza infinita (exclusión de superficies deslizantes)

2.26.2. Configuración del proyecto

Figura N° 14 Ventana de general de configuración del proyecto Slide



Fuente: Elaboración propia.

La opción **Configuración del proyecto**  se utiliza para configurar los principales parámetros de configuración de su modelo *Slide*.

La **Configuración del proyecto** siempre debe seleccionarse antes de continuar con la creación de su modelo, ya que algunas de las configuraciones (por ejemplo, las opciones Unidades de medida y Agua subterránea) determinan la entrada y la disponibilidad de otras opciones de modelado.

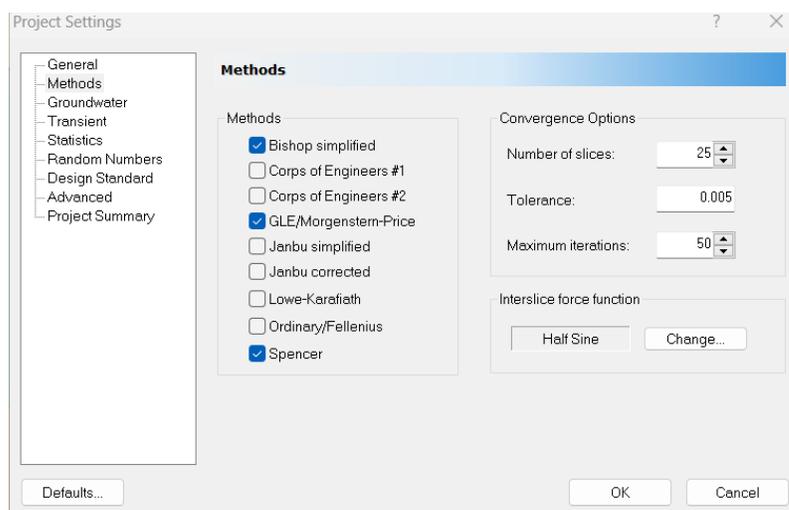
El cuadro de diálogo Configuración del proyecto está organizado en las siguientes secciones (páginas) a las que se accede seleccionando el nombre de la página de la lista a la izquierda del cuadro de diálogo.

- General
- Métodos
- agua subterránea
- Transitorio
- Estadísticas

- Números al azar
- Estándar de diseño
- Avanzado
- Resumen del proyecto

2.26.3. Selección de métodos de análisis

Figura N° 15 Ventana de selección de los Métodos utilizados.



Fuente: Elaboración propia.

La página **Métodos** en el cuadro de diálogo Configuración del proyecto le permite definir:

- Los métodos de análisis de equilibrio límite que se utilizarán para el análisis *de deslizamiento*
- Opciones de convergencia (número de cortes, tolerancia, iteraciones máximas)
- Función de fuerza entre cortes para el método GLE

Las opciones de análisis adicionales están disponibles en la página Avanzado del cuadro de diálogo Configuración del proyecto.

2.26.4. Métodos de análisis

Los siguientes métodos de análisis de equilibrio límite están disponibles en Slide:

- Ordinario / Fellenius
- **Bishop simplificado**
- Janbu simplificado
- Janbu corregido
- **Spencer**
- Cuerpo de Ingenieros #1
- Cuerpo de Ingenieros #2
- Lowe Karafiath
- **GLE (General Limit Equilibrium) / Morgenstern-Price (la implementación del método GLE en *Slide* es esencialmente equivalente al método Morgenstern-Price)**

Cualquiera o todos estos métodos se pueden seleccionar para un análisis *de diapositiva* dado. Cuando se ejecuta Compute , todos los métodos de análisis seleccionados se ejecutarán simultáneamente en el modelo, y los resultados de todos los métodos estarán disponibles para su visualización en el programa *Slide* Interpret.

En el texto de Abramson, Lee, Sharma & Boyce (2001) se puede encontrar una excelente revisión de los métodos de análisis de equilibrio límite para la estabilidad de taludes . Esto incluye las ecuaciones, la teoría y los supuestos asociados con cada método.

Función de fuerza entre cortes GLE

Si se selecciona el método de análisis GLE, puede especificar la **función de fuerza entre cortes** que se usará en el análisis. De forma predeterminada, estará activa una función de fuerza entre cortes de medio seno, a menos que especifique una función diferente con el botón Cambiar. Consulte el tema Función de fuerza entre cortes para obtener más información.

Número de rebanadas

El **número de rebanadas** es el número de rebanadas verticales en las que se dividirá la masa deslizante para cada superficie de deslizamiento. El número predeterminado de 25

cortes es suficiente para obtener una solución precisa para la mayoría de los problemas. No se recomienda una gran cantidad de sectores (p. ej., más de 100), ya que la precisión de la solución no mejorará necesariamente y el tiempo de cálculo y el tamaño del archivo de salida son directamente proporcionales al número de sectores.

Tolerancia

La **Tolerancia** es la diferencia en el factor de seguridad, entre dos iteraciones sucesivas del procedimiento de análisis de equilibrio límite, en el que se considera que la solución ha convergido y se detiene el proceso de iteración. Se recomienda el valor predeterminado de 0,005. Valores mucho más pequeños aumentarán el tiempo de cálculo y pueden conducir a problemas de convergencia. Los valores superiores a 0,01 acelerarán el cálculo, pero conducirán a valores menos precisos del factor de seguridad.

Número máximo de iteraciones

Iteraciones **máximas** es el número máximo de iteraciones permitidas en el análisis de equilibrio límite, para cada superficie de deslizamiento. Aunque el valor predeterminado es 50, debe tenerse en cuenta que, para un problema típico, solo se requieren de 3 a 4 iteraciones para la convergencia. Si una superficie de deslizamiento determinada requiere más de, digamos, 20 iteraciones, las propiedades incorrectas del material o los factores de seguridad muy bajos pueden ser la causa, y el usuario debe verificar cuidadosamente la entrada de su modelo. Si se alcanza el Número máximo de iteraciones, el proceso de iteración finaliza para esa superficie deslizante y se registra el último valor calculado del factor de seguridad.

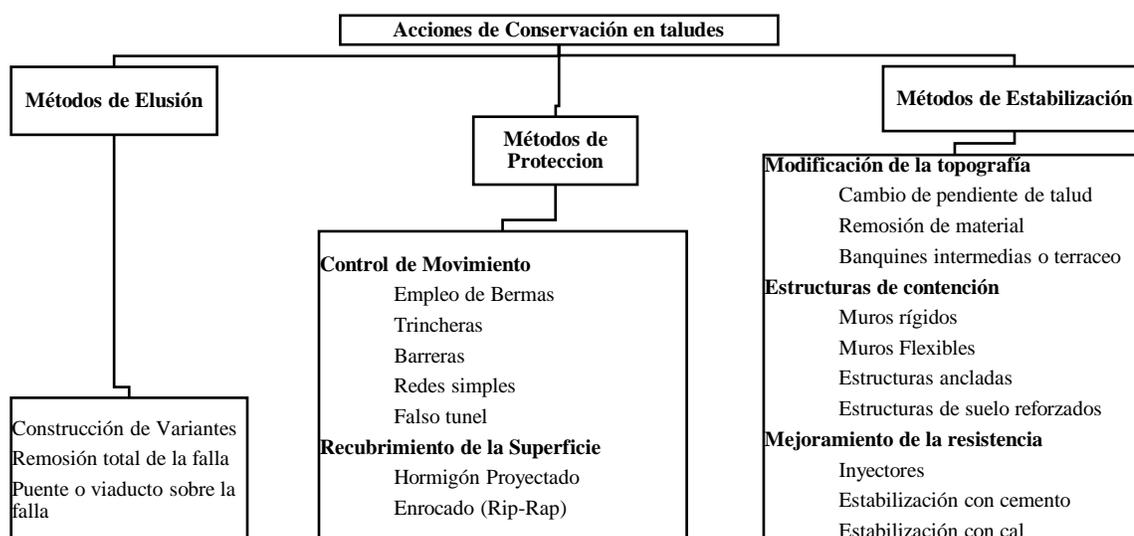
2.27. Métodos de estabilización de taludes

Si, en caso los resultados del proceso de análisis de estabilidad de taludes utilizando el programa Slide se evidencia que haya resultados de inestabilidad de algún talud es decir que el factor de seguridad sea menor al esperado ($FS < 1,5$) se propone acciones de conservación de taludes y métodos más económicos que permitan buscar soluciones a los taludes inestables, estos sean estables y a la misma vez realizando un análisis de costos.

A continuación, se describe una serie de métodos de estabilización, los que pueden ser utilizados, según establezcan las condiciones particulares de cada talud.

Las acciones normalmente utilizadas en taludes para la conservación vial, se basan en tres tipos de soluciones, la elusión del problema, la protección de la vía y la estabilización de la falla, tal como se lo muestran en el siguiente gráfico.

Gráfico N° 3 Acciones de conservación en taludes



Fuente: Manual de conservación vial, ABC.

Los métodos de elusión consisten en evitar que los elementos de la vía estén expuestos a una zona de falla, lo cual suele estar ligado a cambios en el alineamiento de la vía, sea el horizontal o el vertical, a la remoción total de los materiales estables o a la construcción de estructuras que se apoyen en zonas firmes, tales como puentes o viaductos.

Los métodos de protección minimizan los efectos de las fallas sobre la plataforma del camino aumentando la seguridad para los usuarios de la vía, estos métodos son aplicables sobre todo a problemas de pequeña o mediana envergadura.

Los métodos de estabilización se basan en la reducción de las fuerzas motoras, se puede lograr, en general, por dos métodos: remoción de material en la parte apropiada de la falla y subdrenaje, para disminuir el efecto de empujes hidrostáticos y el peso de las masas de

tierra, que es menor cuando pierde agua. (Manual de conservación vial, ABC, capítulo 3, pág. 3-44).

2.27.1. Modificación de la topografía o geometría del talud

Los métodos de estabilización de taludes están orientados a reducir las fuerzas desestabilizadoras o a incrementar las fuerzas resistentes, o a la combinación de ambas, es común que existan varias causas o fuentes de fuerzas desestabilizadoras y resistentes, por lo que también es común utilizar más de un método de estabilización.

2.27.1.1. Cambio de pendiente del talud

Este es uno de los métodos más utilizados para el mejoramiento de las condiciones de la estabilidad de los taludes. Al disminuir la pendiente del talud, el círculo crítico de falla se hace más largo y más profundo para el caso de un talud estable, aumentándose en esta forma su factor de seguridad.

Es un método correctivo ligado a deslizamientos en el cuerpo del talud, de hecho, este es el primer punto a tomar en cuenta respecto a esta solución; al igual que todas las demás soluciones, no es de alcance universal, y su eficiencia no es siempre la misma, sino que puede variar extraordinariamente de unos casos a otros.

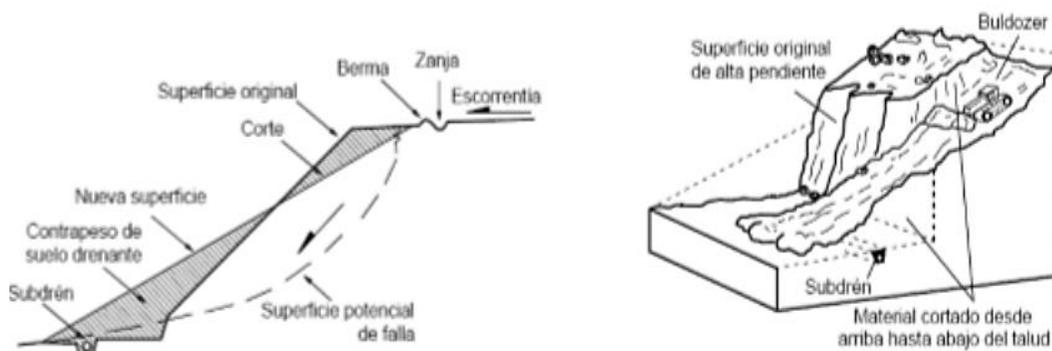
Un segundo punto que se debe comentar desde un principio es que cuando se considere un abatimiento de talud en un proyecto o en una falla que se presente en el campo, se debe tener muy presente que el talud abatido es diferente del original, con todo lo que ello implica.

El abatimiento de la pendiente puede ser efectivo en deslizamientos rotacionales, pero generalmente tiene muy poco efecto o puede tener un efecto negativo en deslizamientos de traslación.

El abatimiento se puede lograr por corte o por relleno. El abatimiento de la pendiente del talud es económicamente posible en taludes de poca altura, pero no ocurre lo mismo en taludes de gran altura, debido al aumento exagerado de volumen de tierra de corte con el

aumento de la altura. El abatimiento por relleno en ocasiones no es posible por falta de espacio en el pie del talud.

Figura N° 16 Abatimiento de la pendiente de un talud



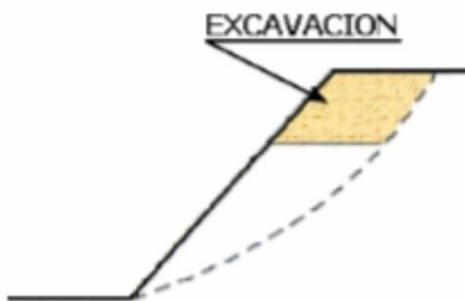
Fuente: Suarez, 2002.

2.27.1.2. Remoción de materiales de la cabeza

La remoción de una suficiente cantidad de materiales en la parte superior del talud puede resultar en un equilibrio de fuerzas que mejore la estabilidad del talud. En la práctica este método es muy útil en fallas activas. La cantidad de material que se requiere depende del tamaño y características del movimiento y de la geotecnia del sitio.

Antes de iniciar el proceso de corte debe calcularse la cantidad de material que se requiere remover, finalmente la efectividad técnica del sistema y el factor económico van a determinar su viabilidad.

Figura N° 17 Área de remoción de material en la cabecera de un talud

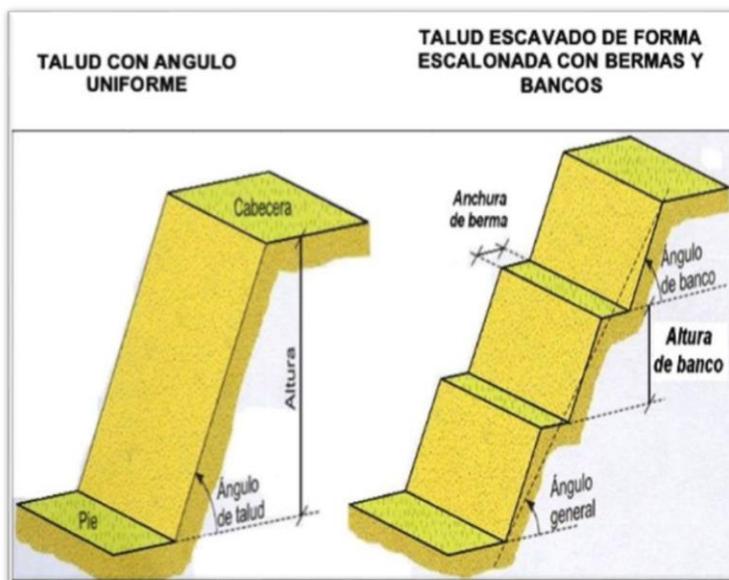


Fuente: Suarez, 2002.

2.27.1.3. Banquinas intermedias o terraceo

Se denomina banquinas a masas generalmente del mismo material del propio talud o de uno similar que se adosan al mismo, para darle estabilidad.

Figura N° 18 Estabilización con banquinas intermedias



Fuente: Manual de conservación vial, ABC.

El terraceo se puede realizar con el propósito de controlar la erosión y facilitar el establecimiento de la vegetación. En suelos arcillosos lo que se busca es transformar el talud en una combinación de varios otros de altura menor, pues en este tipo de suelos, este es el factor determinante en la estabilidad. Por ello los escalones deberán tener huella suficientemente ancha para que puedan funcionar prácticamente como dos taludes independientes. En el caso de taludes con suelos con cohesión y fricción, el escalonamiento se hace sobre todo para provocar un abatimiento del talud; recoger materiales de caídas de rocas y coleccionar aguas. La altura de las gradas es generalmente, de 5 a 7 metros y cada grada debe tener una cuneta revestida para el control del agua superficial. El sistema de cunetas a su vez debe conducir a una estructura de recolección y entrega con sus respectivos elementos de disipación de energía. En todos los casos debe

considerarse el efecto que se puede tener sobre los taludes arriba y abajo de la terraza a excavar.

Es importante la función que pueden cumplir los escalones para proteger el corte contra la erosión del agua superficial, pues reducen la velocidad lateral abajo y el gasto de escurrimiento. Para ello es preciso que los escalones estén adecuadamente conformados; la mayor parte de las veces basta con que el escalón tenga una ligera inclinación hacia el corte, pero en terrenos muy erosionables pudiera llegar a convenir que se invirtiera su inclinación, haciéndola hacia la parte interna, que garantice la rápida eliminación de las aguas. Si la posible infiltración del agua de lluvia fuera muy de temer, se podría llegar a la precaución extrema de impermeabilizar toda la huella de los escalones.

2.28. Alternativa de protección y estabilización de taludes

En la mayoría de los proyectos de infraestructura vial es preciso efectuar desmontes importantes, teniendo en cuenta la topografía. Durante las excavaciones se aplican distintos métodos de arranque, según las características geomecánicas de los macizos más competentes, desde el arranque directo con excavadoras, tractores de oruga o incluso mototraílas en terrenos más blandos.

Desde hace varios años se viene aplicando diversos métodos de clasificación geomecánica para evaluar la inestabilidad real o potencial de los taludes y las técnicas de corrección necesaria en cada caso. Este es un campo en el que se ha progresado significativamente, llegándose a una mejor comprensión de los procesos de inestabilidad y a una valoración cuantitativa de los mismos.

En la apertura de vías de comunicación la mayoría de los taludes quedan expuestos durante mucho tiempo a los agentes atmosféricos y a otros fenómenos, induciéndose en ellos una degradación progresiva, que muy rara vez se contempla durante la etapa de diseño en la elaboración de los proyectos y que exige, en determinados momentos, tanto trabajos de mantenimiento, como de protección para evitar daños o riesgos innecesarios.

El proceso por el que se modifican las estructuras y la composición tanto de los taludes como de los macizos rocosos en general, debido a su exposición, se conoce como

meteorización, y afecta a las propiedades físicas y químicas de los materiales de los que se componen. En nuestro país, debido a sus características climáticas y geográficas la erosión superficial de taludes desempeña un papel importante a la hora de hablar de alteraciones naturales del terreno. La erosión superficial es provocada principalmente por escurrimientos de agua y por la acción del viento. Los materiales arrastrados de los taludes por la erosión ocasionan diversos problemas a las vías de comunicación, como su obstrucción a causa de los deslizamientos.

2.28.1. Tipos de obras de protección

Tan pronto se comprueba que hay un riesgo de inestabilidad de un determinado talud, se debe buscar la mejor solución de protección y considerar aspectos de costo, naturaleza de las obras afectadas (tanto en cresta como en el pie del talud), tiempo estimado en que se puede presentar el problema, disponibilidad de materiales, etc.

Cada caso de problemas de estabilidad en taludes tiene una solución particular de protección de refuerzo, la cual está en función de: el tipo de terreno, el tipo de obra, las limitaciones de espacio, el costo de la obra, el tiempo de ejecución.

