

**Propuesta de obras de mitigación por medio del análisis geológico y geotécnico del talud
ubicado en el municipio de California en el sector “El Casino” en el departamento de
Santander**

Javier Ricardo Martínez Galvis

Proyecto de grado para optar al título de Maestría en Geotecnia

Director

. Hebenly Celis Leguízamo.

MSc. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Geotecnia

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A Dios primeramente la gratitud, que ante la adversidad siempre nos dice “*¿No te he mandado que te esfuerces y seas valiente? No temas ni desmayes, porque el SEÑOR tu Dios estará contigo dondequiera que vayas*” Josué 1:9.

A mi familia y especialmente a mis padres, por contribuir en todos los aspectos a formar la persona que he sido, que soy y que seré.

A mis amigos por su acompañamiento constante en cualquier tipo de situación, brindándome siempre lo mejor de cada uno.

A mi deporte, del cual estaré eternamente agradecido por todas sus enseñanzas, lugares, amigos, etc., que me ha dejado durante la vida.

Y por último, a mi querida universidad UIS, de la cual me siento muy orgulloso y en la cual he podido disfrutar de mis logros profesionales.

Javier Ricardo Martinez Galvis.

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo general.....	16
1.2 Objetivos específicos	16
2. Localización.....	17
3. Justificación	19
4. Planteamiento del problema.....	20
5. Metodología	23
6. Marco Conceptual	24
7. Marco Geológico	28
8. Reconocimiento de campo.....	39
9. Hidrogeología	41
10. Investigaciones geotécnicas realizadas	51
11. Cálculo de factores de seguridad del talud	57
12. Modelo Geotécnico	59
13. Análisis de equilibrio límite.....	61
14. Análisis por elementos finitos.....	74
15. Discusión.....	82

16. Fase Constructiva.....	84
17. Presupuesto Preliminar	85
18. Conclusiones.....	86
Referencias Bibliográficas	88
Apéndices.....	90

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Localización zona de estudio.....	17
Figura 2. Vista general del sector El Casino	18
Figura 3. Panorámica del talud	18
Figura 4. Afloramiento del Sitio Inestable.....	20
Figura 5. Evidencia del macizo rocoso meteorizado	21
Figura 6. Caídas de bloques.	22
Figura 7. Aspectos generales de la afectación del talud.	23
Figura 8. Evolución tectónica de la cordillera oriental, Valle medio del Magdalena y la Cuenca de los Llanos.	30
Figura 9. Esquema tectónico de Santander	31
Figura 10. Geología regional.	37
Figura 11. Geología local.....	38
Figura 12. Perfil geológico de la zona de estudio.....	39
Figura 13. Vista general del talud.	40
Figura 14. Deslizamientos en zonas aledañas.....	41
Figura 15. Cuencas hidrográficas de la zona.	42
Figura 16. Ubicación de la estación meteorológica 23190450 ESTACIÓN VETAS-EL POZO.	43
Figura 17. Comportamiento de las lluvias en el sector.....	44

Figura 18. Curvas IDF de la estación Vetás – El Pozo.....	45
Figura 19. Cobertura del suelo en la cuenca 1 que llega a la alcantarilla por un costado del sector erosionado.	46
Figura 20. Cobertura del suelo en la cuenca 2 que llega al sector erosionado.	47
Figura 21. Hietograma de diseño.	50
Figura 22. Perfil obtenido por medio de ondas compresionales.	57
Figura 23. Perfil del modelo geotécnico.	60
Figura 24. Calculo del F.S estático en condiciones naturales.	62
Figura 25. Calculo del F.S pseudoestático en condiciones naturales.	63
Figura 26. Bosquejo de un Anclaje.....	65
Figura 27. Calculo F.S estático con alternativa 1.	67
Figura 28. Calculo F.S pseudoestático con alternativa 1.	68
Figura 29. Dimensionamiento de los anclajes activos.	69
Figura 30. Calculo del F.S estático con alternativa 2.	71
Figura 31. Calculo del F.S pseudoestático con alternativa 2.	72
Figura 32. Dimensionamiento de los anclajes pasivos.	73
Figura 33. Deformación de la malla en el talud natural.....	76
Figura 34. Desplazamientos generados en el talud natural.....	77
Figura 35. Calculo de F.S estático en el talud natural utilizando PLAXIS V8.5.....	77
Figura 36. Deformación de la malla en la alternativa 1.....	78
Figura 37. Desplazamientos generados en la alternativa 1.	79
Figura 38. Calculo de F.S estático en la alternativa 1, utilizando PLAXIS V8.5.....	79
Figura 39. Deformación de la malla en la alternativa 2.....	80

Figura 40. Desplazamientos generados en la alternativa 2.	81
Figura 41. Calculo de F.S estático en la alternativa 2, utilizando PLAXIS V8.5.	81
Figura 42. Detalle de canales para manejo y control de escorrentías de aguas lluvias.....	84
Figura 43. Planos de las obras de mitigación.....	84
Figura 44. Esquema de obras de mitigación el casino fase 2.....	85

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Periodos de retorno o grado de protección.	48
Tabla 2. Periodos de retorno de diseño en obras de drenaje vial.	49
Tabla 3. Calculo del hietograma de diseño por el método de bloque alterno.	50
Tabla 4. Caudales obtenidos para cada cuenca.	51
Tabla 5. Resumen sondeos de SPT.	52
Tabla 6. Correlaciones SPT suelos granulares.	53
Tabla 7. Correlaciones SPT suelos arcillosos.	53
Tabla 8. Resumen clasificación de suelos.	54
Tabla 9. Resumen cortes directos.	54
Tabla 10. Perfil geotécnico sondeo 1.	55
Tabla 11. Perfil geotécnico sondeo 2.	55
Tabla 12. Resumen parámetros geotécnicos.	61
Tabla 13. Factores de seguridad mínimos.	64
Tabla 14. Capacidad de adherencia del terreno.	66
Tabla 15. Resumen datos anclajes.	67
Tabla 16. Característica de la cobertura vegetal.	70
Tabla 17. Características anclajes pasivos.	70
Tabla 18. F.S condición estática.	73

Tabla 19. F.S condición pseudoestática.	74
Tabla 20. Resumen datos de los materiales MASW.....	75
Tabla 21. Resumen factor de seguridad en las alternativas.	82
Tabla 22. Comparación de las alternativas.	82
Tabla 23. Presupuesto preliminar	86

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Glosario.....	90
Apéndice B Estructuras de manejo de aguas.	98
Apéndice C Ensayos de corte directo tomados de estudios preliminares en el sector, suministrados por INGEOEXPLORACIONES.....	100

Resumen

Título: Propuesta de obras de mitigación por medio del análisis geológico y geotécnico del talud ubicado en el municipio de California en el sector “El Casino” en el departamento de Santander*.

Autor: Javier Ricardo Martínez Galvis **

Palabras Claves: Obras de mitigación, geología, geotecnia, talud, California-Santander.

Contenido:

Este proyecto está basado en el estudio del talud localizado en el sector “el casino”, del municipio de California en el departamento de Santander, el cual es producto de las excavaciones para las vías terciarias presentes en el lugar, aplicando los conocimientos geológicos, ingenieriles y geotécnicos adquiridos durante la maestría en Geotecnia.

Se analizó la estabilidad del talud debido a que se observaron problemas de caídas de rocas, erosión superficial y algunos deslizamientos, el cual se ve afectado principalmente en las épocas de temporadas de lluvias, asociado a la falta de manejo de aguas de escorrentías, utilizando los modelos de equilibrio límite y de elementos finitos.

Para lo cual se propusieron obras de mitigación, enfocadas al control de aguas lluvias por medio de obras hidráulicas, y al reforzamiento de las posibles superficies de falla con obras geotécnicas, las cuales debían cumplir con los factores de seguridad mínimos establecidos por la NSR-10, ya que este se encuentra sobre una vía de acceso importante, la cual presenta zonas de alta complejidad estructural, ocasionando mayor meteorización en las rocas aflorantes y junto con las altas precipitaciones, generan inestabilidad geológica.

Esto nos permite contribuir al conocimiento de la región para mejorar la transitabilidad, debido a su influencia directa con el desarrollo socioeconómico del departamento.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Geotecnia. Director: Hebenly Celis Leguizamó.

Abstract

Title: Proposal of mitigation works through the geological and geotechnical analysis of the slope located in the municipality of California in the sector "El Casino" in the department of Santander*.

Author: Javier Ricardo Martinez Galvis**

Keywords: mitigation, geology, geotechnical, Slope, California-Santander works.

Content:

This project is based on the study of the slope located in the sector "the casino", of the municipality of California in the department of Santander, which is product of the excavations for the tertiary roads present in the place, applying the geological, engineering knowledge and geotechnical acquired during the master's degree in Geotechnics.

The stability of the slope was analyzed due to the fact that problems of rock falls, surface erosion and some landslides were observed, which is affected mainly in the seasons of rainy season, associated with the lack of runoff water management, using the Limit equilibrium and finite element models.

To this end, mitigation works were proposed, focused on the control of rainwater by means of hydraulic works, and the reinforcement of the possible fault surfaces with geotechnical works, which had to comply with the minimum safety factors established by the NSR-10. , since this is on an important access road, which presents areas of high structural complexity, causing greater weathering in the outcropping rocks and together with high rainfall, generate geological instability.

This allows us to contribute to the knowledge of the region to improve the passability, due to its direct influence with the socio-economic development of the department.

* Project of grade

** Facultad de Ingenierias Fisicomecanicas. Escuela de Ingenieria Civil. Maestria en Geotecnica. Director: Hebenly Celis Leguízamo.

Introducción

Gran parte de la economía del municipio de California, en el departamento de Santander, está controlada por las actividades económicas que existen alrededor de este lugar, por lo tanto se requiere que haya condiciones aptas para la transitabilidad de personas, vehículos, cargas, etc., sobre las vías existentes, para que esta no se vea afectada por retrocesos operativos.

Los taludes formados producto de las excavaciones para las vías terciarias presentes en el lugar, se observan en su mayoría problemas de caídas de rocas, erosión superficial y algunos deslizamientos, principalmente en las épocas de temporadas de lluvias debido a la falta de manejo de las aguas de escorrentías que llegan a estos, poca vegetación, altas pendientes, etc., lo que dificulta el paso por estos sectores.

Para este caso en particular se trabajó en la estabilidad del talud ubicado en el sector el Casino por medio de los conocimientos geológicos, ingenieriles y geotécnicos adquiridos durante la maestría en Geotecnia.

Se analizó el talud en condiciones naturales, teniendo en cuenta la geometría de este, parámetros geológicos, condiciones hidrogeológicas y sísmicas en la región, propiedades de resistencia, elasticidad, deformabilidad y pesos unitarios de los materiales presentes en la zona, obtenidos por medio de estudios de campo; geológicos, topográficos y geotécnicos.

Posteriormente se generó un diagnóstico de los problemas geotécnicos presentes en el talud y sus respectivas recomendaciones para las obras de estabilización requeridas, para garantizar la seguridad y funcionalidad de estos, así mismo para la vía de acceso al sector el Casino.

Utilizamos el análisis de equilibrio límite, comparando las fuerzas y/o momentos resistentes y actuantes sobre una determinada superficie de falla, y de elementos finitos utilizando la teoría de Mohr-Coulomb.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Plantear obras de mitigación para el talud ubicado en la vía de acceso al sector el Casino en el municipio de California, en el departamento de Santander.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluación de las condiciones geológicas a la que está expuesta la zona de trabajo, para definir las unidades geológicas superficiales y unidades litoestratigraficas aflorantes en el sector de estudio.
- Plantear un modelo geotécnico a partir de los parámetros de resistencia de los materiales, obtenidos por medio de ensayos de campo directos.
- Identificar los diferentes mecanismos de activación presentes en la zona y su influencia en la estabilidad del talud.

- Realizar el análisis de estabilidad del talud por medio de métodos de equilibrio límite y elementos finitos.
- Proponer soluciones adecuadas para el problema establecido en términos de seguridad y economía.

2. Localización

La zona de estudio se encuentra ubicada al nororiente del departamento de Santander, en el municipio de California como se observa en la figura 1.



Figura 1. Localización zona de estudio.

Nota. Tomado de AWikipedia Enciclopedia Libre (s.f.) California Santander Recuperado de:
[https://es.wikipedia.org/wiki/California_\(Santander\)](https://es.wikipedia.org/wiki/California_(Santander)).

El talud pertenece a un tramo de la vía de tercer orden a nivel nacional, debido a que comunica veredas localizadas en el sector el Casino.



Figura 2. Vista general del sector El Casino

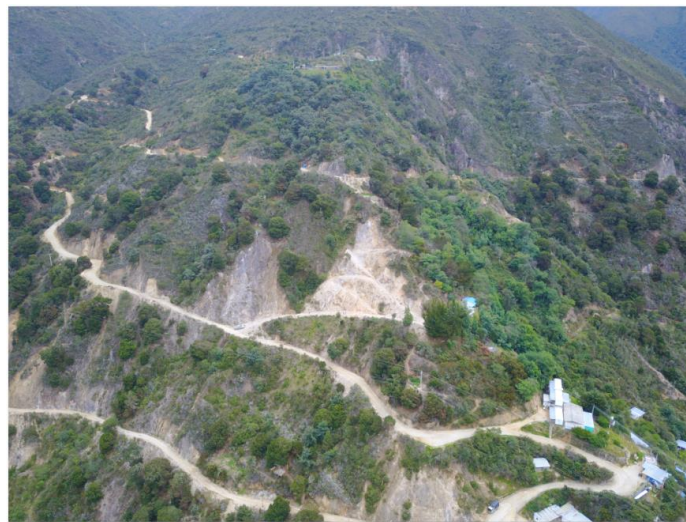


Figura 3. Panorámica del talud

En la figura 3, se observa que sobre este sector influyen varias vías importantes de tercer orden para el municipio de California.

En la parte superior de talud, se localiza la vía que comunica al sector las Picotas y en la parte inferior, la vía que conduce al sector del Casino y la Perezosa, y estas dos a su vez comunican con el casco urbano del municipio de California.

3. Justificación

Para la economía del país es de vital importancia mantener en buen estado de transitabilidad y seguridad vial a las carreteras Nacionales, con el fin de ofrecer mejores condiciones y una mejor conectividad para realizar una fácil comercialización de los productos y generar una mejor calidad de vida de la población afectada, con facilidad para el transporte y menores tiempos de viaje.

Debido a esto se requiere realizar intervención en los taludes que se encuentran en el municipio de California en el departamento de Santander, los cuales se ven afectados principalmente en las épocas de altas precipitaciones afectando directamente aspectos socioeconómicos importantes para la región.

Por lo tanto este trabajo se enfocó en la zona que corresponde al talud generado por efecto de las excavaciones para la vía de acceso al sector el Casino, el cual en general, predominan rocas fracturadas y muy meteorizadas que generan bloques de diversos tamaños y se presentan susceptibles de caídas durante fuertes precipitaciones, las escorrentías de aguas lluvias drenan sin control por la superficie del talud, algunas se infiltran en las grietas y diaclasas generando empujes hidrostáticos que propician la caída de rocas, y deslizamientos principalmente en temporadas de

lluvias, dificultando el paso por la vía que comunica al casco urbano del municipio de California con los sectores del Casino y la Perezosa.

Por consiguiente en este lugar se requiere hacer un diagnóstico para evaluar las condiciones de estabilidad a las que está expuesto el talud, por medio de los conocimientos geológicos y geotécnicos, para posteriormente recomendar las posibles alternativas para las obras de mitigación que permitan dar una buena funcionalidad a esta vía.

4. Planteamiento del problema.

Inestabilidad de la vía de acceso al sector “el Casino” en el municipio de California- Santander, debido a los fenómenos de deslizamiento, erosión superficial y caídas de bloques de rocas.



Figura 4. Afloramiento del Sitio Inestable

En general, en el talud predominan rocas fracturadas muy meteorizadas que generan bloques de diversos tamaños y se presentan susceptibles de caída, durante fuertes precipitaciones, las escorrentías de aguas lluvias drenan sin control por la superficie del talud, algunas se infiltran en las grietas y diaclasas generando empujes hidrostáticos que propician la caída de rocas.



Figura 5. Evidencia del macizo rocoso meteorizado

La presencia de fallas geológicas cercanas favorece la meteorización del macizo rocoso, generando así suelos residuales como se muestra en la (figura 5), y junto con la pendiente alta del terreno se facilita la ocurrencia de deslizamientos.



Figura 6. Caídas de bloques.

Al oriente del área estudiada se observa una descarga directa sobre el talud de las aguas de escorrentía superficial de la vía que conduce a las Picotas, el movimiento es relativamente lento.

La pluviosidad de la zona es mediana a alta, la cual es suficiente para permitir la saturación de la masa inestable. Los movimientos ocurren principalmente en temporada de lluvias y disminuyen en las temporadas secas.



Figura 7. Aspectos generales de la afectación del talud.

5. Metodología

- **Recopilación de información.**

Se tomó bibliografía existente del servicio geológico colombiano, información suministrada por el contratista y estudios realizados anteriormente en la zona de trabajo, para correlacionar con las descripciones que se realicen en campo sobre la geología presente en el sector.

- **Análisis de la información existente**

Se realizó con la finalidad de tener claridad completa sobre las características geológicas, geotécnicas e hidrológicas antes de las visitas al sitio de estudio.

- **Visitas de campo**

Se realizaron recorridos en las áreas afectadas con la finalidad de obtener un diagnóstico general y tomar las correspondientes fotografías.

- **Diagnóstico definitivo**

Se realizó un diagnóstico definitivo teniendo en cuenta los factores geológicos, geomorfológicos, topográficos e hidrológicos presentes en la zona de estudio. También se tuvo en cuenta las causas y los mecanismos de ocurrencia de los problemas identificados.

El análisis de estabilidad del talud fue generado través del programa SLIDE V6.0 del Rocscience de la Universidad de Toronto (Canadá), utilizando análisis bidimensional, y el análisis por medio de elementos finitos utilizado el programa PLAXIS V8.5.

- **Planteamiento de las obras**

Se plantearon diferentes alternativas para mitigar los problemas geotécnicos, dentro de los se encuentran estructuras de contención y retención, sistemas de drenaje y otros tipos de obras geotécnicas.

Una vez analizadas las alternativas, se escogió la que más se adapta tanto económicamente como constructivamente para la estabilidad del talud.

- **Elaboración del informe final**

En este documento se recopila toda la información recolectada para el planteamiento de las obras de mitigación, como geología, parámetros geotécnicos, hidrogeológicos y junto a estos las alternativas propuestas cumpliendo la normativa colombiana.

6. Marco Conceptual

En la ingeniería geotécnica se define principalmente la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener

en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Los factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc., La naturaleza del material que forma un talud está íntimamente relacionada con el tipo de inestabilidad que este puede sufrir, presentando las diferentes litologías distinto grado de susceptibilidad potencial ante la ocurrencia de deslizamientos o roturas. (Vallejo, 2002.).

Aspectos como la alternancia de materiales de diferente litología, competencia y grado de alteración, o la presencia de capas de material blando o de estratos duros, controlan los tipos y la disposición de las superficies de rotura. En los suelos, que generalmente se pueden considerar homogéneos en comparación con los materiales rocosos, las diferencias en el grado de compactación, cementación o granulometría predisponen zonas de debilidad y de circulación de agua, que pueden generar inestabilidades. (Vallejo, 2002.).

Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios. A pesar de esto, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite tener un acercamiento a las posibles soluciones para la estabilidad de los taludes. (Suarez, 2009).

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación. El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se puede

realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. (Suarez, 2009).

El Uso de “Software” es una herramienta útil para el análisis de los taludes, que depende de las características de los sitios y del modo potencial de falla, que considera las fortalezas, y las limitaciones de cada metodología utilizada, estos permiten analizar taludes complejos o con cantidad significativa de información, arrojando excelentes resultados.

Los métodos de equilibrio límite son sencillos de utilizar y permiten analizar los diferentes de tipos de casos de falla, como traslacional, rotacional, de inclinación y las fallas en cuña.

Las características de los métodos de equilibrio límite se basan en obtener un factor de seguridad o a través de un análisis regresivo, obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla. Una vez se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, es posible calcular el factor de seguridad del talud. Este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento.

El factor de seguridad es un factor de amenaza que indica en que momento el talud falla en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Una forma de calcular el factor de seguridad es dividir la masa que se va a estudiar en una serie de dovelas y considerar el equilibrio de cada dovela por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos. (Rondon & Torrado, 2015).

$$F.S = \frac{\sum \text{Resistencias disponibles al cortante}}{\sum \text{Esfuerzos al cortante}}$$

$$F.s = \frac{\sum \text{Momentos resistentes disponibles}}{\sum \text{Momentos actuantes}}$$

El término superficie de falla es utilizado para hacer referencia a una superficie asumida en la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud.

En los métodos de equilibrio límite el factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla, por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie. Generalmente, se asume 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 crítica de falla”. Esta superficie crítica de falla es la superficie más probable para que se produzca el deslizamiento; no obstante, pueden existir otras superficies de falla con factores de seguridad ligeramente mayores, los cuales también se requiere tener en cuenta para el análisis. (Rondon & Torrado, 2015).

Generalmente se asume el material como isotrópico. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema, asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares. Sin embargo, el mecanismo de falla en los materiales residuales donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como las formaciones aluviales y coluviales no isotrópicas, requiere de nuevos enfoques y del estudio de las superficies de falla no simétricas. (Suarez, 2009).

