

**ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA DISMINUIR LA VULNERABILIDAD DE
TALUDES EN VÍAS RURALES. CASO DE ESTUDIO: VÍA CHARALÁ –
COROMORO**

**GIMETH ILEANA TUMAY GAMBA
DIEGO ARMANDO RODRÍGUEZ BARÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA DISMINUIR LA VULNERABILIDAD DE
TALUDES EN VÍAS RURALES. CASO DE ESTUDIO: VÍA CHARALÁ –
COROMORO**

**GIMETH ILEANA TUMAY GAMBA
DIEGO ARMANDO RODRÍGUEZ BARÓN**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

WILFREDO DELTORO RODRÍGUEZ

Ingeniero civil, Msc

Codirector

OMAR GIOVANNY SÁNCHEZ RIVERA

Ingeniero civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios. Por haberme permitido llegar hasta este punto, por estar conmigo en cada paso que doy y por tu bondad y amor.

A mi madre, María Felicita Tumay. Por tu apoyo incondicional, por tus sabios consejos, tus valores, por la motivación constante que hizo que no dejar que desfalleciera en los momentos más críticos.

Gracias por tu amor, todo te lo debo a ti.

A mi padre, Rafael Suarez. Por tu apoyo, por tu comprensión y por ser mi papá y creer en mí. Gracias.

A mis hermanas Aura Cristina Suarez y Lady Catalina Suarez.

Por estar conmigo y apoyarme siempre, han sido mi motivación para lograr esta meta.

Las quiero mucho.

A mis tías Otilia y Ubaldina Tumay.

Por su gran apoyo y Colaboración para poder sacar mi carrera.

A mi novio, Nelson Alvarado. Por tu apoyo constante. Por tu comprensión, paciencia, colaboración y amor incondicional.

Por darme ánimo y valor para seguir adelante, por estar a mi lado y sufrir conmigo en los momentos difíciles.

Solo me queda decirte, Gracias.

A mis amigos, con quienes compartí esta hermosa etapa de mi vida, con quienes nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y hoy puedo decir que su amistad es uno de los mejores regalos de estos cinco años:

Cesar, Jose, Yuri y Karen. Gracias por todo.

*A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de ingeniería Civil.
A todos mis maestros, por sus enseñanzas, tiempo compartido
y por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional.*

Solo me queda por decir, Gracias a todos.

Gimeth Ileana Tumay Gamba

DEDICATORIA

*Dedico este proyecto a Dios por darme la oportunidad de vivir y
por estar conmigo en cada paso que doy,
por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y
por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y
compañía durante todo el periodo de estudio.*

*A mí madre, quien a lo largo de mi vida ha velado por mi bienestar y
educación siendo mí apoyo en todo momento.
Depositando su entera confianza en cada reto que se me
presentaba sin dudar ni un solo momento en mí inteligencia y capacidad.
Es por ella que soy lo que soy ahora. La amo con mi vida.*

*A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos,
gracias a su paciencia y enseñanza y finalmente
un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad
la cual abre sus puertas a jóvenes como nosotros,
preparándonos para un futuro competitivo y
formándonos como personas de bien.*

Diego Armando Rodríguez Barón

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Ingeniero Civil, director de proyecto Wilfredo del Toro, al Ingeniero Civil, co-director Omar Giovanni Sánchez y al Ingeniero Civil Nelson Alvarado Patiño, por sus asesorías y disponibilidad ante el desarrollo de las actividades, también agradecer al grupo de investigación Geomática, al diplomado Modela y Gestión de la Construcción, por los conocimientos adquiridos y disponibilidad de cómputo y software.

***Gimeth Ileana Tumay Gamba
Diego Armando Rodríguez Barón***

CONTENIDO

	pag
INTRODUCCIÓN.....	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. OBJETIVOS	22
2.1. OBJETIVO GENERAL	22
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3. METODOLOGÍA.....	23
3.1. ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.2. ETAPA 2: RECONOCIMIENTO DE CAMPO.....	23
3.3. ETAPA 3: EVALUACIÓN DE LOS SITIOS CRÍTICOS Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	24
3.4. ETAPA 4: MANEJO E INTERPRETACIÓN DE SOFTWARE	24
3.5. ETAPA 5: APLICACIÓN PRÁCTICA DEL SOFTWARE	26
3.6. ETAPA 6: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	26
4. RESULTADOS	28
4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	28

4.1.1. Definición de talud o ladera.....	28
4.1.2. Vulnerabilidad	28
4.1.3. Deslizamiento	29
4.1.4. Estabilidad.	29
4.1.5. Factor de Seguridad (F. S.).....	29
4.1.6. Medidas preventivas y correctivas.	30
4.2. RECONOCIMIENTO DE CAMPO.....	37
4.3. EVALUACIÓN DE LOS SITOS CRÍTICOS Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	38
4.4. MANEJO E INTERPRETACIÓN DEL SOFTWARE	42
4.5. ETAPA 5: APLICACIÓN PRÁCTICA DEL SOFTWARE	45
4.5.1. Estabilización del Talud con el Método de Abatimiento del Talud por Medio de Corte.....	46
4.5.2. Estabilización del Talud con el Método de Gaviones.....	49
4.5.3. Estabilización del Talud con el Método de Muros de Concreto Reforzado ...	52
4.5.4. Revit 2014.....	56
4.6. ETAPA 6: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	57
4.6.1. Costos de Ejecución	57

4.6.2. Análisis Comparativo Entre Costo-Beneficio.....	62
4.6.3. Ventajas y Desventajas de las Alternativas Planteadas.	65
5. DISCUSIÓN	67
6. CONCLUSIONES.....	68
CITAS	71
BIBLIOGRAFIA	74

LISTA DE FIGURAS

	pag
Figura 1. Ejemplo Muro de concreto reforzado modelado en el software Revit 2014.....	31
Figura 2. Ejemplo Muro de contención en gaviones modelado en el software Revit 2014.....	33
Figura 3. Anclaje con tendones de acero. Fuente: [10].....	35
Figura 4. Anclas pre-tensadas sobre zapatas individuales. Fuente: [10]	35
Figura 5. Estabilización de taludes utilizando pantalla anclada. Fuente: [10]	36
Figura 6. Esquema de clavos en un deslizamiento. Fuente: [10].....	37
Figura 7. Recorrido de observación de problemas de estabilidad.....	38
Figura 8. Perfil K13 +440.	39
Figura 9. Perfil K13 +500.	40
Figura 10. Perfil K13 + 560.	40
Figura 11. Perfil K13 + 880.	41
Figura 12. Perfil K13 + 920.	41
Figura 13. Propiedades de una pantalla anclada.....	44
Figura 14. Propiedades de un Nail.....	45

Figura 15. Resultados obtenidos de Geo-Slope (F.S.) para el perfil K13+440 por el método de abatimiento del talud por medio de corte.	47
Figura 16. Resultados obtenidos de Plaxis 2D para la deformación del perfil K13 +440 por el método de abatimiento del talud por medio de corte.	48
Figura 17. Resultados obtenidos de Geo-Slope (F.S.) para perfil K13+440 por el método de gaviones.....	50
Figura 18. Resultados obtenidos de Plaxis para la deformación del perfil K13 +440 por el método de gaviones.....	51
Figura 19. Visualización de los tres métodos de estabilización utilizados en el perfil K13+440 (nails, muros de concreto reforzado y pantallas ancladas).....	53
Figura 20. Resultados obtenidos de Geo-Slope (F.S.) para perfil K13+440 por el método de muros de concreto reforzado.	54
Figura 21. Resultados obtenidos de Plaxis para la deformación del perfil K13 +440 por el método de muros de concreto reforzado.	55
Figura 22. Tramo de vía modelado en Revit 2014.	56

LISTA DE TABLAS

	pag
Tabla 1. Propiedades del Perfil representativo.....	43
Tabla 2. Angulo de inclinación para cada perfil.	46
Tabla 3. Factor de seguridad y deformación por el método de abatimiento del talud	49
Tabla 4. Factor de seguridad y deformación por el método de gaviones.	52
Tabla 5. Factor de seguridad y deformación por el método de muros de concreto reforzado.....	55
Tabla 6. Presupuesto de excavación ideal.	57
Tabla 7. Presupuesto método de abatimiento del talud por medio de corte.....	58
Tabla 8. Presupuesto método de gaviones.	59
Tabla 9. Presupuesto método de muros de concreto reforzado.....	61
Tabla 10. Presupuesto de cada perfil por los tres métodos de estudio.	61
Tabla 11. Resultados de comparación Costo-Factor de Seguridad Estático.....	62
Tabla 12. Resultados de comparación Costo-Factor de Seguridad Dinámico.	63
Tabla 13. Resultados de comparación Costo-Deformación.	63
Tabla 14. Selección de método de estabilización a diseñar.	64

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA DISMINUIR LA VULNERABILIDAD DE TALUDES EN VÍAS RURALES. CASO DE ESTUDIO: VÍA CHARALÁ – COROMORO*

AUTORES: GIMETH ILEANA TUMAY GAMBA
DIEGO ARMANDO RODRÍGUEZ BARÓN**

PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad de taludes, Vías rurales, Métodos de estabilización, Factor de seguridad, Deformación, Presupuesto.

DESCRIPCIÓN:

En ingeniería civil la estabilidad de un talud se define en términos de los valores de factor de seguridad (F.S.) y de deformación, los cuales pueden obtenerse a partir de análisis matemáticos, modelamiento y/o simulación con métodos computacionales. Diversos factores pueden afectar estos valores, como por ejemplo la geometría del talud, las cargas que soporta (peso propio y/o tráfico de la vía), las cargas dinámicas por efectos de los sismos, el flujo de agua, las propiedades del suelo, entre otros. Un talud se puede considerar vulnerable cuando el valor de Factor de seguridad es muy cercano a la unidad y la deformación es considerable, situación en la cual la estabilidad de éste se ve altamente comprometida y se requieren medidas preventivas y/o correctivas.

El presente estudio evalúa la vulnerabilidad de taludes en vías rurales, tomando como caso de estudio el tramo ubicado entre el K13+440 y K13+920 de la vía que comunica los municipios de Charalá y Coromoro (ubicados en el departamento de Santander – Colombia). Se utilizaron herramientas computacionales como Plaxis 2D y Geo-Slope para estimar los valores de Factor de seguridad y de deformación del talud, aplicando como alternativas de estabilización la construcción de gaviones, muros de contención, pantallas ancladas y el abatimiento de talud por medio de corte a media ladera. Un análisis comparativo entre costo - beneficio fue realizado, con el fin de determinar la solución más factible en cuestiones de seguridad y economía.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez. Codirector: Omar Giovanni Sánchez Rivera.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF SOLUTIONS TO REDUCE THE VULNERABILITY OF SLOPES IN RURAL ROADS. CASE STUDY: VIA CHARALÁ – COROMORO*

AUTHOR: GIMETH ILEANA TUMAY GAMBA
DIEGO ARMANDO RODRÍGUEZ BARÓN**

PALABRAS CLAVE: Vulnerability of slope, rural roads, Stabilization methods, Safety factor, Deformation, Budget.