Entre los principales procedimientos para proteger y reforzar a los taludes contra la erosión superficial están:

- Malla de acero
- Geomantas o Geomallas textiles reforzadas
- Vegetación.

2.28.1.1. Protección con mallas de acero

La protección con mallas de acero de alta resistencia es un tratamiento superficial resistente, el procedimiento consiste en cubrir el talud con una malla, debidamente fijada al terreno. La malla no permite que los pequeños derrumbes o caídos, invadan la superficie de rodamiento de la vía terrestre. Los derrumbes o caídos son conducidos por detrás de la malla para que no puedan llegar a caer al trazado de la vía.

Por su naturaleza, permite un rápido drenaje del agua que satura el terreno y ayuda a la reforestación más fácilmente. Es un hecho que el aspecto de los taludes debe ser lo más natural e integrado posible con el medio circundante. De esta forma las mallas de acero de alta resistencia establecen un efectivo y económico sistema de protección del suelo en taludes contra la erosión.

Es necesario proteger los taludes de carretera con malla metálica de triple torsión porque se tratan de mallas de alta resistencia y ofrecen seguridad al usuario para evitar el desprendimiento de material suelto en el talud y de una gran cantidad de derrumbes, que además son un peligro continuo para los vehículos y evitando así que se obstruya las vías de comunicación ya que es uno de los problemas más graves que presentan las carreteras.

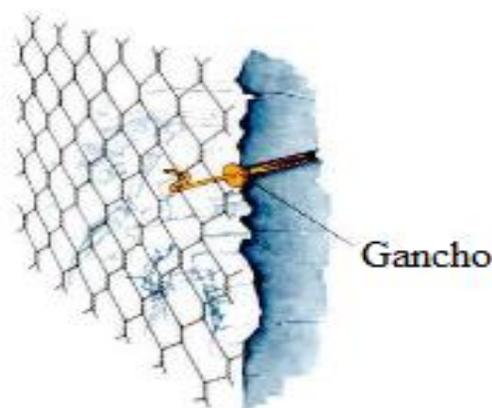
A. Usos generales de mallas de acero de alta resistencia GalMac 4R-P

Son varias las aplicaciones con mallas de acero de alta resistencia, generalmente, es empleada para la fabricación de gaviones, colchones para revestimiento y entre otros para la estabilización de taludes de cortes y terraplenes de carreteras.

Las mallas de acero de alta resistencia por su facilidad de colocación, generalmente, el uso que se le da es para estabilizar taludes:

- a) Cuando existen rocas sueltas con tamaños menores de 0,6 – 1 m hay la posibilidad de reforzar la superficie del talud usando malla hexagonal anclada, sirve como refuerzo de la superficie.
- b) En el caso de rocas compactas, para poder prevenir que estas tengan rupturas, se puede usar la malla de triple torsión simplemente enganchada a la superficie.
- c) En los casos de roca fracturada o en presencia de tierra y piedras sueltas, la red puede ser sujeta a través de barras de acero clavadas en el talud. En estas situaciones el revestimiento con red en malla hexagonal de triple torsión permite el rápido crecimiento de la vegetación. A través de las mallas pueden, inclusive crecer árboles, de tal manera que en poco tiempo el talud revestido tendrá la apariencia de una ladera natural.

Figura N° 19 Estabilización usando ganchos en la malla



Fuente: Folleto Maccaferri

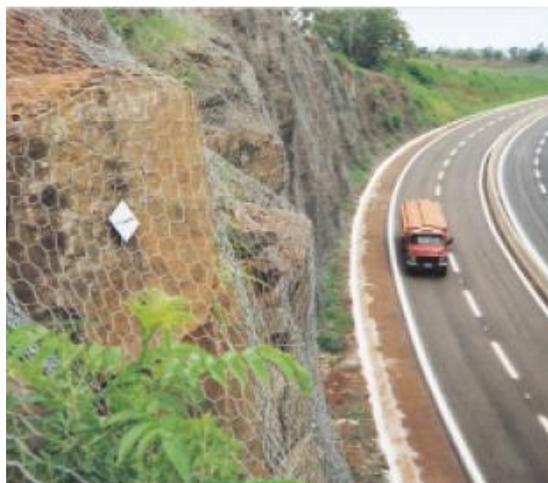
B. Características y ventajas

En las intervenciones para la sustentación de rocas es necesario el máximo nivel de seguridad, siendo que cualquier desprendimiento puede afectar seriamente bienes y personas. En estos casos se exigen materiales de alta resistencia y que al mismo tiempo sean flexibles, para que puedan acompañar y adherir a la superficie del talud. Estas son las características de las redes de alta resistencia que, por ser de acero, tienen alta resistencia a la tracción y al punzonamiento.

Su configuración geométrica (hexagonal de triple torsión) impide, en caso de ruptura, que los alambres se deshilen y, por ser tejida (no soldada) acompaña fácilmente la conformación de la superficie del talud.

Gracias a la triple torsión, es lo suficientemente fuerte para resistir el impacto de las rocas y aun cuando no exista traslape entre mallas, ésta trabaja de manera satisfactoria sin romperse.

Figura N° 20 Protección con malla



Fuente: Folleto Maccaferri

Los alambres de las redes de alta resistencia son revestidos con una aleación que proporciona una resistencia contra la corrosión, y para aplicaciones en ambientes agresivos o contaminados, se utiliza una protección adicional con revestimiento plástico que garantiza una larga vida útil, aún en condiciones extremadamente agresivas.

Muchas veces en los taludes y laderas se encuentran brotes de agua. Es importante, por lo tanto, no crear barreras impermeables para evitar la acumulación de agua y la consiguiente desestabilización del macizo. Las mallas de acero de alta resistencia son extremadamente permeables y drenantes, no necesitando sistemas complementarios de drenaje y contribuyendo para el saneamiento y recubrimiento vegetal del talud.

Otra de las ventajas más sobresalientes de las mallas de acero de alta resistencia usadas para la estabilidad de taludes es el bajo costo de instalación, dependiendo del tamaño del rollo de malla. Se puede decir también que actúa como revestimiento y favorece la recomposición ambiental.

Figura N° 21 Instalación de mallas en caídos



Fuente: Folleto Maccaferri.

Es un sistema que otorga una protección inmediata al suelo. Por la sencillez en la colocación, solo necesita de mano de obra local sin preparación. Además, por su gran resistencia y rapidez de manejo, es un sistema difícil de superar por otro método alternativo.

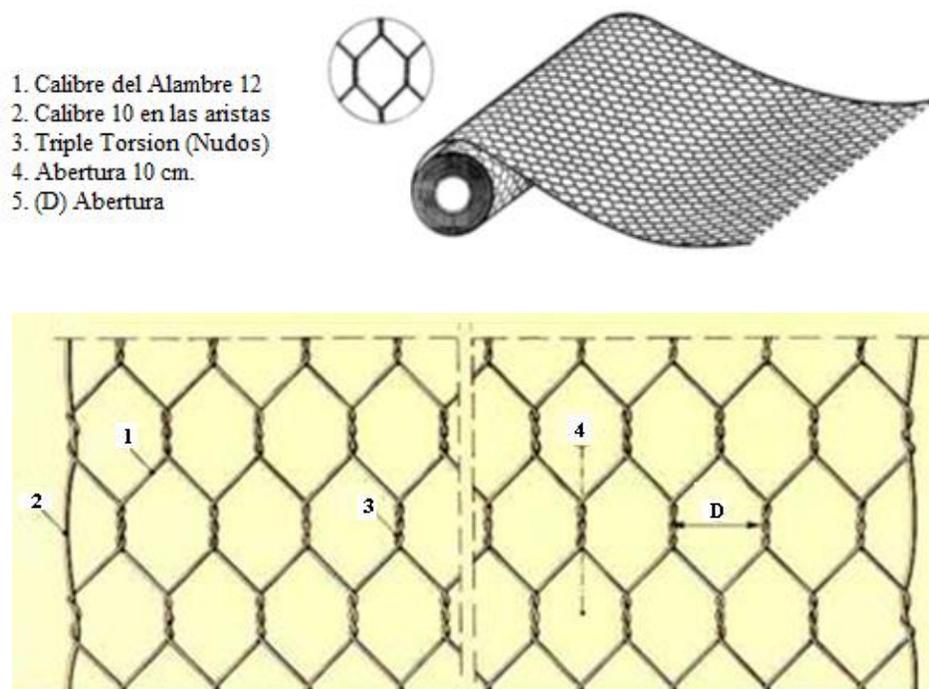
C. Especificaciones de malla metálica de triple torsión

La malla de acero de alta resistencia no se deshilvana, está hecha a base de girar continuamente pares de alambre para generar tres torsiones y dar forma a las aberturas hexagonales, las cuales después se interconectan a alambres adyacentes, dando origen a las aberturas hexagonales.

Todas las mallas son fabricadas con alambre galvanizado clase III, calibre de alambre 12, reforzado con calibre 10 en las aristas (triple galvanización) conforme con las normas para la resistencia mecánica.

Para la fabricación de la malla se prevé un alambre cuyo calibre es de 12 con o sin el revestimiento en PVC, deberá ser en acero galvanizado de acuerdo con las normas.

Figura N° 22 Malla de triple torsión



Fuente: Folleto presentación de estabilización Maccaferri.

D. Descripción de la malla

La malla hexagonal de triple torsión tiene aberturas tipo 8 x 10 cm o 6 x 8 cm., el diámetro de alambre de la malla está entre 2,2 y 3,4 mm dependiendo de la abertura de la malla, está fuertemente galvanizada y reforzada en las aristas. El alambre para amarre normalmente más utilizado para unir las mallas debe ser de 2,2 mm de diámetro.

Tabla N° 7 Especificaciones de la malla para control de caídos

Malla hexagonal galvanizada o recubierta con PVC		
Especificaciones		
Escuadría	8 x 10 cm.	6 x 8 cm.
Tipo	Triple torsión	Triple torsión
Diámetro del alambre	2,7 y 3,4 mm.	2,2 y 2,7 mm.
Tolerancias	± 5% Ancho ± 3% Largo	± 5% Ancho ± 3% Largo

Fuente: Folleto especificación malla Maccaferri

E. Esquemas de aplicación y colocación

Los modos de colocar las redes pueden ser varios y deben ser elegidos en función de la inclinación del talud, de su naturaleza geofísica, de las dimensiones de los materiales que normalmente pueden desprenderse y de la posibilidad de fijarse con anclas en las extremidades superiores e inferiores.

Figura N° 23 Colocación de anclas en T

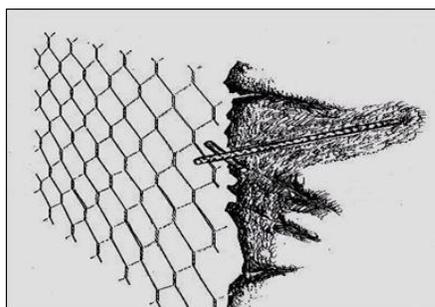


Fuente: Folleto protección contra caídos Maccaferri

Los tipos de anclaje y la separación entre los mismos depende del tipo de material del talud que se desea estabilizar, los desprendimientos, o si se encausan hacia la parte baja lo cual es preferible, dejando el anclaje adecuado en la parte inferior para poder remover la malla, sacando el desprendimiento acumulado y volver a fijar la malla. Es preferible fijar la malla en la parte inferior del talud con anclajes de barras de acero haciendo esto desmontable, para su mantenimiento.

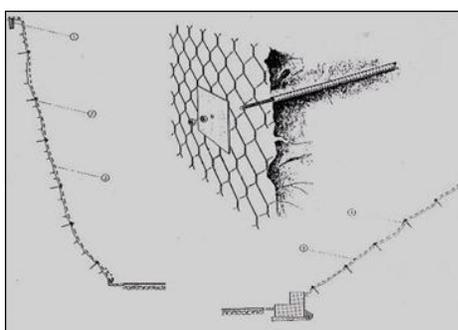
Hay varios tipos de anclaje que se usan para la parte superior del talud; los más usados para fijar las mallas de acero de alta resistencia son las varillas en forma de “T” o placas de acero colocadas a una profundidad de un metro y posteriormente ahogadas con mortero-cemento-arena.

Figura N° 24 Anclaje con varillas en forma de “T”



Fuente: Folleto Maccaferri

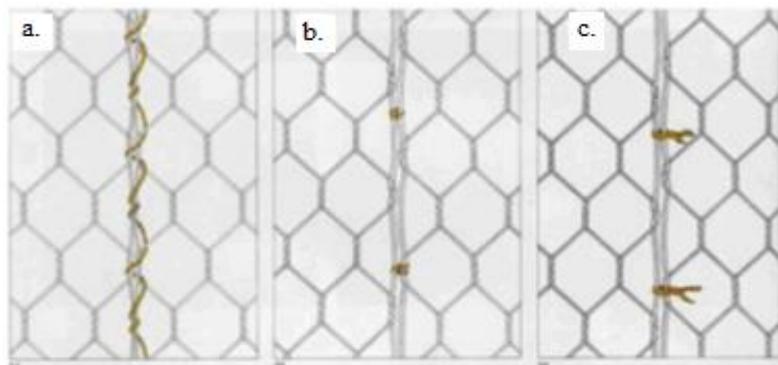
Figura N° 25 Anclaje con placa de acero



Fuente: Folleto Maccaferri

Los tipos de amarres que se hacen para unir los rollos de malla unas entre otras deben ser bien asegurados y amarrados continuamente entre sí usando alambre de amarre.

Figura N° 26 Tipos de amarre



Fuente: Folleto presentación de estabilización Maccaferri

- a. Amarre continuo (espiral).
- b. Amarre mecánico.
- c. Amarre de moño.

2.28.1.2. Geomantas textiles reforzadas

El MacMat R1 - GalMac 4R-P de Maccaferri, es un geocompuesto formado por la asociación de una geomanta flexible, tridimensional, que presenta más de 90% de vacíos, fabricada a partir de filamentos gruesos de polipropileno fundidos en todos los puntos de contacto y, un refuerzo metálico confeccionado con malla hexagonal de doble torsión, producida con alambres de acero de bajo contenido de carbono, con aleación GalMac 4R y adicionalmente recubierto con polímero especialmente desarrollado para obras de ingeniería.

La asociación de la geomanta y el refuerzo metálico, constituyendo un geocompuesto, permite que estos elementos trabajen juntos, confiriendo a la solución características de elevada capacidad anti-erosiva, con óptima resistencia a la tracción. Por esta razón, es indicada, para situaciones en las que existan taludes susceptibles a la erosión, con grandes alturas y pendientes muy empinadas, ya que, añade las ventajas de la geomanta a aquellas de un elemento de refuerzo.

Figura N° 27 Geomalla MACMAT R1 - GALMAC 4R-P

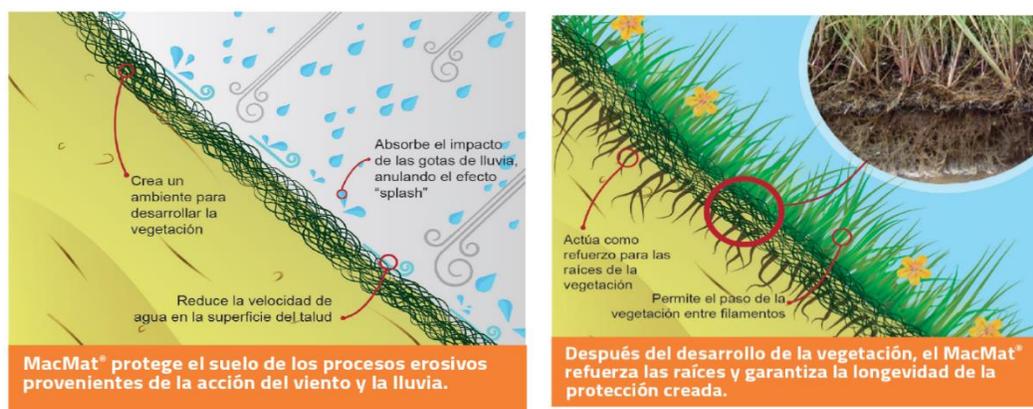


Fuente: Folleto MacMat

A. Principales funciones del MacMat:

- Proteger la superficie contra la erosión causada por la lluvia y el viento, así como los daños causados por el efecto “splash” (acción mecánica del impacto de las gotas de lluvia en el suelo)
- Reducir la velocidad del agua sobre la superficie del terreno, aumentando su rugosidad
- Evitar el transporte de partículas de suelo de la superficie protegida
- Prevenir la formación de grietas en los taludes
- Permitir el paso de la vegetación entre sus filamentos
- “Actuar” como refuerzo para las raíces de la vegetación
- Crear un ambiente propicio para el crecimiento de la vegetación, disminuyendo la radiación solar.

Figura N° 28 Propiedades de la Geomallas



Fuente: Folleto MacMat

B. Aplicaciones de la Geomalla MacMat

- Taludes erosionables expuestos a la acción de agentes externos como lluvias, viento, nieve, fauna local, actividades humanas, evitando efectivamente el desplazamiento de las capas superficiales de suelo y semillas.

- Cursos fluviales, canales revestidos y costas expuestas a erosión en condiciones hidráulicas moderadas, evitando el desplazamiento de las capas superficiales de suelo y semillas.
- Confinamiento de partículas y mezclas aglomerantes, cumpliendo la función de encofrado de aquellos materiales en pendientes pronunciadas.

C. Anclajes

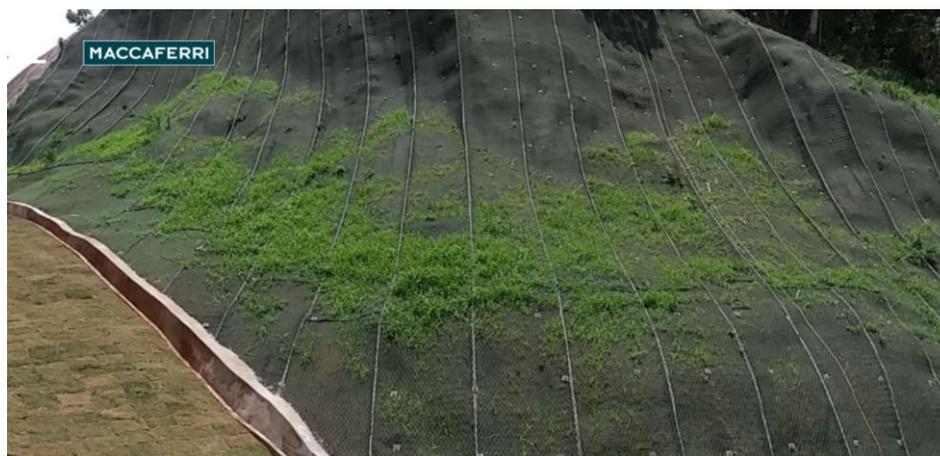
Revestimiento sobre la superficie con **Geomalla MACMAT R1 - GALMAC 4R-P**

Figura N° 29 Geocompuesto instalado en la superficie de un talud



Fuente: Folleto MacMat

Figura N° 30 Impermeabilización de taludes con geomallas reforzadas



Fuente: Folleto MacMat

2.28.1.3. Vegetación

A. Efecto de la vegetación sobre el talud

El tipo de vegetación tanto en el talud como en el área arriba del talud es un parámetro importante para su estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales: en primer lugar, tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y además da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces.