Los métodos de Bishop (1955) y Janbú (1954) han sido muy utilizados en los últimos 50 años y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967), ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de éstos posee un cierto grado de precisión.

El método de elementos finitos divide la masa de suelo en unidades discretas, estos elementos se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos. El método típicamente utilizado es el de

la formulación de desplazamientos, el cual presenta los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. (Rondon & Torrado, 2015).

7. Marco Geológico

La geología colombiana está representada por el Sistema Montañoso Andino y por el Cratón Amazónico. Eventos tectónicos que influyeron en la evolución geológica de las cuencas generadas a lo largo del país y se encuentran estrechamente ligadas a la evolución del margen activa del oeste de Sur América. (Cooper *et al.*, 1995), reflejando la interacción de varios campos de esfuerzos que han acrecionado terrenos oceánicos y continentales a lo largo de esta margen, levantando los Andes del Norte a lo largo del tiempo geológico (Cortés *et al.*, 2005; en Cetina y Patiño, 2013).

El valle medio del Magdalena, la cordillera oriental y la cuenca de los llanos, constituyen regionalmente una importante cuenca sedimentaria que va desde el Triásico al Mioceno medio. (Cooper *et al.*, 1995).

Para la zona de estudio durante el Triásico y Jurásico, fueron depositadas facies continentales, y volcánicas en cuencas extensionales (Mojica *et al.*, 1996, en Sarmiento *et al.*, 2006), durante el Triásico, estas cuencas están relacionadas con la separación de Pangea (Pindell and Dewey, 1982; Ross and Scotese, 1988; Cediel *et al.*, 2003, en Sarmiento *et al.*, 2006) y a partir de Jurásico, se desarrollan detrás de un arco magmático relacionadas a la subducción que se genera en el borde oeste de Sur América, (McCourt *et al.*, 1984; Fabre, 1987; Toussaint and Restrepo, 1989; Cooper *et al.*, 1995; Meschede and Frisch, 1998, en Sarmiento *et al.*, 2006). Durante el Cretácico Inferior,

facies marinas fueron acumuladas dentro de un sistema de cuencas extensionales, la sedimentación de plataforma marina termino al final del cretácico, debido a la acreción de terrenos oceánicos de la cordillera Occidental. (Sarmiento *et al.*, 2006).

Con la acreción de la cordillera Occidental se dio paso a un episodio deposicional que consistió de llanuras aluviales ricas en carbón, de planicies costeras y depósitos estuarinos a lo largo del valle medio del Magdalena, la cordillera oriental y la cuenca de los llanos, desde el Maastrichtiano hasta principios del Eoceno. Esta misma secuencia se mantuvo hasta principios del Mioceno, luego de la deformación del Eoceno medio en la cuenca del valle medio del Magdalena. El Mioceno medio comienza con la deformación Andina en la cordillera Oriental aislando el Valle Medio del Magdalena de la cuenca de los llanos, la deformación estuvo dominada por una inversión tectónica, lo cual dio inicio a la acumulación de facies fluviales, producto del levantamiento de la cordillera Oriental. (Cooper *et al.*, 1995).

En la siguiente figura (Figura 8) se muestra gráficamente la evolución tectónica para la cordillera Oriental, Valle medio del Magdalena y la cuenca de la Llanos, desde el jurásico hasta el Mioceno Medio.

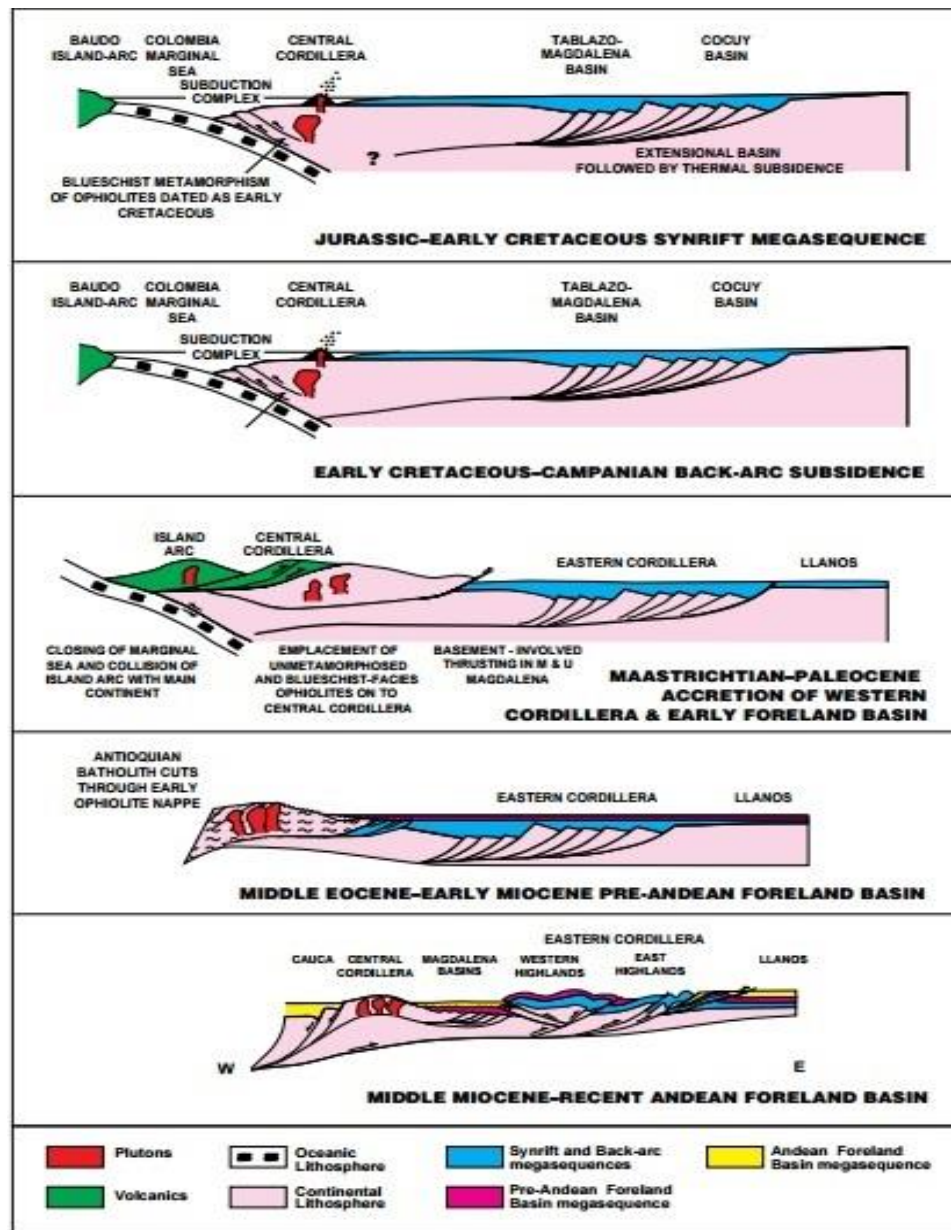


Figura 8. Evolución tectónica de la cordillera oriental, Valle medio del Magdalena y la Cuenca de los Llanos.

Nota: Tomado de Cooper *et al.*, 1995

Geología regional

Esquema tectónico del departamento de Santander, adaptado de (Clavijo *et al.*, 1993, en Royero y Clavijo, 2001), donde la primera es limitada al este por el sistema de falla Bucaramanga y al oeste

por el sistema de falla La Salina, y la segunda es limitada al este por el sistema de falla la Salina, y al occidente fuera del área del Departamento de Santander por las fallas de Mulatos y Morales

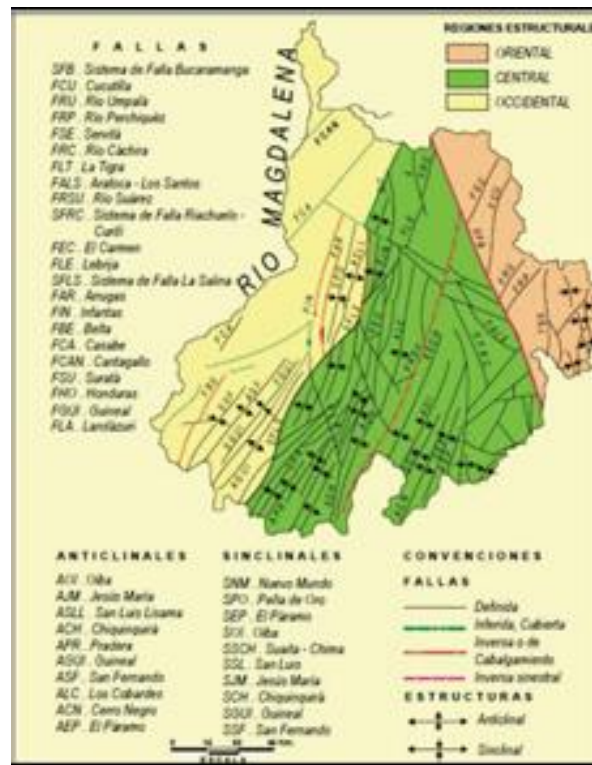


Figura 9. Esquema tectónico de Santander

Nota. Tomado de: Vargas (1979); León (1986, 1991); Clavijo, et; al. (1993), en Royero y Clavijo, 2001.

En un marco geológico regional, el sector de interés se encuentra ubicado en la vecindad NE del municipio de California, departamento de Santander, sobre un basamento precámbrico, representado especialmente por rocas cristalinas metamórficas compuestas por un neis hornbléndico y numerosas masas pequeñas de ortoneis correlacionable con el Neis de Bucaramanga, infrayaciendo a un depósito -antrópico producto de la intervención minera con bloques heterométricos de rocas metamórficas e ígneas embebidos en una matriz areno-limosa.

Las unidades geológicas reconocidas en campo fueron el neis biotítico-hornbléndico y paraneis, cuarzo monzonita de la Corcova, Granodiorita y Tonalita gris de Rionegro y Páramo Rico, las cuales están parcialmente cubiertas por delgados cuerpos cuaternarios (depósitos de pie de ladera, coluviones, y conos de deyección), presentando en términos generales exposición aceptable, meteorización avanzada, observable parcialmente a lo largo de las vías de comunicación y en pequeñas cañadas dentro y fuera del área.

En general la región genera una expresión Geomorfológica de origen denudacional-estructural de pendientes moderadas a fuertes en rocas cristalinas y de origen coluvial representado por los depósitos cuaternarios. Superficialmente se tienen suelos cubiertos por pastos y rastrojos.

Estratigrafía

En este capítulo se desea ilustrar las características litológicas y sedimentológicas de las unidades de roca del subsuelo que están comprometidas en la amplitud de la investigación, existen diferentes unidades de roca que para nuestro objetivo exploratorio no implican repercusiones importantes y por ello no se describen en el presente informe.

Neis de Bucaramanga (PEb)

Es una unidad conformada por rocas metamórficas de origen sedimentario de alto y medio grado de metamorfismo dinamo-térmico regional, que afloran en el sector oriental y nororiental del Departamento de Santander. Esta unidad se encuentra representada por las metamorfitas proterozoicas del denominado Neis de Bucaramanga.

En la presente memoria explicativa, debido a la variación de sus características litológicas y a la compleja evolución geológica de esta unidad, se plantea de manera conveniente, que se utilice el término de Complejo Bucaramanga, como el más apropiado para la literatura geológica de esta región.

El nombre original de Neis de Bucaramanga fue utilizado por Goldsmith, R. et al. (1971) y posteriormente propuesto por Ward, D. et al (1973). Esta unidad tiene como localidad tipo el frente montañoso (Cerro La Judía y Morro Negro) al Oriente de Bucaramanga. Presenta buenas exposiciones en las carreteras Bucaramanga-Pamplona, Bucaramanga-Matanza y Berlín-Vetas.

El complejo Bucaramanga consta de una secuencia de paraneises cuarzofeldespáticos, hornbléndicos, micáceos y granatíferos; cantidades subordinadas de anfibolitas, migmatitas, cuarcitas, mármoles y esporádicamente granulitas.

Las unidades que suprayacen Complejo Bucaramanga son del Paleozoico, Jurásico y aún del Cretácico. El contacto de esta unidad con la Formación Silgará que la suprayace en muchos sitios, no se ha podido determinar con exactitud, porque existe mucha similitud litológica entre estas unidades. El Complejo Bucaramanga ha sido intruido por plutones félsicos del Paleozoico y Jurásico (WARD, D. et al., 1973).

Las dataciones radiométricas de Rb/Sr en roca total, de un neis biotítico cerca a la Quebrada El Volcán (Plancha 110, Pamplona) dieron 680 ± 140 m.a. Otra datación K/Ar al W de la Falla Bucaramanga-Santa Marta, en Neis hornbléndico cerca de Ocaña (Plancha 76, Ocaña) presentó una edad de 950 ± 40 m.a. (GOLDSMITH, R. et al., 1971), que lo ubica en el Proterozoico superior.

Rocas precámbricas con dataciones equivalentes a las del Complejo Bucaramanga se mencionan en la Sierra Nevada de Santa Marta (GANSSE, 1955; TSCHANZ, CH. et al., 1969), en el Macizo de Garzón, en las serranías de La Macarena y San Lucas; en algunos sectores de la Cordillera Central. También se atribuye edad precámbrica a neises, migmatitas y granulitas en el Batolito de Ibagué y a algunos cuerpos compuestos de neises, anfibolitas y migmatitas, localizados en los departamentos de Putumayo, Cauca y Nariño.

Esta unidad de roca se encuentra localizada al oriente de la zona de Falla de Bucaramanga, constituyendo la parte Occidental del Macizo de Santander (Hubach, 1952). La mayoría de los afloramientos presentes tienen en común un alto grado de meteorización y evidencias de cizallamiento producidos por la Falla de Bucaramanga.

Debido a su aspecto masivo, la falta general de estratificación, Ward et al, (1973), suponen un origen ígneo intrusivo primario y lo clasifican como ortoneis.

Granodiorita-Tonalita (Jgd)

Estas rocas afloran al nororiente del departamento de Santander y constituyen el Batolito granodiorítico de Rionegro y el Plutón tonalítico de Páramo Rico.

La granodiorita del Batolito de Ríonegro es de color gris, de grano medio a grueso, subporfirítico, compuesta por andesina, cuarzo, microclina y biotita. La tonalita del Plutón de Páramo Rico es de color gris verdoso, de grano medio, con variaciones locales a granodiorita; está constituida por andesina, cuarzo, hornblenda y feldespato potásico. También existe un pequeño cuerpo de tonalita en el Río Surata al norte de su confluencia con el Río Tona.

Depósitos cuaternarios (Qtf, Qal)

En el departamento de Santander, los depósitos cuaternarios son muy variados en su origen y se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo de los valles de los principales ríos y quebradas.

Entre los depósitos de mayor extensión se diferencian y representan a la escala del mapa geológico, tres unidades predominantes.

La unidad TQ está constituida por areniscas, limolitas y conglomerados débilmente consolidados como depósitos de origen fluvial, los cuales están representados por el grupo Mesa y la unidad Meseta de Bucaramanga, de edad pliocena-pleistocena; la unidad Qtf se encuentra compuesta por depósitos no consolidados aluviales en abanicos y terrazas, es considerada de edad

Pleistoceno, y la unidad Qal está conformada por depósitos no consolidados de aluvión, coluvión, derrubios, glaciares, fluvioglaciares, que son considerados de Holoceno. (Gutiérrez y Clavijo, 2001).

Geología estructural

El Nororiente Colombiano de los Andes es un territorio geológicamente complejo y tectónicamente dinámico; su conformación está relacionada a la interacción de las placas tectónicas Nazca, Caribe y Suramérica.

El área de Santander por encontrarse dentro de este dominio despierta gran interés y genera discusiones sobre su origen y su conformación geológica.

El territorio santandereano se caracteriza por presentar tres estilos estructurales diferenciados, los cuales identifican tres regiones estructuralmente bien definidas del Departamento: uno de fallamientos en bloques en la región oriental; otro de plegamientos en la región central, y el graben del Magdalena, en la región occidental.

La Región Oriental es la de interés porque es donde se encuentra el sitio del Estudio Geofísico; Esta región comprende el Macizo de Santander en donde predomina un sistema de fallamientos en bloques de rumbo Norte-Sur a Noreste y un sector de pliegues anticlinales y sinclinales estrechos, ubicados en el extremo más oriental del Departamento. En esta región se destacan principalmente las fallas geológicas de Suratá y Cucutilla con direcciones Noreste a Suroeste.

Esta tectónica es parte importante de la inestabilidad de casi toda el área estudiada ya que el replegamiento y fracturamiento de las rocas han generado este fenómeno de inestabilidad en las laderas.

Geomorfología

En la zona de estudio predomina relieve donde aparece una unidad geomorfológica correspondiente a laderas denudacionales. El carácter y composición de la roca, su fracturamiento y la facilidad de saturación de los suelos residuales superficiales facilitan el desprendimiento de material fino y bloques de gran tamaño.

Geología local

Corresponde a la geología presente en el talud en estudio, la cual se obtuvo por medio de visitas de campo a la zona y corroborando con la información suministrada anteriormente.

Estratigrafía**Pórfidos dacíticos (TPo)**

Esta unidad litológica agrupa rocas plutónicas de composición dacítica, que se presentan altamente fracturadas con grandes cambios laterales en su grado de meteorización mostrando suelos residuales, es notoria la presencia de estos pórfidos como cuerpos alargados en las zonas aledañas en gran parte del trazado de la Falla La Perezosa.

Localmente en la zona de estudio se observa la roca altamente fracturada, afloramientos muy locales alineados y altamente fracturados en grandes bloques muy susceptibles a caída.

Depósitos de deslizamiento (Qd)

En el sector son depósitos recientes que cubren a las rocas cristalinas y están compuestos principalmente por fragmentos heterométricos de areniscas, rocas ígneas, metamórficas embebidas en una matriz areno-limosa.

Por las condiciones tectónico - litológicos y determinantes climáticos son frecuentes estos depósitos de ladera en el sector. La morfología del área está conformada por pendientes moderadas que se tornan escarpadas.

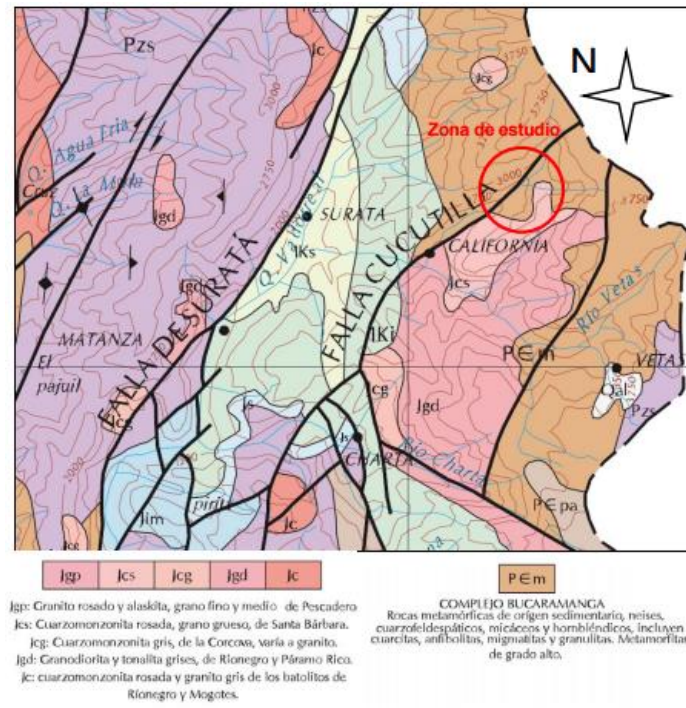


Figura 10. Geología regional.

Nota. Tomado de: Servicio Geológico Colombiano.

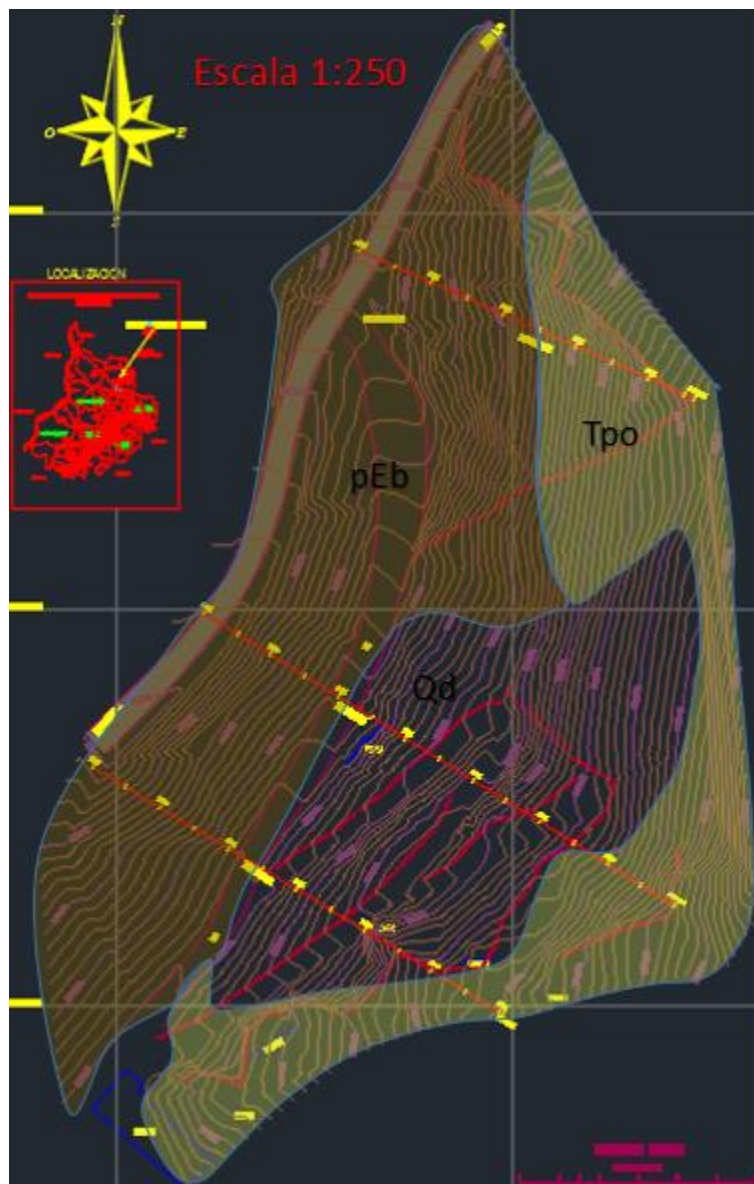
Plano Geológico local

Figura 11. Geología local.