DESCRIPTION:

In civil engineering the stability of a slope is defined in terms of the values of safety factor (S.F.) and deformation, which can be obtained from mathematical analysis, modeling and/or simulation with computational methods. Various factors can affect these values, for example the slope geometry loads acting over it (own weight and/or the road traffic), dynamic loads by effects of earthquakes, water flow, soil properties, etc. A slope may be vulnerable when the value of safety factor is very close to the unit and the deformation is significant, situation in which the stability of it is highly compromised and preventive and/or corrective actions are required.

This study assesses the vulnerability of slope in rural roads, taking as a case study the section located between the K13+440 y K13+920 of the road connects the towns of Charalá and Coromoro (located in the department of Santander – Colombia). Computational tools such as Plaxis 2D and Geo-Slope were used to estimate the values of safety factor and deformation of the slope, applying gabions construction, retaining walls, anchored screens and gloom slope by cutting along the hillside as stabilization alternatives. A comparative analysis of cost – benefice was carried out in order to determine the most feasible solution on safety and economy.

* Work Degree

** Faculty of Physical-Mechanics Engineering. School of Civil Engineering. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez. Codirector: Omar Giovanny Sánchez Rivera.

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan las obras civiles, causando grandes pérdidas humanas y económicas cada año [1]; sin embargo la importancia dada a esta problemática es insuficiente.

Se piensa que la mayoría de los taludes son aparentemente estables y estáticos, pero realmente son sistemas dinámicos en evolución. Un talud en aparente estado de equilibrio puede desestabilizarse con el tiempo y la ocurrencia de un deslizamiento es un fenómeno propio de ese proceso. Por lo tanto, se requiere conocer detalladamente lo que ocurre dentro de un talud para poder diagnosticar correctamente su comportamiento. Este diagnóstico es un aspecto fundamental en la ciencia de la estabilidad de los taludes [2]. Si este es erróneo, las medidas remediales y/o los procedimientos de estabilización fracasaran. Previamente al diseño de las medidas remediales, se debe tener un conocimiento completo de la magnitud de la amenaza, las causas y los mecanismos que la generan (topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas).

En el estudio de estabilidad de taludes o laderas el principal objetivo es diseñar medidas de prevención, control, remediación y/o estabilización para reducir los niveles de amenaza y riesgo; para lo cual se ha desarrollado gran cantidad de técnicas probadas para el manejo de los taludes inestables o los deslizamientos (cerchas metálicas, mallas con pernos anclados, concreto lanzado, revegetación, zanjas de coronación, tierra armada, rellenos con geotextil, pantallas ancladas, gaviones, muros de gravedad, entre otros). Dichas soluciones deberán garantizar

la seguridad de la estructura y la minimización de costos de mantenimiento durante la vida útil de esta.

En el análisis de perfiles estratigráficos se hace necesario realizar un gran volumen de cálculos repetitivos, por lo cual resulta práctico la utilización de una herramienta computacional que facilite el proceso. Entre las más conocidas se encuentra el software PLAXIS 2D, el cual permite analizar la estabilidad de taludes por el método de elementos finitos [3].

Este proyecto de investigación contempla la realización de un estudio de vulnerabilidad geotécnica de los taludes de corte y/o relleno de la vía que comunica los municipios de Charalá y Coromoro (K13+440 – K13+920) ubicados en el departamento de Santander - Colombia, tomando como base el Proyecto de Mejoramiento de las vías secundarias del Departamento de Santander.

Como producto se presentan las memorias de cálculo y la modelación en el software Revit de cada una de las soluciones estudiadas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La topografía colombiana, marcada por el paso de las tres cordilleras, exige de manera constante la construcción de carreteras a lo largo de los valles. Una gran cantidad de estas han sido formadas a través de laderas de gran pendiente, las cuales requieren de la intervención del hombre y posteriormente la del Ingeniero Civil para poder aplicar las técnicas de corte-relleno asegurando la integridad de las vías.

En la mayoría de casos, aun cuando se realizan las obras de estabilización necesarias (muros de contención, pantallas ancladas, gaviones, revestimiento de taludes, entre otros), los taludes de corte y relleno continúan presentando problemas de estabilidad a lo largo de la vía, que desencadenan en el deterioro o falla de la estructura de ésta. Además, durante los periodos invernales es muy común que se aumente la vulnerabilidad de los taludes (desprendimiento de rocas desde los taludes, derrumbes, deslizamientos, pérdida de la banca, entre otros) debido al aumento de la presión de poros.

La ingeniería colombiana se ha enfocado en abordar esta problemática a través de una serie de normas y procedimientos técnicos, como el título H de la NSR-10, las Normas Geotécnicas del Control de Erosión, el Manual de Estabilidad de Taludes y el Manual para la Inspección Visual de Obras de Estabilización (INVIAS), que permiten garantizar la integridad de las obras lineales durante su vida útil.

El presente proyecto de investigación está enfocado en realizar un estudio de la vulnerabilidad geotécnica de los taludes de corte y/o relleno de la vía que comunica

los municipios de Charalá y Coromoro (K13+440 – K13+920), tomando como base el Proyecto de Mejoramiento de las vías secundarias del Departamento de Santander¹ (destinado a los tramos viales que conectan a los municipios de La Playa – Charta, Suratá – California y Charalá – Coromoro). A partir de las visitas de campo, se escogerán cinco sitios de mayor vulnerabilidad (aproximadamente 100 metros cada sitio, tomando el perfil transversal de cada uno de ellos para el estudio) con el fin de modelarlo con la ayuda de software como Plaxis 2D, estableciendo una alternativa funcional que permita mitigar las consecuencias sobre la vía mediante la estabilización del mismo.

Para este estudio se adoptará como posibles soluciones los métodos de cercas metálicas, mallas con pernos anclados, concreto lanzado, revegetación, zanjas de coronación, tierra armada, rellenos con geotextil, pantallas ancladas, gaviones, muros de gravedad, entre otros. Dichas soluciones deberán garantizar la seguridad de la estructura y la minimización de costos de mantenimiento durante la vida útil de ella.

A partir de los resultados obtenidos se pretende generar un conjunto de recomendaciones constructivas para cada tipo de solución adoptada, acompañados de sus respectivos modelos de cálculo.

¹ Estudios y diseños necesarios para la planificación técnica del mejoramiento de las vías secundarias del Departamento de Santander. Contrato Interadministrativo No.00001125 de 2011. Universidad Industrial de Santander.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar soluciones para la disminución de vulnerabilidad de taludes resultantes del corte y relleno durante la construcción de una vía rural.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los perfiles transversales de los taludes más críticos de la vía Charalá – Coromoro entre abscisas K13+440 a K13+920 que resulten convenientes para el análisis de la estabilidad, teniendo en cuenta los estudios realizados por el equipo técnico del grupo de investigación de Geomática.
- Proponer alternativas para la disminución de la vulnerabilidad geotécnica de taludes del tramo de vía estudiado.
- Realizar un modelo de los taludes que requieran de análisis de estabilidad en el software Plaxis 2D.
- Calcular el costo de construcción de las alternativas propuestas para la disminución de la vulnerabilidad de los taludes del tramo de vía estudiado.
- Elaborar un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de las alternativas estudiadas para la disminución de vulnerabilidad de los taludes.
- Modelar la alternativa de mayor beneficio, mediante la utilización del software Autodesk Revit 2014.

3. METODOLOGÍA

Para la realización del presente proyecto de investigación (estudio de soluciones para disminuir la vulnerabilidad de taludes en vías rurales. Caso de estudio, vía Charalá – Coromoro) se desarrolló una metodología dividida en 6 etapas: Revisión bibliográfica, Reconocimiento de campo, Evaluación de los sitios críticos y análisis de alternativas, Manejo e interpretación de software, Aplicación práctica del software y Análisis de los resultados.

Las etapas de la metodología adoptada se explican a continuación:

3.1. ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se consultaron fuentes bibliográficas como artículos publicados en revistas científicas, libros, tesis de grado, reseñas y demás documentos relacionados con el estudio de estabilidad de taludes o laderas, centralizándonos en el diseño de medidas de prevención, control, remediación y/o estabilización para reducir los niveles de amenaza y riesgo.

3.2. ETAPA 2: RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Se realizó un recorrido de la vía en ambos sentidos, identificando las formaciones y las fallas geológicas presentes en la zona de estudio. Durante dicho recorrido se identificaron y registraron (soporte fotográfico) cada uno de los sitios críticos (socavamientos, derrumbes, deslizamientos), así como su posible influencia sobre la integridad de la vía.

3.3. ETAPA 3: EVALUACIÓN DE LOS SITIOS CRÍTICOS Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Con el registro fotográfico y las anotaciones de campo, sumados los estudios técnicos de la vía Charalá - Coromoro, desarrollados por el grupo de investigación de Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander, se evaluaron los sitios que presentan mayor vulnerabilidad sobre la vía, con el fin de realizar un análisis de estabilidad en los software Plaxis 2D y Geo Slope, para finalmente modelar en el software Revit la alternativa de estabilización propuesta para cada sitio considerado como crítico. Estos sitios fueron seleccionados a criterio de los autores teniendo en cuenta problemas que se observaron (derrumbes, caída de rocas e insuficiencia en el ancho de calzada) durante la visita que se hizo al lugar en estudio y basándose en las recomendaciones y exigencias del título H del reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10), así como en los diferentes manuales existentes.

En la solución a los problemas de estabilidad que presenta la vía, se proponen alternativas entre las cuales el uso de gaviones, muros de concreto reforzado, abatimiento del talud por medio de corte y/o relleno y de ser necesario el uso de pantallas ancladas y nails con el fin de mitigar o remediar estos inconvenientes geotécnicos.

3.4. ETAPA 4: MANEJO E INTERPRETACIÓN DE SOFTWARE

Actualmente es muy común el uso de herramientas computacionales para la solución de proyectos de ingeniería, ya que ellas permiten reducir el tiempo de dicho análisis de manera importante [4].

En este trabajo se utilizó como Software de ayuda AutoCAD civil 3D, Geo-Slope, Plaxis 2D y Revit 2014.

Plaxis 2D es un programa de elementos finitos bidimensionales el cual tiene como uno de sus objetivos es el análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos [5]. La interface gráfica del programa está diseñada para que el usuario pueda tener una fácil interacción con este, permite crear un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basándose de una sección transversal representativa del problema en estudio [6].

El método empleado por el programa de elementos finitos es una herramienta útil en el análisis de problemas geotécnicos. La confianza de este método para excavaciones profundas ha sido examinada ampliamente por investigadores [7].