Como controlador de infiltraciones tiene efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo al tomar el agua que requiere para vivir.

B. Factores más importantes

- Intercepta la lluvia.
- Aumenta la capacidad de infiltración.
- Extrae la humedad del suelo.
- Grietas por desecación.
- Raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia al cortante.
- Ancla el suelo superficial a mantos más profundos.
- Aumentan el peso sobre el talud.
- Transmiten al suelo fuerza del viento.
- Retienen las partículas del suelo, disminuyendo susceptibilidad a la erosión.

La deforestación puede afectar la estabilidad de un talud de varias formas:

- Disminuyen las tensiones capilares de la humedad superficial.
- Se elimina el factor de refuerzo de las raíces.

- Se facilita la infiltración masiva de agua.

C. Acción de refuerzo de las raíces

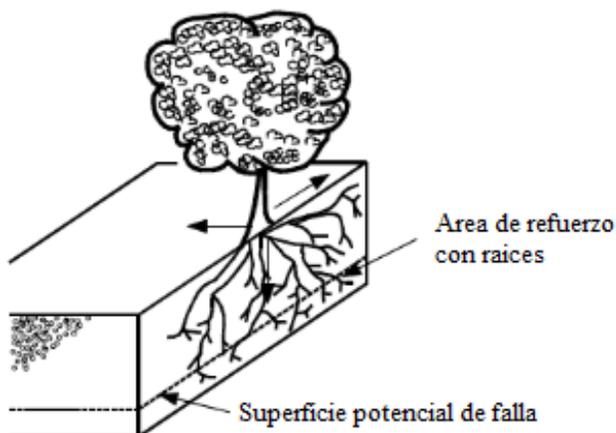
Las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades. Sidle (1985) explica el efecto de las raíces sobre la resistencia del suelo en tres formas:

Unir materiales de los suelos inestables a mantos más estables. Este efecto es más pronunciado donde la superficie crítica de falla se encuentra en la zona de raíces.

Formar una red densa entretejida en los primeros 30 a 50 centímetros de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.

Las raíces individuales actúan como anclajes que estabilizan los arcos de suelo que se extienden a través del talud. Las raíces actúan como pilas de refuerzo.

Figura N° 31 Refuerzo de superficie de falla por las raíces de los árboles



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

Una clasificación del refuerzo de taludes con las raíces de los árboles fue propuesta por Tsukamoto and Kusakabe (1984).

Tipo A: Taludes que poseen una capa muy delgada de suelo sobre roca masiva y sin defectos que permitan puntos de anclaje para las raíces y una superficie de falla potencial entre el suelo y la roca.

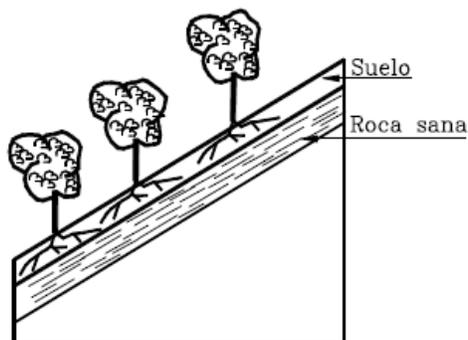
Tipo B: Una capa delgada de suelo sobre una roca con fracturas o defectos que permiten la entrada y anclaje de las raíces.

Tipo C: Varias capas de suelo y las raíces penetran normalmente las interfaces reforzando los contactos entre las diversas capas.

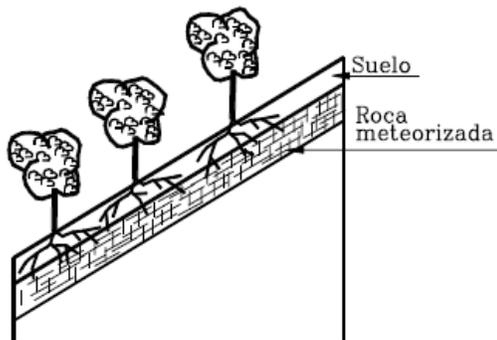
Tipo D: Taludes con una capa gruesa de suelo y raíces a profundidades superiores a las de las superficies potenciales de falla.

Figura N° 32 Tipos de anclaje de la superficie de falla por acción de las raíces

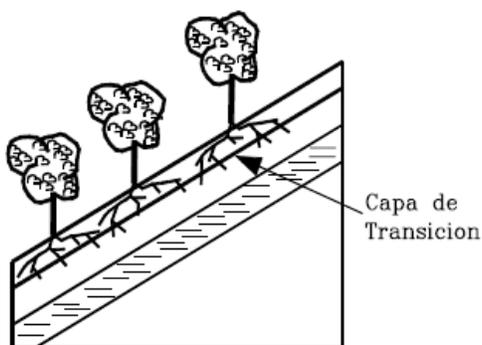
Tipo A
No hay anclaje.



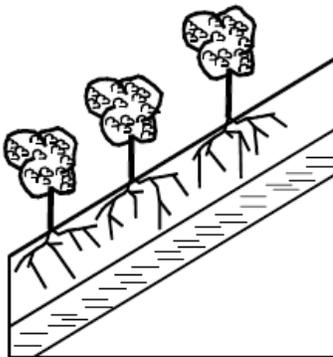
Tipo B
Anclaje del suelo a la roca.



Tipo C
Anclaje entre capas de suelo



Tipo D
Falla por debajo de la
profundidad de las raíces.



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

La profundidad de las raíces es un factor muy importante. La profundidad de refuerzo de las raíces de los pastos es de solo 20 centímetros comúnmente, pero algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos.

D. Limitaciones de la protección vegetal

El establecimiento exitoso de vegetación en un talud está determinado por muchos factores tales como: época de siembra, pendiente del talud, localización, y composición de los materiales del talud. Las épocas ideales de plantación son las semanas anteriores a la temporada de lluvias, sin embargo, se puede realizar el plantado en épocas secas disponiendo de un programa adecuado de riego.

La pendiente de los taludes tiene un efecto importante en el esfuerzo requerido para establecer la cobertura vegetal. Para taludes de pendiente alta se requiere colocar elementos de anclaje para los pastos y bermas para los árboles. En taludes de pendiente fuerte se aconseja no sembrar árboles, sino arbustos para disminuir las fuerzas del viento sobre ellos.

Si los materiales son muy duros se puede requerir la excavación de cajas profundas para la siembra de cada arbusto y deben utilizarse cantidades importantes de suelo orgánico o fertilizantes.

Con referencia a la localización del talud, los taludes que reciben la exposición directa del sol de la tarde presentan mayores dificultades para la vegetación, que los que reciben el sol de la mañana o poseen condiciones de sombra relativa.

Deben analizarse, además, los factores relacionados con la presencia del hombre como pisoteo, quemas, basuras, humo de los vehículos, etc.

E. Selección de especies vegetales

Como no existen especies universales se debe acudir a los expertos forestales para escoger la especie de pasto, hierba, arbusto o árbol que se debe utilizar para cada caso específico, teniendo muy en cuenta la experiencia local y las diferencias de tolerancias y hábitos de las diferentes especies.

El tipo de vegetación que cubre la superficie del talud tiene efecto sobre la estabilidad, por ejemplo, Campbell (1975) reportó que los deslizamientos de suelo eran 3 a 5 veces más frecuentes en aquellos taludes cubiertos por pastos que en aquellos cubiertos por maleza y arbustos. Los deslizamientos en taludes cubiertos por pasto eran más cortos y más anchos y ocurren a ángulos de inclinación menores que aquellos cubiertos por maleza.

La especie vegetal debe seleccionarse que sea compatible con las condiciones del suelo y el sitio, incluyendo disponibilidad de agua, nutrientes, PH, clima, regulaciones gubernamentales, etc.

Ciertos tipos de planta son intrínsecamente mejores que otras para objetivos de estabilización específicos. La vegetación maderable posee raíces más profundas y más resistentes que las plantas herbáceas y pastos, y provee un mejor refuerzo y efecto de arco.

Tabla N° 8 Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedades para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles de establecer en las riberas de ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Arbustos	Variedades para escoger. Existen especies que se reproducen por estaca. Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer.
Árboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.

Fuente: Suárez Díaz. 1998

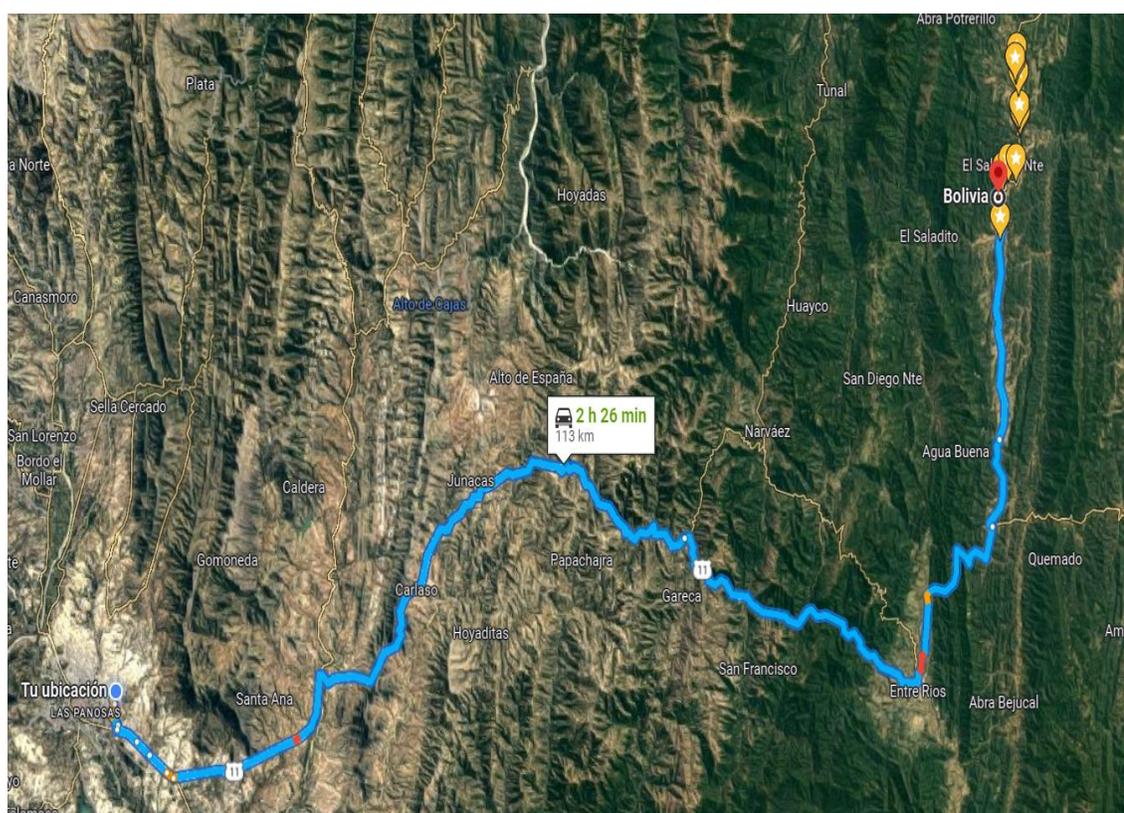
CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN DE LOS TALUDES EN ESTUDIO

3.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio

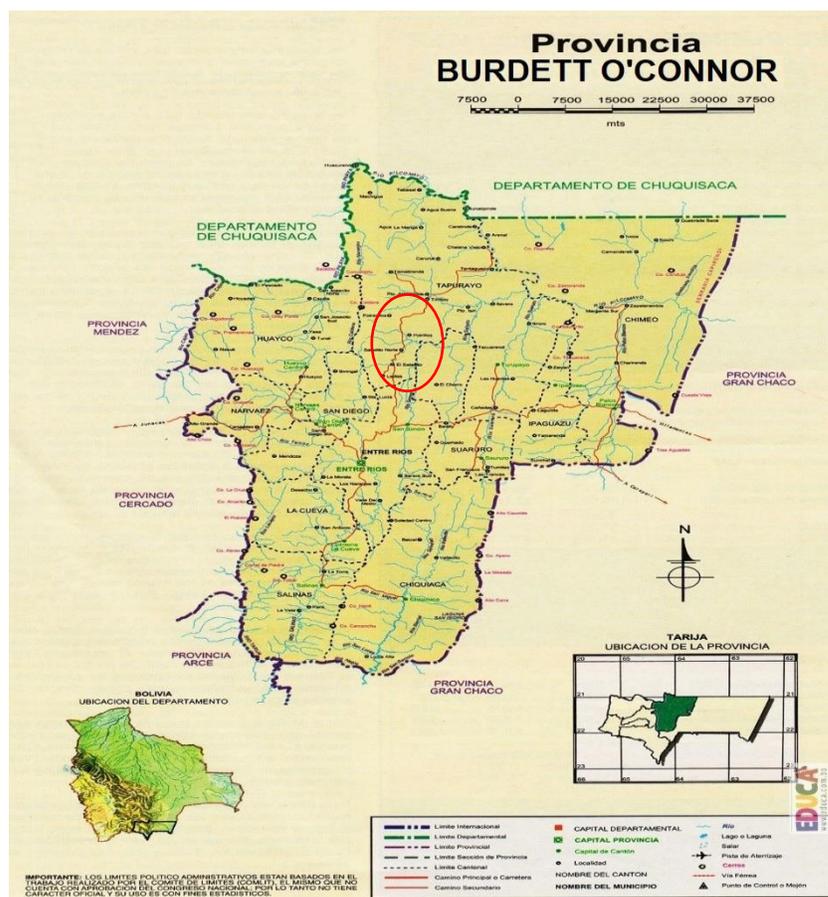
La zona de estudio está ubicada en la provincia O'Connor municipio de Entre Ríos del Departamento de Tarija, al sur de Bolivia, ubicada a 115 km. de la capital del departamento, el punto de referencia Progresiva km 0+000 inicia en el tramo Saladito Norte - Timboy, el estudio se realizó desde la progresiva 2+950 a 10+110.

Figura N° 33 Ubicación geográfica



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 34 Mapa de ubicación de la zona de estudio



Fuente: Mapas cartográfico de provincia O'connor

3.2. Geología regional

3.2.1. Clima

La temperatura media anual de Entre Ríos es de 20,9 °C y las precipitaciones anuales rondan los 1300 mm, concentrándose fundamentalmente en verano, de enero a marzo.

El clima de Entre Ríos es del tipo clima subtropical húmedo con invierno seco , de acuerdo con la clasificación climática.

3.3. Metodología

El método inductivo, como tal, sigue una serie de pasos. Inicia por la observación de determinados hechos, los cuales registra, analiza y compara. A continuación, clasifica la observación obtenida, establece patrones, hace generalizaciones para inferir de todo lo anterior una aplicación o teoría.

El método inductivo es una estrategia de razonamiento que se basa en la inducción para ello procede a partir de premisas particulares para generar conclusiones generales. En este sentido el método inductivo opera realizando generalizaciones amplias apoyándose en observaciones específicas. Esto es así porque en el razonamiento inductivo las premisas son las que proporcionan la evidencia que dota de veracidad con una conclusión.

Con este método ya definido en los párrafos anteriores se desarrolló el presente proyecto mediante la aplicación de acciones específicas, que va a regir en la toma de datos, que estará basado en la aplicación de la estabilidad de taludes utilizando el programa Slide para obtener los factores de seguridad, esta aplicación de estabilidad será en un tramo específico con características propias de la zona de la red departamental de Tarija.

Con esta información y datos se procedió a la caracterización y agrupamiento de los taludes para así poder realizar el análisis de estabilización de taludes mediante los métodos de cálculo de Bishop simplificado, Spencer y Morgenstern - Price y determinar su grado de inestabilidad de acuerdo a su factor de seguridad mediante el software Slide v6.0.

Finalmente, luego de realizado el análisis de estabilidad, se realizará un estudio de alternativas de estabilización de taludes mediante un análisis de su viabilidad técnica, económica y de seguridad donde se propendió las alternativas de estabilización que mejor se adecúen a cada talud con problema de inestabilidad.

3.4. Características de los componentes de los taludes

La construcción del Tramo Saladito Timboy Tabasay trajo consigo importantes movimientos de tierra, lo que generó taludes con inclinaciones proporcionales a lo largo

del tramo. Algunos taludes en el tramo de estudio presentan deslizamientos importantes, con frecuente acumulación de material al pie del talud (plataforma y cunetas).

Por lo que es necesario realizar un análisis de la estabilidad de los Taludes y así tomar medias de acciones de conservación de taludes para contrarrestar estos efectos de inestabilidad de manera que se puedan minimizar o hasta eliminar el problema, dando así mayor seguridad al tránsito vehicular y disminuir el costo de mantenimiento tramo.

3.4.1. Criterios técnicos para la selección de los taludes

3.4.1.1. Taludes en riesgo de deslizamiento

Al evidenciar en lugar de estudio se pudo observar taludes que presentaban una seria de deslizamiento, erosión y desprendimiento de material, lo cual presenta riesgo de deslizamiento, por esta razón estos taludes que presentaban estas características se decide identificarlos para su posterior estudio.

Figura N° 35 Talud N° 5

Progresiva km 6+770



Fuente: Elaboración propia

3.4.1.2. Tamaño o altura máxima del talud

Es muy importante a la hora de realizar un estudio de estabilidad de taludes visualizar el tamaño del talud es decir la altura máxima que presenta el mismo ya que al poseer una elevada altura, posee una mayor masa de suelo = mayor peso, este peso transmite esfuerzos cortantes en la estructura interna del suelo el cual tiende a producir una serie de fallas para su posterior riesgo de deslizamiento de material.

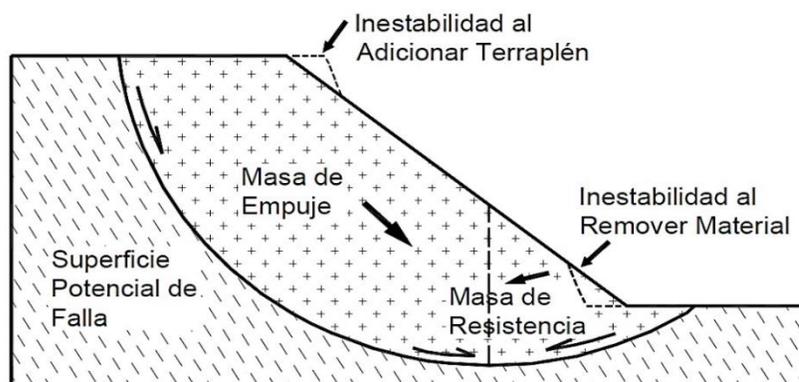
Figura N° 36 Talud N° 4

Progresiva Km 4+160



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 37 Dirección de los esfuerzos cortantes

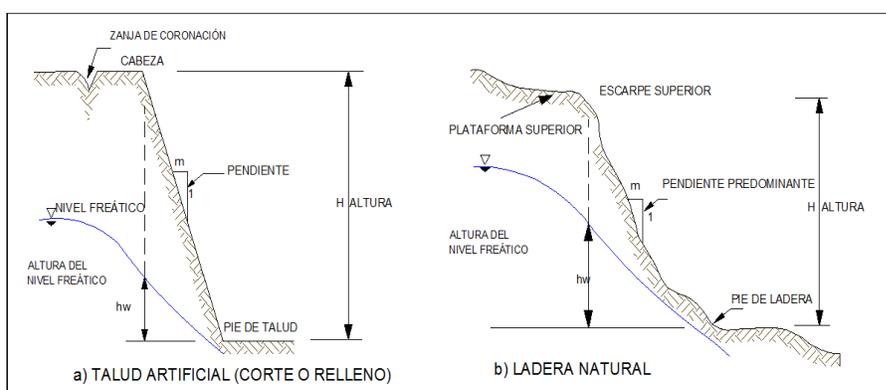


Fuente: Suárez Díaz. 1998.