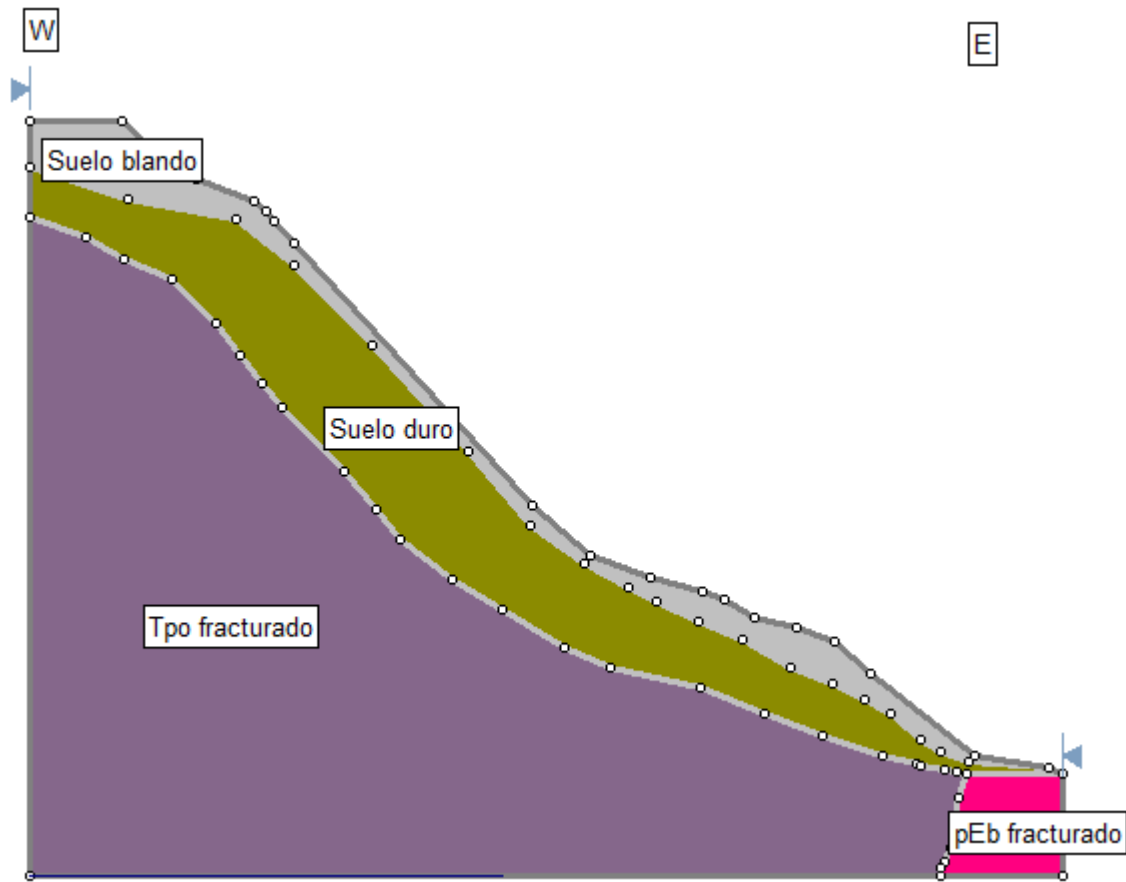
Perfil geológico

Figura 12. Perfil geológico de la zona de estudio.

8. Reconocimiento de campo

Según la visita realizada, se puede concluir lo siguiente:

- a. Los fenómenos de inestabilidad observados, corresponden principalmente a efectos de las altas precipitaciones en la zona, causando erosión en la parte más superficial del talud debido a la falta de obras de control de escorrentías de aguas lluvias.



Figura 13. Vista general del talud.

- b. El macizo rocoso en la zona de estudio se presenta diaclasado, y alterado favoreciendo fenómenos como caída de rocas y erosión en surcos y canales.



Figura 14. Deslizamientos en zonas aledañas.

- c. La cobertura vegetal en general es escasa y se requiere incrementar y evaluar convenientemente como parte de las medidas de mitigación.
- d. Los modelos de estabilidad de taludes para cada sitio permitirán ajustar las obras de mitigación complementarias a las obras de drenaje y revegetalización.
- e. En la vía de acceso se deben evaluar las obras de drenaje superficial y la alcantarilla existente, la cual puede ser objeto de mejoramiento para incrementar su capacidad hidráulica.
- f. En general las obras de mitigación estarán orientadas a construir una adecuada interacción con el medio ambiente y la recuperación vegetal de la zona estudiada.

9. Hidrogeología

Se identificaron dos drenajes, uno que tiene influencia directa sobre el sector en estudio y el otro que confluye a la misma alcantarilla donde descarga el anterior, se delimitaron las dos cuencas

hidrográficas correspondientes a estos drenajes ya que para el análisis de las obras de drenaje en el talud se empleara el caudal aportado por la que tiene influencia directa sobre este y para el análisis de la alcantarilla vial se debe tener en cuenta el aporte de la otra cuenca que descarga en este sitio.

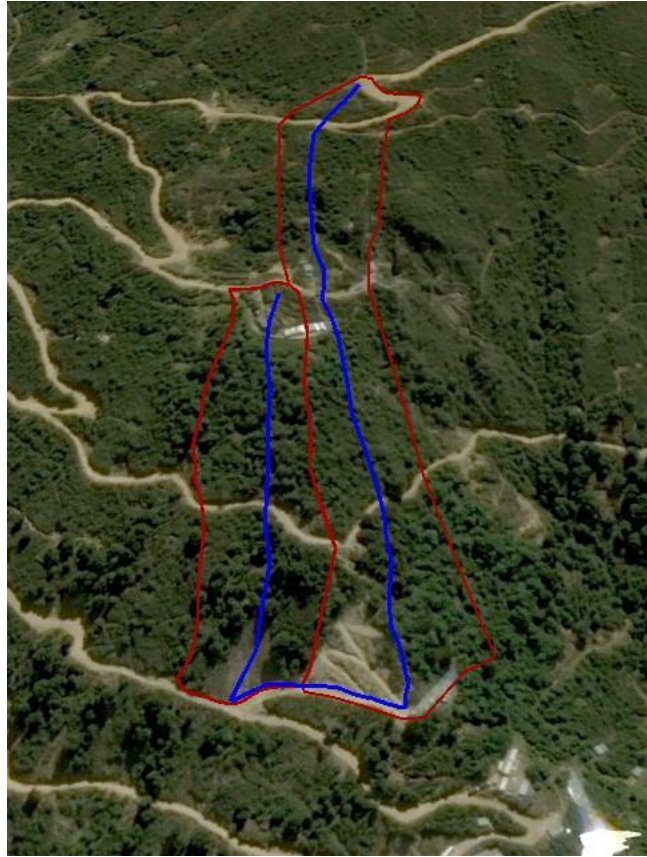


Figura 15. Cuencas hidrográficas de la zona.

Nota: Modificado de Google Earth.

Para la delimitación de las cuencas se realizó el trazado de las líneas divisorias de aguas (polígonos rojos) ubicando los puntos altos en la topografía de Google Earth, se localizaron los drenajes principales (líneas azul oscuro).

En la zona se cuenta con la estación meteorológica 23190450 ESTACIÓN VETAS

– EL POZO, del IDEAM ubicada en una zona cercana al sitio en estudio, y siendo la única en funcionamiento y con un registro amplio de datos, esto hace que los datos de esta estación ofrezcan la suficiente confianza.

Se empleó en el estudio la totalidad de los datos de precipitaciones con una base de datos de 46 años desde el año 1971 hasta el 2016 con el fin de que la muestra fuera lo más significativa posible.

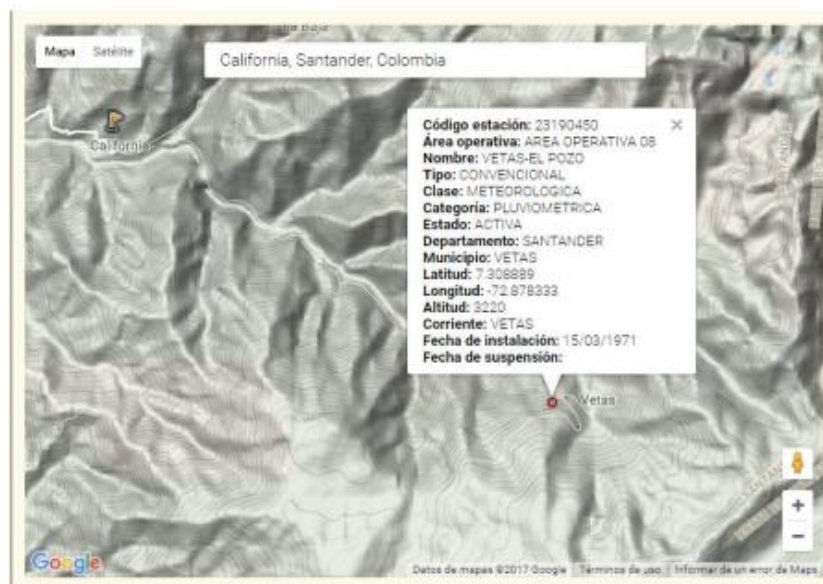


Figura 16. Ubicación de la estación meteorológica 23190450 ESTACIÓN VETAS-EL POZO.

Nota. Tomado de: Google maps.

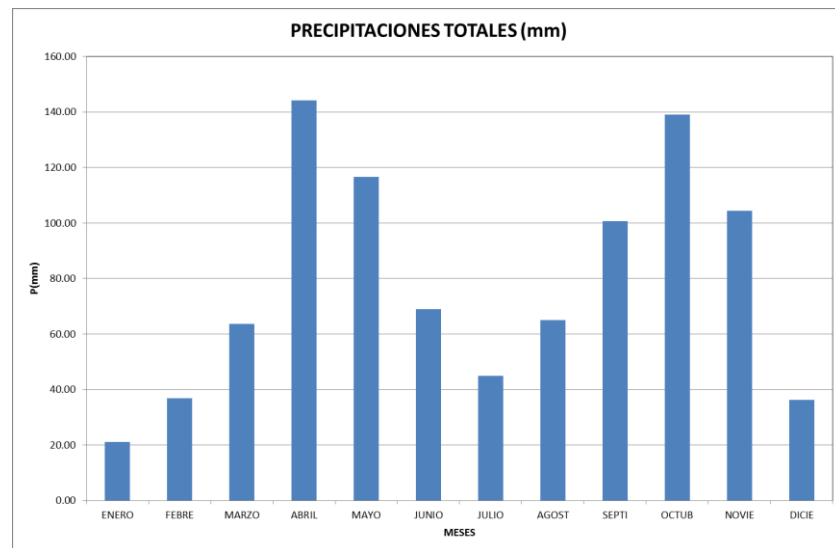


Figura 17. Comportamiento de las lluvias en el sector.

Nota. Tomado de: IDEAM.

El régimen de lluvias en sector presenta un comportamiento bimodal, con dos temporadas lluviosas siendo los picos de estas los meses de abril y octubre con un promedio máximo multianual total de lluvias de 144.10mm en abril y 139.10mm en octubre, la precipitación promedio acumulada durante el año es de 941.70mm.

Curvas intensidad duración frecuencia de la zona

Las características de las lluvias a considerar en el diseño dependen del grado de protección que se desee, lo cual por razones económicas, se basa en la importancia del sector, en la importancia de los canales de drenaje y las vías, y los posibles daños que se puedan causar por no controlar las mismas.

Las curvas Intensidad - Frecuencia - Duración de las lluvias sintetizan las características de los eventos extremos máximos de precipitación de una determinada zona y definen la intensidad media de lluvia para diferentes duraciones de eventos de precipitación con períodos de retorno específicos.

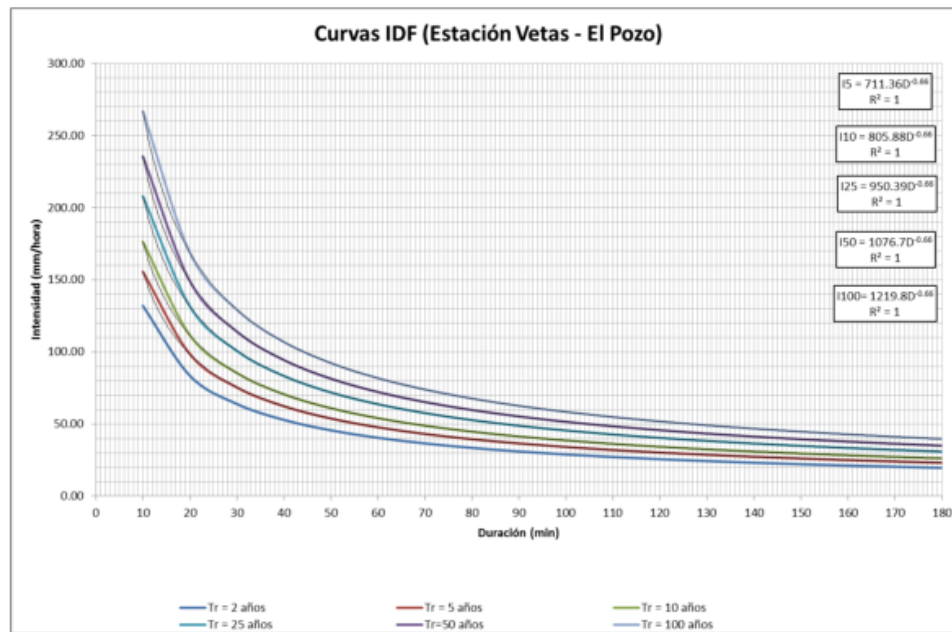


Figura 18. Curvas IDF de la estación Vetas – El Pozo.

Nota. Tomado de: IDEAM

Características de la zona.

El tipo de superficie, sus pendientes, así como los porcentajes de construcción son factores que influyen sobre el grado de impermeabilidad que facilita o retarda el escurrimiento de las aguas lluvias que puedan concentrarse en un punto.

Mediante el empleo del Software ArcGis y basándose en imágenes satelitales actualizadas se determinó los porcentajes de cobertura del suelo en las dos cuencas hidrográficas que tienen influencia en el sector en estudio.

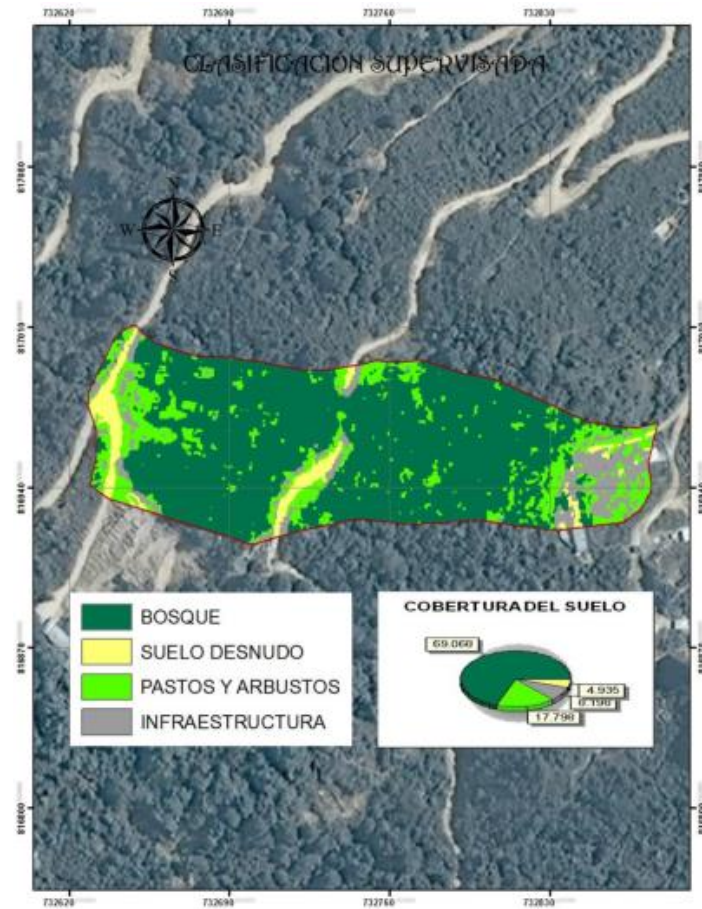


Figura 19. Cobertura del suelo en la cuenca 1 que llega a la alcantarilla por un costado del sector erosionado.

Nota. Tomado de: Modificado de ArcGis V10.1.

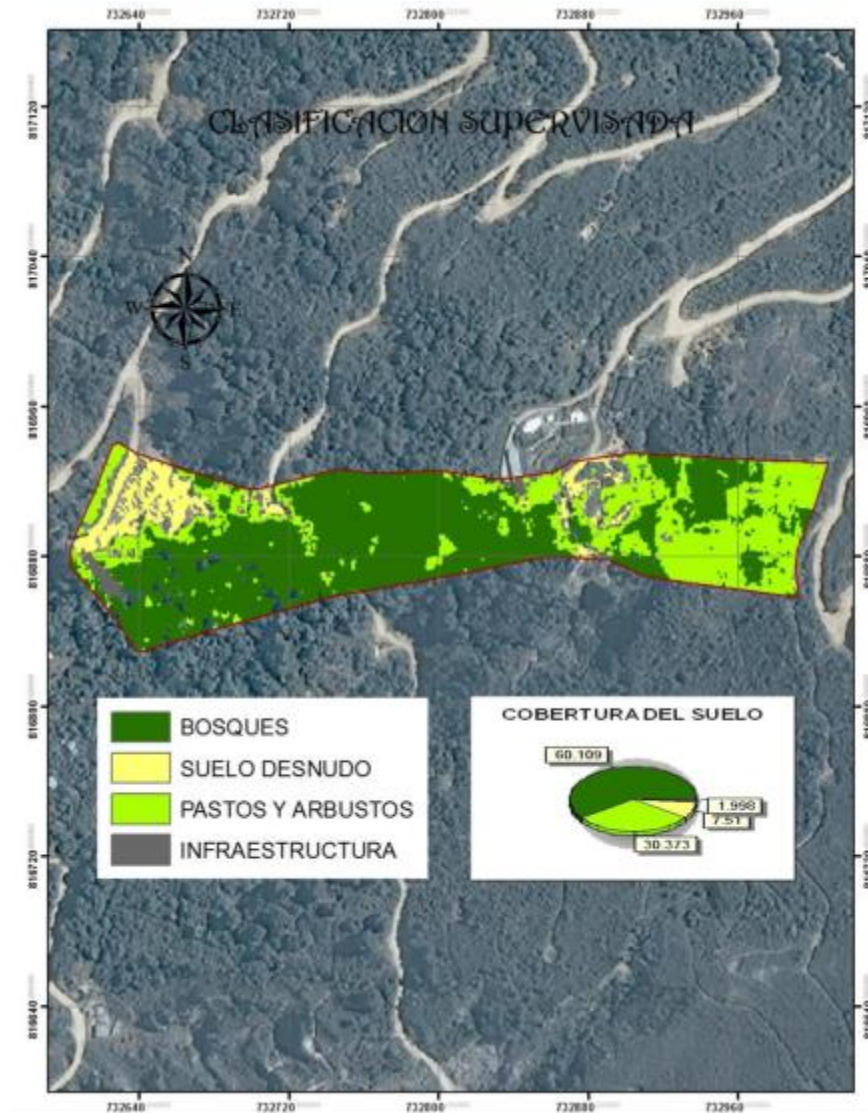


Figura 20. Cobertura del suelo en la cuenca 2 que llega al sector erosionado.

Nota. Tomado de: Modificado de ArcGis V10.1.

En la clasificación de la cobertura del suelo en las dos cuencas se puede observar que más del 90% de esta corresponde a cobertura vegetal de bosque de arbustos y pastos, lo cual nos indica que la pérdida de cobertura vegetal tiene una incidencia insignificante en el coeficiente de escorrentía de aguas lluvias del sector.

Periodo de retorno.