Slope/W es uno de los softwares más utilizados para calcular el factor de seguridad en taludes de tierra y roca. Este software puede analizar de forma eficaz los problemas simples y complejos para una variedad de formas de la superficie de deslizamiento, las condiciones de presión del agua intersticial, las propiedades del suelo, los métodos de análisis y las condiciones de carga.

Usando equilibrio límite, Slope/W puede modelar diferentes tipos de suelos, estratigrafías y geometrías de superficie de deslizamiento complejas, así como condiciones variables de la presión de poros utilizando una amplia gama de modelos de suelo. El análisis de estabilidad de taludes puede realizarse utilizando parámetros de entrada determinísticos o probabilísticos [8].

3.5. ETAPA 5: APLICACIÓN PRÁCTICA DEL SOFTWARE

Con el software AutoCAD Civil 3D se realizó un bosquejo de la estabilización de los perfiles, que luego fueron trabajados en los softwares Plaxis 2D y Geo-Slope. La utilización de este último con el fin de obtener los valores de factor de seguridad para cada caso. Para el uso de este software fue necesario que el documento de AutoCAD a importar contuviera la estratificación en regiones y que estuviera en formato DXF.

Ya en el Software Plaxis 2D, se hallaron los valores de deformación de cada uno de los perfiles, los cuales se tomaron como criterio adicional para la escogencia del método de estabilización más adecuado. A diferencia del software Geo-Slope, este requirió que el documento de AutoCAD se presentara en formato DWG. Ya importado el documento de AutoCAD a Plaxis 2D se le asignaron las diferentes propiedades a cada estrato, las cuales fueron suministradas de los estudios realizados por el Grupo de investigación Geomática. Finalmente se realizó el respectivo análisis de los perfiles seleccionados para cada una de las alternativas propuestas.

Se culminó esta etapa con la realización de un bosquejo de la vía, integrando los taludes estabilizados. Para ello fue necesaria la utilización de software Revit 2014.

3.6. ETAPA 6: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El costo de ejecución de una obra es otro factor que influye al momento de la realización de un proyecto, ya que este nos permite conocer la factibilidad de una

alternativa y el presupuesto necesario para llevarla a término [9]. Para la realización de los cálculos del costo de ejecución fueron necesarios dos elementos, el cálculo de cantidades y el costo de cada una de las alternativas.

Lo primero que se realizó fue el cálculo de cantidades, teniendo en cuenta que eran tres alternativas principales las planteadas para cada perfil; abatimiento del talud por medio de corte, gaviones y muro. Otra consideración tomada fue la de realizar los cálculos de un metro lineal de sección transversal en cada alternativa propuesta.

Para el cálculo del costo de cada una de las alternativas se tuvo en cuenta factores como el movimiento de tierra y el tipo de estructura a utilizar (gaviones, muros de concreto reforzado, clavos o nails, pantallas ancladas, entre otros).

Luego de tener el costo de cada una de las alternativas se realizó un cuadro comparativo en el cual se tenían en cuenta los valores de factor de seguridad (obtenidos de Geo-Slope), deformación (obtenidos de Plaxis 2D) y el costo de ejecución; estos tres parámetros se tomaron como criterio al momento de seleccionar la opción más favorable para cada perfil. Dicha selección también tuvo en cuenta las ventajas y desventajas de cada alternativa, con el fin de escoger la más favorable en términos de los parámetros tenidos en cuenta para el estudio.

4. RESULTADOS

4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1.1. Definición de talud o ladera: Se considera un talud o ladera toda superficie de tierra inclinada que posee cambios significativos de pendiente. Cuando los taludes son hechos por el hombre son denominados cortes o talud artificiales y cuando en su proceso de formación no intervino el ser humano son considerados laderas o taludes naturales. [10].

La inestabilidad de taludes o laderas según sea el caso ocurre cuando se conjugan varios factores, que pueden ser: factores geológicos (debilidad del material, la meteorización, fracturas, fisuras, capacidad de infiltración, dureza del material entre otros), factores morfológicos (erosión en márgenes laterales, erosión fluvial de pie de ladera, erosión subterránea), factores físicos (la precipitación, la temperatura, el drenaje, vibraciones, sismos, erupciones volcánicas) y factores antropogénicos (excavaciones, deforestación, vibraciones artificiales, aumento de peso sobre la pendiente, entre otros).

4.1.2. Vulnerabilidad: Varnes fue uno de los primeros autores en introducir el término de vulnerabilidad en sus estudios. Para él "la vulnerabilidad está definida como el grado de daños potenciales que puede sufrir un elemento o un grupo de elementos" [11].

La ONU maneja el concepto de vulnerabilidad como el resultado de la exposición a riesgos y la incapacidad para enfrentarlos; son las condiciones determinadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de amenazas [12].

4.1.3. Deslizamiento: Se denomina deslizamiento o movimientos de masa a la rotura y al desplazamiento del suelo situado debajo de un talud, originando un movimiento hacia abajo o hacia afuera de toda la masa que participa del mismo (piedras, tierra, y vegetación). Es común que se presente un deslizamiento durante un evento sísmico o en temporadas invernales con el aumento de las presiones intersticiales debido a la infiltración que puede presentar. [13].

En todos los casos los deslizamientos o movimientos de masa no son iguales, y para poder evitarlos o mitigarlos es indispensable saber las causas y la forma como se originan (por caída libre, movimientos en masa, erosión o flujos).

4.1.4. Estabilidad: En geotecnia se entiende por estabilidad al grado de seguridad que presenta una masa de tierra contra la falla o movimiento.

El termino estabilidad de taludes hace referencia a la inclinación que se le da a un corte o a un terraplén presentando niveles de seguridad adecuados para que no haya colapso evidente [14].

Algunas de las posibles soluciones para mejorar la estabilidad de taludes o laderas es la construcción de estructuras de drenaje y contención, la eliminación de estratos débiles y el uso de químicos.

4.1.5. Factor de Seguridad (F. S.): El factor de seguridad en el análisis de estabilidad de taludes es utilizado para conocer cuál es el factor de amenaza para que un talud falle en las peores condiciones para el cual se diseña.

En Ingeniería el término Factor de Seguridad F.S se define como la relación entre fuerzas resistentes y actuantes.

$$F.S = \frac{\text{Fuerzas Resistentes}}{\text{Fuerzas Actuantes}} \quad (1)$$

La norma colombiana exige un factor de seguridad para una excavación temporal estático de 1.25 y dinámico de 1.00 [15].

4.1.6. Medidas preventivas y correctivas: Las medidas preventivas y/o correctivas establecen como principal objetivo la disminución, mitigación o prevención de problemas geotécnicos de manera que se reduzcan los niveles de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

En la actualidad existe un sinnúmero de medidas. A continuación se exponen las consideradas más relevantes para el presente trabajo.

Estructuras de contención de gravedad

Las estructuras de contención o de relleno son construidas con la finalidad de proveer estabilidad contra la rotura de macizos de tierra o roca. Son estructuras que proveen soporte y evitan el deslizamiento del talud causado por su peso propio o por cargas externas.

Ejemplos típicos de estructuras de contención de gravedad son los muros de concreto reforzado, gaviones y muros en criba.

La principal ventaja de un muro de gravedad es que utilizan su peso propio y muchas veces el peso de su relleno incorporado a ella para su estabilidad; es muy

fácil su ejecución ya que para esto no se requiere, en general, mano de obra especializada [10].

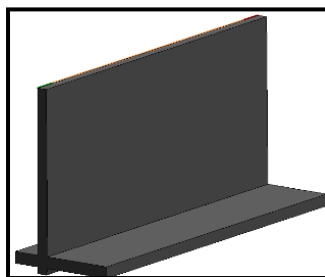
Se deben diferenciar dos tipos generales de muros de gravedad:

Muros rígidos: En esta categoría se encuentran los muros de concreto reforzado, concreto simple y concreto ciclópeo.

- **Muros de Concreto Reforzado:** Muros de concreto reforzado o también denominados muros de corte ya que resisten un alto porcentaje de las fuerzas cortantes; dada su alta rigidez exhiben un comportamiento adecuado ante eventos sísmicos. Su altura y resistencia son propuestas por un ingeniero estructural o experto en el tema y pueden variar según sean las necesidades solicitadas.

Estos muros pueden resultar antieconómicos en comparación con otros tipos de estructuras de contención; en la Figura 1 se muestra un muro de concreto reforzado.

Figura 1. Ejemplo Muro de concreto reforzado modelado en el software Revit 2014.



Muros flexibles: Se incluyen los muros en gaviones, los muros criba, los terraplenes y los muros de tierra con llantas usadas, entre otros.

Los muros flexibles son estructuras de contención que se deforman fácilmente por las presiones de la tierra sobre ellas o que se acomodan a los movimientos del suelo y generalmente, se diseñan para resistir presiones activas en lo que se refiere a su estabilidad intrínseca y actúan como masas de gravedad para la estabilización de deslizamientos de tierra.

- **Muros en Gaviones:** Los muros de contención en gaviones representan una solución válida desde el punto de vista técnico para construir muros de contención en cualquier ambiente, clima y estación. Los muros de contención en gaviones son eficientes y no precisan mano de obra especializada. Presentan una extrema flexibilidad que permite a la estructura adaptarse a los movimientos del terreno, una alta resistencia y una elevada permeabilidad. Se puede construir sin necesidad de equipos mecánicos y es fácil obtener una buena calidad de un muro de contención, debido a la simplicidad de los dos materiales, los gaviones y las piedras de relleno [10].

Los gaviones presentan algunas ventajas frente a otras estructuras de contención, las principales se muestran a continuación:

- Elevada permeabilidad que facilita el saneamiento del terreno dejando filtrar el agua de la escarpa a través de los gaviones.
- Extrema flexibilidad que permite a la estructura adaptarse a los movimientos del terreno sin comprometer la estabilidad y la eficiencia de los gaviones.

- Alta resistencia al empuje del terreno sobre el muro de contención, estando calculados como estructura monolítica a gravedad de gaviones.

Figura 2. Ejemplo Muro de contención en gaviones modelado en el software Revit 2014.



Estructuras ancladas

Son estructuras que logran estabilidad a través de tirantes, con capacidad para soportar las fuerzas de carga que actúan sobre esta. Estas fuerzas pueden ser el empuje del suelo, el agua y sobrecargas.

En las estructuras ancladas se colocan varillas o tendones, generalmente de acero, dentro de perforaciones realizadas con taladro, se inyectan con un cemento, y luego se tensionan [16].

Algunas de las ventajas de las estructuras ancladas son:

- Permiten la estabilización de bloques en macizos rocosos.
- Son muy eficientes como elementos de refuerzos en materiales fracturados.
- Permiten excavar junto a edificios o estructuras.
- Permiten alturas considerables.
- Su construcción es de arriba hacia abajo.