3.4.1.3. Forma del talud

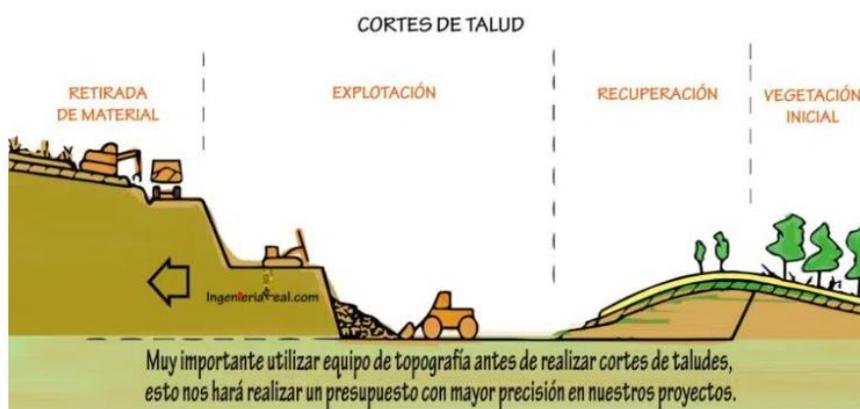
Los taludes a ser estudiados presentan pendientes de corte considerable, mientras más pendiente posean los taludes mayor riesgo de deslizamiento, de acuerdo a la metodología existe un método el cual se denomina modificación de la topografía o cambio de geometría del talud es decir reducir la pendiente del mismo realizando corte de material por esta razón se procedió a identificar para su posterior estudio.

Figura N° 38 Partes que conforman un talud inestable



Fuente: Armas-Zagoya

Figura N° 39 Cortes del Talud



Fuente: Suárez Díaz. 2005.

Una vez realizado y analizado los criterios técnicos para la selección de los taludes se procede a identificar todos los taludes de la zona de estudio.

Figura N° 40 Talud N° 1



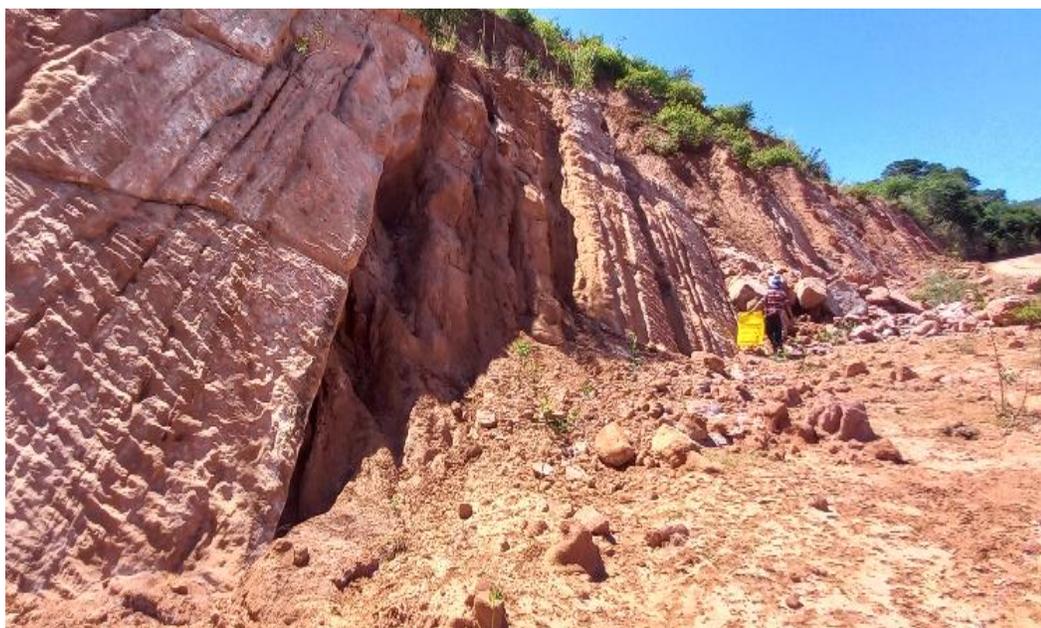
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 41 Talud N° 2



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 42 Talud N° 3



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 43 Talud N° 4



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 44 Talud N° 5



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 45 Talud N° 6



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 46 Talud N° 7



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 47 Talud N° 8



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 48 Talud N° 9



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 49 Talud N° 10



Fuente: Elaboración propia

Con el propósito de que la investigación permita lograr los objetivos previstos se eligió taludes cuyos materiales constituyentes sean diferentes en su constitución, estratificación y comportamiento en la superficie del talud, mismos que presentan materiales finos hasta taludes que presentan suelos limosos, arenosos en su mayoría, clasificación que será expuesta más adelante.

3.5. Desarrollo de la investigación

Una vez definida la ubicación de los taludes inestables en el tramo “el tramo Saladito Norte - Timboy” se procedió al estudio de suelos que está dividida en tres etapas:

- Trabajo de campo.
- Trabajo de laboratorio.
- Trabajo de gabinete.

A continuación, se describe el trabajo que se realizó en campo, laboratorio y gabinete.

3.5.1. Trabajo de campo

Esta fase comprendió el reconocimiento de los taludes con mayor inestabilidad aparente con el fin de constatar el estado de los mismos, mediante observaciones, mediciones, toma de muestras para ensayos de laboratorio, etc., para así determinar el tipo de inestabilidad y los factores que influyen en esta, y posteriormente establecer las posibles soluciones.

Es importante para el desarrollo del proyecto de grado, entorno a la investigación y el estudio de alternativas técnicas para la estabilidad de taludes, la visita al tramo carretero Saladito Norte – Timboy , con el fin de constatar el estado de la misma, con énfasis en los taludes de mayor inestabilidad aparente, para mediante observaciones, mediciones, toma de muestras para ensayos de laboratorio, etc., determinar el tipo de inestabilidad y los factores que influyen en esta, y posteriormente establecer las posibles soluciones. A continuación, se describe el trabajo que se realizó en campo, laboratorio y gabinete.

3.5.2. Ubicación de los tramos de estudio

En primer lugar, se procedió a ubicar las zonas de estudio en tramo carretero de acuerdo a sectores donde existan los taludes de mayor riesgo de inestabilidad, y de los diferentes tipos de suelos que los componen.

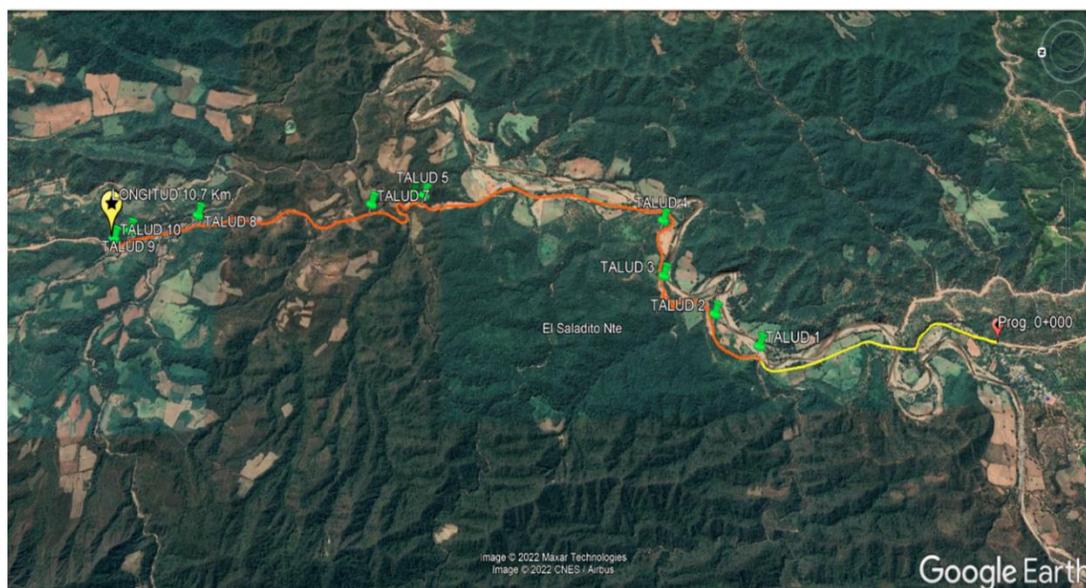
A continuación, se elabora una descripción de los lugares de interés, de acuerdo a la progresiva real de la vía.

Tabla N° 9 Relevamiento tramo en estudio

Progresiva km.		Punto de interés	Observaciones
Inicio	Fin		
2+400	2+440	Talud 1	Talud de gran longitud y altura con desprendimiento de material
2+910	3+110	Talud 2	Talud de gran longitud y altura con caída de sedimentos.
3+640	3+760	Talud 3	Talud de gran longitud y altura con grietas y caída de sedimentos.
4+160	4+260	Talud 4	Talud con desprendimiento de material y caída de sedimentos.
6+770	6+890	Talud 5	Talud de gran longitud y altura con desprendimiento de material y caída de sedimentos.
6+960	7+100	Talud 6	Talud de gran longitud y altura con gran desprendimiento de material
7+450	7+510	Talud 7	Talud con desprendimiento de material y caída de sedimentos.
9+260	9+310	Talud 8	Talud de gran longitud con gran desprendimiento de material.
9+890	9+960	Talud 9	Talud de gran longitud con gran desprendimiento de material sedimento.
10+060	10+110	Talud 10	Talud de con desprendimiento con caída de sedimentos.

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 50 Ubicación de los taludes estudiados



Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico se realizó en 10 taludes de mayor riesgo de inestabilidad relevados anteriormente de acuerdo a la progresiva real de la vía y sus coordenadas, luego se procedió a determinar los parámetros básicos de la geometría, como la altura vertical (h), la longitud horizontal (L) y la pendiente del plano del talud.

Para el levantamiento se necesitó el apoyo de un equipo topográfico estación total marca Sokkia, un GPS y demás accesorios, dichos equipos que mediante solicitud fueron usados, pertenecen al laboratorio de Topografía y Vías de comunicación de la Universidad Juan Misael Saracho.

Figura N° 51 Levantamiento topográfico talud N° 10



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 52 Estación total Sokkia set 5x, levantamiento topográfico talud N° 7



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 53 Levantamiento topográfico talud N° 5

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 10 Datos del levantamiento topográfico

Punto Interés	Progresiva (km)		Longitud de proyección (m)		Pendiente			Coordenadas UTM	
	Inicio	Fin	Long.	Altura	V	H	°	Este	Norte
Talud 1	2+400	2+440	40	19.07	1	0,510	63	383900	7644500
Talud 2	2+910	3+110	200	39.63	1	0,510	63	384200	7644900
Talud 3	3+640	3+760	120	35.23	1	0,510	63	384525	7645310
Talud 4	4+160	4+260	100	33.41	1	0,510	63	385025	7645300
Talud 5	6+770	6+890	120	27.47	1	0,510	63	385300	7647475
Talud 6	6+960	7+100	140	31.96	1	0,510	63	385350	7647710
Talud 7	7+450	7+510	60	17.54	1	0,510	63	385275	7648100
Talud 8	9+260	9+310	50	13.96	1	0,510	63	385200	7649775
Talud 9	9+890	9+960	70	16.41	1	0,510	63	385050	7650375
Talud 10	10+060	10+110	50	11.69	1	0,510	63	385000	7650525

Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Recolección de muestras

Ya conociendo la topografía, para la caracterización de materiales en la fase de trabajo de campo, se procedió a realizar la recolección de las muestras representativas del material, se extrajo muestras del pie, cuerpo y cabeza de cada uno de los diez taludes objeto de estudio.

La toma de muestras se hizo de forma manual, con la ayuda de herramientas como pico de mano, pala, introduciendo luego el material en bolsas plásticas identificadas con la ubicación de su extracción.

Figura N° 54 Recolección de muestras cabeza talud N° 8



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 55 Recolección de muestras cuerpo talud N° 10



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 56 Recolección de muestras pie talud N° 6



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 57 Recolección de muestras pie talud N° 10 - Cabeza



Fuente: Elaboración propia

3.6. Trabajo de laboratorio

Para la caracterización de materiales de los diez taludes de estudio, las muestras obtenidas fueron analizadas en el laboratorio de suelos INGEOSUD.

En esta fase, el trabajo está orientado a conocer la distribución granulométrica de las partículas sólidas que constituyen los suelos investigados, proporcionando un nivel de referencia que, juntamente con los otros trabajos de laboratorio, permitieron conocer las características, las propiedades físicas y mecánicas de los suelos que conforman cada talud objeto a estudio.

Los ensayos realizados en laboratorio son los siguientes:

- Distribución granulométrica de los materiales constitutivos del suelo, mediante la vía del tamizado según ASTM D 2487/AASHTO M-145 (método del lavado).
- Establecimiento de los límites de consistencia o los límites de Atterberg:
 - Límite líquido

- Límite plástico
- Índice de plasticidad.
- Clasificación de los suelos, adoptando el sistema internacional AASHTO y el Sistema de Clasificación Unificado SUCS.
- Determinación del peso unitario ASTM D 7263.
- Determinación del ángulo de fricción y de la cohesión mediante el ensayo de corte directo según ASTM D 3080-72.

3.6.1. Granulometría

Se llama granulometría o análisis granulométrico a la determinación de la distribución de las partículas de un suelo en cuanto a su tamaño; se hace por proceso de tamizado (tamices) en suelos de grano grueso, y por un proceso de sedimentación en agua o por el método del lavado.

Figura N° 58 Tamizado de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 59 Granulometría suelo granular talud 9 - cabeza



Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Límite líquido (LL)

El límite líquido de un suelo se define como el contenido máximo de humedad a partir del cual dicho suelo deja de comportarse plásticamente y pasa a comportarse como un líquido. Es el contenido de agua del material en el límite superior de su estado plástico.

Figura N° 60 Humedeciendo la muestra para ensayo de límites



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 61 Ensayo del límite líquido en el equipo de Casa Grande



Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Límite plástico (LP)

El límite plástico de un suelo es el contenido de humedad correspondiente a un límite convencional entre los estados de consistencia plástico y semisólido. Es el contenido de agua del material, en el límite inferior de su estado plástico.

Figura N° 62 Determinación del límite plástico



Fuente: Elaboración propia

3.6.4. Peso unitario

Peso unitario del suelo, es el peso, por unidad de volumen, de la parte sólida (partículas) de un suelo. Se considera también como el volumen total de la muestra de suelo.

El peso unitario del suelo varía de acuerdo al contenido de agua del suelo, definidos como: peso unitario húmedo (no saturado), peso unitario saturado y peso unitario seco.

De acuerdo a la norma ASTM D 7263, puede realizar por el método de medición directa, aplicando la siguiente fórmula:

$$\rho_m = (M_t / V)$$

Donde:

ρ_m = Peso unitario de la muestra

M_t = Masa de la muestra del suelo húmedo/total (gr)

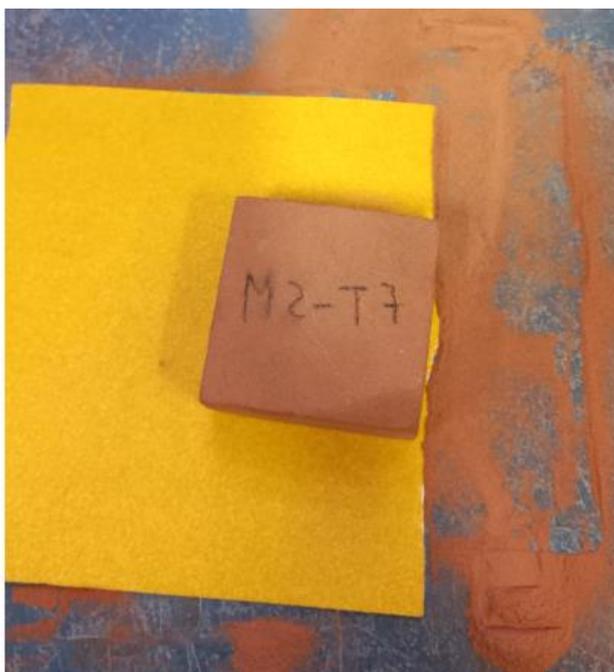
V = Volumen de la muestra de suelo húmedo (cm^3)

Figura N° 63 Realizando el tallado de la muestra intacta cúbica



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 64 Realizando el acabado manual de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 65 Realizando la medición precisa con el vernier de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 66 Obteniendo el peso de la muestra



Fuente: Elaboración propia

3.6.5. Ensayo de corte directo

El ensayo de Corte Directo determina los parámetros de resistencia al corte de los suelos, Angulo de fricción (ϕ) y cohesión (C), es uno de los ensayos más comunes, debido a que es simple y económico de realizar frente al ensayo de Triaxial, dichos parámetros que nos brinda el ensayo de corte son puntuales y suficientes para aplicar a las metodologías de Análisis de estabilidad de taludes.

Ventajas del ensayo de corte directo

- El ensayo es relativamente rápido y fácil de llevar a cabo.
- Se puede realizar ensayos a todo tipo de muestras inalteradas, remodeladas o compactadas
- El principio básico es fácilmente comprensible.
- La preparación de la muestra no es complicada.

- El principio puede aplicarse a suelos granulares y otros materiales que contienen grandes partículas que serían muy caras de ensayar por otros medios.
- Puede medirse el ángulo de fricción entre suelo y roca, o entresuelo y otros materiales.
- El ensayo Triaxial es, relativamente, mucho más difícil de ejecutar e interpretar, especialmente si se toman medidas de presión de poros.
- El tamaño de las muestras hace que efectuar ensayos consolidados no drenados y consolidados drenados no requiere demasiado tiempo, pues el tiempo de drenaje es bastante corto aún para materiales con bajo coeficiente de permeabilidad, debido a que el camino de drenaje es muy pequeño.
- Se ha introducido cajas con muestra cuadrada de forma que la reducción de área durante el ensayo pueda fácilmente tenerse en cuenta si se desea. El uso de cajas cuadradas es relativamente reciente, y la mayoría de las máquinas antiguas todavía en servicio, utilizan cajas circulares.
- Se ha encontrado que los parámetros de suelo ϕ y C obtenidos por el método de corte directo son casi tan confiable como los valores Triaxial (probablemente esto se debe más a problemas del operador que al hecho de que los equipos tengan igual capacidad de comportamiento). Lo anterior no quiere indicar que el ensayo Triaxial sea indeseable; sino que, si se desean únicamente los parámetros de suelo, los valores que brinda el ensayo de corte directo se han encontrado usualmente bastante aceptables.