El área de drenaje la cuenca 1 es de 1.59 Ha y el de la cuenca 2 es de 2.84 Ha para un área total de drenaje de 4.43 Ha, el RAS 2000 define para áreas de drenaje entre 2 y 10 Ha un periodo de retorno de 5 años y el manual de drenaje de carreteras de INVIA para estructuras de disipación de energía mediante caídas y para alcantarillas con diámetro de 0.90m (36”) un periodo de retorno de 10 años. Teniendo en cuenta que las obras requeridas corresponden a las especificadas por el manual de drenaje de carreteras se tomara para el análisis de la lluvia de diseño un periodo de retorno de 10 años.

Tabla 1.

Periodos de retorno o grado de protección.

Características del área de drenaje	Mínimo (años)	Aceptable (años)	Recomendado (años)
Tramos iniciales en zonas residenciales con áreas tributarias menores de 2 ha	2	2	3
Tramos iniciales en zonas comerciales o industriales, con áreas tributarias menores de 2 ha	2	3	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias entre 2 y 10 ha	2	3	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores de 10 ha	5	5	10
Canales abiertos en zonas planas y que drenan áreas mayores de 1000 ha *	10	25	25
Canales abiertos en zonas montañosas (alta velocidad) o a media ladera, que drenan áreas mayores a 1000 ha	25	25	50

Nota. Tomado de: RAS 2000.

Tabla 2.

Periodos de retorno de diseño en obras de drenaje vial.

TIPO DE OBRA	PERIODO DE RETORNO (AÑOS) ¹
Cunetas	5
Zanjas de Coronación ²	10
Estructuras de Caída ²	10
Alcantarillas de 0.90 m de diámetro	10
Alcantarillas mayores a 0.90 m de diámetro	20
Puentes menores (luz menor a 10 m)	25
Puentes de luz mayor o igual a 10 m y menor a 50 m	50
Puentes de luz mayor o igual a 50 m	100
Drenaje subsuperficial	2

Nota. Tomado de: Manual drenaje de carreteras INVIAS.

Caudales Obtenidos

El cálculo del caudal se realizó con el software HEC-HMS 4.2 del cuerpo de Ingenieros del ejército de Estados Unidos.

Para ingresar la lluvia de diseño al software se creó un hietograma para la lluvia con periodo de retorno de 10 años partiendo de la curva idf con dicho periodo de retorno, el método empleado en la construcción del hietograma fue el de bloque alterno.

Tabla 3.

Calculo del hietograma de diseño por el método de bloque alterno.

CALCULO DEL HIETOGRAMA DE DISEÑO POR EL MÉTODO DE BLOQUE ALTERNO, TR=10 AÑOS						
Tiempo (min)	Tiempo (horas)	Intensidad (mm/hora)	P (mm)	ΔP (mm)	ΔT (min)	P (mm)
15	0.25	134.91	33.73	33.73	0 - 15	2.43
30	0.50	85.38	42.69	8.96	15 - 30	2.79
45	0.75	65.34	49.00	6.31	30 - 45	3.34
60	1.00	54.04	54.04	5.04	45 - 60	4.26
75	1.25	46.64	58.30	4.26	60 - 75	6.31
90	1.50	41.35	62.02	3.73	75 - 90	33.73
105	1.75	37.35	65.36	3.34	90 - 105	8.96
120	2.00	34.20	68.40	3.04	105 - 120	5.04
135	2.25	31.64	71.19	2.79	120 - 135	3.73
150	2.50	29.52	73.79	2.60	135 - 150	3.04
165	2.75	27.72	76.22	2.43	150 - 165	2.60
180	3.00	26.17	78.51	2.29	165 - 180	2.29

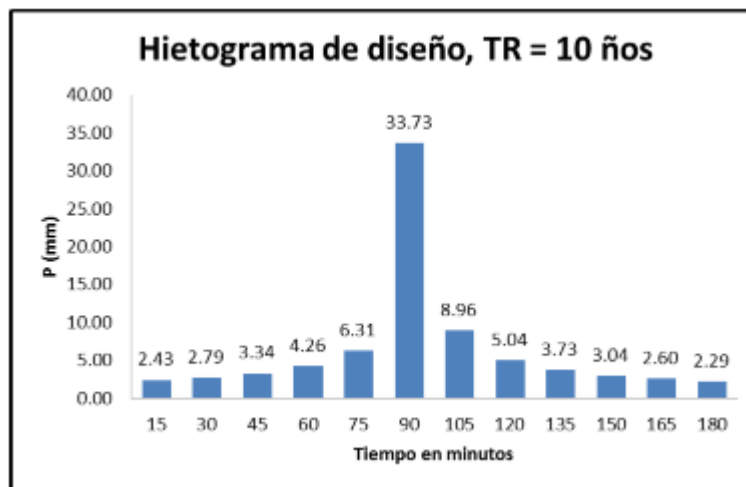


Figura 21. Hietograma de diseño.

Tabla 4.

Caudales obtenidos para cada cuenca.

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)
SUB CUENCA 1	0.03	0.6
SUB CUENCA 2	0.02	0.4
ALCANTARILLA	0.05	1.0

10. Investigaciones geotécnicas realizadas

Ensayos de campo

Se tomaron diferentes tipos de muestras alteradas al talud para identificar la naturaleza y características del subsuelo en profundidad. Se realizaron dos sondeos SPT.

Ensayos de penetración estándar SPT

- Se realizaron ensayos de penetración estándar utilizando la norma ASTM D 1586, equivalente a la norma I.N.V.E. 111.
- Peso del martillo: 140 libras
- Altura de caída: 76 centímetros
- Penetración: 3 intervalos de 15 centímetros cada uno (6")
- N de diseño: Sumatoria de los golpes de los últimos 30 centímetros (12")
- Diámetro exterior del tubo: 50.8 mm
- Diámetro interior del muestreador en la punta: 34.93 mm
- Longitud del tubo: 75 centímetros
- Sistema de hincado: Malacate y polea

- Rechazo: Más de 50 golpes para 15 centímetros (6").

Resumen de ensayos de penetración estándar SPT

Tabla 5.

Resumen sondeos de SPT.

Profundidad (metros)	Sondeo	
	1	2
	N golpes/pie	
0.0 a 0.5	1	1
0.5 a 1.0	3	10
1.0 a 1.5	6	19
1.5 a 2.0	4	16
2.0 a 2.5	4	28
2.5 a 2.5	8	69
3.0 a 3.5	22	34
3.5 a 4.0	36	36
4.0 a 4.5		29
4.5 a 5.0		63
5.0 a 5.5		68
5.5 a 6.0		81

Nota. Tomado de: INGEOEXPLORACIONES.

Correlaciones para interpretación de los ensayos SPT

Se realizan las interpretaciones a partir de unas tablas indicativas con los resultados de los ensayos realizados.

Para suelos granulares:

Tabla 6.

Correlaciones SPT suelos granulares.

CONSISTENCIA	Ncorr	Dr (%)
Arena muy suelta	0 – 3	0 - 15
Arena suelta	3 – 8	15 - 35
Arena media	8–25	35 - 65
Arena compacta o densa	25 – 42	65 - 85
Arena muy compacta o muy densa	42 – 58	85 - 100

Nota. Tomado de: Kowski 1988.

Para suelos arcillosos

Tabla 7.

Correlaciones SPT suelos arcillosos.

CONSISTENCIA	Ncorr	qu (KN/m2)
Arcilla muy blanda	0-2	0-25
Arcilla blanda	2-5	25-50
Arcilla medio firme	5-10	50-100
Arcilla firme	10-20	100-200
Arcilla muy firme	20-30	200-400
Arcilla dura	>30	>400

Nota. Tomado de: Das 1999.

Ensayos de laboratorio

Tabla 8.

Resumen clasificación de suelos.

Sondeo	Prof (m)	W%	% finos	Clasificación S.U.C.S
1	4	15.85	46.65	SC
2	3	15.99	39.22	SC
2	6	15.31	42	SC

Nota. Tomado de: INGEOEXPLORACIONES.

Tabla 9.

Resumen cortes directos.

Sondeo	Profundidad (m)	Angulo fricción	Cohesión (Kg/cm2)
1	3	38.233	0.164
2	7,5	32.249	0,291

Nota. Tomado de: INGEOEXPLORACIONES.

Convenciones:

W = humedad

% Finos = pasantes del tamiz ASTM 200

S.U.C.S. = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Perfiles geotécnicos típicos

Tabla 10.

Perfil geotécnico sondeo 1.

Profundidad en metros		Suelo	Limitaciones geotécnicas
Desde	Hasta		
0.0	3.0	Suelos sueltos compuestos por arenas limosas, muy sueltas, algo húmedas, poco resistentes, color rojo y gris.	Suelo sueltos, susceptibles a deslizamientos
3.0	4.0	Suelos residuales compuestos por arenas limosas, algo densas, algo húmedas, algo resistentes, color amarillo, naranja y blanco.	Suelos residuales algo sueltos y de baja cohesión; en condiciones de saturación son susceptibles a deslizamientos.

Nota. Tomado de: INGEOEXPLORACIONES.

Tabla 11.

Perfil geotécnico sondeo 2.

Profundidad en metros		Suelo	Limitaciones geotécnicas
Desde	Hasta		
0.0	1.0	Suelos sueltos compuestos por arenas arcillosas, sueltas, algo húmedas, poco resistentes, color marrón y naranja	Suelo sueltos, susceptibles a deslizamientos.
1.0	2.5	Suelos residuales compuestos por arenas limosas, densas, algo húmedas, resistentes, color marrón, naranja y blanco	Suelos residuales algo sueltos y de baja cohesión; en condiciones de

Profundidad en metros		Suelo	Limitaciones geotécnicas
Desde	Hasta		
			saturación son susceptibles a deslizamientos
2.5	4.5	Suelos residuales compuestos por arenas arcillosas, algo permeables, densas, algo húmedas, resistentes, color amarillo, naranja y blanco.	Suelos residuales algo duros, en condiciones de saturación son susceptibles a deslizamientos
4.5	Profundidades no determinadas mayores a 6.0	Suelos residuales compuestos por arenas arcillosas, algo permeables, muy densas, algo húmedas, resistentes, color naranja y amarillo.	Suelos residuales duros, en condiciones de saturación son moderadamente susceptibles a deslizamientos.

Nota. Tomado de: INGEOEXPLORACIONES.

Refracción sísmica

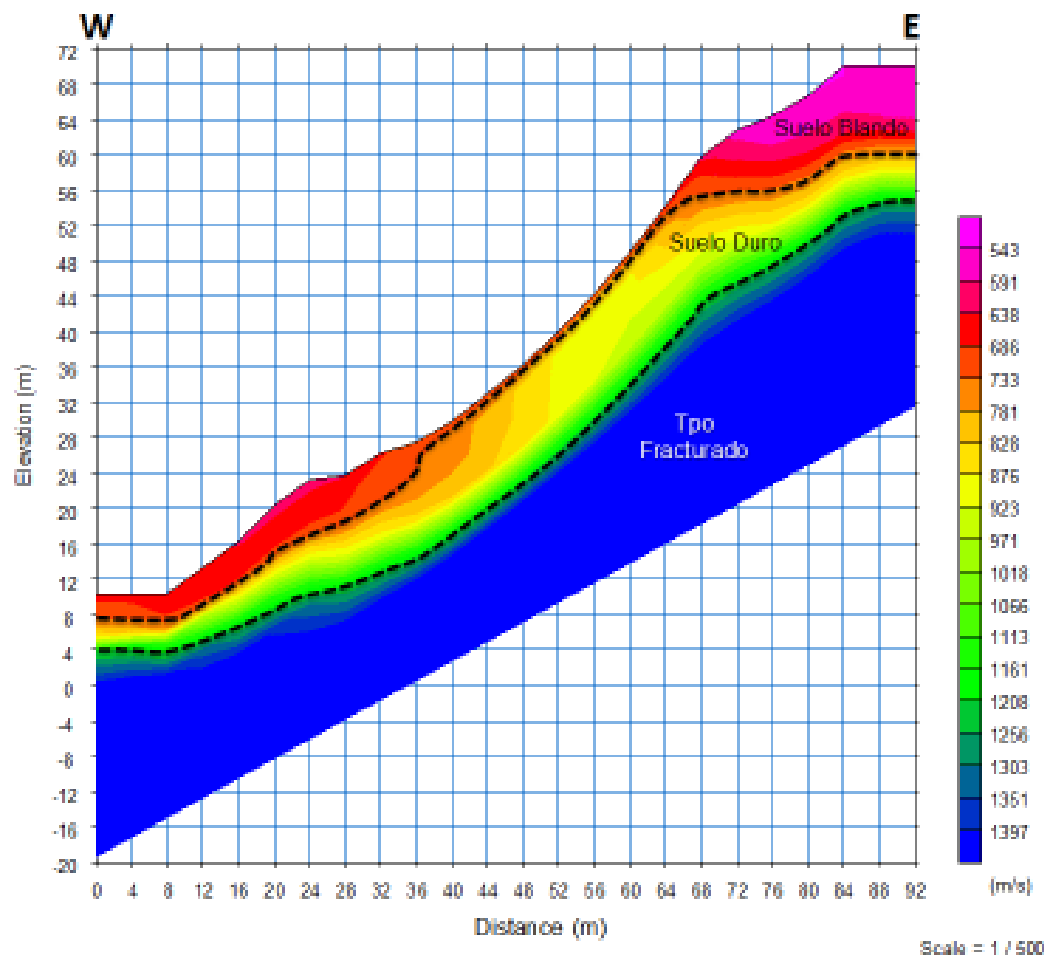


Figura 22. Perfil obtenido por medio de ondas compresionales.

Nota. Tomado de: INGEOEXPLORACIONES

11. Cálculo de factores de seguridad del talud

Modelo y software utilizado

Para el análisis del modelo geotécnico se utilizó el software SLIDE V6.0 para el análisis de estabilidad de taludes de la Universidad de Toronto (Canadá), utilizando análisis bidimensional el

cual realiza el análisis por medio de la teoría de equilibrio límite para obtener factores de seguridad al deslizamiento del talud.

Para la evaluación de los resultados obtenidos, se verificaron los resultados con base en los requerimientos de la norma NSR10, en la cual se especifica un factor de seguridad mínimo de 1.05 para diseño con análisis pseudoestático. Aceleración pico efectiva para el Municipio de California (Santander) según NSR10 es 0.25, por lo tanto la aceleración sísmica pseudoestática para los análisis es 0.125g.

Adicionalmente se realizó el análisis por elementos finitos utilizando el método de Mohr Coulomb, para el cálculo del factor de seguridad y los desplazamientos generados en el talud.

Método de análisis

Para el análisis de este talud se trabajó con los siguientes métodos:

- **Método ordinario o de Fellenius**

Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales (Suarez, 2009).

- **Método Bishop simplificado**

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, 2009).

- **Método de Spencer**

Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida (Suarez, 2009).

Estratigrafía

El modelo geotécnico se realizó con los materiales de suelo identificados en los sondeos realizados. Las propiedades de los suelos fueron obtenidas en laboratorio por la consultoría.

Presiones de poro

Para modelar las condiciones hidrostáticas a las que está expuesto el talud, se colocó la línea de nivel freático próxima a la superficie del terreno debido a la alta pluviosidad que presenta la zona.

12. Modelo Geotécnico

A continuación se describirá el modelo a utilizar en los siguientes capítulos para las respectivas modelaciones, (Topografía del talud, estratigrafía, materiales, y parámetros geotécnicos).

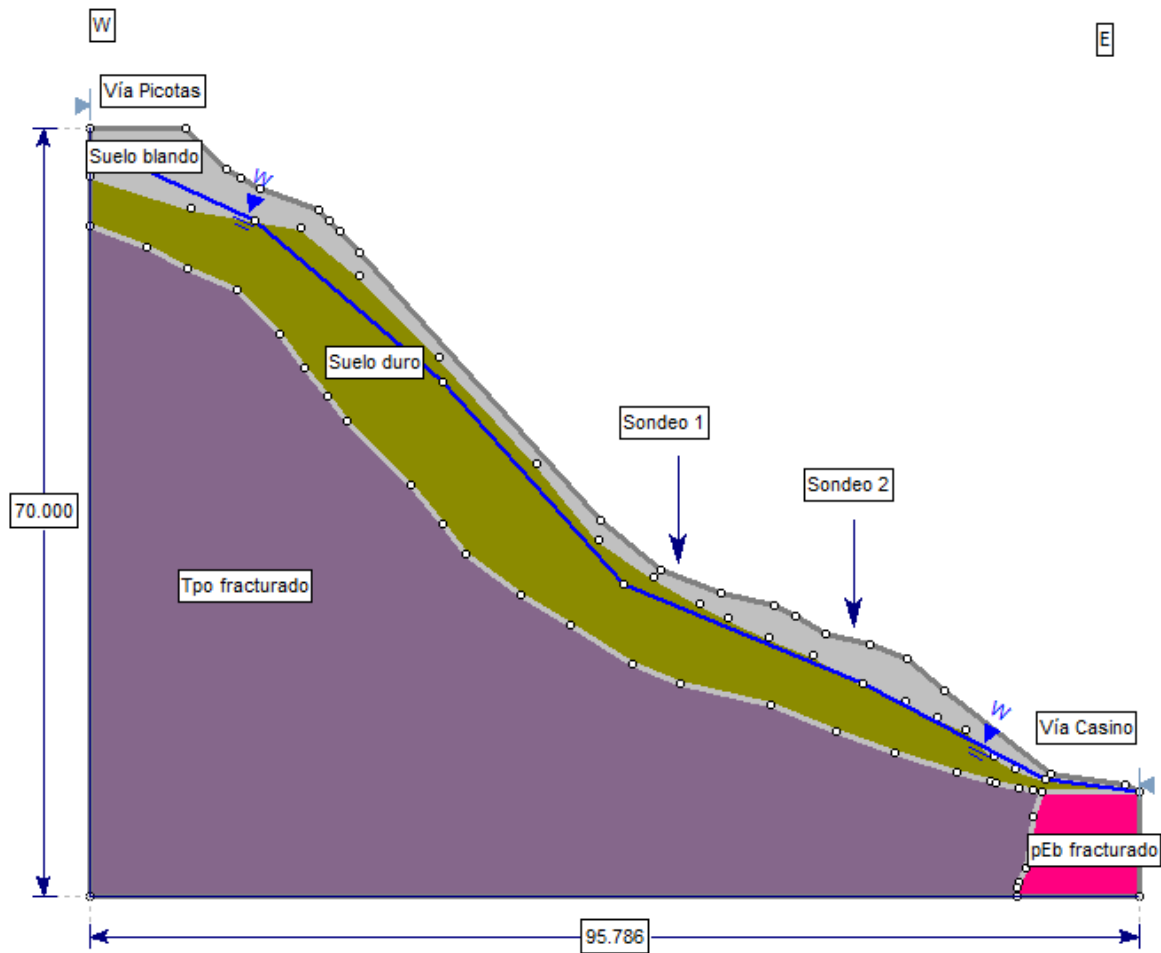


Figura 23. Perfil del modelo geotécnico.

Suelo suelto: Suelos compuestos por arenas limosas, muy sueltas, algo húmedas, poco resistentes, color rojo y gris.

Suelo duro: Suelos residuales compuestos por arenas limosas, densas, algo húmedas, resistentes, color marrón, naranja y blanco

Tpo fracturado: Rocas ígneas plutónicas de composición dacítica, que se encuentran altamente fracturas y meteorizadas.

pEb fracturado: Complejo de rocas metamórficas de origen sedimentario, altamente fracturas y meteorizadas.

Sé presenta el resumen de los parámetros geotécnicos que se utilizaron para cada uno de los materiales en la modelación.

Tabla 12.

Resumen parámetros geotécnicos.

Suelo	Peso unitario (KN/m3)	Fricción (grados)	Cohesión (KN/m2)
Suelo suelto	17	38	16
Suelo residual duro	18	32	28
Roca fracturada	Impenetrable		

Nota. Tomado de: INGEOEXPLORACIONES.

13. Análisis de equilibrio límite

En este capítulo se muestran los resultados de la modelación de estabilidad del talud en estudio, teniendo en cuenta el modelo geológico-geotécnico, evaluándolo en condiciones estáticas y pseudoestáticas, tanto para el talud natural, como para las diferentes propuestas de construcción del talud artificial por medio del análisis de equilibrio limite utilizando los métodos de Fellenius, Bishop y Spencer, para el cálculo del factor de seguridad.