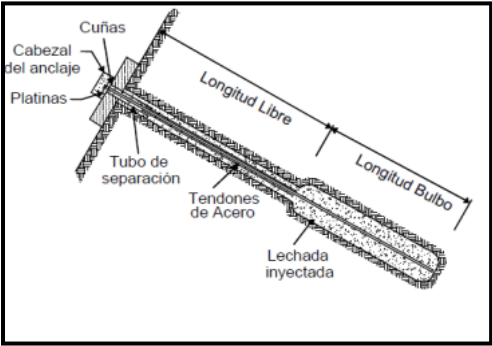
Como desventaja podemos encontrar que son susceptibles a la corrosión y en algunos casos resultan antieconómicas.

Tipos de estructura anclada

- **Muros Anclados:** Los muros anclados son estructuras utilizadas para asegurar cortes en excavaciones o en cualquier tipo de estabilización en taludes. Los anclajes son usados para proporcionar una precarga de los sistemas estructurales aplicando tensión por medio de sistemas hidráulicos al tendón del anclaje.

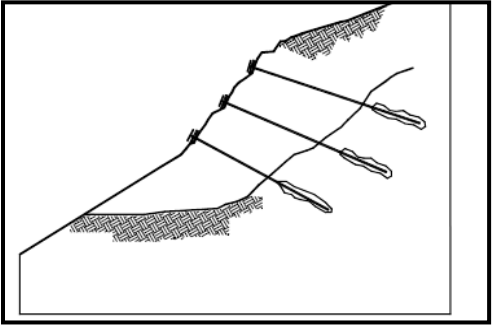
Los anclajes permanentes incorporan una variedad de sistemas de la protección contra la corrosión que son determinados por las condiciones específicas del sitio de trabajo, al presupuesto y a la duración de la obra.

Figura 3. Anclaje con tendones de acero. Fuente: Suarez Díaz, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. [Imagen] Bucaramanga. 2005.



Los muros anclados pueden ser de varios tipos:

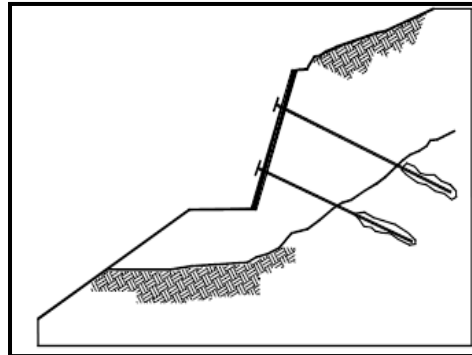
Figura 4. Anclas pre-tensadas sobre zapatas individuales. Fuente: Suarez Díaz, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. [Imagen] Bucaramanga. 2005.



- **Pantallas ancladas:** Se denomina pantallas a los elementos de contención de tierra que se emplean para realizar excavaciones verticales en aquellos casos en donde el terreno no sería estable sin su ejecución.

La idea general del uso de pantallas ancladas es que permiten ‘coser’ la estructura para impedir el deslizamiento del talud [17].

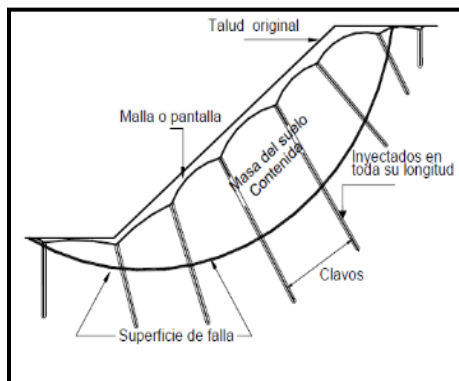
Figura 5. Estabilización de taludes utilizando pantalla anclada. Fuente: Suarez Díaz, Jaime, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. [Imagen] Bucaramanga. 2005.



- **Los clavos (Nails):** Los nails son elementos de tensión no pretensados, que pueden ser varillas de acero, tubos, o cables; los cuales se introducen dentro del suelo natural o roca blanda por medio de inyección, perforación o hincados.

La principal función de los nails es servir de refuerzo para aumentar la resistencia interna al corte en superficies con posible rotura o falla [18].

Figura 6. Esquema de clavos en un deslizamiento. Fuente: Suarez Díaz, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. [Imagen] Bucaramanga. 2005.



4.2. RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Durante el reconocimiento de campo, se realizó una observación detallada, así como un registro fotográfico de los sitios considerados como críticos (socavamientos, derrumbes, deslizamientos) y que tenían una posible influencia sobre la integridad de la vía. Algunos de ellos se presentan en la figura 7.

Figura 7. Recorrido de observación de problemas de estabilidad.



4.3. EVALUACIÓN DE LOS SITOS CRÍTICOS Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Durante el recorrido sobre la vía Charalá – Coromoro, entre los kilómetros 13+440 a 13+920 se pudo observar los diferentes problemas que presentaba la infraestructura de la misma, entre los cuales se pueden destacar los siguientes:

En algunos tramos de la vía el ancho de la calzada no cumple con los requerimientos que estipula el Manual de Diseño Geométrico, el cual indica que este ancho debe oscilar entre 6.0 y 7.3 metros [19] dependiendo de las condiciones

del terreno. Según lo observado, en algunos sectores la vía posee ancho de calzada inferior a los tres metros, dificultando la movilidad y reduciendo la seguridad para los usuarios. Con el fin de aumentar el ancho de la calzada como mínimo a los 6.0 metros, se planteó la realización de cortes y/o rellenos al talud.

Otra problemática evidenciada en la vía es la constante caída de rocas sobre la banca, inconveniente que aumenta en temporada de lluvias debido a la erosión de la arcilla que une los bloques de roca en la matriz coluvial. Para dar solución a este inconveniente, se pensó en la posibilidad de un revestimiento con concreto o con vegetación de la región, la utilización de gaviones, muros de contención (si se considera deslizamiento) y la construcción de pantallas de ser necesario.

A partir de los estudios realizados por el grupo de investigación Geomática y de las observaciones realizadas durante la visita de campo, se consideró que los sitios con mayor vulnerabilidad geotécnica eran:

Figura 8. Perfil K13 +440.

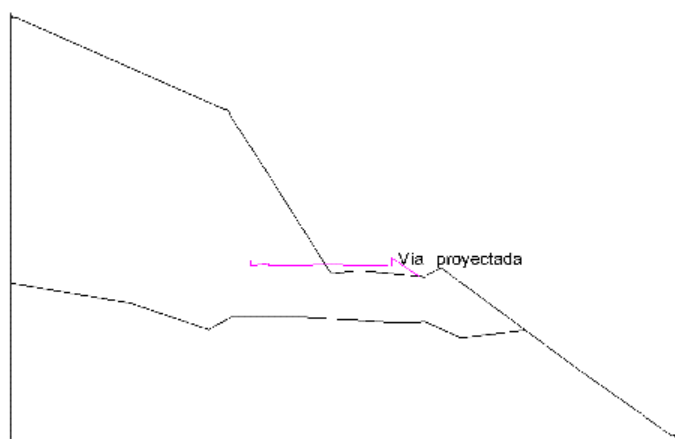


Figura 9. Perfil K13 +500.

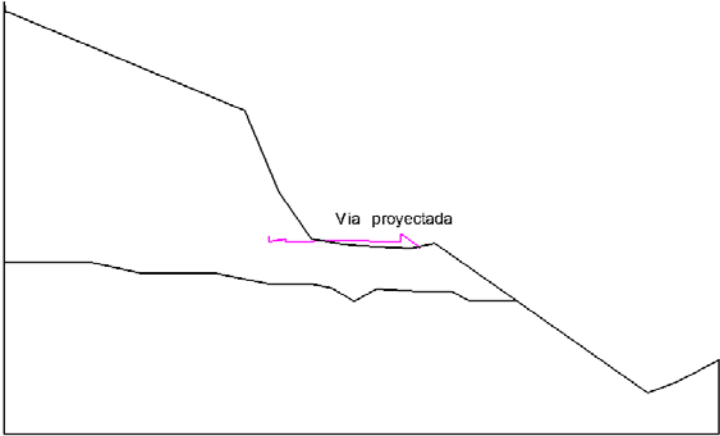


Figura 10. Perfil K13 + 560.

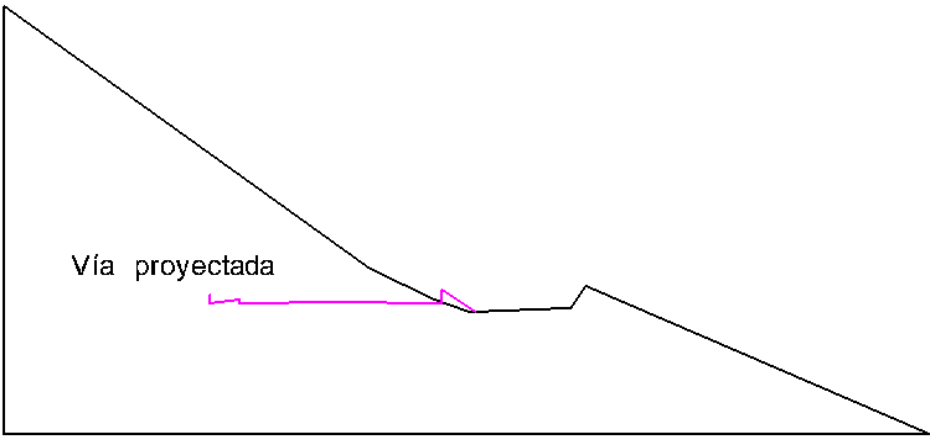


Figura 11. Perfil K13 + 880.

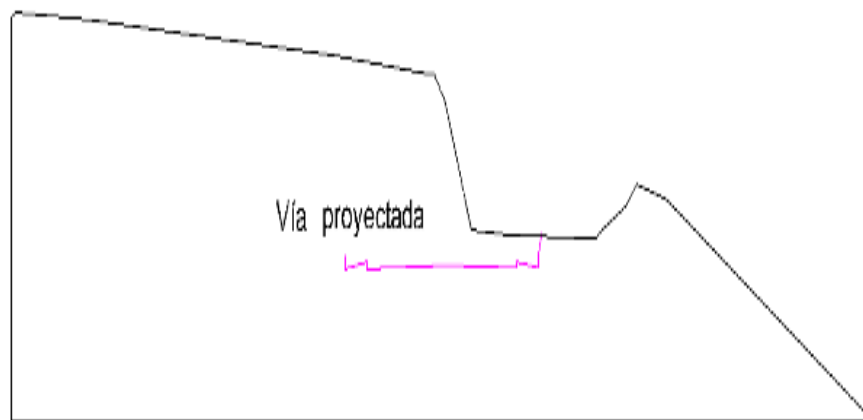


Figura 12. Perfil K13 + 920.