El ensayo de corte directo se desarrollado en el laboratorio de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho para la determinación de la resistencia al corte de un suelo.

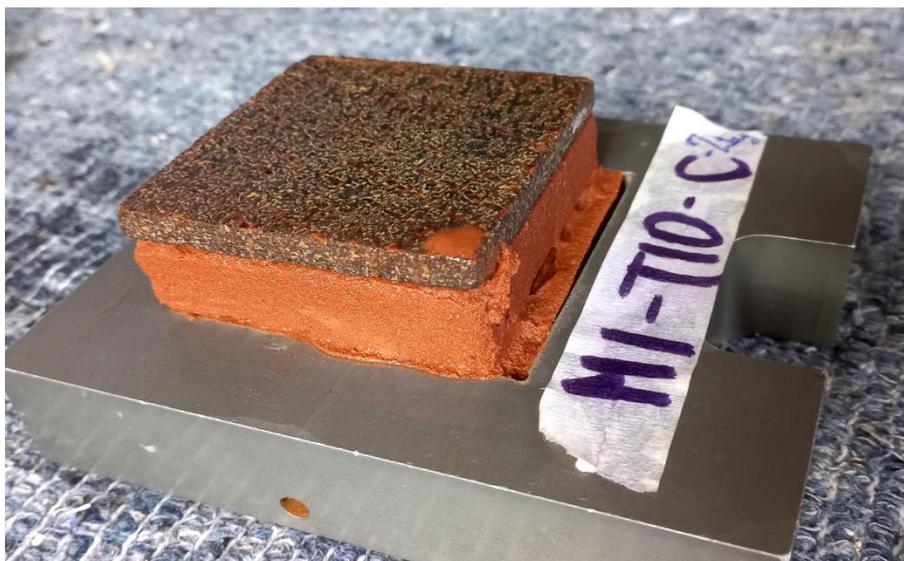
Esta prueba es realizada mediante la deformación de un espécimen en un rango de deformación controlada. Generalmente se realizan un mínimo de 3 pruebas, cada una bajo una diferente carga normal para determinar el efecto sobre la resistencia y desplazamiento y las propiedades resistentes. De esta manera se determinan los parámetros de corte, ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c) del suelo.

Figura N° 67 Equipos para realizar los ensayos de corte directo



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 68 Muestra ensayada



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 69 Extrayendo la muestra del equipo de corte directo



Fuente: Elaboración propia

3.7. Trabajo de gabinete

Este aspecto contempló el análisis profundo de todos los ensayos realizados en el laboratorio, en este trabajo de gabinete se realizaron todas las observaciones y cálculos correspondientes para obtener los resultados de los diferentes ensayos para la caracterización de los materiales.

También en el trabajo de gabinete, se elaboraron todas las tablas resumen, de la clasificación de los suelos, peso específico, cohesión y ángulo de fricción interna para posteriormente calcular con estos datos el factor de seguridad de cada talud en el programa Slide v6.0 por los métodos de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern-Price.

3.8. Resultados de laboratorio

Mediante el estudio de suelos, realizado en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, se obtuvo las granulometrías, los límites de consistencia y por consiguiente la clasificación de suelos para los tres taludes. Este detalle se muestra en la parte de anexos.

Las muestras de los taludes en las partes de pie, mitad, y cabeza de acuerdo al estudio realizado, tienen la siguiente clasificación:

Tabla N° 11 Resultados de caracterización de suelos

Talud	Parte del talud	Pasa N° 200	Contenido de humedad	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Índice de Grupo
T-1	Cabeza	65,05	1,83	0	0	0	6
	Cuerpo	67,85	1,77	0	0	0	7
	Pie	58,56	1,74	0	0	0	5
T-2	Cabeza	69,48	3,67	24	20	4	7
	Cuerpo	72,42	3,70	22	19	4	7
	Pie	58,05	3,62	24	20	4	5
T-3	Cabeza	86,22	3,27	21	17	4	8
	Cuerpo	84,83	3,23	22	18	4	8
	Pie	85,65	3,49	21	17	4	8
T-4	Cabeza	78,87	1,70	23	19	4	8
	Cuerpo	79,55	1,65	24	20	4	8
	Pie	75,36	1,73	24	21	4	8
T-5	Cabeza	53,10	2,62	19	15	4	4
	Cuerpo	51,12	2,55	20	16	4	3
	Pie	51,92	2,59	20	16	4	3
T-6	Cabeza	86,02	3,24	21	18	4	8
	Cuerpo	86,38	3,31	23	19	4	8
	Pie	87,41	3,36	23	19	4	8
T-7	Cabeza	70,85	1,96	21	18	4	7
	Cuerpo	75,28	1,92	23	19	4	8
	Pie	76,23	1,99	21	17	4	8
T-8	Cabeza	24,68	2,35	0	0	0	0
	Cuerpo	26,86	2,31	0	0	0	0
	Pie	29,79	2,28	0	0	0	0
T-9	Cabeza	49,93	2,73	21	16	5	3
	Cuerpo	67,23	1,52	0	0	0	6
	Pie	63,62	1,55	0	0	0	6
T-10	Cabeza	61,25	1,79	20	14	6	5
	Cuerpo	81,15	1,84	23	19	4	8
	Pie	80,10	1,87	22	18	4	8

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 12 Resultados de clasificación de suelos

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	Descripción
T-1	Cabeza	ML	A-4 (6)	Limos inorgánicos, limos arenosos no plásticos..
	Cuerpo	ML	A-4 (7)	Limos inorgánicos, limos arenosos no plásticos.
	Pie	ML	A-4 (5)	Limos inorgánicos, limos arenosos no plásticos.
T-2	Cabeza	ML	A-4 (7)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad.
	Cuerpo	ML	A-4 (7)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad.
	Pie	ML	A-4 (5)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
T-3	Cabeza	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad.
	Cuerpo	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad.
	Pie	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
T-4	Cabeza	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
	Cuerpo	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
	Pie	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
T-5	Cabeza	ML	A-4 (4)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
	Cuerpo	ML	A-4 (3)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
	Pie	ML	A-4 (3)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
T-6	Cabeza	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
	Cuerpo	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
	Pie	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
T-7	Cabeza	ML	A-4 (7)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
	Cuerpo	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
	Pie	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad
T-8	Cabeza	SM	A-2-4 (0)	Arenas limosas, mezclas de arena y limo
	Cuerpo	SM	A-2-4 (0)	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
	Pie	SM	A-2-4 (0)	Arenas limosas, mezclas de arena y limo
T-9	Cabeza	SM-SC	A-4 (3)	Arenas con presencia de gravas pequeñas, limos y arcillas
	Cuerpo	ML	A-4 (6)	Arenas limosas, mezclas de arena y limo
	Pie	ML	A-4 (6)	Arenas limosas, mezclas de arena y limo
T-10	Cabeza	ML-OL	A-4 (5)	Limos y arcillas orgánica e inorgánica de baja plasticidad.
	Cuerpo	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad.
	Pie	ML	A-4 (8)	Limos inorgánicos, limos arenosos de baja plasticidad.

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 13 Cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario

Talud	Parte del talud	Cohesión		Ángulo de fricción	Peso Unitario (KN/m ³)	
		Kg/cm ²	KN/m ²		Húmedo	Seco
T-1	Cabeza	0,28	27,25	27	22,31	21,19
	Cuerpo	0,24	24,46	30	22,27	21,55
	Pie	0,24	23,33	30	23,07	21,86
T-2	Cabeza	0,26	26,41	25	20,20	19,73
	Cuerpo	0,23	23,92	32	21,07	20,24
	Pie	0,26	26,13	31	20,96	20,11
T-3	Cabeza	0,21	21,19	28	20,50	20,13
	Cuerpo	0,20	20,38	28	21,41	20,74
	Pie	0,22	22,34	29	21,22	20,31
T-4	Cabeza	0,21	21,60	27	21,64	21,07
	Cuerpo	0,23	23,49	32	21,53	20,75
	Pie	0,24	24,96	31	21,41	20,46
T-5	Cabeza	0,22	22,25	29	21,24	20,07
	Cuerpo	0,24	23,85	32	21,16	20,91
	Pie	0,23	23,22	32	20,95	20,62
T-6	Cabeza	0,25	25,98	30	22,82	21,77
	Cuerpo	0,26	26,40	32	22,11	21,34
	Pie	0,27	27,18	31	21,94	20,65
T-7	Cabeza	0,25	24,12	24	21,13	20,46
	Cuerpo	0,22	22,04	25	21,72	21,35
	Pie	0,24	23,65	26	21,20	20,51
T-8	Cabeza	0,20	19,13	27	19,18	18,58
	Cuerpo	0,18	17,58	29	19,06	18,56
	Pie	0,18	18,09	28	18,99	18,22
T-9	Cabeza	0,17	16,58	33	14,53	14,01
	Cuerpo	0,21	20,64	30	19,27	18,63
	Pie	0,20	20,06	29	19,24	18,37
T-10	Cabeza	0,13	12,88	35	14,86	13,97
	Cuerpo	0,20	19,25	28	19,83	18,66
	Pie	0,21	20,99	29	19,72	18,47

Fuente: Elaboración propia

Los valores de cohesión, ángulo de fricción y peso específico están dentro de los rangos de valores según el tipo de suelo de las tablas de “Suelos, fundaciones y muros. María Graciela Fratelli. 1993”, “Principios de ingeniería y cimentaciones, Braja M. Das. 4ta edición. 2013” y “Mecánica de suelos y fundaciones, Budhu, 2000”

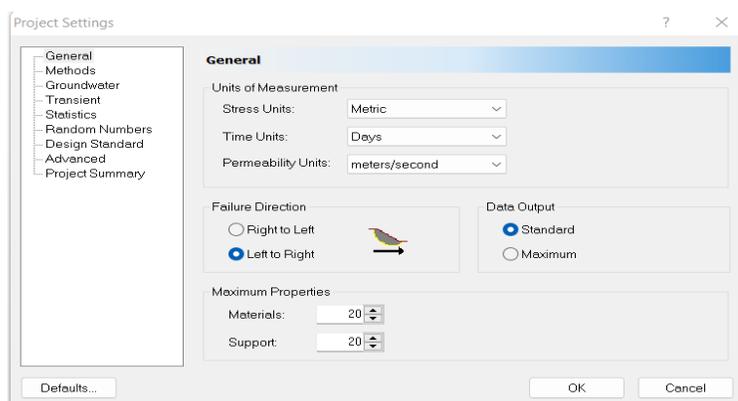
CAPÍTULO IV

APLICACIÓN PRÁCTICA CON EL PROGRAMA SLIDE Y ANÁLISIS ECONÓMICO DE ALTERNATIVA

4.1. Procedimiento de cálculo del factor de seguridad con el programa Slide

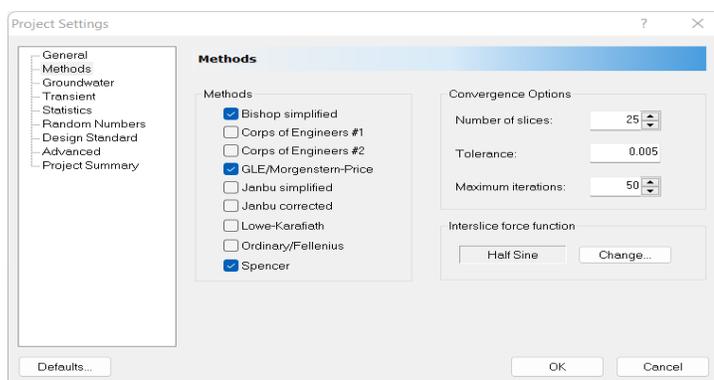
Visualizando el programa vamos a la pestaña de comandos en la parte superior izquierda “análisis” y definimos las “características generales y específicas del proyecto” (unidades, sentido de la falla, métodos a utilizar, cantidad de dovelas, nombre del proyecto, etc.)

Figura N° 70 Configuración general del proyecto



Fuente: Slide v6.0

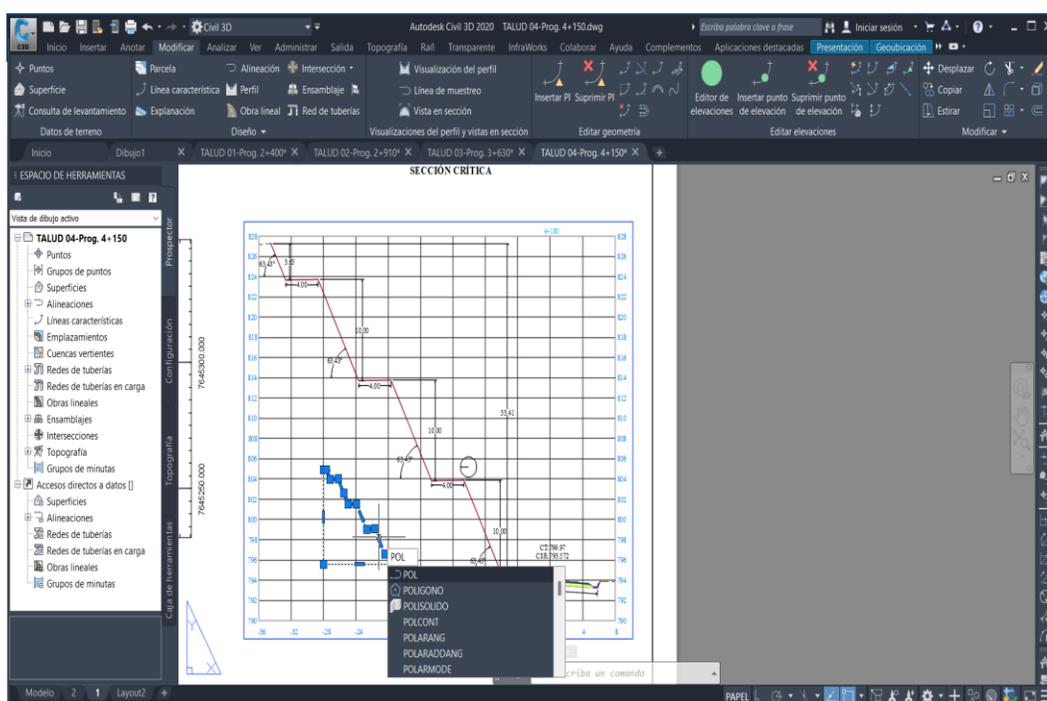
Figura N° 71 Configuración de los métodos de análisis de estabilidad



Fuente: Slide v6.0

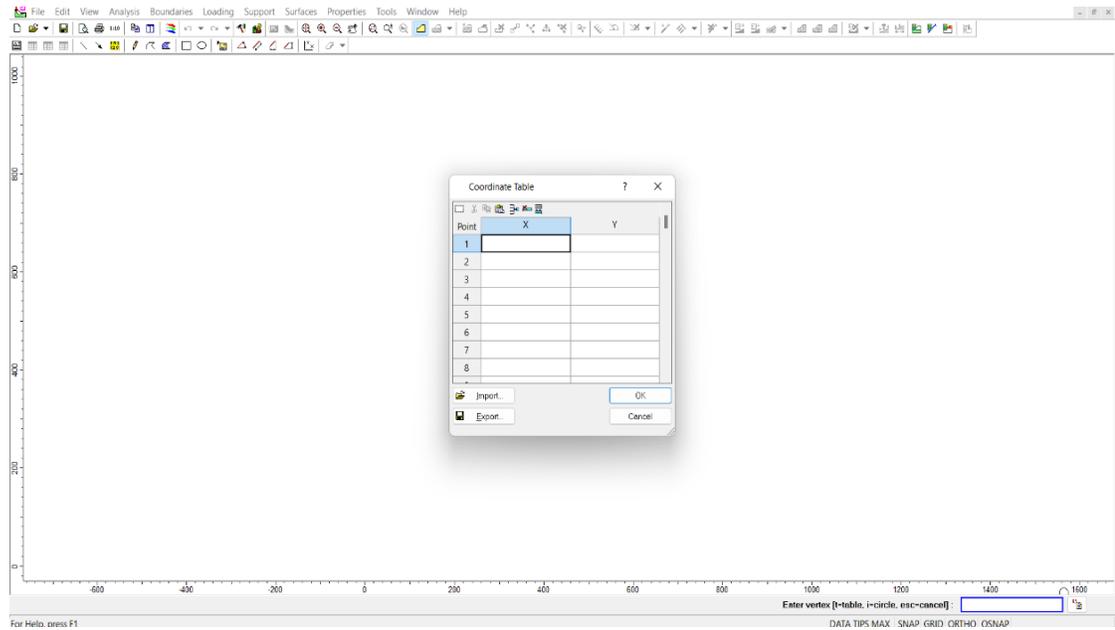
Posteriormente añadimos el perfil del talud presionando “ctrl+1” y dirigiéndonos a la esquina inferior derecha, abrimos la pestaña e introducimos las coordenadas del perfil del talud, en este caso se introdujo la sección transversal más crítica es decir la sección donde representaba la máxima altura del talud, los datos que se introdujeron fueron transportados desde el Auto Cad, Civil 3D realizando poli líneas a la sección trasversal luego se importaron datos de coordenadas de cada punto para luego exportar estos puntos a una tabla de Excel y posteriormente exportarlos al programa Slide.

Figura N° 72 Extrayendo datos de la sección talud 4, realizando polilíneas



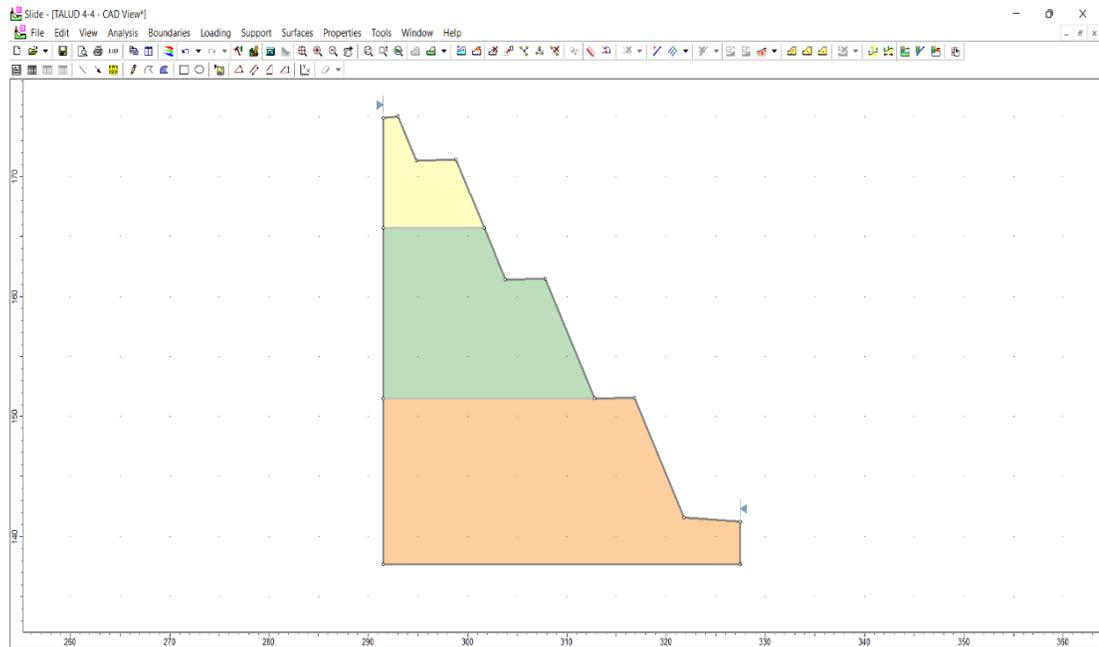
Fuente: Auto Cad Civil 3D.