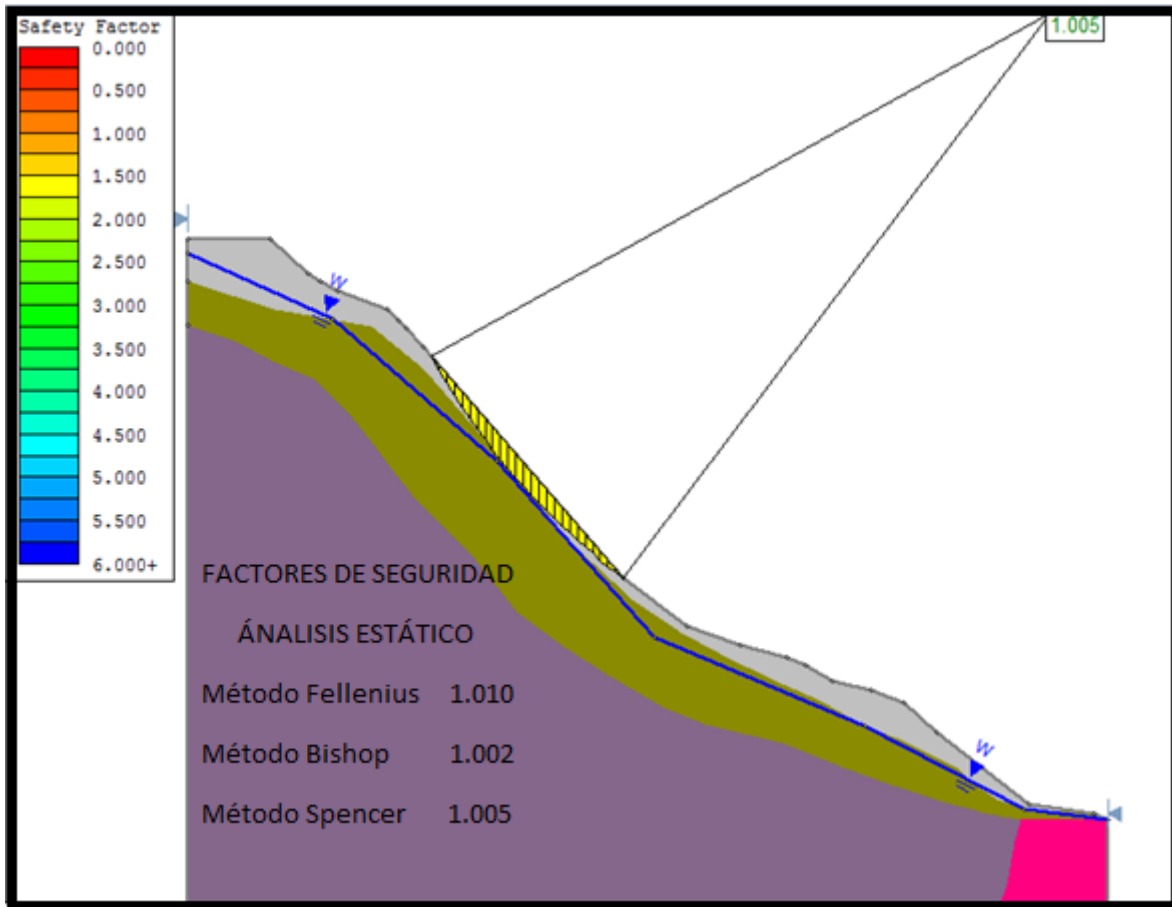
Condiciones naturales del terreno

Figura 24. Calculo del F.S estático en condiciones naturales.

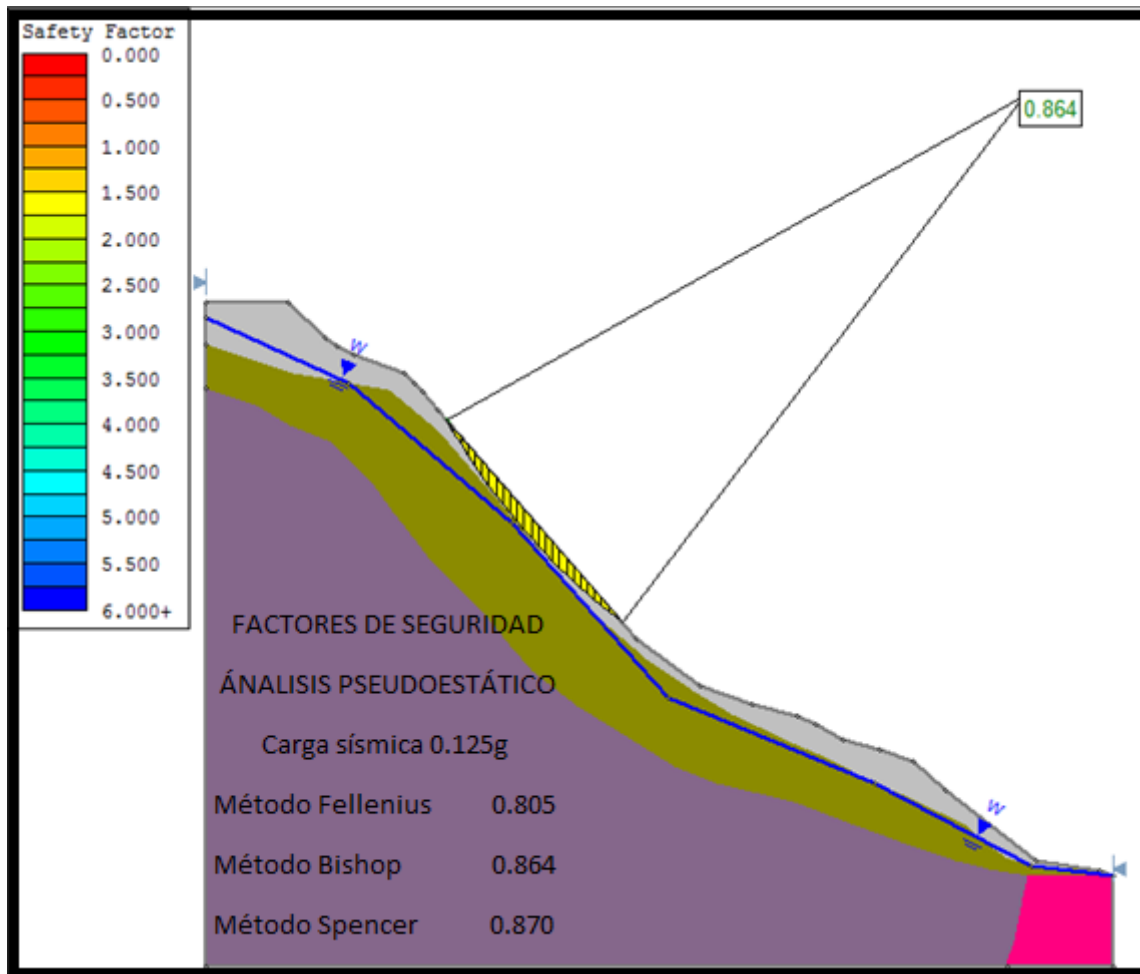


Figura 25. Cálculo del F.S pseudoestático en condiciones naturales.

Sé observa que el talud natural, tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas, no cumple con los factores de seguridad mínimos establecidos por la NSR-10 que se muestran a continuación, por lo tanto se deben proponer alternativas que garanticen la estabilidad de este para condiciones permanentes o de larga duración.

Tabla 13.

Factores de seguridad mínimos.

Factores de Seguridad		
Condición	FS Estático	FS Dinámico
Permanente o de larga duración	1,50	1,05
Temporal o de corta duración	1,30	1,00

Nota. Tomado de: NSR-10

Todas las alternativas de estabilización que se proponen a continuación contemplan una serie de cortes al talud, para minimizar las pendientes de este, así mismo, para el manejo de aguas de escorrentía, se propone la reconstrucción de la alcantarilla existente, y la elaboración de canales de drenaje elaborados con sacos de suelo-cemento, así como la instalación de subdrenes a lo largo del talud.

Estas alternativas deben cumplir con los factores de seguridad mínimos establecidos en la NSR-10, y a su vez deben contribuir al control de la erosión producto de las aguas de escorrentía y a la caída de rocas.

Alternativa 1

En esta alternativa se plantea realizar una pantalla anclada de aproximadamente 30 cm de espesor, por medio de un sistema de anclajes activos, en la zona más crítica del talud.

Los anclajes activos están sometidos a una carga de tensado, después de su ejecución, no inferior al 50% de la máxima prevista en proyecto y de tipo permanente.

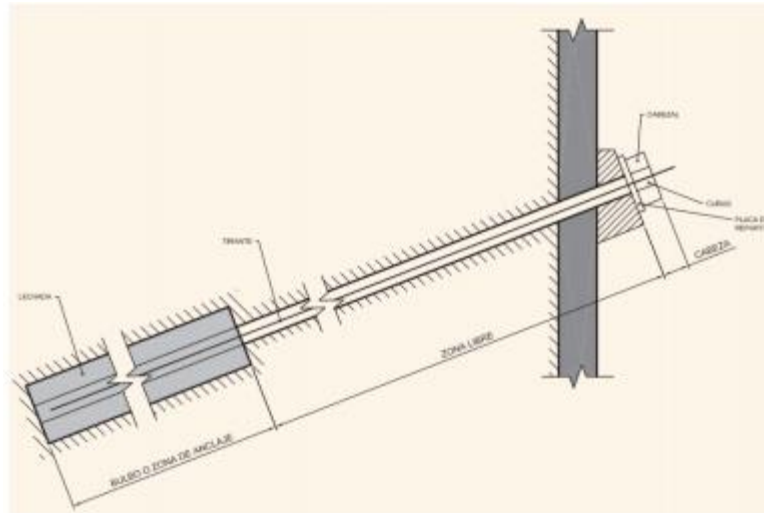


Figura 26. Bosquejo de un Anclaje

Nota. Tomado de: Guía para el Diseño y Ejecución de Anclajes al Terreno en Obras de Carreteras (Madrid – España).

Dimensionamiento de los anclajes

Considerando la magnitud del deslizamiento y las fuerzas activas actuantes en el talud, se plantean anclajes compuestos por tres (3) torones de 5/8", los cuales presentan una resistencia a la rotura de 26.6 toneladas, tomado de la norma ASTM A-416.

Con estos datos se busca calcular la capacidad de los anclajes:

$$\text{Capacidad de carga} = \frac{\text{Resistencia a la rotura} * \# \text{ torones}}{F.S}$$

$$\text{Capacidad de carga} = \frac{26.6 * 3}{2}$$

$$\text{Capacidad de carga} = 39.9 \text{ Ton}$$

Este valor se aproxima a 40 Ton = 400KN

Se procede a calcular la longitud del bulbo o zona de anclaje que es la parte de este, que se adhiere al terreno y le transmite su carga, por medio de la lechada, para determinar esta longitud se debe tener en cuenta las características físicas y mecánicas del suelo donde se construirá el bulbo.

Tabla 14.

Capacidad de adherencia del terreno.

Tipo de Terreno	Resistencia media τ_a al arrancamiento (kN/m ²)
Roca dura (granito, gneiss, calizas, etc.)	1000 - 2500
Roca blanda (margas, esquistos, pizarras, etc.)	300 - 100
Gravas y arenas gruesas Arenas finas y medias, arenas limosas y arcillas arenosas	700 - 1000 300 - 600
Arcillas de consistencia rígida ($c_u > 200\text{kN/m}^2$) firme ($100 < c_u < 200\text{kN/m}^2$) media ($50 < c_u < 100\text{kN/m}^2$)	600 - 800 200 - 600 50 - 200

Nota. Tomado de: Norma Española de anclajes.

Para este caso tomamos una resistencia de 900 KN/m², debido a que el suelo presente en la zona, se alterna principalmente con suelos arenosos, y rocas de origen ígneo.

$$\text{Longitud del bulbo} = \frac{\text{capacidad de carga} * \text{factor de seguridad}}{\text{capacidad de adherencia} * \text{perímetro de perforación}}$$

$$\text{Longitud del bulbo} = \frac{400 \text{ KN} * 2}{\frac{900 \text{ KN}}{\text{m}^2} * 0,3 \text{ m}}$$

$$\text{Longitud del bulbo} = 2.96 \text{ m}$$

Se tomó el valor aproximado de 3 metros para la longitud del bulbo.

Tabla 15.

Resumen datos anclajes.

Carga de pretensionamiento (KN)	Capacidad de adherencia (KN/m ²)	Perimetro de perforación (m)	Longitud del bulbo (m)
400	900	0,3	3

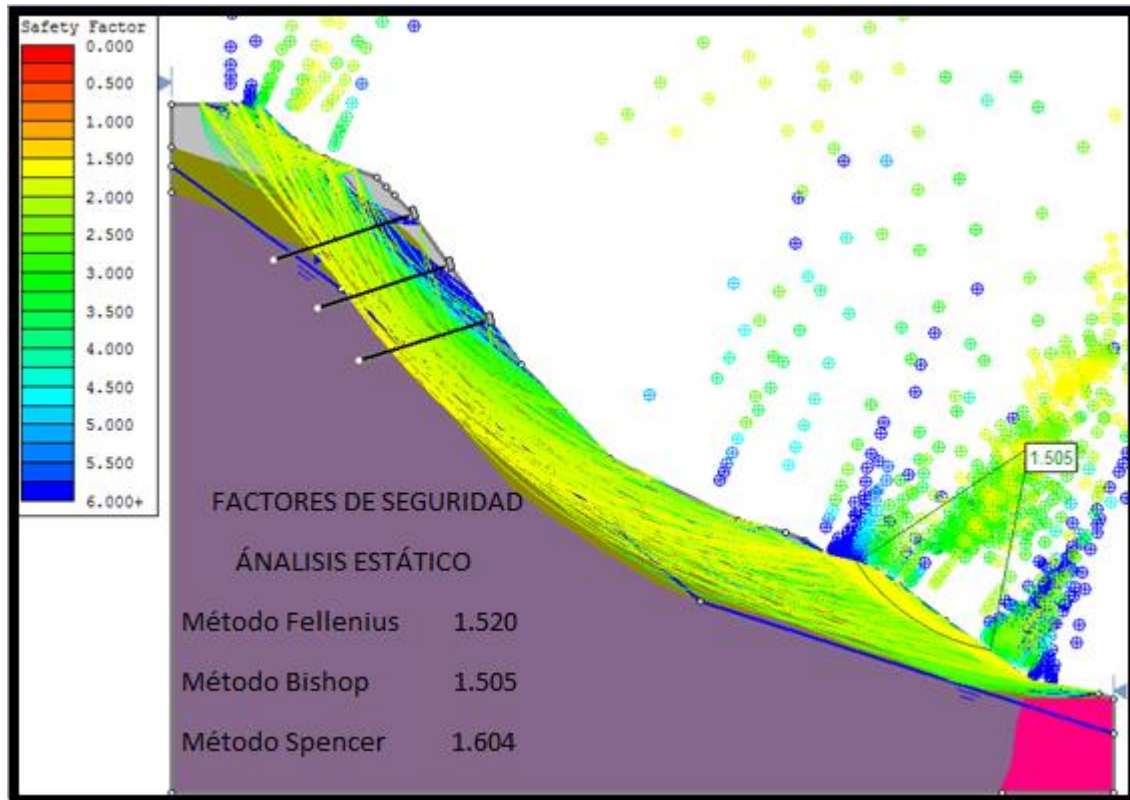


Figura 27. Calculo F.S estático con alternativa 1.

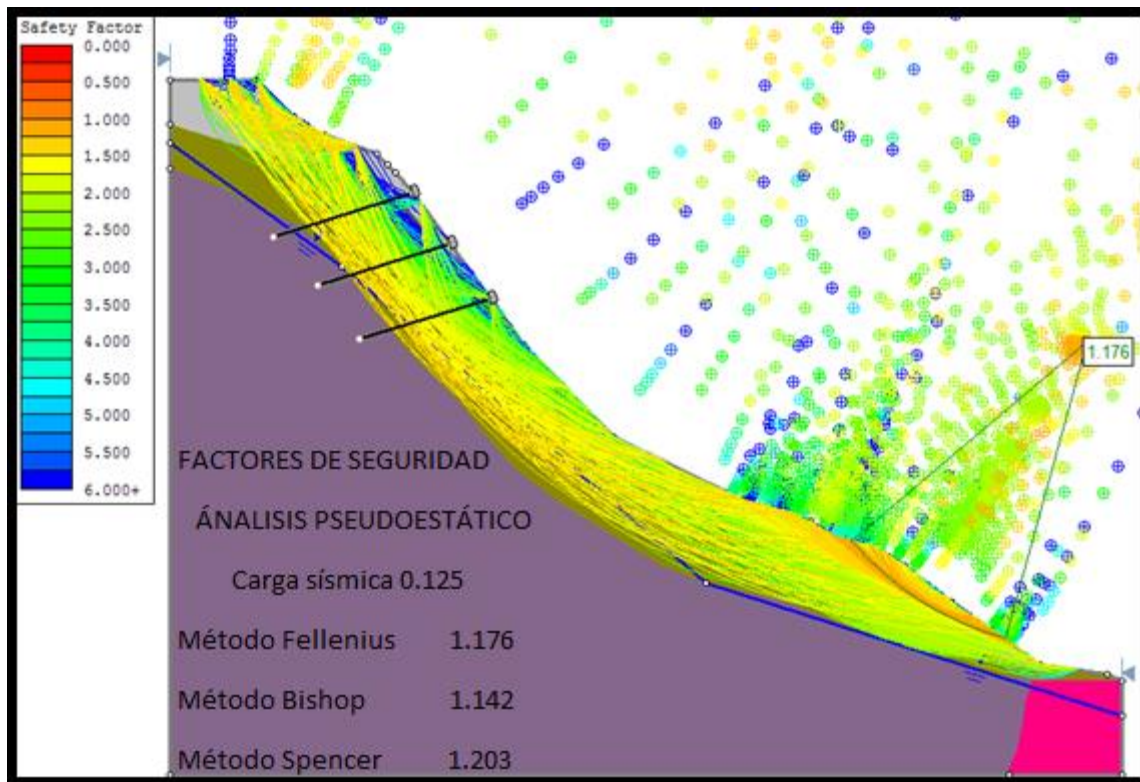


Figura 28. Cálculo F.S pseudoestático con alternativa 1.

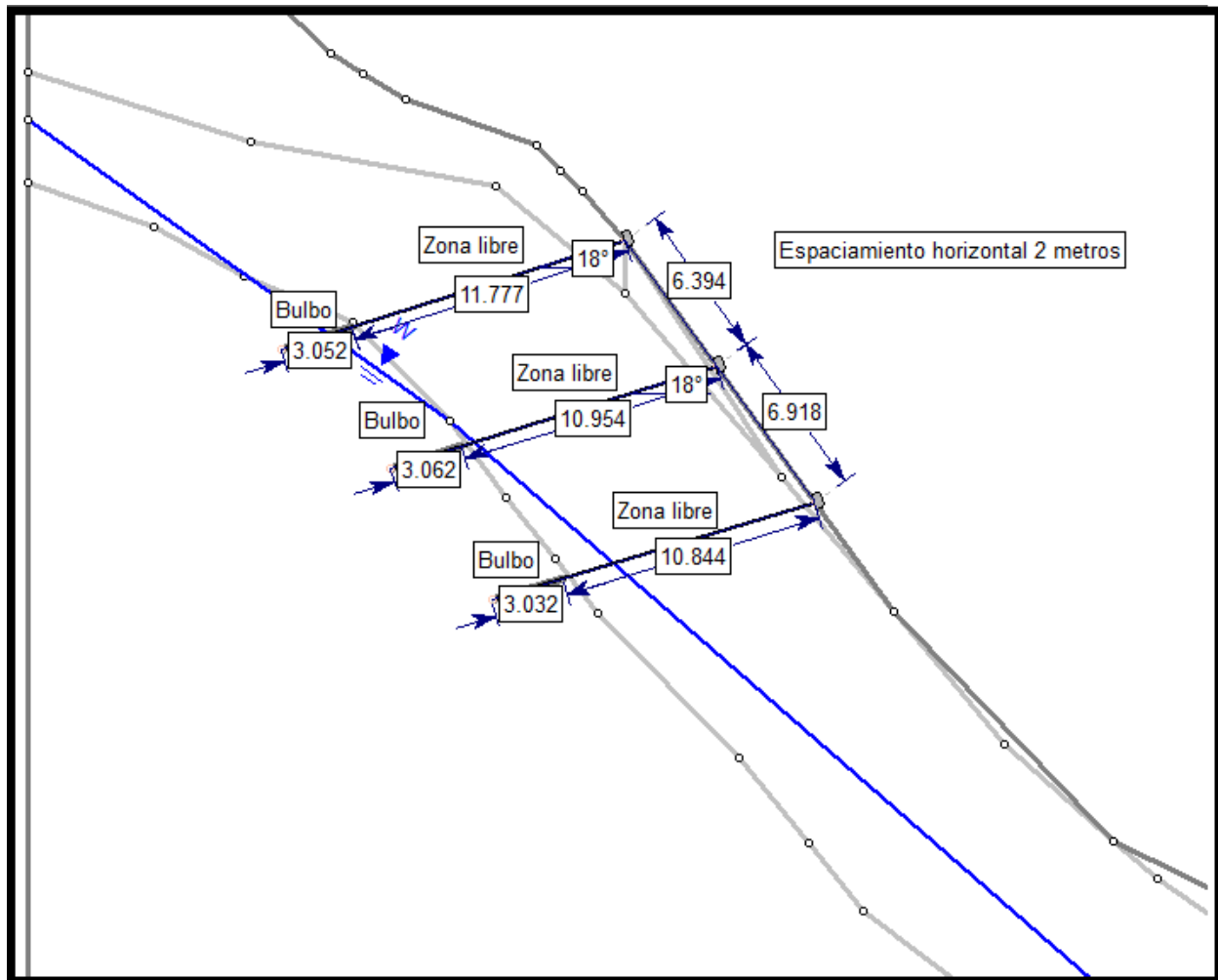


Figura 29. Dimensionamiento de los anclajes activos.