A los cinco tramos seleccionados se les realizó un análisis de estabilidad utilizando los softwares Geo-Slope y Plaxis 2D con el fin de determinar un factor de

seguridad y la posible deformación que posean tanto en condición estática como dinámica. Para realizar el análisis del talud de corte a la sección, se propuso estabilizar los taludes con muros de concreto reforzado, gaviones y la utilización de clavos (Nails) y pantallas ancladas de ser necesario. Esto con la finalidad de garantizar los niveles de seguridad exigidos por la normatividad vigente.

4.4. MANEJO E INTERPRETACIÓN DEL SOFTWARE

A pesar de tener conocimientos básicos en el manejo de Plaxis 2D y Geo-Slope, fue necesario reforzarlos. En función de la complejidad y del nivel de confiabilidad que presentan los resultados obtenidos a partir de Geo-Slope, se realizó un primer modelamiento con este software.

Geo-Slope ofrece un sinnúmero de opciones para hacer frente a los refuerzos estructurales. En un análisis más riguroso, las propiedades de los componentes estructurales se pueden incluir en un análisis de tensión-deformación de tal manera que las fuerzas y momentos en la estructura pueden ser calculados junto con la interacción entre la estructura y el suelo [8].

Algunos parámetros que hay que tener en cuenta a la hora de trabajar con este software son las propiedades del suelo (*tabla 1*), tales como el peso específico, ángulo de fricción y cohesión de cada uno de los materiales presentes.

Tabla 1. Propiedades del Perfil representativo.

Perfil estratigráfico representativo		
Profundidad	Clasificación	Propiedades
0 a 4 m	GM	γ : 16 kN/m ³
		C: 36 kN/m ²
		ϕ : 15 °
4 a 6 m	GM	γ : 17 kN/m ³
		C: 20 kN/m ²
		ϕ : 30 °

Para el caso de una pantalla anclada o un nails, se deben tener en cuenta parámetros como el ángulo de inclinación, la profundidad del torón, la profundidad de la lechada y la separación entre ellos. En las Figuras 13 y 14 se muestran las propiedades y requerimientos de una pantalla anclada y un nail a la hora de utilizarlo en Geo-Slope.²

²Ingeniero Geotecnista JOSE RONDÓN, “Análisis de la estabilidad de taludes: Estructuras de contención” (clase, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 23 de Julio de 2014).

Figura 13. Propiedades de una pantalla anclada.

Draw Reinforcement Loads [?] [Σ]

Reinforcement

Type:	F of S Dependent:	Load Distribution:	Length:	Direction:
Anchor ▼	No ▼	Conc. in 1 slice ▼	15 m	18 °

Constant Applied Load: 600 kN Anchor Spacing: 2 m

Variable Applied Load Bar Capacity: 2000 kN

Bond Length: 4 m Bar Safety Factor: 2

Bond Diameter: 0.254 m Shear Capacity: 0 kN

Bond Safety Factor: 2 Shear Safety: 1

Bond Skin Friction (F/Area): 300 kPa Apply Shear: Parallel to Slip ▼

Applied Load: 300 kN	Bond Resistance: 59.847 kPa
----------------------	-----------------------------

Done

Figura 14. Propiedades de un Nail.

Reinforcement				
Type:	F of S Dependent:	Load Distribution:	Length:	Direction:
Nail	No	Conc. in 1 slice	8 m	45 °
Bond Diameter:	0.1 m	Bar Capacity:	120 kN	
Bond Safety Factor:	1.5	Bar Safety Factor:	2	
Bond Skin Friction (F/Area):	150 kPa	Shear Capacity:	90 kN	
Nail Spacing:	2 m	Shear Safety:	2	
		Apply Shear:	Parallel to Slip	
Applied Load:	0 - 30 kN	Bond Resistance:	15.708 kPa	

Done

4.5. ETAPA 5: APLICACIÓN PRÁCTICA DEL SOFTWARE

Se decidió comenzar el análisis de estabilidad de los perfiles con Geo-Slope, permitiendo estabilizar los taludes con una menor complejidad en el software Plaxis 2D, ya que al garantizar un factor de seguridad en el rango establecido por la norma, los taludes no presentaban inconvenientes a la hora de trabajarlos con este último software.

En función del tipo de suelo presente en la región, se decidió utilizar alternativas de solución económicamente viables como el uso de gaviones, muros de concreto reforzado y abatimiento del talud por medio de corte.

4.5.1. Estabilización del Talud con el Método de Abatimiento del Talud por Medio de Corte

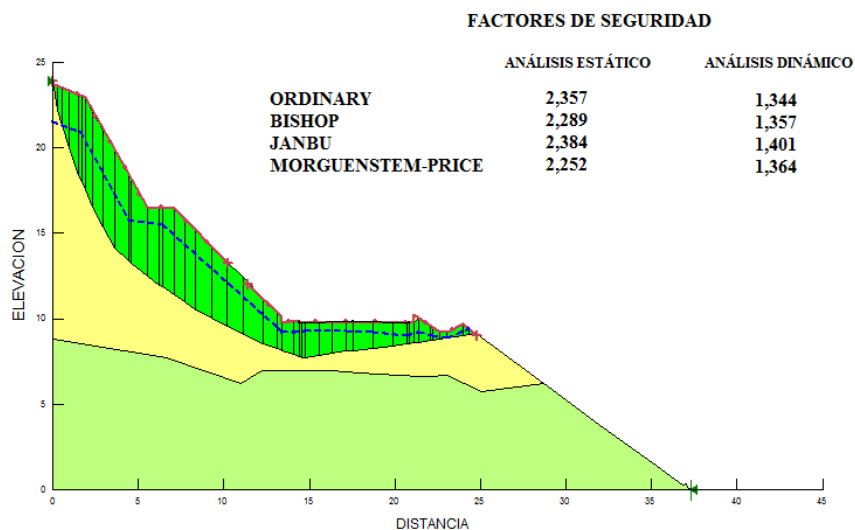
Una de las opciones de estabilización para los taludes fue la de corte de ladera. Cabe aclarar que este método se puede utilizar en todo tipo de deslizamiento, aunque para secciones con gran altura puede presentar inconvenientes [20]. Un ejemplo de ello, fueron los taludes K13 + 440 y K13 +500, los cuales eran muy altos y con muy poca pendiente. Por tal razón fue necesario excavar lo suficiente hasta obtener valores de factor de seguridad confiables. En *tabla 2* se muestran las inclinaciones de los taludes para cada perfil.

Tabla 2. Angulo de inclinación para cada perfil.

Perfil	Ángulos de inclinación en grados
K13+440	27 y 48
K13+500	28 y 38
K13+560	15
K13+880	23
K13+920	30

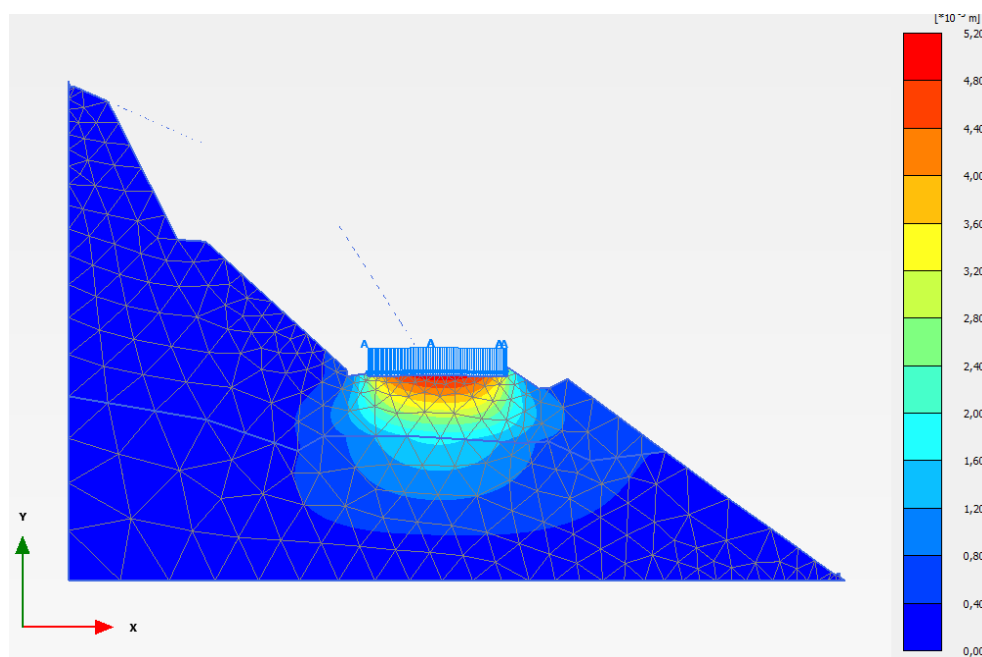
Los valores de factor de seguridad obtenidos para cada perfil, fueron satisfactorios según los métodos de análisis utilizados. En la figura 15 se muestra el perfil representativo.

Figura 15. Resultados obtenidos de Geo-Slope (F.S.) para el perfil K13+440 por el método de abatimiento del talud por medio de corte.



Para el trabajo en Plaxis 2D se tomaron los perfiles que se utilizaron en Geo-Slope, considerando que estos presentaban valores de factor de seguridad adecuados. La utilización de este software permitió obtener los valores de deformaciones para cada perfil, que servirían como criterio adicional al momento de elegir los métodos de estabilización. La figura 16 muestra los resultados obtenidos para el perfil representativo.

Figura 16. Resultados obtenidos de Plaxis 2D para la deformación del perfil K13 +440 por el método de abatimiento del talud por medio de corte.



Los valores de factor de seguridad y de deformación para cada uno de los perfiles son presentados en la tabla 3.

Tabla 3. Factor de seguridad y deformación por el método de abatimiento del talud por medio de corte.

Perfil	Factor Seguridad- Geo-Slope		Deformación- Plaxis 2D [m]
	Estático	Dinámico	
K13+440	2.252	1.364	5.06E-03
K13+500	1.670	1.267	5.24E-03
K13+560	1.683	1.218	5.05E-03
K13+880	2.603	1.239	4.07E-03
K13+920	1.650	1.251	9.25E-03

4.5.2. Estabilización del Talud con el Método de Gaviones

Una de las ventajas de los gaviones es que son simples de construir y mantener, se utilizan cantos y piedras disponibles en el sitio. Su estructura es flexible, puede tolerar asentamientos diferenciales, fácil de demoler y reparar [10].