Figura N° 73 Introducción de coordenadas del perfil del talud



Fuente: Slide v6.0

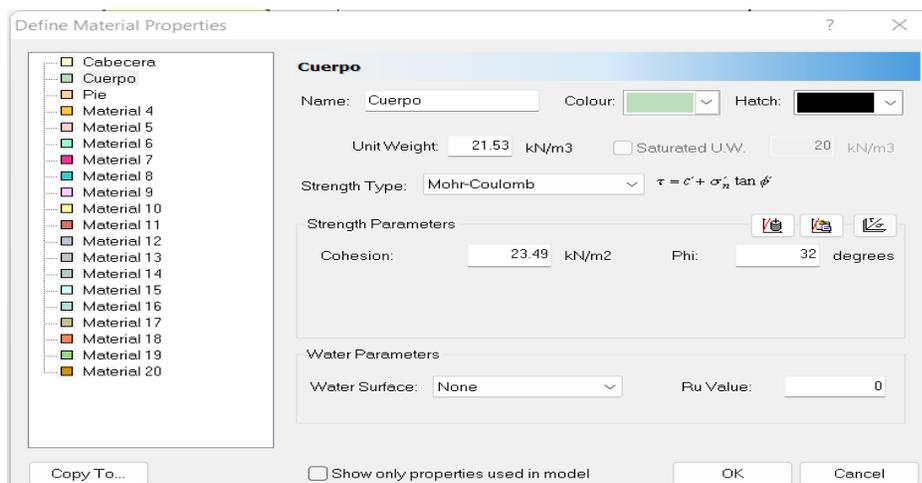
Figura N° 74 Perfil del talud



Fuente: Slide v6.0

Una vez definido el perfil, se procede a definir los límites de las capas de material del talud y a dar las características de los materiales en la ventana “propiedades”, opción “definir propiedades de los materiales”.

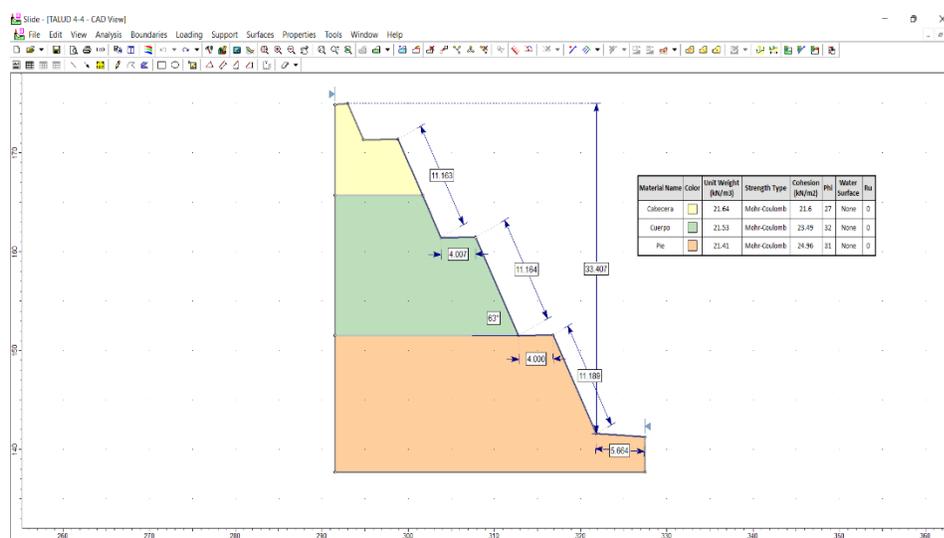
Figura N° 75 Propiedades de los materiales



Fuente: Slide v6.0

También definimos sus dimensiones del perfil en la pestaña “dimensiones de longitud”.

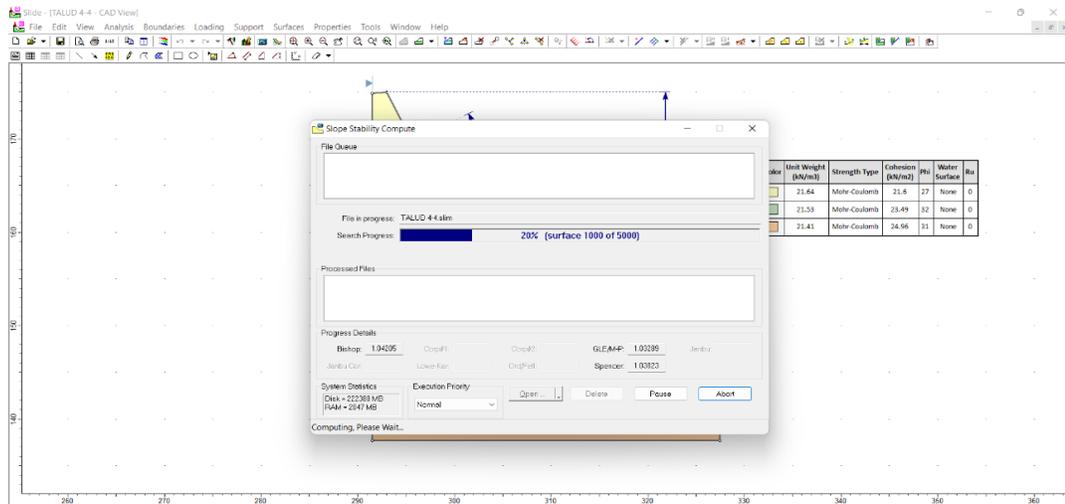
Figura N° 76 Propiedades y dimensiones del perfil



Fuente: Slide v6.0

Luego se realizar el análisis del factor de seguridad del talud yendo a la pestaña “análisis” opción calcular.

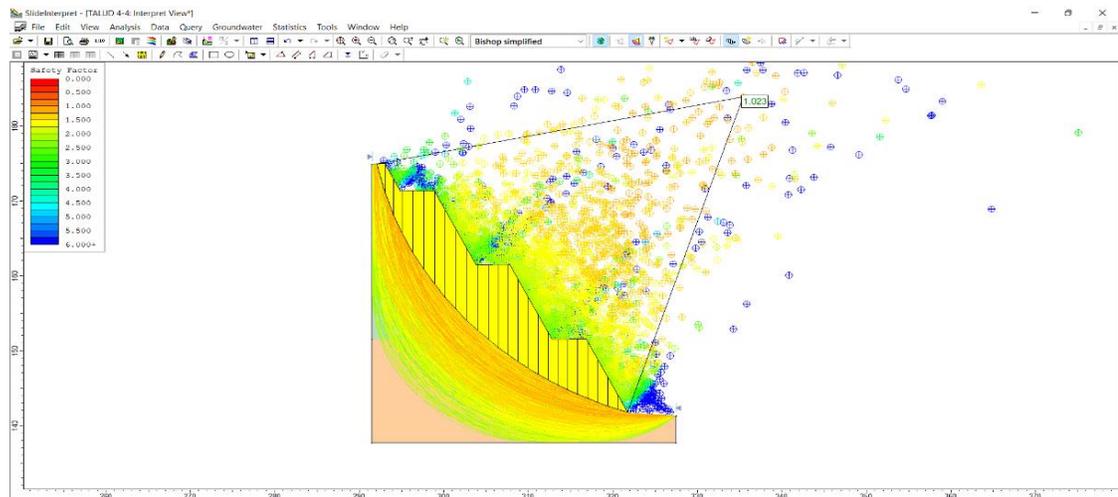
Figura N° 77 Análisis del factor de seguridad



Fuente: Slide v6.0

Ya analizado el talud se abrirá una ventana donde podemos ver los factores de seguridad mínimos del talud, sus líneas de falla, ubicación de las fallas, dovelas, fuerzas aplicadas en la dovela y posibles fallas con un factor de seguridad superior.

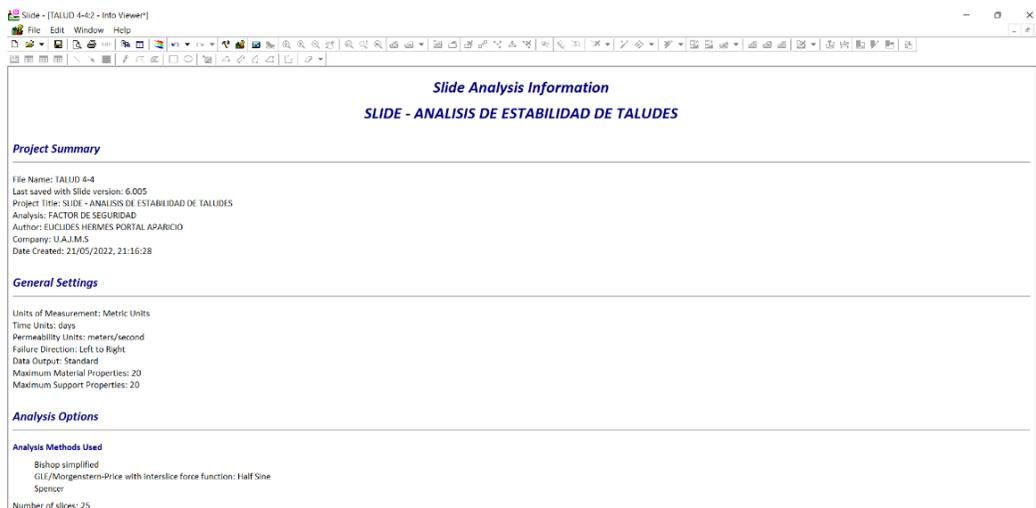
Figura N° 78 Interpretación de los factores de seguridad – inestable



Fuente: Slide v6.0

El programa también elabora un informe de los cálculos realizados, donde indica a detalle todas las características del proyecto, para poder visualizar el informe debemos dirigirnos a la pestaña de “análisis” opción “info viewer”.

Figura N° 79 Informe y cálculos realizados por el programa

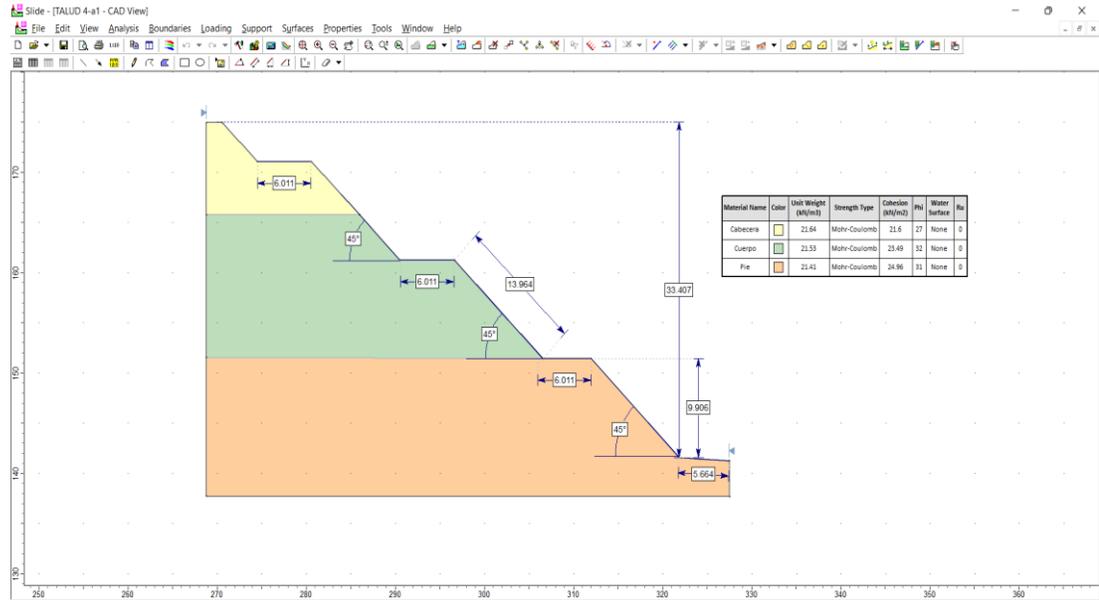


Fuente: Slide v6.0

4.2. Métodos de estabilización de taludes

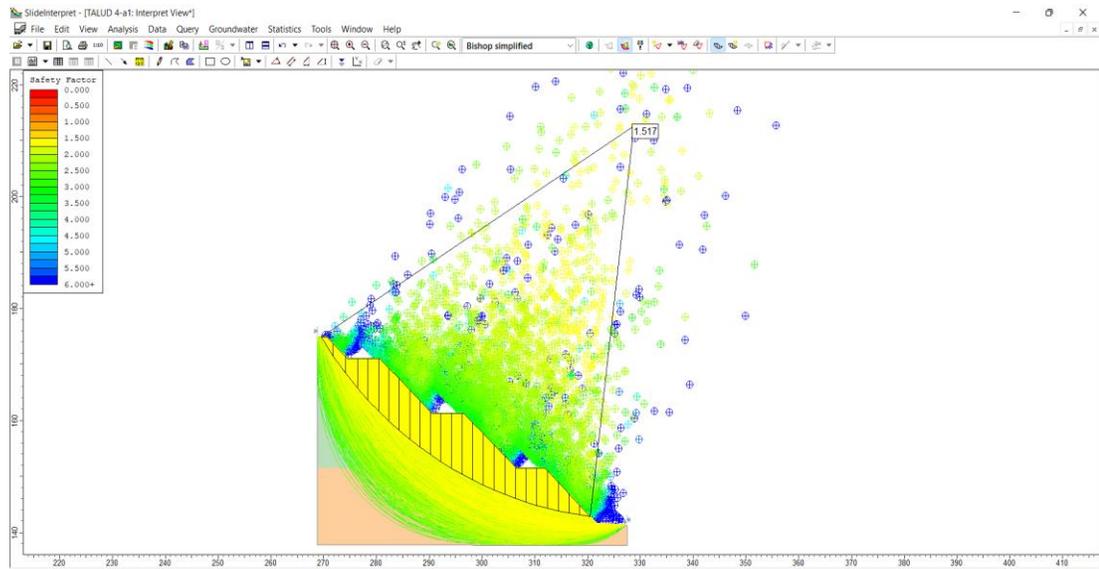
Para las alternativas de Acciones de Conservación en Taludes, Métodos de Estabilización se procedió a la Modificación de la Topografía para ello se procedió a editar el perfil, en este análisis se tomaron varios factores para lograr su estabilidad de cada talud; Cambio de pendiente del talud, Remoción de materiales de la cabecera y banquetas intermedias o terracedo, tomando en cuenta procesos constructivos y la optimización de poder determinar un factor de seguridad estable = 1,5.

Figura N° 80 Modificación de la topografía del talud 4 – cambio de pendiente

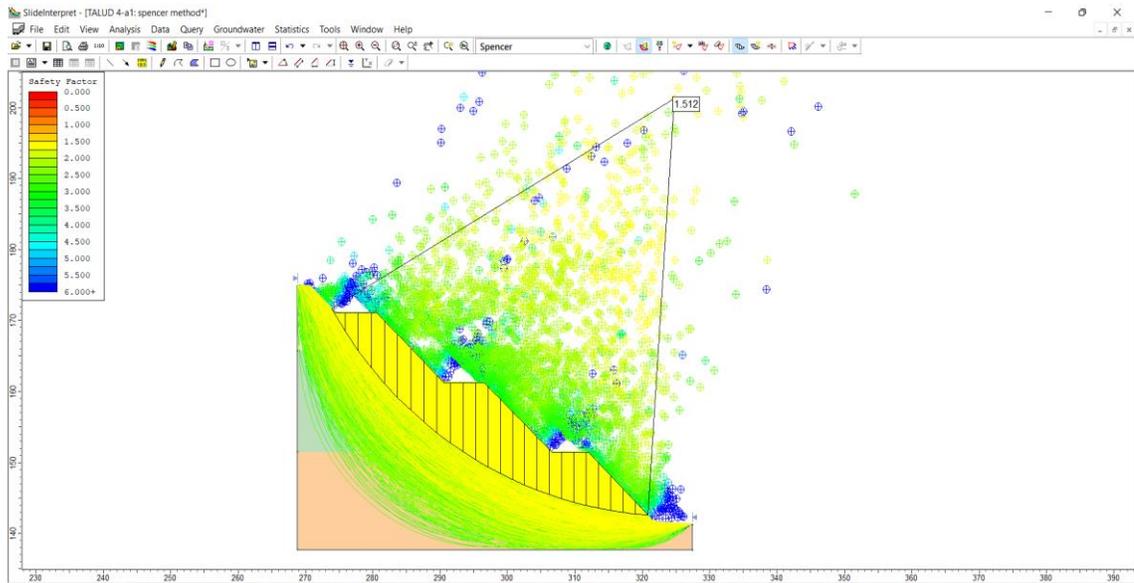


Fuente: Slide v6.0

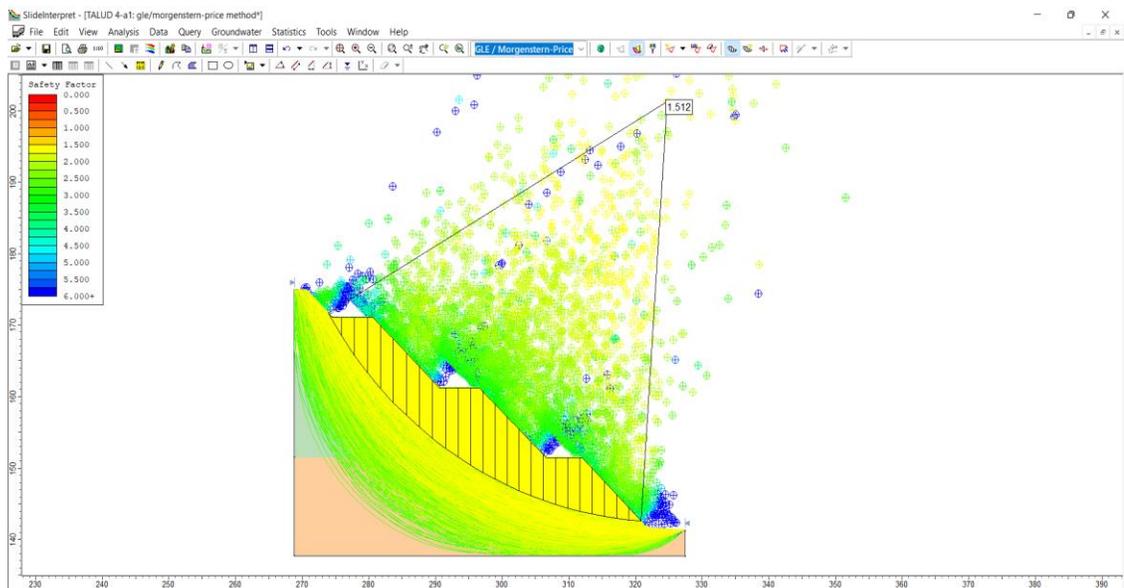
Figura N° 81 Análisis del nuevo factor de seguridad Método - Bishop Simplificado