Alternativa 2

Esta alternativa consta en un sistema de cobertura vegetal anclada, que consiste en todo tipo de manto, textil o malla hechos en geosintéticos de alta resistencia o en fibra natural con la capacidad de brindar soporte a la vegetación (césped) asegurados a la superficie del talud mediante anclajes pasivos, los cuales presentan un menor espaciamiento en las zonas más inestables del talud. La cobertura permite el crecimiento de vegetación que protege el talud de erosión superficial y

desplazamiento de partículas. Los anclajes proveen la resistencia a los esfuerzos del suelo y refuerza la masa de suelo contra posibles desplazamientos.

Se recomienda recubrir el talud con cobertura vegetal típica del sector.

Tabla 16.

Característica de la cobertura vegetal.

	Tensile Strenght (KN/m)	Angulo de Fricción (°)	Adhesión (KN/m²)
Cobertura Vegetal	10	25	5

Nota. Tomado de: Pavco.

Tabla 17.

Características anclajes pasivos.

	Separación horizontal (m)	Tensile Capacity (KN)	Plate Capacity (KN)	Bond Strenght (KN/m)
Anclaje	2	100	100	50

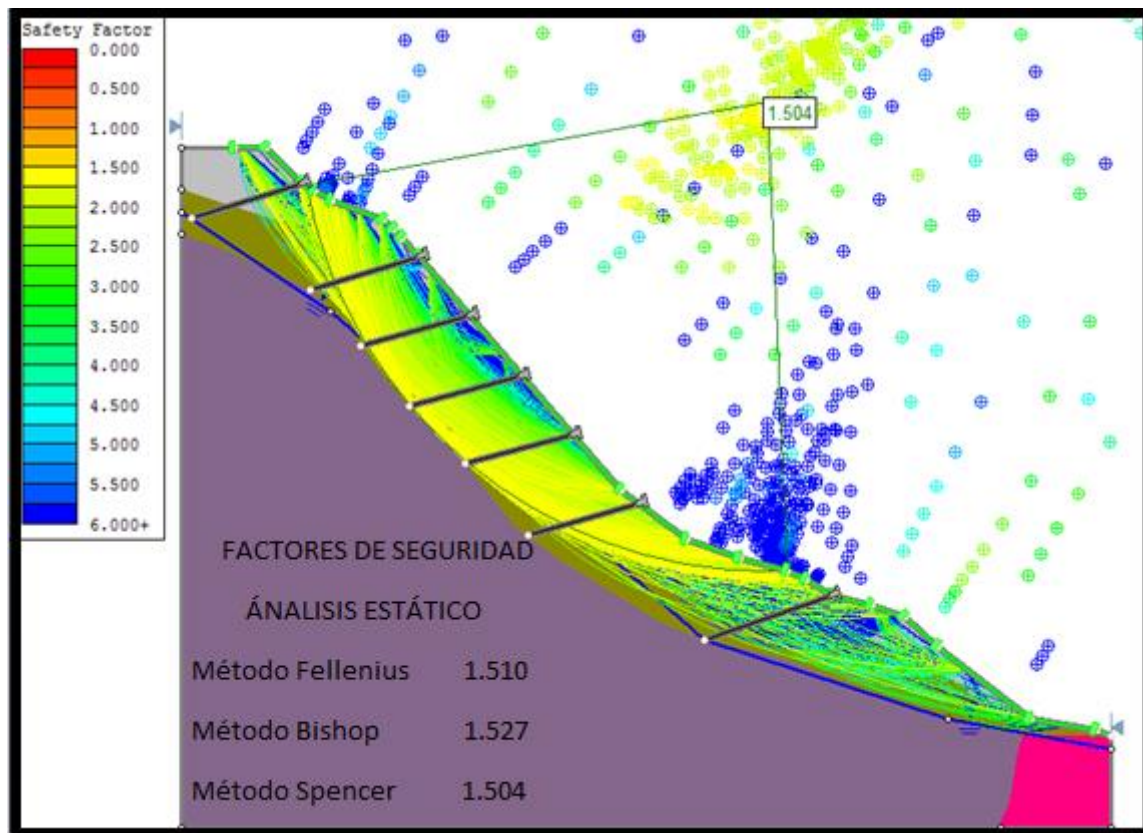


Figura 30. Calculo del F.S estático con alternativa 2.

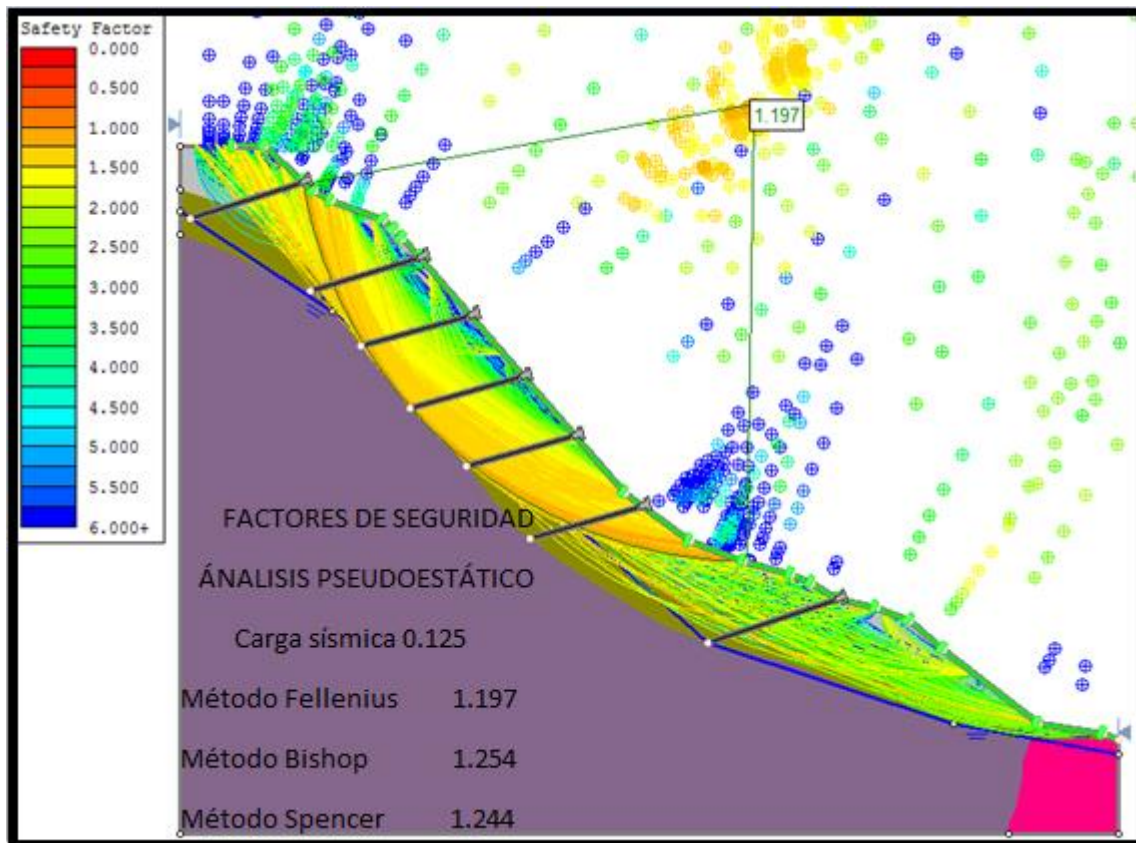


Figura 31. Calculo del F.S pseudoestático con alternativa 2.

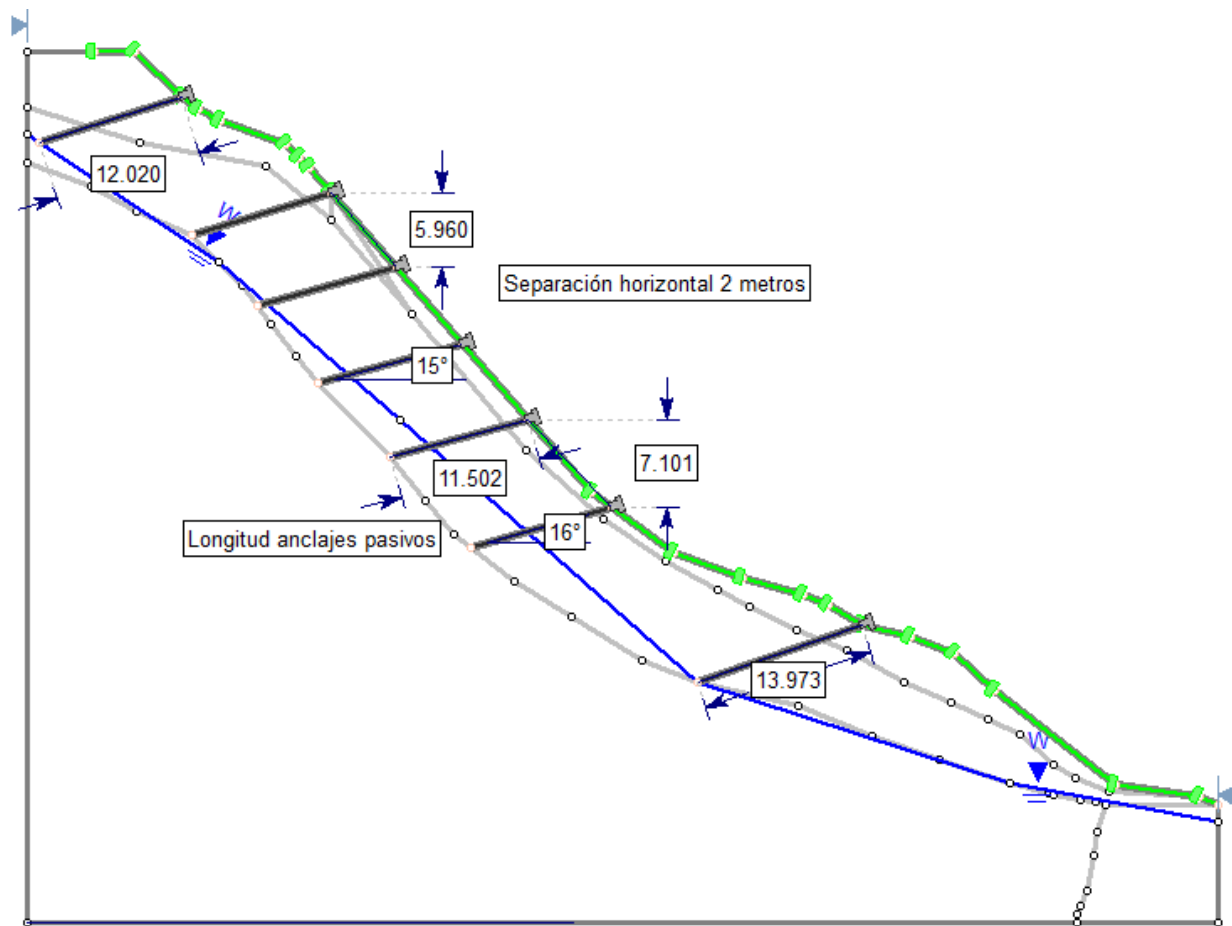


Figura 32. Dimensionamiento de los anclajes pasivos.

Como se observa en la figura 32, los anclajes pasivos varían su longitud entre 10 a 14 metros aproximadamente, y con ángulos de inclinación entre 15 y 20 grados.

Resumen factores de seguridad para las diferentes alternativas

Tabla 18.

F.S condición estática.

ALTERNATIVA	Bishop	Fellenius	Spencer
1	1.505	1.520	1.604
2	1.527	1.510	1.504

Tabla 19.

F.S condición pseudoestática.

ALTERNATIVA	Bishop	Fellenius	Spencer
1	1.142	1.176	1.203
2	1.254	1.197	1.244

Con lo anterior concluimos que las 2 alternativas propuestas para la mitigación de los problemas geotécnicos por medio de la teoría de equilibrio límite, cumplen con los factores de seguridad mínimos requeridos por la NSR-10, para la estabilidad del talud en estudio.

14. Análisis por elementos finitos

En este capítulo se mostraran los resultados del cálculo del factor de seguridad estático por elementos finitos, tanto en condición natural como con las alternativas de mitigación propuestas, por medio del análisis de elementos finitos con el software PLAXIS V8.5.

Tabla 20.

Resumen datos de los materiales MASW.

TABLA DE DATOS - MASW 1D - LS 1								
Depth h (m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (g/cm ³)	N	Relacion de Poisson v	Módulo de Corte G (M Pa)	Módulo de Elasticidad Ed (M Pa)	Deformación K (M Pa)
0.00	302.52	1625.80	1.83	37.43	0.25	1640	4100	2733
1.07	301.00	1624.11	1.83	36.83	0.25	1623	4058	2705
2.31	298.23	1621.03	1.83	35.76	0.25	1592	3981	2654
3.71	297.52	1620.25	1.83	35.49	0.25	1585	3962	2641
5.27	381.24	1713.18	1.86	78.18	0.25	2643	6609	4406
7.01	399.30	1733.23	1.86	90.60	0.25	2910	7274	4849
8.90	417.34	1753.25	1.87	104.28	0.25	3189	7972	5316
10.96	429.76	1767.03	1.87	114.49	0.25	3389	8473	5648
13.19	435.38	1773.27	1.87	119.33	0.25	3482	8705	5803
15.58	435.94	1773.90	1.87	119.82	0.25	3491	8728	5819
18.13	433.79	1771.51	1.87	117.95	0.25	3456	8639	5759
20.85	431.10	1768.52	1.87	116.63	0.25	3411	8528	5685
23.74	428.49	1765.63	1.87	113.42	0.25	3368	8421	5614
26.79	426.66	1763.59	1.87	111.88	0.25	3338	8346	5564
36.43	435.94	1773.90	1.87	119.82	0.25	3491	8728	5819

Nota. Tomado de: INGEOEXPLORACIONES.

Con los datos de la tabla 20, y junto con los parámetros mostrados en el capítulo del modelo geotécnico, fueron usados para la modelación por elementos finitos por el método de Mohr Coulomb.

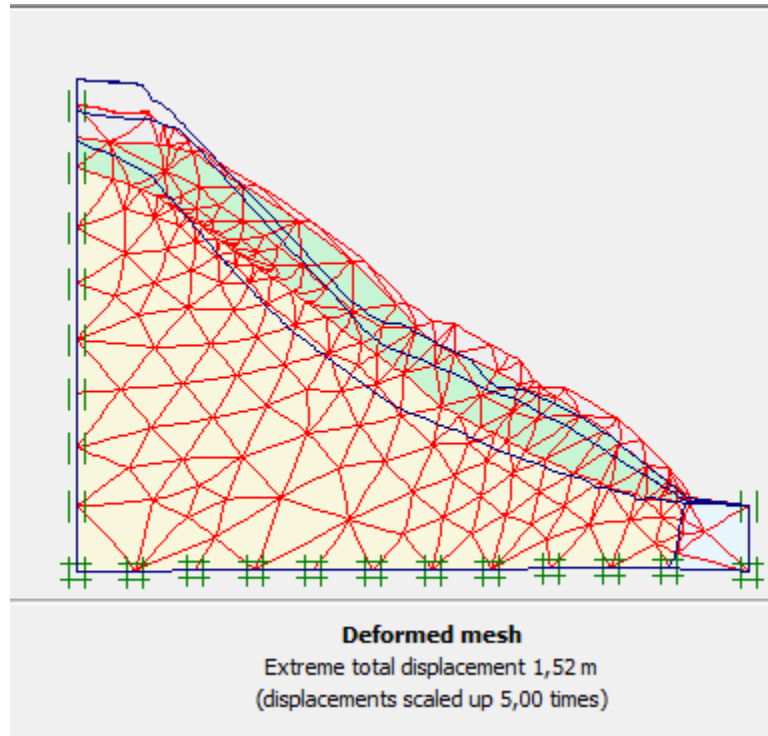
Condiciones naturales del terreno

Figura 33. Deformación de la malla en el talud natural.

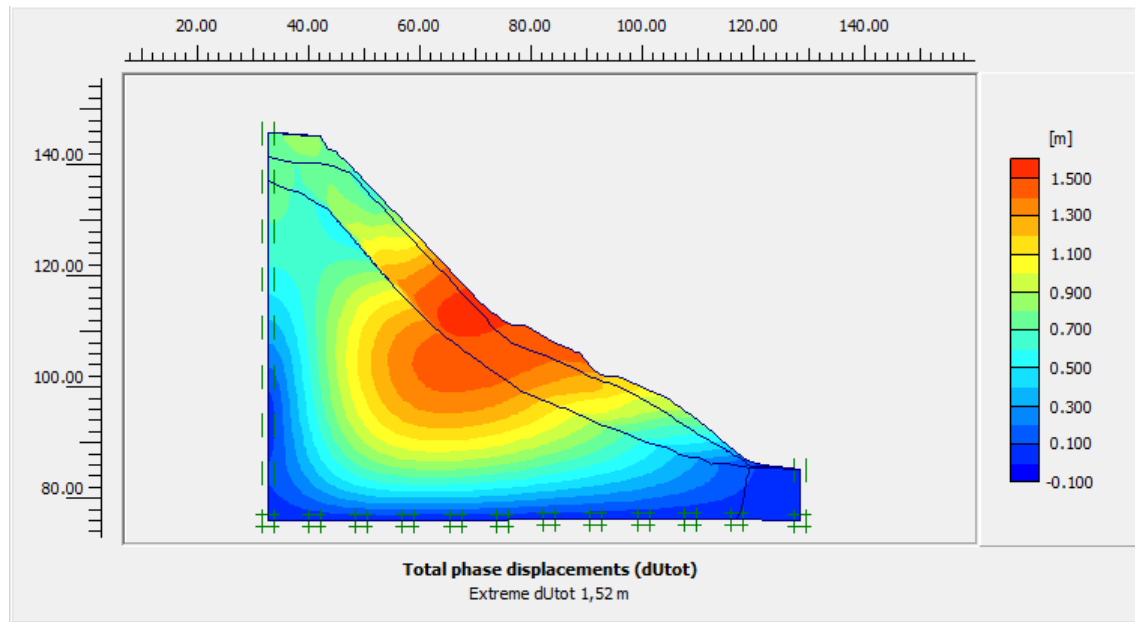


Figura 34. Desplazamientos generados en el talud natural.

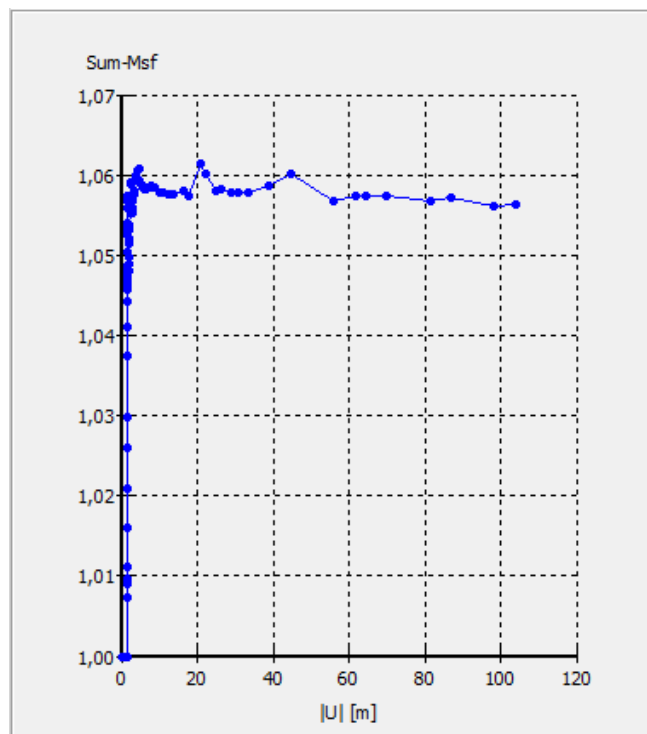


Figura 35. Cálculo de F.S estático en el talud natural utilizando PLAXIS V8.5.

Sé observa que el factor de seguridad es de aproximadamente 1.06, lo cual no cumple con el factor de seguridad mínimo permitido por la NSR-10, por lo tanto a continuación se muestra el resultado del análisis del talud con las diferentes obras propuestas por medio de elementos finitos.

Alternativa 1

Pantalla anclada.

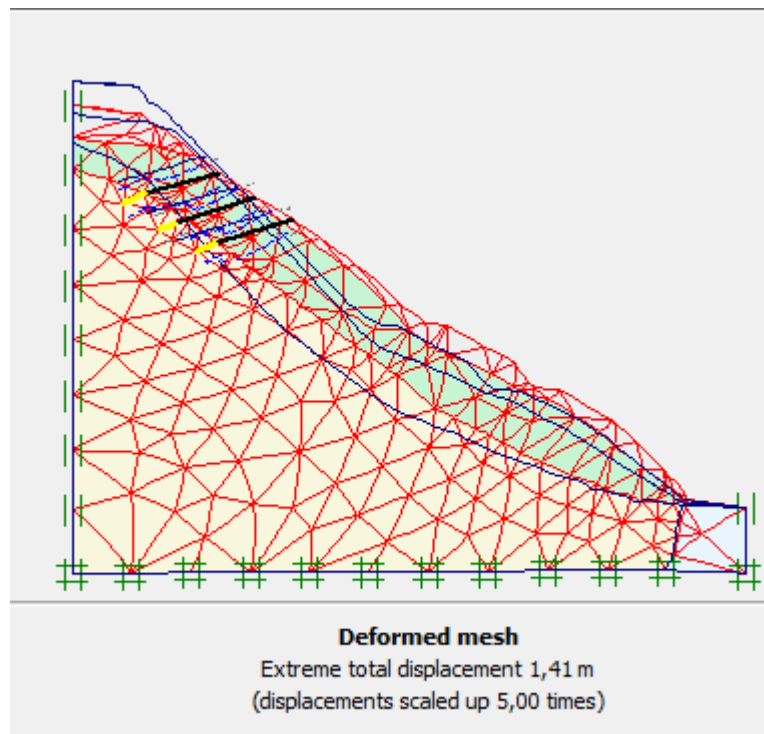


Figura 36. Deformación de la malla en la alternativa 1.