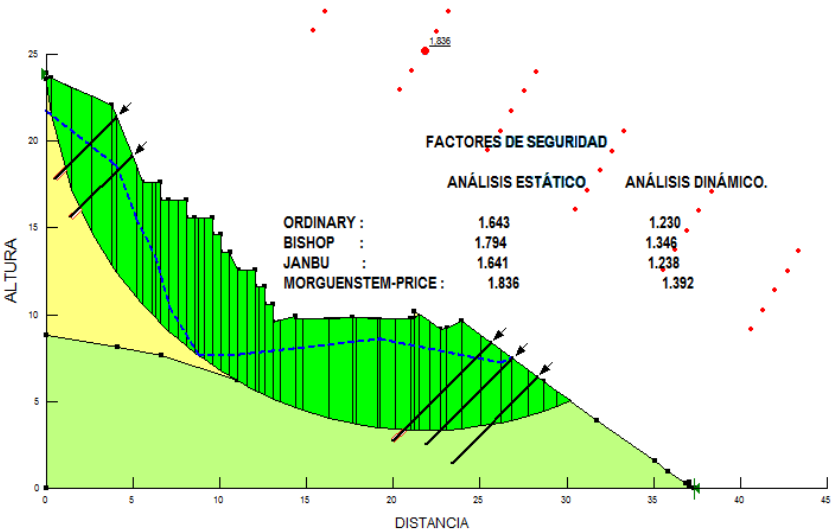
El análisis con Geo-Slope presentó algunas complicaciones en el perfil K13 +440, dónde la estabilización del talud utilizando solo gaviones no permitía garantizar la integridad del mismo. Fue necesario utilizar nails hacia la parte del rio para estabilizar dicho talud.

Cuando se realizó el recorrido por la vía se pudo evidenciar los problemas de erosión de la ladera hacia el costado del rio, donde se evidenció la utilización de concreto lanzado en algunos sectores como prevención a este fenómeno.

Se adoptaron gaviones de 1x1x2 metros, nails con inclinaciones de 45° y profundidades entre 6 y 8 metros. En la figura 17 se muestra un ejemplo de esto.

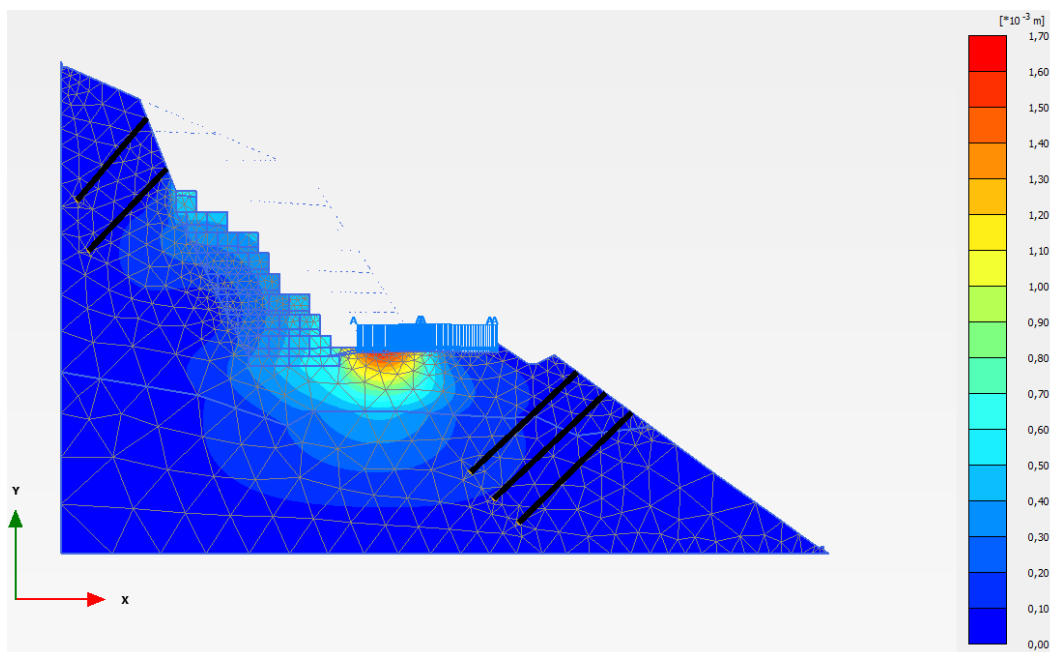
Los valores de factor de seguridad (estático y dinámico) obtenidos por en Geo-Slope utilizando el método *Morguenstem-Price* se muestran en la tabla 4.

Figura 17. Resultados obtenidos de Geo-Slope (F.S.) para perfil K13+440 por el método de gaviones.



Los análisis realizados en Plaxis 2D no presentaron ningún inconveniente. Se consideró que los nails debían ubicarse cada 2 metros. En la figura 18 se muestra el perfil repetitivo.

Figura 18. Resultados obtenidos de Plaxis para la deformación del perfil K13 +440 por el método de gaviones.



Los valores de deformación estuvieron entre 3.22 cm y 0.407 cm, considerados como aceptables.

Partiendo del hecho que la corrosión y la abrasión pueden afectar la integridad de los gaviones, se recomienda la construcción de zanjas de coronación y la utilización de geotextil como medidas de protección.

Tabla 4. Factor de seguridad y deformación por el método de gaviones.

Perfil	Factor Seguridad-Geo-Slope		Deformación-Plaxis 2D [m]
	Estático	Dinámico	
K13+440	1.836	1.392	1.65E-03
K13+500	1.809	1.378	3.22E-02
K13+560	2.446	1.827	5.85E-03
K13+880	1.822	1.416	4.07E-03
K13+920	1.698	1.288	9.18E-03

4.5.3. Estabilización del Talud con el Método de Muros de Concreto Reforzado

Los muros de concreto reforzado son estructuras que actúa como una masa relativamente concentrada que sirven de elemento contenedor a la masa inestable. Es una de las prácticas más comunes en el mundo [10].

Los análisis realizados con Geo-Slope para este método también presentaron inconvenientes. Al igual que para la estabilización con gaviones, se presentaron problemas hacia el costado del río, aunque en este caso en tres perfiles. No fue suficiente la estabilización con nails, por ende se optó utilizar pantallas ancladas, con las cuales se evidenciaron factores de seguridad confiables. La tabla 5 muestra los valores de factor de seguridad obtenidos con este software.

Se planteó un diseño con una altura de 5 metros, en forma de T invertida y con tacón para todos los muros de concreto reforzado. Los anclajes tuvieron

inclinaciones de 18° y profundidades entre 15 y 17 metros, en los cuales la longitud del bulbo oscilaba entre los 7 y 8 metros. Para el caso de los nails, estas inclinaciones fueron de 45° , con profundidades entre 5 y 8 metros.

En la figura 19 y 20 se puede apreciar el muro de concreto reforzado al lado de la vía, los nails para el talud de la parte superior y el uso de anclajes hacia el costado del rio. En un primer intento se realizó el análisis tan solo con la utilización del muro de concreto reforzado, pero los valores de factor de seguridad suministrados por Geo-Slope no cumplían con los mínimos requeridos y los valores de deformación arrojados por Plaxis 2D eran muy altos. Con base en los resultados anteriores y la información geológica del sitio, se pudo evidenciar la existencia de una superficie de falla para lo cual fue necesaria la utilización de pantallas ancladas y nails.

Figura 19. Visualización de los tres métodos de estabilización utilizados en el perfil K13+440 (nails, muros de concreto reforzado y pantallas ancladas)..

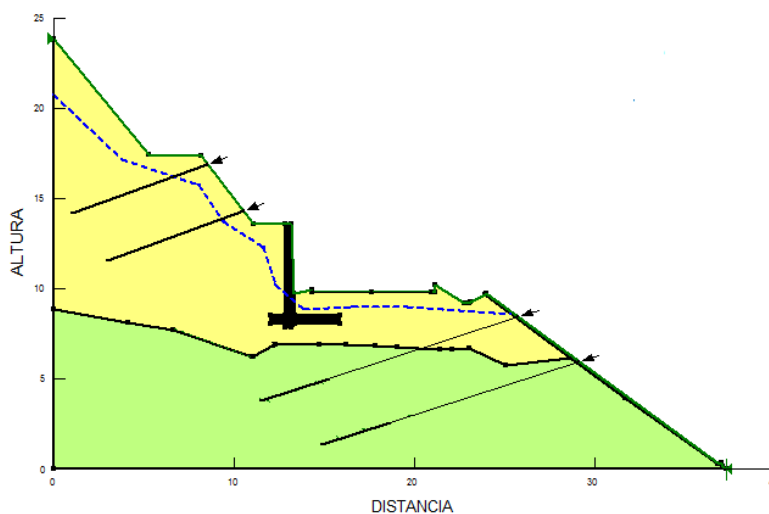
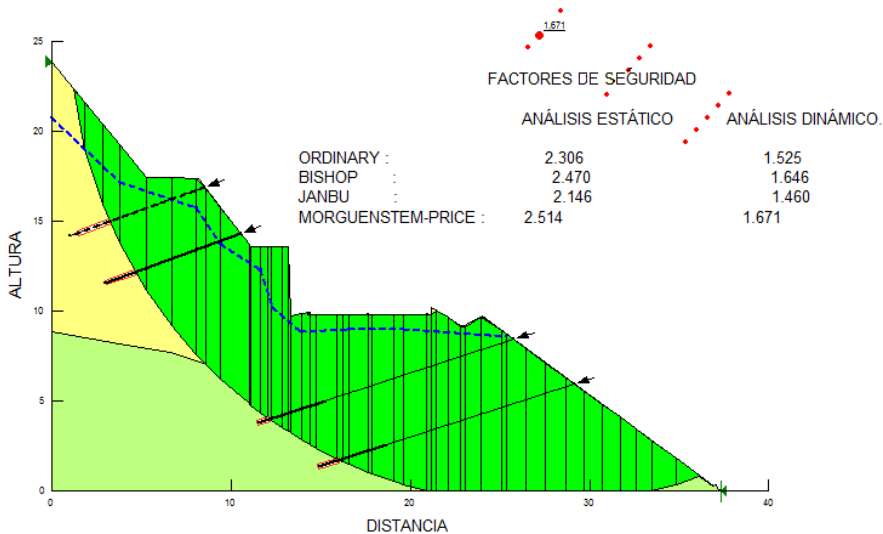


Figura 20. Resultados obtenidos de Geo-Slope (F.S.) para perfil K13+440 por el método de muros de concreto reforzado.



Los resultados obtenidos por Geo-Slope y Plaxis 2D con esta alternativa de estabilización fueron confiables, aunque esto generaba un sobrecosto a la hora de construir. Se propuso una separación de 2 metros para los nails y las pantallas ancladas. En la figura 21 se muestran los valores de deformación obtenidos por el software Plaxis 2D para el perfil representativo, mientras que la tabla 5 presenta los valores obtenidos para los demás perfiles.

Figura 21. Resultados obtenidos de Plaxis para la deformación del perfil K13 +440 por el método de muros de concreto reforzado.