Fuente: Slide v6.0

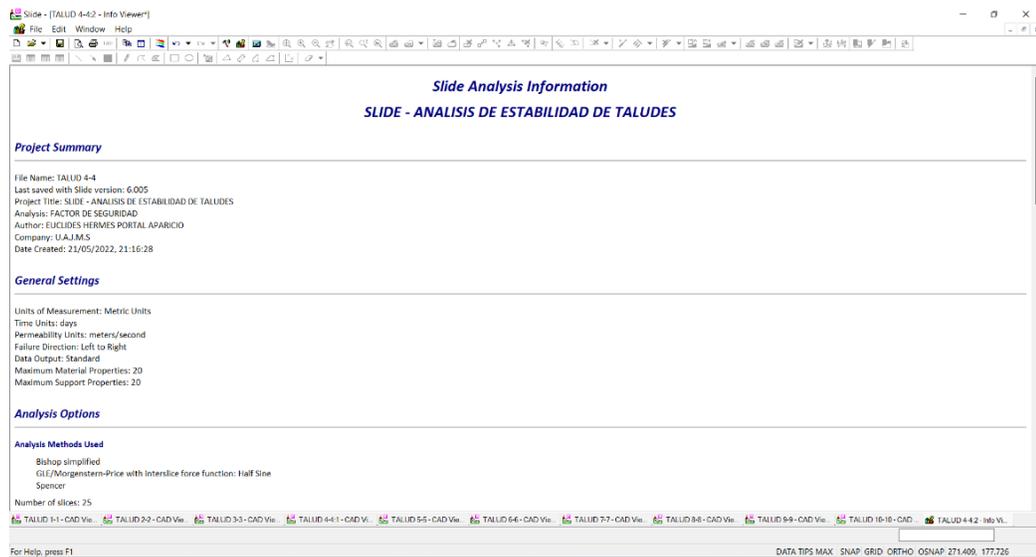
Figura N° 82 Análisis del nuevo factor de seguridad, método - Spencer

Fuente: Slide v6.0

Figura N° 83 Análisis del nuevo factor de seguridad, método – Morgenstern - Prince

Fuente: Slide v6.0

Figura N° 84 Informe y cálculos realizados por el programa

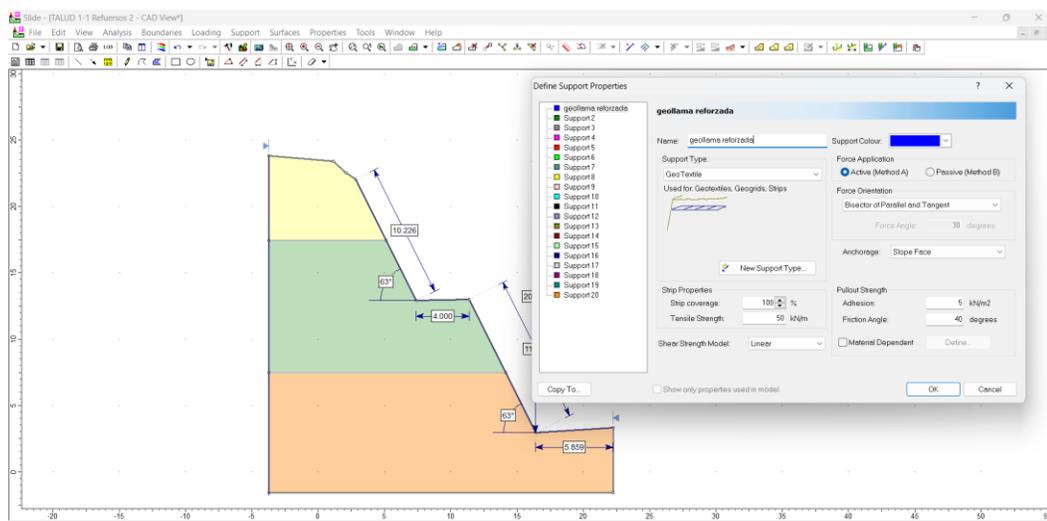


Fuente: Slide v6.0

4.3. Análisis del factor de seguridad utilizando geomallas reforzadas. Talud 1

Para las alternativas de solución se puede editar el perfil del talud, partiendo con “clic derecho editar coordenadas” y para añadir refuerzos al talud debemos ir a la pestaña de “propiedades” opción “definir propiedades de soportes”.

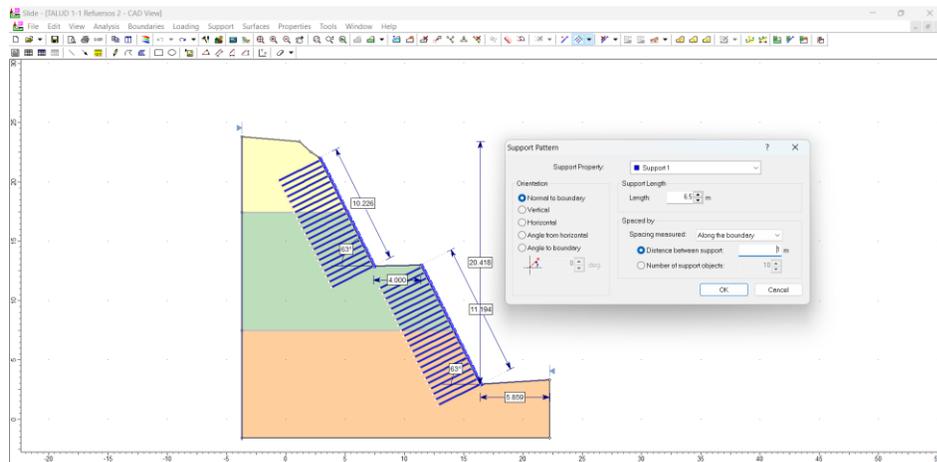
Figura N° 85 Propiedades de soportes



Fuente: Slide v6.0

Una vez establecidas las características y tipos de soportes, para añadirlos vamos a la ventana de “Support” opción “Add support” y añadimos los soportes al perfil del talud que necesitemos y posteriormente seguimos para el análisis del factor de seguridad del talud yendo a la pestaña “análisis” opción calcular.

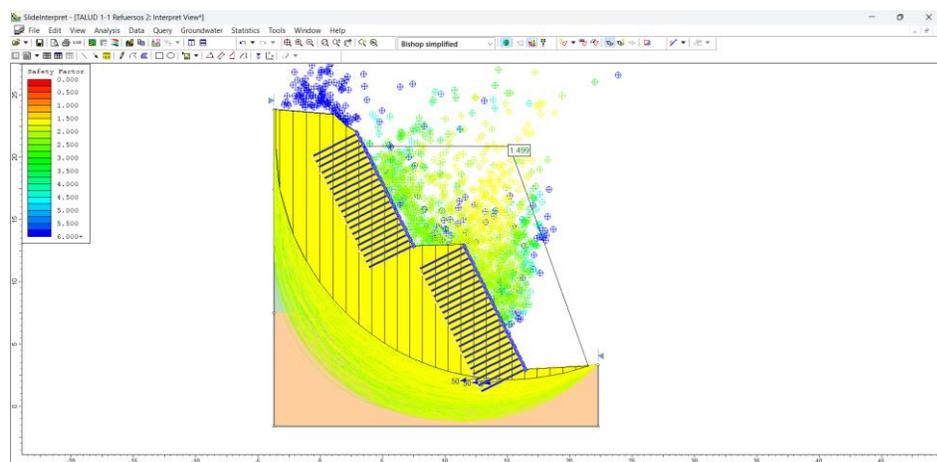
Figura N° 86 Colocado de soportes



Fuente: Slide v6.0

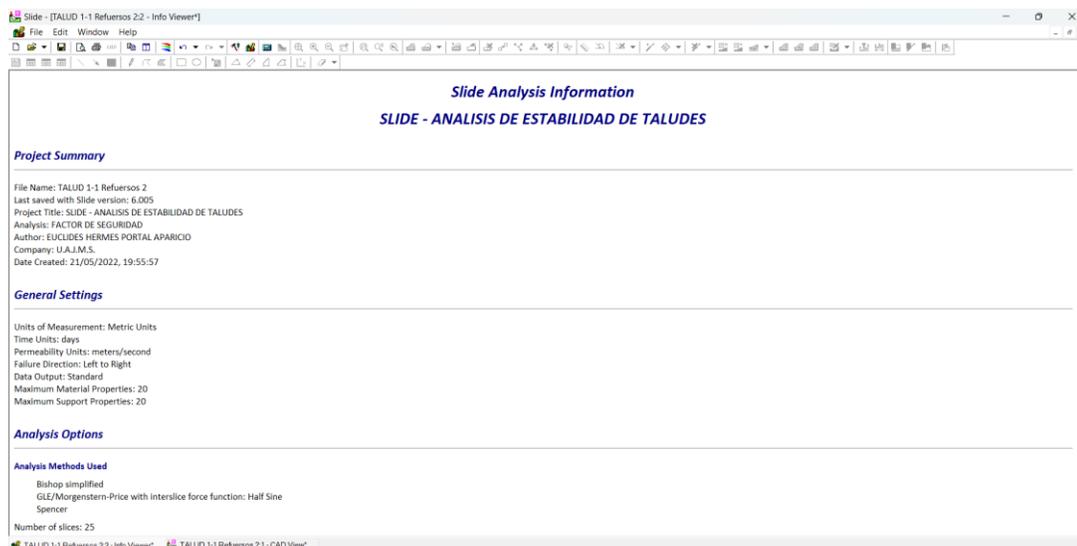
Ya analizado el talud se abrirá una ventana donde podemos ver los factores de seguridad mínimos del talud, sus líneas de falla, ubicación de las fallas, dovelas, fuerzas aplicadas en la dovela y posibles fallas con un factor de seguridad superior.

Figura N° 87 Análisis de resultados con refuerzos



Fuente: Slide v6.0

Figura N° 88 Informe y cálculos realizados por el programa



Fuente: Slide v6.0

4.4. Cálculo manual del F.S. mediante el método Bishop simplificado

Bishop (1955) presentó un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. Bishop asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales, es decir, que no tiene en cuenta las fuerzas de cortante.

La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón, se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo con la expresión:

$$F.S. = \frac{\sum [C'b + (W - ub)\tan\alpha]}{\sum W\sin\alpha}$$

$$ma = \cos\alpha \left(1 + \frac{\tan\alpha \tan\phi}{F.S.} \right)$$

Donde:

b = Ancho de la dovela

W = Peso de cada dovela

C' , ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w \times h_w$

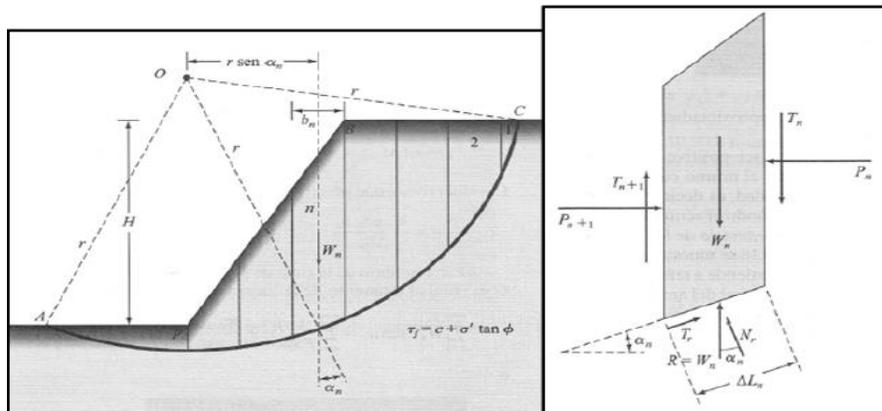
α = Ángulo del radio y la vertical en cada dovela.

Tabla N° 14 Limitaciones de método Bisho simplificado

satisface:	eq. total, de momentos y eq. FV
no satisface:	eq. individual de momentos eq. FH
$n + 1$ ecuaciones	$n + 1$ incógnitas
Tipo de falla	Circular

Fuente: Suarez D.

Figura N° 89 Representación gráfica para el método de Bisho simplificado



Fuente: Suarez D.

Como se puede observar en la ecuación, el término factor de seguridad FS se encuentra tanto en la izquierda como en la derecha de la ecuación; se requiere un proceso de interacción para calcular el factor de seguridad.

4.4.1. Desarrollo del método

Tabla N° 15 Datos de entrada

Peso unitario (γ)	(KN/m ³)	22,55
Cohesión (C)	(KN/m ²)	23,9
Ángulo de fricción (ϕ')	Grados	30
Peso específico del agua (γ_w)	(KN/m ³)	9,81

Fuente: Elaboración propia.

1.- Dividir la superficie de falla en dovelas. Para este caso, se divide en 25 tramos y determinar el ancho $b = 0,43$ m.

2.- Hallar las alturas promedias de cada dovela, la altura promedio se la realizó en el programa AutoCAD es $h_m = 0,60$ m para la dovela 1,

3.- calcular el área de cada dovela, Para la dovela 1 es de:

$$A = 0,26 \text{ m}^2$$

4.- Cálculo del peso de cada dovela. Para la dovela 1

$$W = 1\text{m} * 0,257\text{m}^2 * 22,55 \text{ KN/m}^3$$

$$W = 5,81 \text{ KN}$$

5.- Medir el ángulo de inclinación de cada dovela. Para la dovela 1 es:

$$\alpha = 70$$

6.- Calcular la fuerza $W \text{sen} \alpha$

$$W \text{sen} \alpha = 5,81 * \text{sen}(70) = 5,46$$

Para todas las dovelas tenemos que:

$$\sum W \text{sen} \alpha = 481,4$$

7.- Calcular la presión de poros en la base de la dovela:

$$\mu b = \gamma_w * h_w * b$$

Para este ejemplo la presión de poros es cero, ya que no existe nivel freático en el suelo.

8.- Calcular las fuerzas resistentes para cada dovela (cohesión y fricción)

$$c'b = 23,9 * 0,43m \quad (W - \mu b) \tan \emptyset = 5,81 * \tan(30)$$

$$c'b = 10,3 \quad (W - \mu b) \tan \emptyset' = 3,35$$

9.- Sumar las fuerzas resistentes para cada dovela

$$c'b + (W - \mu b) \tan \emptyset = 10,3 + 3,35$$

$$c'b + (W - \mu b) \tan \emptyset = 13,60$$

Con estas fuerzas se obtiene la sumatoria total:

$$\sum(c'b + (W - \mu b) \tan \emptyset) = 722,16$$

10.- Cálculo de un F.S. Aproximado

$$\text{F. S. aprox.} = \frac{\sum(c'b + (W - \mu b) \tan \emptyset)}{\sum W \text{sen} \alpha}$$

$$\text{F. S. aprox} = \frac{722,16}{481,14} = 1,50$$

11.- Cálculo del factor de Seguridad

Con el F.S aproximado, se escoge en F.S ligeramente superior a este para una primera iteración, para este caso se tomará un F.S de 1,55 y se calcula el multiplicador para cada dovela

$$\frac{\text{sec} \alpha}{1 + \tan \alpha \frac{\tan \emptyset'}{\text{F.S}}} = \frac{\text{sec}(70)}{1 + \tan(70) \frac{\tan 30}{1,55}} = 0,50$$

Luego este valor se multiplica por las fuerzas resistentes:

$$c'b + (W - \mu b) \tan \emptyset * \frac{\text{sec} \alpha}{1 + \tan \alpha \frac{\tan \emptyset'}{\text{F.S}}} = 13,60 * 0,5 = 6,80$$

Y se halla la sumatoria total:

$$\Sigma c'b + (W - \mu b)\tan\emptyset * \frac{\text{seca}}{1 + \tan\alpha \frac{\tan\emptyset'}{F.S}} = 715,97$$

12.- Por último, el valor anterior se divide por la sumatoria de las fuerzas tangentes $W\text{sena}\alpha$

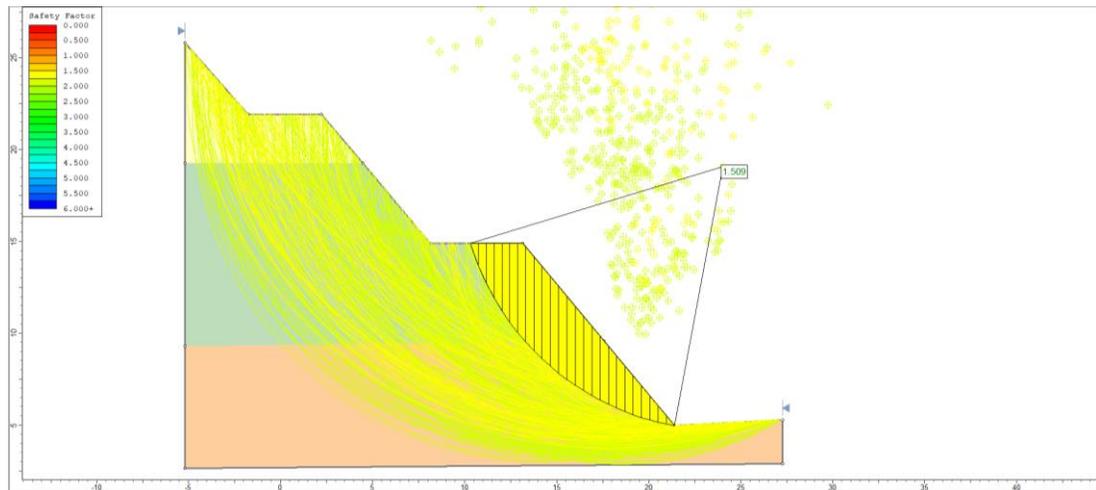
$$F.S = \frac{\Sigma(c'b + (W - \mu b)\tan\emptyset) * \frac{\text{Sec}\alpha}{1 + \frac{1}{F.S.}(\tan\emptyset' \tan\alpha)}}{\Sigma W\text{sena}\alpha}$$

$$F.S = \frac{715,97}{481,14} = 1,49$$

Hizo falta una segunda iteración donde:

$$F.S = \frac{706,67}{481,14} = 1,47 \text{ real}$$

Figura N° 90 F.S con el programa Slide = 1,5



Fuente: Slide v6.0

4.5. Resultados factor de seguridad con programa Slide v6.0

Con los datos obtenidos en el campo y laboratorio se procedió a procesarlos mediante el software Slide v6.0 para obtener su factor de seguridad de cada talud en estudio mediante

los métodos Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern-Price sin alterar sus secciones actuales, ni modificando su topografía, para así verificar en qué estado están los mismos.

Tabla N° 16 Factor de seguridad inestables de los taludes con sección actuales

Talud N°	Bishop Simplificado	Spencer	Morgenstern-Price	Observaciones
1	1,169	1,224	1,183	Inestable
2	0,996	0,988	0,985	Inestable
3	0,926	0,927	0,925	Inestable
4	1,023	1,010	1,010	Inestable
5	1,118	1,115	1,112	Inestable
6	1,065	1,108	1,057	Inestable
7	1,068	1,075	1,069	Inestable
8	1,115	1,118	1,120	Inestable
9	1,205	1,208	1,239	Inestable
10	1,184	1,186	1,186	Inestable

Fuente: Elaboración propia

Con los mismos datos obtenidos en el campo y laboratorio se procedió a procesarlos mediante el software Slide v6.0 para obtener su factor de seguridad de cada talud en estudio mediante los métodos Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern-Price; esta vez alterando sus secciones actuales y modificando su topografía, para así verificar y poder estabilizar los taludes.