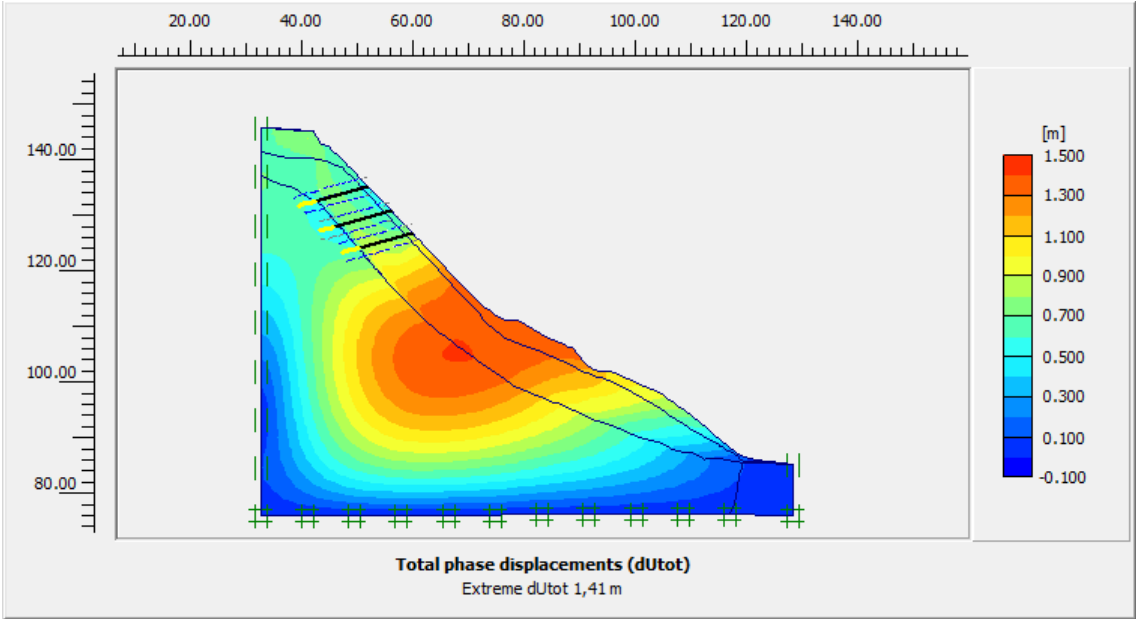


Figura 37. Desplazamientos generados en la alternativa 1.

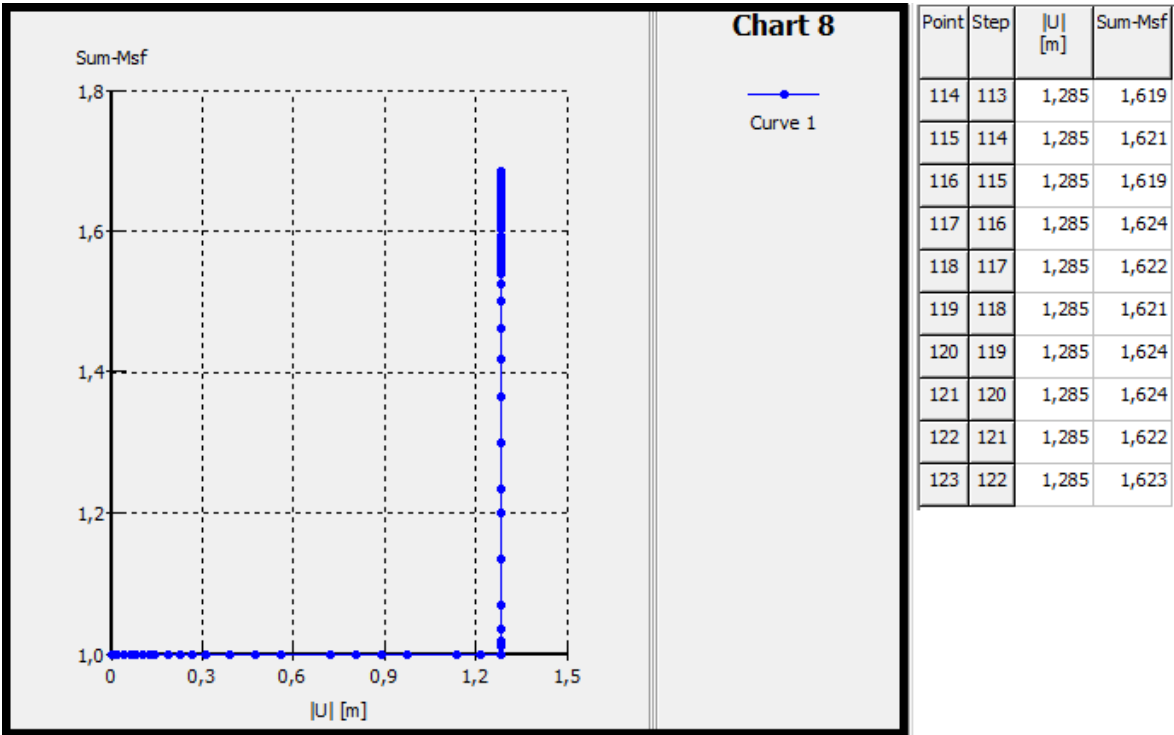


Figura 38. Calculo de F.S estático en la alternativa 1, utilizando PLAXIS V8.5.

Alternativa 2

Cobertura vegetal anclada.

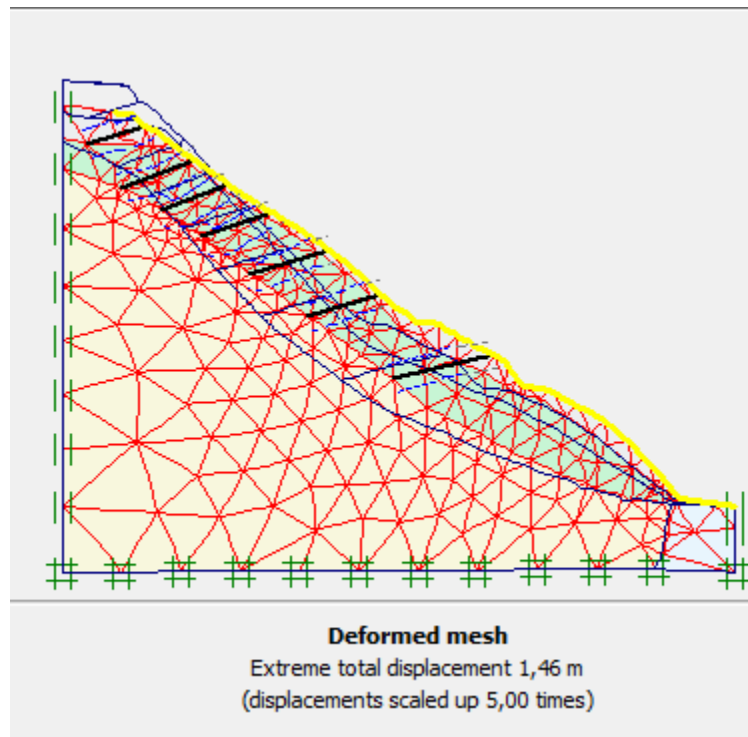


Figura 39. Deformación de la malla en la alternativa 2.

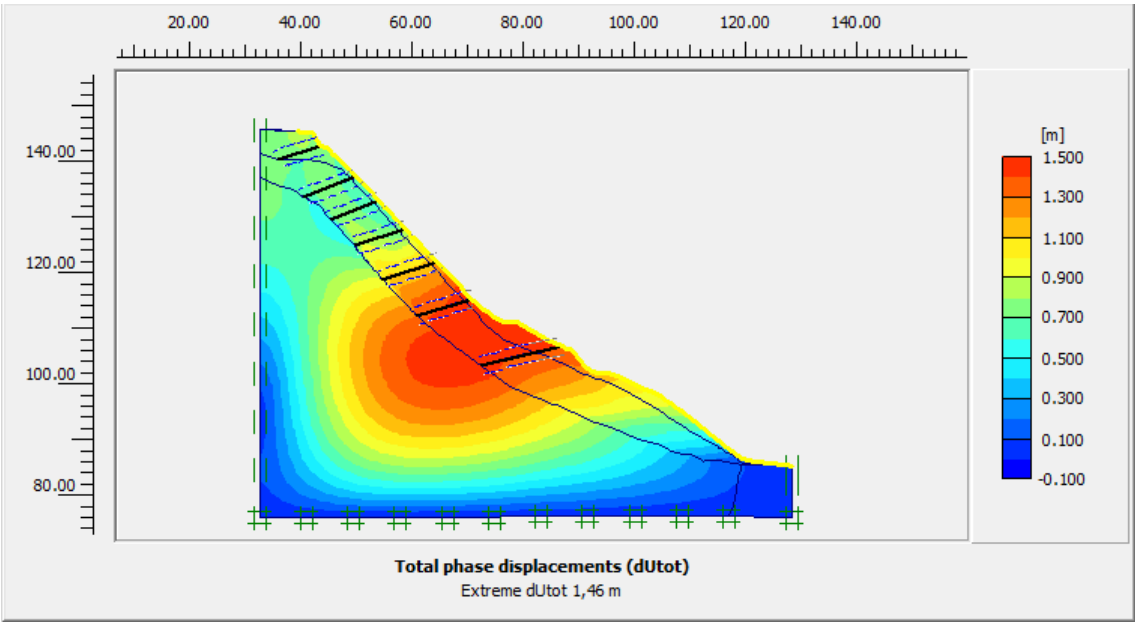


Figura 40. Desplazamientos generados en la alternativa 2.

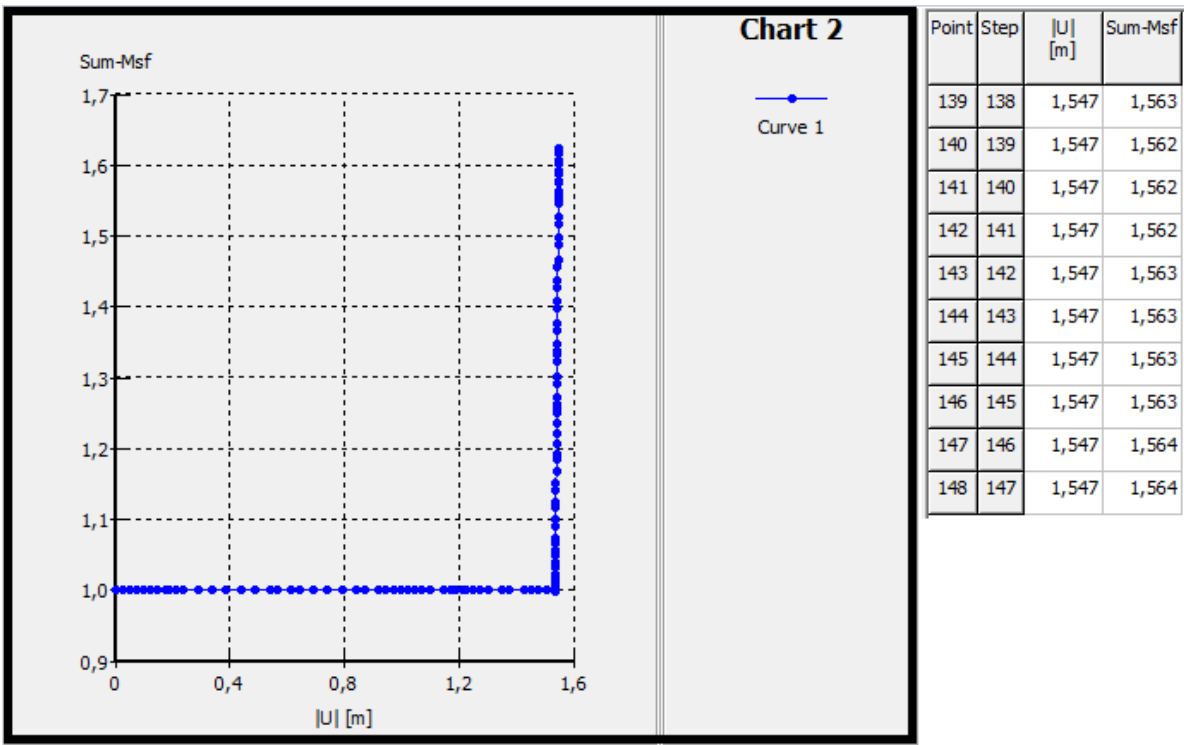


Figura 41. Calculo de F.S estático en la alternativa 2, utilizando PLAXIS V8.5.

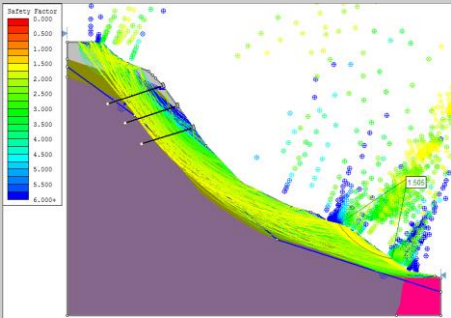
Tabla 21.
Resumen factor de seguridad en las alternativas.

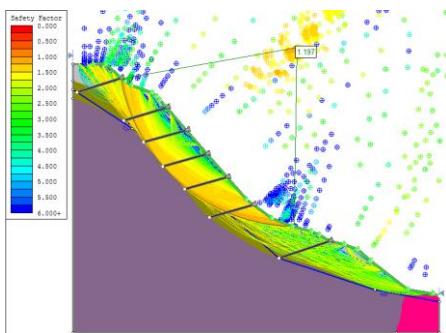
Alternativa	Factor de seguridad
1	1.62
2	1.56

Sé puede observar en las alternativas 1 y 2, pantalla anclada y cobertura vegetal respectivamente, que el factor de seguridad en condiciones estáticas por medio de elementos finitos, cumplen con los factores mínimos permitidos y los desplazamientos se reducen en baja proporción con respecto al talud natural.

15. Discusión

Tabla 22.
Comparación de las alternativas.

Alternativa	Modelo	Descripción	F.S estático	F.S pseudoestático
1		En esta alternativa se plantea realizar una pantalla anclada de aproximadamente 30 cm de espesor, con anclajes activos.	1,505	1,142

Alternativa	Modelo	Descripción	F.S estático	F.S pseudoestático
2		Esta alternativa consta en un sistema de cobertura vegetal anclada, que consiste en todo tipo de manto, textil o malla hechos en geosintéticos de alta resistencia, con la capacidad de brindar soporte a la vegetación (césped) asegurados a la superficie del talud mediante anclajes pasivos los cuales presentan un menor espaciamiento en las zonas más inestables del talud	1,504	1,197

Los factores de seguridad que se tomaron, son los menores calculados por los diferentes métodos utilizados.

Sé observa que las 2 alternativas cumplen con los factores de seguridad mínimos requeridos por la NSR-10.

Debido a esto y junto a los métodos constructivos y económicos, se optó por la alternativa 2, para mitigar los problemas geotécnicos, desprendimientos de rocas y erosión superficial, reforzando la superficie de falla, sumado a los cortes del talud, reconstrucción de la alcantarilla existente, y la elaboración de canales de drenaje, así como la instalación de subdrenes a lo largo del talud de una longitud de 10 metros aproximadamente, para el abatimiento del nivel freático.

16. Fase Constructiva

1ª FASE: Canales de drenaje con sacos revestidos con mortero reforzado con fibras plásticas.

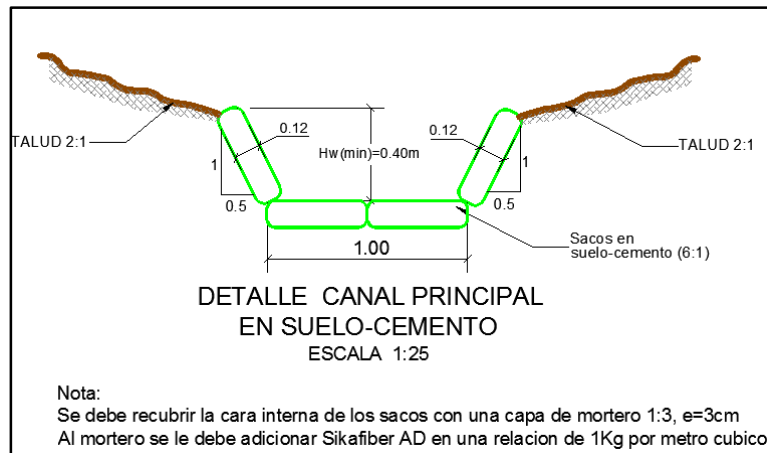


Figura 42. Detalle de canales para manejo y control de escorrentías de aguas lluvias.

Fuente: Propia junto con INGEOEXPLORACIONES.

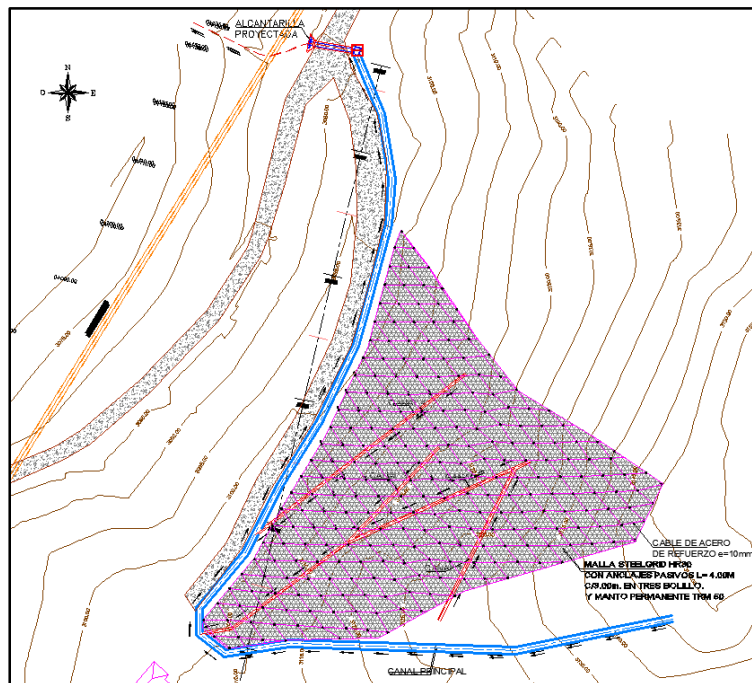


Figura 43. Planos de las obras de mitigación.

Fuente: Propia junto con INGEOEXPLORACIONES.

2ª FASE: Instalación de malla de acero reforzada con guaya de acero y manto para control de erosión permanente.

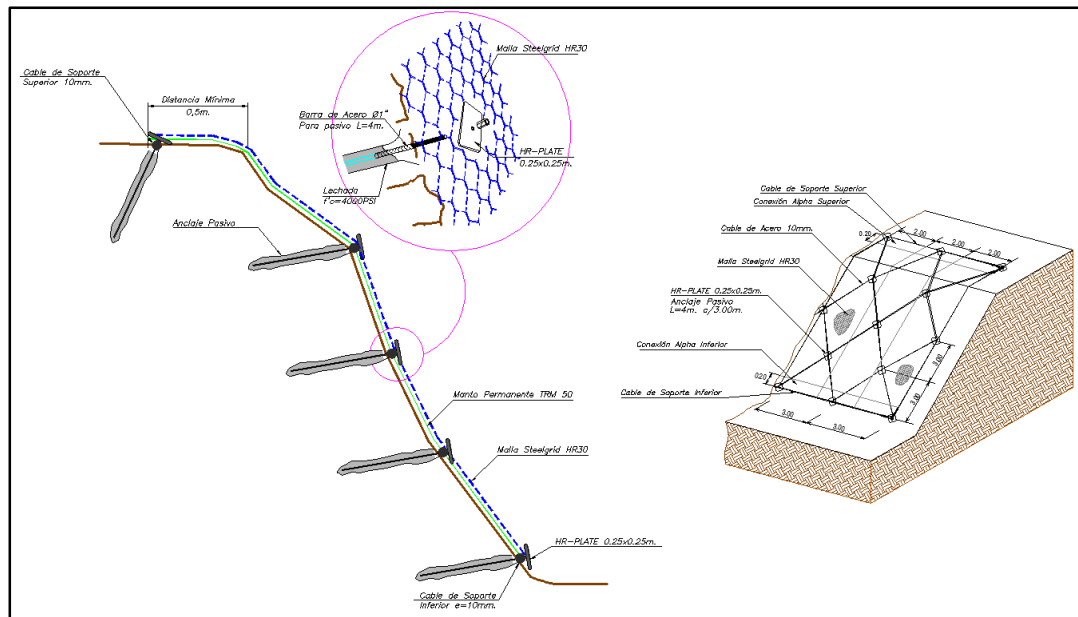


Figura 44. Esquema de obras de mitigación el casino fase 2.

Fuente: Propia junto con INGEOEXPLORACIONES.