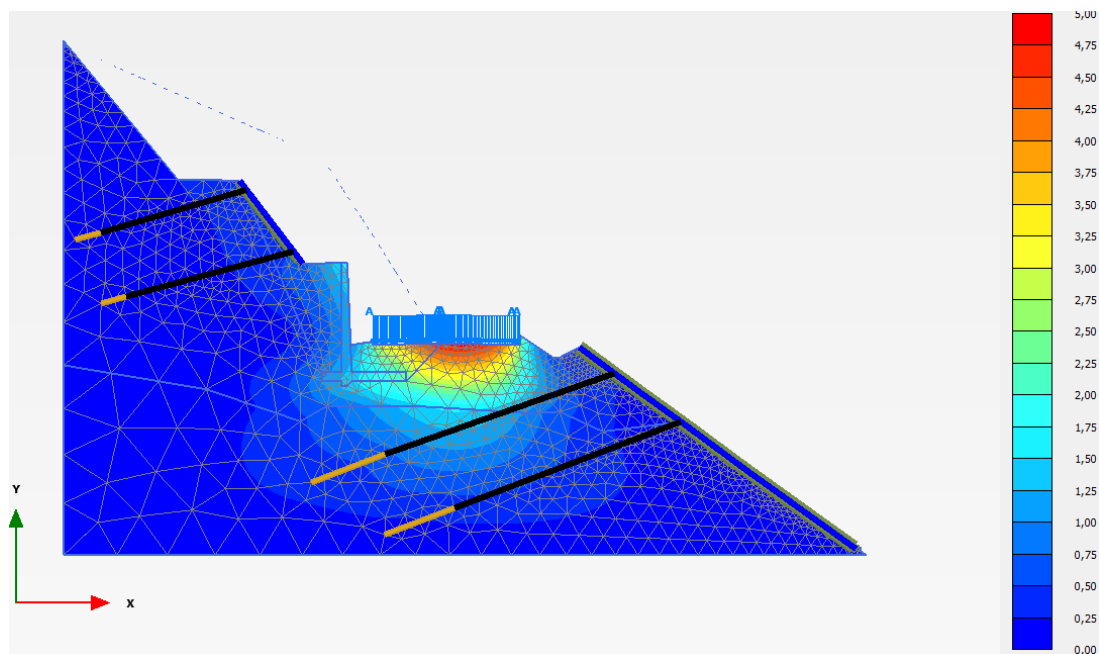


Tabla 5. Factor de seguridad y deformación por el método de muros de concreto reforzado.

Perfil	Factor Seguridad-Geo-Slope		Deformación-Plaxis 2D [m]
	Estático	Dinámico	
K13+440	2.514	1.671	4.87E-03
K13+500	2.771	1.75	5.07E-03
K13+560	2.193	1.599	1.24E-02
K13+880	1.739	1.376	8.53E-03
K13+920	2.361	1.461	8.40E-03

4.5.4. Revit 2014

Como parte final de esta etapa, se realizó el modelamiento del tramo de vía en Revit 2014, teniendo en cuenta la alternativa de mayor beneficio.

En la figura 22 se puede apreciar una muestra del planteamiento realizado para la estabilización y disminución de la vulnerabilidad en la zona de estudio.

Figura 22. Tramo de vía modelado en Revit 2014.



4.6. ETAPA 6: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.6.1. Costos de Ejecución

Inicialmente se realizó el cálculo de cantidades para cada actividad, en función de cada una de las tres alternativas planteadas. Para todas las alternativas se requirió de excavación, por lo tanto, se tomó como ejemplo ilustrativo dicho ítem para el cálculo del presupuesto (tabla 6).

Para hallar la cantidad de material que sería excavado, se tuvo en cuenta la geometría de cada perfil y los planos utilizados en Plaxis 2D. Se calculó el presupuesto para las tres alternativas en cada perfil, teniendo en cuenta solo un metro de la sección transversal.

Tabla 6. Presupuesto de excavación ideal.

EXCAVACIÓN PARA MÉTODO DE ABATIMIENTO DE TALUD POR MEDIO DE CORTE				
Ítem	Un	Cantidad	Costo unitario en pesos	Total en pesos
Excavación mecánica en material común con cargue, transporte y disposición final.	m3	67,25	21.984	1'478.445

En el presupuesto realizado para el método de abatimiento del talud por medio de corte la única actividad fue el movimiento de tierra; la cual cuenta con los siguientes ítems:

- Excavación mecánica en material común con cargue, transporte interno, transporte externo y disposición final.
- Excavación mecánica en material común - Material para relleno.
- Relleno de excavación compactado.

Se resalta que este fue el método en el cual se requería un presupuesto más bajo. En la tabla 7 se muestra el presupuesto de referencia del perfil K13 +440.

Tabla 7. Presupuesto método de abatimiento del talud por medio de corte.

MÉTODO DE ABATIMIENTO DEL TALUD POR MEDIO DE CORTE		
	Descripción	Sub-valor en pesos
1	Movimiento de tierra	1'539.899
VALOR TOTAL en pesos		1'539.899

Para el método de gaviones, el presupuesto presentó las siguientes especificaciones con sus respectivos ítems:

Movimiento de tierra:

- Excavación mecánica en material común con cargue, transporte interno, transporte externo y disposición final.

- Excavación mecánica en material común - Material para relleno.
- Relleno de excavación compactado.

Estructuras de contención:

- Nails (Torón de 7 metros).
- Gaviones.
- Geotextil geoNT-2000 (suministro + instalación).

Estructuras de concreto:

- Concreto para solados.

Para el perfil representativo, la opción de gaviones fue la más costosa, tal como se puede apreciar en la tabla 8.

Tabla 8. Presupuesto método de gaviones.

MÉTODO DE GAVIONES		
	Descripción	Sub-valor en pesos
1	Movimiento de tierra	1'809.508
2	Estructuras de contención	4'480.828
3	Estructuras de concreto	66.523
VALOR TOTAL en pesos		6'356.860

Para el método de muros de concreto reforzado, el presupuesto presentó las siguientes especificaciones con sus respectivos ítems:

Movimiento de tierra:

- Excavación mecánica en material común con cargue, transporte interno, transporte externo y disposición final.
- Excavación mecánica en material común - Material para relleno.
- Relleno de excavación compactado.

Estructuras de contención:

- Pantalla de contención y anclaje (Torón de 15 metros).
- Nails (Torón de 7 metros).

Estructuras de concreto:

- Muro de concreto reforzado.

En la tabla 9 se muestra el presupuesto de referencia del perfil K13 + 440, utilizando el método de muros de concreto.

Tabla 9. Presupuesto método de muros de concreto reforzado.

MÉTODO DE MUROS		
	Descripción	Sub-valor en pesos
1	Movimiento de tierra	956.242
2	Estructuras de contención	1'813.825
3	Estructuras de concreto	1'661.841
VALOR TOTAL en pesos		4'431.908

El presupuesto de cada una de las tres alternativas se presenta en la tabla 10.

Tabla 10. Presupuesto de cada perfil por los tres métodos de estudio.

PERFIL	CORTE	GAVIONES	MUROS
K13+440	\$ 1'539.899	\$ 6'3560.860	\$ 4'431.908
K13+500	\$ 1'539.988	\$ 4'577.543	\$ 3'377.106
K13+560	\$ 480.401	\$ 3'010.767	\$ 2'616.338
K13+880	\$ 677.933	\$ 2'761.130	\$ 2'617.252
K13+920	\$ 513.581	\$ 2'761.130	\$ 3'938.732

4.6.2. Análisis Comparativo Entre Costo-Beneficio

La realización de este análisis comparativo se hizo con el fin de seleccionar una de las tres alternativas de estabilización para cada uno de los perfiles de estudio. El beneficio se midió en función de los valores de factor de seguridad, tanto para el estado dinámico como para el estático y la deformación.

La comparación se realizó entre el costo de ejecución y el beneficio de cada alternativa. El costo de cada alternativa se dividió entre los valores de factor de seguridad (estático y dinámico) y deformación, seleccionando el menor valor para el primer caso (Tablas 11 y 12) y el mayor para el segundo caso (Tabla 13).

Tabla 11. Resultados de comparación Costo-Factor de Seguridad Estático.

Costo - F. S. Estático			
Perfil	Corte	Gaviones	Muros
K13+440	\$ 683.792	\$ 3'462.342	\$ 1'762.891
K13+500	\$ 922.149	\$ 2'530.427	\$ 1'218.732
K13+560	\$ 65.682	\$ 1'230.894	\$ 465.375
K13+880	\$ 260.443	\$ 1'515.439	\$ 1'505.033
K13+920	\$ 311.261	\$ 1'626.107	\$ 1'668.248

Tabla 12. Resultados de comparación Costo-Factor de Seguridad Dinámico.

Costo - F. S. Dinámico			
Perfil	Corte	Gaviones	Muros
K13+440	\$ 1'128.958	\$ 4'566.709	\$ 2'652.249
K13+500	\$ 1'215.460	\$ 3'321.874	\$ 1'929.775
K13+560	\$ 134.303	\$ 1'647.929	\$ 864.334
K13+880	\$ 547.161	\$ 1'949.951	\$ 1'902.073
K13+920	\$ 410.536	\$ 2'143.735	\$ 2'695.915

Tabla 13. Resultados de comparación Costo-Deformación.

Costo - Deformación			
Perfil	Corte	Gaviones	Muros
K13+440	\$ 304'147.536	\$ 3.847'977.948	\$ 909'295.891
K13+500	\$ 293'946.965	\$ 142'159.720	\$ 665'570.698
K13+560	\$ 95'053.698	\$ 514'309.288	\$ 210'485.773
K13+880	\$ 166'568.210	\$ 679'244.787	\$ 306'685.307
K13+920	\$ 55'498.258	\$ 300'809.463	\$ 469'120.101

A pesar que el método de abatimiento del talud por medio de corte es atractivo en términos de factor de seguridad, los resultados del análisis de costo-deformación fueron variables (gaviones para perfiles 1, 3 y 4, muros de concreto reforzado para perfiles 2 y 5).

Tabla 14. Selección de método de estabilización a diseñar.

Nº	Perfil	Costo_ F.S. Estático	Costo_ F.S. Dinámico	Costo_ Deformación	Selección
1	K13+440	Corte	Corte	Gaviones	Corte
2	K13+500	Corte	Corte	Muros	Corte
3	K13+560	Corte	Corte	Gaviones	Gaviones
4	K13+880	Corte	Corte	Gaviones	Gaviones
5	K13+920	Corte	Corte	Muros	Gaviones

Para los primero dos perfiles se adoptó la alternativa de corte (tabla 14) solo en función de los resultados de factor de seguridad, ya que los valores de deformación para las alternativas de gaviones y muros están influenciados por obras de estabilización complementarias (nails y pantallas ancladas). En el caso de los perfiles 3 y 4, la alternativa seleccionada estuvo condicionada por los resultados del análisis costo – deformación. A pesar que para el perfil 5 las posibles alternativas de solución eran de corte o muros, se optó por utilizar los gaviones a fin de mantener una continuidad con el perfil precedente.