Tabla N° 17 Factor de seguridad estables, modificando su topografía de los taludes

Talud N°	Bishop Simplificado	Spencer	Morgenstern-Price	Observaciones
1	1,509	1,507	1,504	Estable
2	1,504	1,500	1,496	Estable
3	1,502	1,500	1,496	Estable
4	1,517	1,512	1,512	Estable
5	1,537	1,530	1,531	Estable
6	1,546	1,541	1,540	Estable
7	1,533	1,530	1,526	Estable
8	1,511	1,501	1,503	Estable
9	1,539	1,535	1,531	Estable
10	1,604	1,597	1,595	Estable

Fuente: Elaboración propia

4.6. Sistema de estabilización mallas MacMat R1 - GalMac 4R

Se eligió este sistema como alternativa de solución ya que su alta viabilidad técnica en la ejecución de taludes, la asociación de la geomanta y el refuerzo metálico, constituyen un geocompuesto, que permite que estos elementos trabajen juntos, confiriendo a la solución características de elevada capacidad anti-erosiva, con óptima resistencia a la tracción. Por esta razón, es indicada, para situaciones en las que existan taludes susceptibles a la erosión, con grandes alturas y pendientes muy empinadas, ya que, añade las ventajas de la geomanta a aquellas de un elemento de refuerzo el sistema garantiza la seguridad con un costo de mantenimiento casi nulo y permite crecimiento de vegetación.

Figura N° 91 Mallas MacMat R1 - GalMac 4R

Fuente: Maccaferri

Tabla N° 18 Características malla MacMat R1 - GalMac

Malla	Diámetro (mm)	Cuadrícula del rombo (cm)	Resistencia tracción de la membrana (KN/m)
R1-G4R	2,20	6,0 x 8,0	37
R1-G4R	2,40	8,0 x 10,0	40
R1-G4R	2,70	8,0 x 10,0	50
R1-G4R	2,20	6,0 x 8,0	37

Fuente: Maccaferri

A continuación, se presenta una descripción detallada de la estabilización mediante el sistema malla MacMat R1 - GalMac

4.6.1. Descripción

La malla hexagonal de doble torsión tiene aberturas tipo 8 x 10 cm u 6 x 8 cm., el diámetro de alambre de la malla está entre 2,2 y 3,4 mm dependiendo de la abertura de la malla, está fuertemente galvanizada y reforzada en las aristas.

La asociación de la geomanta y el refuerzo metálico, constituyendo un geocompuesto, permite que estos elementos trabajen juntos, confiriendo a la solución características de elevada capacidad anti-erosiva, con óptima resistencia a la tracción. Por esta razón, es indicada, para situaciones en las que existan taludes susceptibles a la erosión, con grandes alturas y pendientes muy empinadas, ya que, añade las ventajas de la geomanta a aquellas de un elemento de refuerzo.

Los tipos de anclaje y la separación entre los mismos depende del tipo de material del talud que se desea estabilizar, los desprendimientos, o si se encauzan hacia la parte baja lo cual es preferible, dejando el anclaje adecuado en la parte inferior para poder remover la malla, sacando el desprendimiento acumulado y volver a fijar la malla. Es preferible fijar la malla en la parte inferior del talud con anclajes de barras de acero haciendo esto desmontable, para su mantenimiento.

4.6.2. Costo económico

El precio de ejecución del sistema de estabilización MacMat R1 - GalMac tiene un costo aproximado de 88,78 bolivianos el m².

4.6.3. Viabilidad técnica

El sistema de estabilización MacMat R1 - GalMac de alta resistencia 50 KN/m que además comprende de una malla doble torsión aumentando su capacidad de resistencia es empleada en taludes de grandes alturas donde sus principales ventajas son las siguientes:

- Libertad de adopción de cuadrícula.
- Capacidad de carga garantizada en toda la superficie.
- Permite el drenaje natural.
- Ejecución rápida.
- Escaso impacto visual de la actuación, permite revegetación.

4.6.4. Grado de seguridad

La ejecución del método de estabilización nos brinda un elevado grado de seguridad ya que al tener una geomanta y el refuerzo metálico es capaz de sostener grandes cantidades de cargas garantizando la estabilización total de la superficie a emplear el sistema.

Tabla N° 19 Factor de seguridad con refuerzo MacMat R1 - GalMac con el programa Slide v6.0

Talud N°	Bishop Simplificado	Spencer	Morgenstern-Price	Observaciones
1	1,499	1,535	1,484	Estable
2	1,499	1,483	1,498	Estable
3	1,480	1,496	1,498	Estable
4	1,480	1,588	1,479	Estable
5	1,471	1,463	1,462	Estable
6	1,479	1,501	1,476	Estable
7	1,484	1,553	1,479	Estable
8	1,472	1,556	1,463	Estable
9	1,46	1,553	1,450	Estable
10	1,46	1,553	1,45	Estable

Fuente: Elaboración propia

4.7. Análisis de costos

Alternativa 1

Tabla N° 20 Análisis de costos para el método de estabilidad, modificación de la topografía de los taludes – alternativa 1

Cómputos métricos por cada talud						
Talud N° 1						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Replanteo y trazado	ml	40	5,27	210,92	92.895,04
2	Movimiento de tierras	m ³	2931,83	31,61	92684,13	
Talud N° 2						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Replanteo y trazado	ml	200	5,27	1054,58	1.780.213,72
2	Movimiento de tierras	m ³	56279,24	31,61	1779159,15	
Talud N° 3						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Replanteo y trazado	ml	120	5,27	632,75	890.622,03
2	Movimiento de tierras	m ³	28152,58	31,61	889989,28	
Talud N° 4						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Replanteo y trazado	ml	100	5,27	527,29	874.523,20
2	Movimiento de tierras	m ³	27646,67	31,61	873995,91	
Talud N° 5						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Replanteo y trazado	ml	120	5,27	632,75	683.991,78
2	Movimiento de tierras	m ³	21616,35	31,61	683359,03	
Talud N° 6						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Replanteo y trazado	ml	140	5,27	738,21	1.229.742,17
2	Movimiento de tierras	m ³	38876,46	31,61	1229003,97	
Talud N° 7						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Replanteo y trazado	ml	60	5,27	316,37	144.679,95
2	Movimiento de tierras	m ³	4566,58	31,61	144363,58	
Talud N° 8						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Replanteo y trazado	ml	50	5,27	263,64	60.376,20
2	Movimiento de tierras	m ³	1901,51	31,61	60112,55	
Talud N° 9						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Replanteo y trazado	ml	70	5,27	369,10	60.340,03
2	Movimiento de tierras	m ³	1897,03	31,61	59970,93	

Talud N° 10						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Replanteo y trazado	ml	50	5,27	263,64	36.426,62
2	Movimiento de tierras	m ³	1143,925	31,61	36162,97	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 21 Cómputos métricos totales de la alternativa 1

Cómputos métricos totales			
Ítem N°	Material	Unidad	Cantidad
1	Replanteo y trazado	ml	950,00
3	Movimiento de tierras	m ³	185.012,18

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 22 Presupuesto total – alternativa 1

Presupuesto total - Alternativa 1					
Proyecto: Análisis de Estabilidad de Taludes en el tramo Saladito Timboy Tabasay aplicando el programa computacional Slide					
Ítem N°	Descripción	Unidad	Cantidad	P. U. Total	Costo P/Ítem
1	Replanteo y trazado	ml	950,00	5,27	5.009,25
2	Movimiento de tierras	m ³	185012,18	31,61	5.848.801,5
Costo total (Bs) =				5.853.810,75	
Costo total en \$us. =				875.009,08	

Fuente: Elaboración propia

Alternativa 2

**Tabla N° 23 Análisis de costos para la Implementación de Geomallas Reforzadas,
Malla MacMat R1 – GalMac – alternativa 2**

Cómputos métricos por cada talud						
Talud N° 1						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	692,25	88,78	61455,79	192.409,41
2	Barras de anclaje	kg	6990,984	10,42	72815,98	
3	Perforación para anclaje	ml	4504,5	12,91	58137,64	
Talud N° 2						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	5716,1	88,78	507457,51	3.499.113,11
2	Barras de anclaje	kg	159710,112	10,42	1663492,32	
3	Perforación para anclaje	ml	102906	12,91	1328163,28	
Talud N° 3						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	3233,3	88,78	287042,28	1.791.329,95
2	Barras de anclaje	kg	80306,688	10,42	836450,22	
3	Perforación para anclaje	ml	51744	12,91	667837,45	
Talud N° 4						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	3278,2	88,78	291028,36	1.720.921,47
2	Barras de anclaje	kg	76335,12	10,42	795083,57	
3	Perforación para anclaje	ml	49185	12,91	634809,55	
Talud N° 5						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	2987,7	88,78	265238,68	960.169,35
2	Barras de anclaje	kg	37099,008	10,42	386412,07	
3	Perforación para anclaje	ml	23904	12,91	308518,60	

Talud N° 6						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	4406,3	88,78	391177,56	1.672.368,76
2	Barras de anclaje	kg	68396,64	10,42	712398,76	
3	Perforación para anclaje	ml	44070	12,91	568792,45	
Talud N° 7						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	954,6	88,78	84746,41	292.972,68
2	Barras de anclaje	kg	11116,2	10,42	115782,98	
3	Perforación para anclaje	ml	7162,5	12,91	92443,29	
Talud N° 8						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	542,4	88,78	48152,58	94.885,39
2	Barras de anclaje	kg	2494,84	10,42	25985,50	
3	Perforación para anclaje	ml	1607,5	12,91	20747,31	
Talud N° 9						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	723,05	88,78	64190,12	133.816,92
2	Barras de anclaje	kg	3717,04	10,42	38715,57	
3	Perforación para anclaje	ml	2395	12,91	30911,23	
Talud N° 10						
Ítem	Material	Unidad	Cantidad	P.U. (Bs.)	Costo parcial (Bs.)	
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	535,4	88,78	47531,14	81.545,07
2	Barras de anclaje	kg	1815,84	10,42	18913,24	
3	Perforación para anclaje	ml	1170	12,91	15100,68	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 24 Cómputos métricos totales de la alternativa 2

Cómputos métricos totales			
Ítem N°	Material	Unidad	Cantidad
1	Malla MacMat R1 – GalMac	m ²	23.069,30
2	Barras de anclaje	kg	447.982,47
3	Perforación para anclaje	ml	288.648,50

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 25 Presupuesto total – alternativa 2

Presupuesto total - Alternativa 2					
Proyecto: Análisis de Estabilidad de Taludes en el tramo Saladito Timboy Tabasay aplicando el programa computacional Slide					
Ítem N°	Descripción	Unidad	Cantidad	P. U. Total	Costo P/Ítem
1	Malla MacMat R1 - GalMac	m ²	23069,30	88,78	2.048.020,42
2	Barras de anclaje	kg	447982,47	10,42	4.666.050,20
3	Perforación para anclaje	ml	288648,50	12,91	3.725.461,49
Costo total (Bs) =				6.714.070,63	
Costo total en \$us. =				1.003.598,00	

Fuente: Elaboración propia

4.8. Análisis de resultados

Se realizó el análisis de estabilidad de taludes en el tramo de estudio donde se pudo aplicar la metodología de estabilidad de taludes utilizando como herramienta de cálculo el programa Slide para determinar los diferentes Factores de Seguridad de los 10 taludes.

A continuación, se muestra un resumen del análisis económico de las diferentes alternativas de solución para la estabilidad de los taludes.

Partiendo de un análisis técnico económico se puede evidenciar que la alternativa 1, es más viable económicamente en comparación a la alternativa 2 ya que su presupuesto de ejecución es más económico.

No obstante, la ejecución de la alternativa 2 tiene una alta viabilidad técnica.

Tabla N° 26 Presupuesto total de alternativa 1

Ítem N°	Descripción	Unidad	Cantidad	P. U. Total	Costo P/Ítem
1	Replanteo y trazado	ml	950,00	5,27	5.009,25
2	Movimiento de tierras	m ³	185012,18	31,61	5.848.801,5
Costo total(bs) =				5.853.810,75	
Costo total en \$us, =				875.009,08	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 27 Presupuesto total de alternativa 2

Ítem N°	Descripción	Unidad	Cantidad	P. U. Total	Costo p/ítem
1	Malla MacMat R1 – GalMac	m ²	23069,30	88,78	2.048.020,42
2	Barras de anclaje	kg	447982,47	10,42	4.666.050,20
3	Perforación para anclaje	ml	288648,50	12,91	3.725.461,49
Costo total (Bs) =				6.714.070,63	
Costo total en \$us. =				1.003.598,00	

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Una vez finalizado el trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se realizó el análisis de estabilidad y la determinación del factor de seguridad en 10 taludes en un tramo de 10,1 km, satisfactoriamente utilizando el programa Slide.
- Asimismo, se analizó la estabilidad de taludes con los modelos de cálculo Bishop simplificado, Spencer y Morgenterm-price.
- Los factores de seguridad obtenidos utilizando los tres métodos de cálculo son los siguientes: Bishop simplificado, Spencer y Morgenterm-price.
- El método Morgenstern-Price tiene mayor precisión a comparación de los demás métodos debido a que considera todas las fuerzas actuantes sobre las dovelas tanto horizontales como verticales.
- Se desarrolló el cálculo manual del factor de seguridad mediante el método de Bishop simplificado y se comparó con los resultados que brinda el programa Slide.
- Se pudo lograr la estabilidad de los 10 taludes utilizando el método de estabilidad el cual consiste en la modificación de la topografía de los mismos, logrando que los factores de seguridad sean iguales o mayores a 1,5 de acuerdo a lo planteado en el este estudio.
- Se logró la estabilidad en los 10 taludes utilizando la alternativa de solución para la estabilidad la cual consiste en reforzar la superficie de los taludes con geo mallas reforzadas MacMat® R1 - GalMac® 4R-P logrando que los factores de seguridad sean iguales o mayores a 1,5 de acuerdo a lo planteado en este estudio.
- La mejor alternativa de solución para la estabilidad de los taludes en la zona de estudio es la modificación de la topografía debido a que su presupuesto de ejecución es menor

en comparación con la alternativa de implementación de geomallas reforzadas MacMat® R1 - GalMac® 4R-P

- Al momento de medir los taludes de la zona de estudio, esto se realizó en la sección crítica de talud es decir donde estos presentan mayor altura.
- Se utilizó la Estación Total Sokkia y sus implementos necesarios, brindado por el laboratorio de topografía de la U.A.J.M.S, para desarrollar el levantamiento topográfico de los taludes.
- Al caracterizar los materiales que están compuestos los taludes se identifican que la mayoría de estos se componen de suelos limosos, arenosos de baja plasticidad y de clasificación (ML).
- De acuerdo al análisis de estabilidad de los taludes inicialmente se pudo verificar que de acuerdo al análisis del factor de seguridad con el programa Slide los taludes tienden a ser inestables ya que presentan un factor de seguridad menor a 1,5.

Talud N°	Bishop Simplificado	Spencer	Morgenstern-Price	Observaciones
1	1,169	1,224	1,183	Inestable
2	0,996	0,988	0,985	Inestable
3	0,926	0,927	0,925	Inestable
4	1,023	1,010	1,010	Inestable
5	1,118	1,115	1,112	Inestable
6	1,065	1,108	1,057	Inestable
7	1,068	1,075	1,069	Inestable
8	1,115	1,118	1,120	Inestable
9	1,205	1,208	1,239	Inestable
10	1,184	1,186	1,186	Inestable

- En la siguiente tabla se muestran los F.S. aplicando el método de estabilidad modificación de su topografía.

Talud N°	Bishop Simplificado	Spencer	Morgenstern-Price	Observaciones
1	1,509	1,507	1,504	Estable
2	1,504	1,500	1,496	Estable
3	1,502	1,500	1,496	Estable
4	1,517	1,512	1,512	Estable
5	1,537	1,530	1,531	Estable
6	1,546	1,541	1,540	Estable
7	1,533	1,530	1,526	Estable
8	1,511	1,501	1,503	Estable
9	1,539	1,535	1,531	Estable
10	1,604	1,597	1,595	Estable

- En la siguiente tabla se muestran los F.S aplicando la alternativa de solución para la estabilidad de los taludes, la cual consiste en reforzar la superficie de los taludes con geo mallas reforzadas MacMat® R1 - GalMac® 4R-P

Talud N°	Bishop Simplificado	Spencer	Morgenstern-Price	Observaciones
1	1,499	1,535	1,484	Estable
2	1,499	1,483	1,498	Estable
3	1,480	1,496	1,498	Estable
4	1,480	1,588	1,479	Estable
5	1,471	1,463	1,462	Estable
6	1,479	1,501	1,476	Estable
7	1,484	1,553	1,479	Estable
8	1,472	1,556	1,463	Estable
9	1,46	1,553	1,450	Estable
10	1,46	1,553	1,45	Estable

5.2. Recomendaciones

De acuerdo a lo expuesto en el presente trabajo de grado, se sugiere evaluar las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda el uso de este software (Slide), para el cálculo de estabilidad de taludes, debido a que este considera todas las características del talud como ser altura, inclinación, diferentes estratos, nivel freático, perfil del talud, todas las fuerzas actuantes en la dovela, etc.
- Dentro de los modelos estudiados, se debe considerar emplear el método de Morgenstern-Price puesto que este método es de mayor aplicación y precisión a comparación de los demás métodos.
- En cuanto al uso de equipos de seguridad para realizar la medición y levantamiento topográfico en campo contar con los necesarios e indumentaria adecuada.
- Al momento de realizar la toma de muestras, se deberá ser muy preciso y cuidadoso para realizar una extracción adecuado, así mismo se debe contar con colaboradores necesarios para la protección, para así no contaminar o evitar pérdida de material.
- Utilización de estaciones totales en los estudios similares a lo que conlleve estabilidad de taludes o procesos de remoción en masa para obtener datos más precisos.
- Es indispensable que se lleve a cabo una intervención en los taludes para disminuir los contratiempos que, ocasionado los deslizamientos del talud, a fin de que no exista incomodidad a los usuarios de la vía.
- Emplear un talud de pendiente necesaria para su estabilización utilizando una inclinación 1,00H: 1,00V para que el factor de seguridad aumente.
- Con el fin de evacuar las aguas de lluvia y evitar el daño del talud es necesario la construcción de cunetas de coronación en el escarpe del talud.

- Debido a la presencia de lluvias constantes, se recomienda de forma preventiva establecer mejoras en los controles de drenajes superficiales en los taludes, reduciendo así las posibilidades de otros movimientos de masa generados
- Actuar lo más antes posible con las alternativas técnicas de solución propuestas en el presente trabajo de grado para la estabilidad de los taludes estudiados, de esta manera evitar que se produzca peligro de deslizamiento en el tramo de estudio.
- Es muy importante estimular la siembra de especies vegetales nativas en las paredes de los taludes que deben ser protegido con arbustos, hierba o árboles originarios de la zona, para que estos ayuden a una mayor protección de talud.