4.6.3. Ventajas y Desventajas de las Alternativas Planteadas.

Método	Ventajas	Desventajas
Abatimiento de Talud: corte o relleno	<ul style="list-style-type: none"> -No se necesitó de ayuda de otros métodos de estabilización. -Menor requerimiento de maquinaria pesada. -El costo de ejecución es relativamente bajo. -Efectivo especialmente en suelos friccionantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Valores de deformación más altos. - En rellenos puede presentar problemas cuando se colocan en suelos blandos o de baja resistencia. -No es factible económicamente en taludes de gran altura.
Gaviones	<ul style="list-style-type: none"> -Su ejecución es sencilla y económica. -Fácil alivio de presiones de agua. -Soportan movimientos sin pérdida de eficiencia. 	<ul style="list-style-type: none"> -Valores de Factor de seguridad entre los menores. -Necesidad de otro método de estabilización y debido a esto altos costo de ejecución. -Las mallas de acero galvanizado se corroen fácilmente en ambientes ácidos. -Al amarre de la malla y las unidades generalmente no se le hace un buen control de calidad.
Muros de concreto reforzado	<ul style="list-style-type: none"> -Se pueden emplear en alturas grandes (superiores a diez metros), luego de un diseño 	<ul style="list-style-type: none"> -Necesidad de otro método de estabilización y debido a esto altos costo de ejecución. -Requieren de un buen soporte en la

	estructural y un análisis de estabilidad.	cimentación. -Son antieconómicos en alturas muy grandes y requieren de formaletas especiales.
--	---	--

5. DISCUSIÓN

La solución para problemas de estabilidad geotécnica requiere de un análisis conceptual y determinístico, además de un diseño detallado de la remediación. La estabilización de los deslizamientos en actividad o potencialmente inestables, es un trabajo relativamente complejo que requiere de procedimientos especializados de diseño y construcción.

Según los resultados obtenidos en este estudio, el método más económico a la hora de realizar estabilización a taludes de menor altura es el de abatimiento del talud por medio de corte y/o relleno.

Si el costo de ejecución de una obra no fuera un factor importante a la hora de la escogencia de este, se puede decir que uno de los métodos más factibles sería la implementación de muros de concreto reforzado y llegado el caso un sobre-refuerzo con pantallas ancladas, para así garantizar valores de deformación muy pequeños, con lo cual se puede inferir que la vida útil de esta estructura no sería afectada.

6. CONCLUSIONES

La prevención comprende el manejo de la vulnerabilidad, evitando que se presenten amenazas o riesgos a deslizamientos, caída de rocas y otros problemas de estabilización. A continuación se compilan las recomendaciones, sugerencias y conclusiones que se presentaron en el presente estudio.

- Para el caso de estudio; vía Charalá – Coromoro, según los resultados obtenidos con los softwares el método de estabilización conveniente es el de estructuras de contención tipo gaviones. Algunos beneficios que este método tiene son: los gaviones pueden deformarse fácilmente al ser sometidos a presiones; debido a que su superficie es bastante rugosa, el suelo de la fundación penetra en los espacios de las piedras aunque en suelos duros no existe esa condición; soportan movimientos sin pérdida de eficiencia; entre otros. A nivel nacional, este método de estabilización es muy utilizado en las vías rurales, en gran parte porque su construcción es fácil, los materiales con los cuales se arman los gaviones son viables puesto que se puede tomar del material del sitio con lo cual se reducen costos y hace que este método de estabilización sea vistoso por la parte económica.
- Cuando lo que se quiere es un método de estabilización que cumpla con los factores de seguridad establecidos en la Norma NSR-10, título H y que sea económico, la opción más factible es la de abatimiento del talud por medio de corte y/o relleno. Este es un método que en taludes de menor altura se considera uno de los más económicos y es muy utilizado en suelos friccionante.

- Aunque no es económicamente factible la utilización de pantallas ancladas o pernos anclados en vías rurales, este es un método con el cual se obtienen resultados favorables para taludes de gran altura, con materiales fracturados o sueltos.
- Teniendo en cuenta los resultados de comparación de costo de ejecución y factor de seguridad, la unidad de factor de seguridad más costosa es la de gaviones, esto puede ser debido a que para lograr alcanzar los valores mínimos de factor de seguridad (1.2 F.S. dinámico y 1.6 F.S. estático) fue necesario la utilización de un número grande de gaviones. El caso de mayor número de estos fue de 21 gaviones, con los cuales se obtuvieron valores de factor de seguridad de 1.836 para F.S. estático y 1.392 para F.S. dinámico. El valor aproximado de unidad de factor de seguridad en ese punto (K13+440) del tramo de vía esta entre tres millones y cuatro millones, esto debido a la cantidad de gaviones que fue necesario colocar y sumado a esto que los gaviones no fueron suficientes y se tomó la decisión de ayudar en la estabilización de este punto con pernos o nails anclados, lo cual generaba un incremento en el costo de ejecución.
- Al realizar los cálculos para la obtención de los valores de la relación costo-beneficio se puede deducir que los factores seguridad para cada una de las tres alternativas propuestas de remediación y/o estabilización (muros de concreto reforzado, gaviones y abatimiento del talud mediante corte y/o relleno) son variables respecto a su costo de ejecución; de tal manera se puede afirmar que los valores de factor de seguridad no son directamente ni inversamente proporcional a su costo de ejecución, sino que dependen de las condiciones en que se encuentra el terreno a estabilizar. No siempre la opción más costosa será la más segura.

- Teniendo en cuenta los valores de deformación y el costo de ejecución de los métodos de estabilización y/o remediación que se tomaron en cuenta en este estudio, los muros de concreto reforzado y gaviones podrían adoptarse como los métodos apropiados para este tipo de suelo (suelo aluvial).

CITAS

- [1] H. B. Brabb E.E., Landslides: Extent and economic significance: Proc., 28th International Geological Congress: Symposium on landslides, A.A., Rotterdam, Netherlands: Balkema, 1989, p. 385.
- [2] Ing. Jaime Suárez Díaz, «Deslizamientos. Tomo I: Análisis geotécnico,» [En línea]. [Citado: 17 Marzo 2015]. Available: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>.
- [3] Donald Francisco Membreño Alarcón, «Análisis de estabilidad de taludes por el método de elementos finitos: aplicación al terraplén de entrada viaducto de más Rubio,» 03 Octubre 2012.
- [4] Autodesk, «Manual del usuario de Autodesk,» [En línea]. [Citado: 20 Marzo 2015]. Available: http://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_aca_user_guide_spanish.pdf.
- [5] Rosales Garzón, Sergio Esteban., Desarrollo de una Herramienta Para Diseño de Falsos Túneles como Protección Contra Impacto de Caída de Rocas Usando Redes Neuronales Artificiales [Tesis de maestría], Bogotá, Colombia, 2012.
- [6] Ronald Gustavo Ramirez Contreras, Yovanny Salcedo Barreto., «Comparación de los métodos de esfuerzo-deformación y equilibrio límite en la modelación de estabilidad de taludes utilizando los software Plaxis y Slope/w,» [En línea]. [Citado: 23 Marzo 2015]. Available: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1733/2/119412.pdf>.

- [7] R.B.J. Brinkgreve, S. Kumarswamy, W.M. Swolfs, «PLAXIS 2D - Taludes y laderas,» [En línea]. [Citado: 07 Abril 2015]. Available: <http://www.plaxis.nl/files/files/2D-0-Gen-Info.pdf>.
- [8] «Manual Geo-Studio. Productos-SLOPE/W,» [En línea]. Available: <http://www.geo-slope.com/products/slopew.aspx>. [Citado: 07 Abril 2015].
- [9] Tatiana Santos, «Estudio de Factibilidad de un Proyecto de Inversión: Etapas en su Estudio. Contribuciones a la Economía».
- [10] Suarez Díaz, Jaime, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Universidad Industrial de Santander, 2005.
- [11] Varnes D.J., Slope movement types and processes in R.L. Shuts y R.J. Crises (eds) Landslide: analysis and control Transportation Research Board Special report, pp. 11-33.
- [12] ONU/EIRD, Vivir con el riesgo: Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, 2004.
- [13] Cruden, D. M., A simple Definition of a Landslide Bulletin of the International Association of Engineering Geology, vol. 43, 1991, pp. 27-29.
- [14] Álvaro F. De Matteis., «Geología y geotecnia: estabilidad de taludes,» Agosto 2003. [En línea]. [Citado: 15 Abril 2015]. Available: <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>.
- [15] NSR 10 TITULO H, Titulo H estudios Geotécnicos H.2.4 Factores de seguridad, pp. H-5.
- [16] Jaime Suárez Díaz, «Seminario estructuras de contención,» [En línea].

- [Citado: 16 Abril 2015]. Available: http://ocw.uis.edu.co/ingenieria-civil/estabilidad-de-taludes/clase10/muros_anclados.pdf.
- [17] Reynaldo Alexander Coronel, Raul Fernando Tavera Calderon, «Lecciones aprendidas en la estabilización de taludes con pantallas ancladas,» [En línea]. [Citado: 16 Abril 2015]. Available: http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/1237/1/digital_19981.pdf.
- [18] Diana Carolina Oquendo, Astrid Alieta Quintero, «Elaboración de un manual con ejercicios para la estabilización de taludes utilizando estructuras de contención,» 2008. [En línea]. [Citado: 16 Abril 2015]. Available: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1937/2/128832.pdf>.
- [19] «Manual de Diseño Geométrico de carreteras,» [En línea]. [Citado: 27 Marzo 2015]. Available: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~carboled/Libros/Manual%20de%20Diseno%20Geometrico%20de%20Carreteras.pdf>.
- [20] J. Navarro, «Estabilidad de Taludes,» [En línea]. [Citado: 10 Abril 2015]. Available: <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/estabilidad-de-taludes.pdf>.

BIBLIOGRAFIA

CORONEL, Reynaldo Alexander y TAVERA CALDERON Raul Fernando, «Lecciones aprendidas en la estabilización de taludes con pantallas ancladas,» [En línea]. [Citado: 16 Abril 2015]. Available: http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/1237/1/digital_19981.pdf.

H. B. Brabb E.E., Landslides: Extent and economic significance: Proc., 28th International Geological Congress: Symposium on landslides, A.A., Rotterdam, Netherlands: Balkema, 1989, p. 385.

«Manual de Diseño Geométrico de carreteras,» [En línea].[Citado: 27 Marzo 2015]. Available:<http://artemisa.unicauca.edu.co/~carboled/Libros/Manual%20de%20Dise%20no%20Geometrico%20de%20Carreteras.pdf>.

OQUENDO, Diana Carolina Y QUINTERO, Astrid Alieta, «Elaboración de un manual con ejercicios para la estabilización de taludes utilizando estructuras de contención,» 2008. [En línea]. [Citado: 16 Abril 2015]. Available:<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1937/2/128832.pdf>

SUAREZ DÍAZ, Jaime, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander Bucaramanga Colombia. Publicaciones UIS. Ingeniería de suelos Ltda, junio de 1998, p.123.