17. Presupuesto Preliminar

A continuación se presenta un presupuesto preliminar para las obras de mitigación escogidas, para garantizar la funcionalidad y seguridad del talud en la vía al Casino, municipio de California departamento de Santander.

Tabla 23.

Presupuesto preliminar

ITEM	ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO INCLUYE (A.I.U)	VR. TOTAL
1	Explanaciones				
1,1	Localización, replanteo y control topográfico	M2	3.375,00	\$ 1.535,00	\$ 5.180.625,00
1,2	Excavación manual	M3	250,33	\$ 53.070,00	\$ 13.285.226,44
	TOTAL EXPLANACIONES				\$ 18.465.851,44
2	Estructuras y Drenajes				
2,2A	Concreto de saneamiento de 2000 PSI	M3	4,19	\$ 634.014,00	\$ 2.656.518,66
2,3	Concreto de 3000 psi para estructuras (Incluye transporte)	M3	1,69	\$ 803.001,00	\$ 1.357.071,69
2,4	Concreto para estructuras de 4.000 psi (incluye transporte de insumos)	M3	9,42	\$ 929.127,00	\$ 8.752.376,34
2,5	Malla SteelGrid HR 30/2x25m/tipo 8x10/2,7mm/Galmac 4R+Cable	M2	3.055,53	\$ 153.498,00	\$ 469.017.743,94
2,6	Acero de refuerzo grado 60	KG	1.714,76	\$ 7.033,00	\$ 12.059.871,92
2,7	Perforación y colocación de anclajes pasivos roscados	ML	1.296,29	\$ 218.683,00	\$ 283.476.586,07
2,10	Construcción de canales con Sacos de suelo cemento	UN	3.332,00	\$ 33.838,00	\$ 112.748.216,00
2,11	Mortero ref con fibra plastica	M3	17,00	\$ 689.822,00	\$ 11.726.974,00
2,13	SISTEMA DE REVEGETALIZACION DE TALUDES CON AGROMANTO	M2	138,89	\$ 18.858,00	\$ 2.619.187,62
2,14	Tubería polietileno 36" de alta densidad	ML	6,00	\$ 666.475,00	\$ 3.998.850,00
	TOTAL ESTRUCTURAS Y DRENAJES				\$ 908.413.396,24
3	Obras Varias				
3,1	Instalación Inclínómetros (No incluye monitoreo)	ml	21,00	\$ 334.980,00	\$ 7.034.580,00
3,2	Instalación Piezómetros	ml	21,00	\$ 296.813,00	\$ 6.233.073,00
	TOTAL OBRAS VARIAS				\$ 13.267.653,00
	SUB TOTAL COSTO OBRAS ajustado al \$\$				\$ 941.268.058,40
	SUBTOTAL COSTO OBRAS				\$ 941.268.058,40
	VALOR COSTO DIRECTO DE OBRAS				\$ 724.052.353,00
A.I.U.					\$ 0,30
ADMINISTRATIVOS					\$ 0,20
IMPREVISTOS					\$ 0,05
UTILIDAD					\$ 0,05
I.V.A.					\$ 6.878.497,00
	VALOR TOTAL DE LAS OBRAS				\$ 948.146.555,00

18. Conclusiones

- a. Los fenómenos de inestabilidad observados, están relacionados principalmente a la falta de control de aguas de escorrentía que genera alta erosión en la parte más superficial del talud, por lo cual es importante que se construyan las medidas de drenaje superficial recomendadas y que se realice el trabajo de revegetalización de los taludes.

- b. La implementación de la malla de alta resistencia con anclajes pasivos permite el control de caída de rocas y la erosión en surcos y canales que se observa actualmente, las cuales son generados por las fisuras por relajación de esfuerzos que presenta el macizo rocoso. Así mismo, es importante la protección con el manto permanente, ya que permite la revegetalización del talud, dado la escasa cobertura vegetal que se presenta en la actualidad.
- c. En la vía de acceso se deben ejecutar las obras de drenaje superficial recomendadas con canales de drenaje y la reconstrucción de la alcantarilla existente.
- d. Todas las obras proyectadas en su conjunto aportan para el control y estabilidad del sector, por lo que se deben desarrollar o construir en su totalidad para garantizar un adecuado comportamiento y garantizar la estabilidad y el cumplimiento de la norma NSR10.
- e. Las obras de estabilización son complejas y requieren un seguimiento y monitoreo constante realizando ajustes según las condiciones del terreno.
- f. Se recomienda construir inclinómetros y piezómetros para el control de los movimientos del terreno y la posición del nivel de agua dentro del talud, con esto se valida la efectividad de las obras de mitigación que se construyan.

Referencias Bibliográficas

- Cetina, L. y Patiño, H. (2013) Determinación de los tensores de esfuerzos asociados a la evolución del flanco oeste del anticlinal de los Cobardes, Santander. Bucaramanga. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología.
- Cooper, M., Addison, F., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A., Y Taborda, A. (1995) Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. En: AAPG Bulletin, no. 10. p. 1421–1443. Vol 79.
- Leiva, O. Moya, H. Gonzales, G. Y Carvajal, J. (2012) Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá D. C. 2012. p. 90.
- Martínez, J. y Gutiérrez, G. (2002) Geología estructural y dinámica global. Salamanca. Departamento de Geología Universidad de Salamanca. p. 431.
- Rondon, J., & Torrado, L. M. (2015). <http://ingeassas.com/>.
- Royero, J. y Clavijo, J. (2001) Mapa geológico generalizado departamento de Santander. Memoria explicativa. Escala 1:400.000. Instituto de investigación e informática geocientífica, minero-ambiental y nuclear INGEOMINAS. Bogotá D.C. p. 91.
- Sarmiento, L. Van Wess, J. y Cloetingh, S. (2006) Mesozoic transtensional (Rondon & Torrado, 2015) basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. In: Journal of South American Earth Sciences 21. p. 383–411.
- Suárez, J. (2009) Suelos Residuales en Deslizamientos. Bucaramanga. p. 389-438.

Vallejo, L. Ferrer, M. Ortuño, L. y Oteo, C. (2002) Ingeniería Geológica. Pearson educación. Madrid. 2002. p. 744.

Varnes, D. J. (s.f.) Slope movements types and processes. In: Schuster, R. L. and Krizek, R. J. Landslides analysis and control: National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 176. p. 9 – 33.

Ward, D., Richard, G., Jaime, C., y Hernán, R. (1973) Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona Departamento de Santander. Boletín Geológico. Vol 21. p. 1 – 3.

Apéndices

Apéndice A Glosario

Para el desarrollo de este trabajo se deben tener en cuenta conceptos básicos de geología, ingenieriles y geotécnicos, los cuales se describirán a continuación para un mayor entendimiento de estos, y su posterior aplicación durante el desarrollo de este documento.

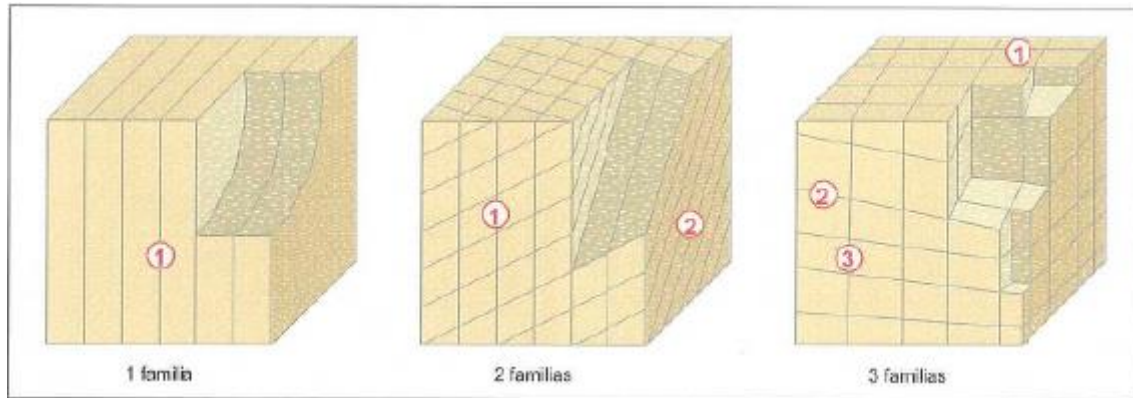
Geomorfología: La geomorfología se especializa en estructural (que atiende a la arquitectura geológica) y climática (que se interesa por el modelado), incorpora las técnicas estadísticas sedimentológicas, en laboratorio y, sobre todo, pierde su aislamiento para convertirse en una ciencia que atiende múltiples factores e inserta el estudio del relieve al conjunto de relaciones naturales que explica globalmente la geografía física. (Duque, 2003).

Geoforma: Una geoforma es un cuerpo tridimensional: tiene forma, tamaño, volumen y topografía, elementos que generan un relieve. En las geoformas se debe identificar su topografía, drenaje, textura, tono, vegetación natural y uso del suelo. Una geoforma está compuesta por materiales que le son característicos: como arenas, gravas, arcilla o cuerpos masivos; tiene una génesis y por lo tanto una dinámica que explica los materiales que la forman. (Duque, 2003).

Deslizamiento: Movimiento perceptible ladera abajo de material rocoso, suelo o relleno artificial por efecto de la gravedad terrestre. Se asocia con superficies de ruptura, falla o una zona delgada de intensa cizalla. (Leiva et al., 2012).

Diaclasas: Discontinuidad planar o curvilinear que se forma como resultado de un proceso de deformación frágil en la corteza terrestre. (Martínez, 2002).

Anexo A-1



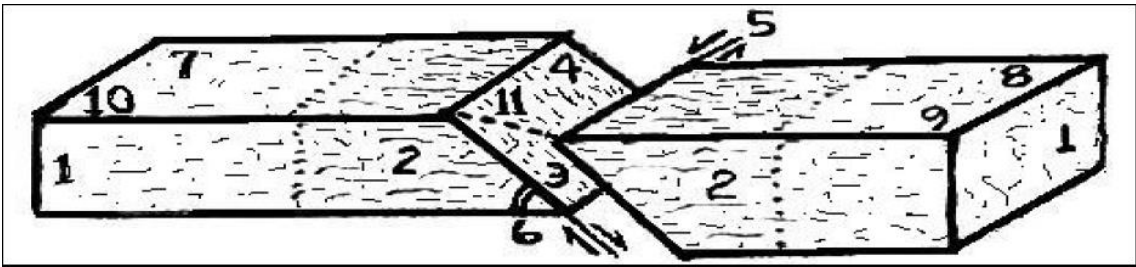
Fuente: Gonzales et al., (2002).

Coluvión: Se define un coluvión como una masa incoherente de materiales sueltos y heterogéneos, de suelo o fragmentos de roca depositados por lavado de la lluvia, reptación o deslizamiento, los cuales comúnmente se depositan en la base de las laderas. El coluvión típico es una mezcla de fragmentos angulares y materiales finos. (Bates y Jackson, 1980, en Suarez, 2009).

Deformación: La deformación es cualquier cambio en la magnitud de una o más dimensiones de un cuerpo como consecuencia de la aplicación de un campo de esfuerzos y puede constar de hasta cuatro componentes: traslación, rotación, dilatación y distorsión (Martínez, 2002)

Fallas: Las fallas son un elemento muy importante de la masa de roca, debido a que en éstas ha ocurrido desplazamiento de las masas de roca. (Suarez, 2009).

Anexo A-2



Fuente: Duque, (2003). 1 Bloques., 2 Labios de falla., 3 Plano de falla., 4 Espejo de falla., 5 Línea de falla., 6 Angulo de buzamiento., 7 Bloque levantado., 8 Bloque hundido., 9 Techo., 10 Piso., 11 Salto real.

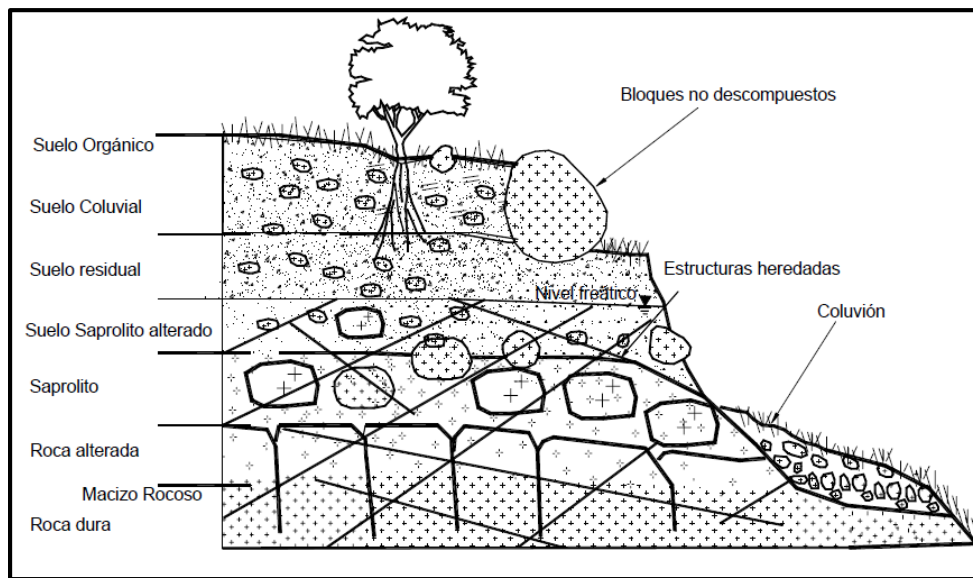
Suelo: Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas: física, química y biológica. (Vallejo, 2002).

PERFIL ESQUEMÁTICO	LOVE (1951) LITTLE (1961)	VARGAS (1951)	SOWERS (1954, 1963)	CHANDLER (1969)	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (1971)
	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS, BASÁLTICAS Y ARENISCAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS
	VI SUELO	SUELO RESIDUAL	ZONA SUPERIOR	V COMPLETAMENTE ALTERADA	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA
	V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL JOVEN	ZONA INTERMEDIA	IV	V COMPLETAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IB
	IV ALTAMENTE ALTERADA	CAPAS DE ROCA DESINTEGRADA	ZONA PARCIALMENTE ALTERADA	III	IV ALTAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IC (SAPROLITO)
	III MODERADAMENTE ALTERADA			II	III MODERADAMENTE ALTERADA	IA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
	II ALGO ALTERADA				II DEBILMENTE ALTERADA	IB PARCIALMENTE METEORIZADA
	I ROCA SANA	ROCA SANA	ROCA INALTERADA	I ROCA INALTERADA	IB MUY POCO ALTERADA	ROCA SANA
					IA ROCA SANA	

Fuente: Vallejos, (2002).

Anexo A-3

Suelos residuales: Los suelos residuales se formaron “in-situ” por la meteorización mecánica y química de las rocas. Estos suelos son muy comunes en las zonas tropicales. (Suarez, 2009).

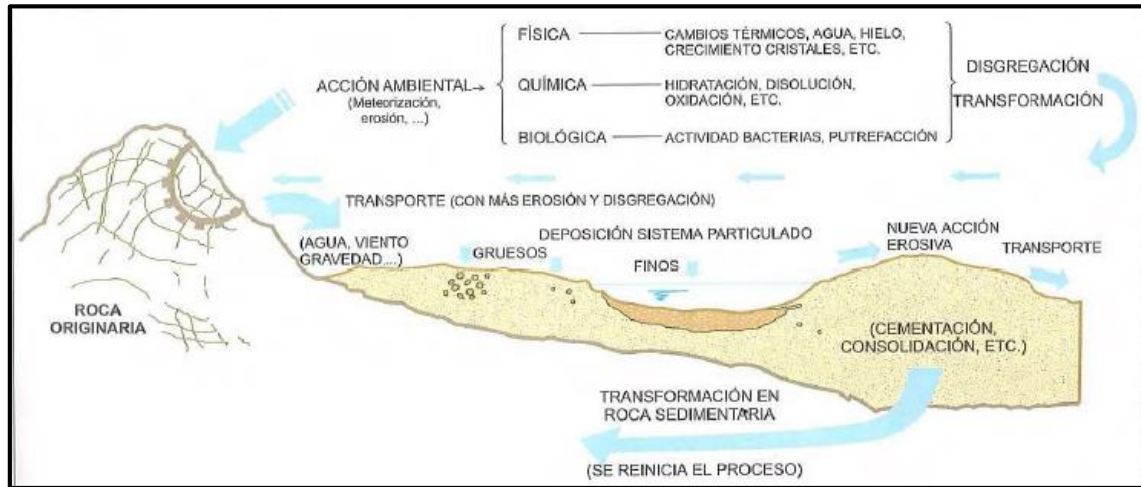


Fuente: Suarez, (2009).

Meteorización física: La meteorización física o mecánica es un proceso de fragmentación, que consiste en que se abren las discontinuidades y se desintegra la roca, formándose nuevas discontinuidades por fracturación; y las partículas se parten, aumentando la relación de vacíos y la permeabilidad y disminuyendo la cohesión. (Suarez, 2009).

Meteorización química: La descomposición puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos principales de meteorización química dependen de los procesos del agua y en algunos casos de la disponibilidad de agua para mantener la química requerida en el proceso. (Suarez, 2009).

Anexo A-4



Fuente: Vallejo, (2002).

Movimientos en masa: Hacen parte de los movimientos en masa aquellos movimientos de suelo o roca inducidos por la acción de la gravedad, donde influyen características como litología, grado de meteorización y disposición estructural de los materiales, también las características topográficas del terreno y el clima imperante que incide en el contenido de humedad de los materiales. Para la clasificación de los deslizamientos se siguen los lineamientos propuestos por Varnes (1978).

Anexo A-5

Clasificación de Movimientos en Masa Según Varnes (1978).

Tipo de movimiento			Rocas	Suelos ingenieriles	
				Gruesos	Finos
CAÍDAS			caída de rocas	caída de detritos	caída de tierras
VOLCAMIENTOS			volcamiento de roca	volcamiento de detritos	volcamiento de tierras
Deslizamiento	rotacional	roca homogénea	hundimiento de rocas	hundimiento de detritos	hundimiento de tierras
	traslacional	heterogeneidad litológica	deslizamiento de bloques de rocas	deslizamiento de bloques de deslizamiento de detritos	deslizamiento de bloques de tierras
		Propagación Lateral		de rocas	de detritos
Flujos			flujo de rocas	flujo de detritos	flujo de tierras
				reptación	
Movimientos Complejos			combinación de dos o más movimientos		

Fuente: Varnes (1978).

Claves para la caracterizar y clasificar movimientos en masa.

(Propuesto por el Servicio Geológico Colombiano 2012)

- **Características morfológicas:** Pendientes cóncavas y convexas, nichos semicirculares, pendientes escalonadas, bloques inclinados, relieve irregular, formación de grietas y cambio súbito de pendiente.

Anexo A-6

- **Características de la vegetación:** Vegetación desordenada y parcialmente muerta, cambios en la vegetación coincidentes con escalones morfológicos, zonas con vegetación menos abundante, (elongadas y claras), diferencia de vegetación dentro y fuera del deslizamiento y cambios de vegetación asociados a condiciones de drenaje.
- **Características del drenaje y medidas de estabilización:** Drenaje desordenado con líneas interrumpidas, anomalías en los patrones de drenaje, zonas de acumulación de agua, zonas de infiltración o nacimientos (tonos oscuros), zonas excesivamente drenadas (tonos claros). Si hay intervención, canalización de aguas y terracetas en pendiente con canales en curvas de nivel
- **Otras características o elementos:** Ausencia de vegetación, escarpes en forma de pinza, concavidades elongadas, depósitos elongados, acumulaciones en quiebres de pendiente, facetas triangulares, cuerpos coalescentes (masas contiguas dislocadas), escarpes elongados y lóbulos de flujo.

Procesos erosivos: La erosión del suelo se manifiesta físicamente por la actividad del agua por medio de tres fases: el arranque de partículas de sedimentos, el transporte de las mismas y finalmente su deposición. (Vallejo, 2002.).

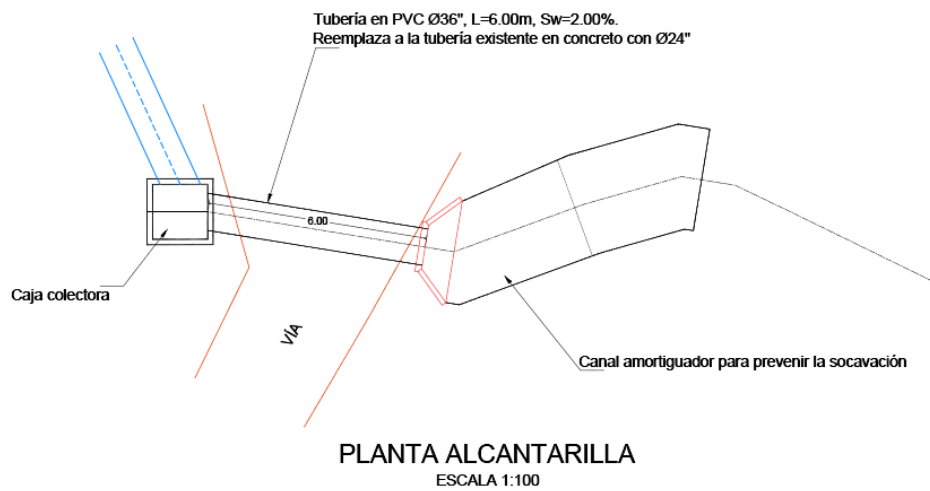
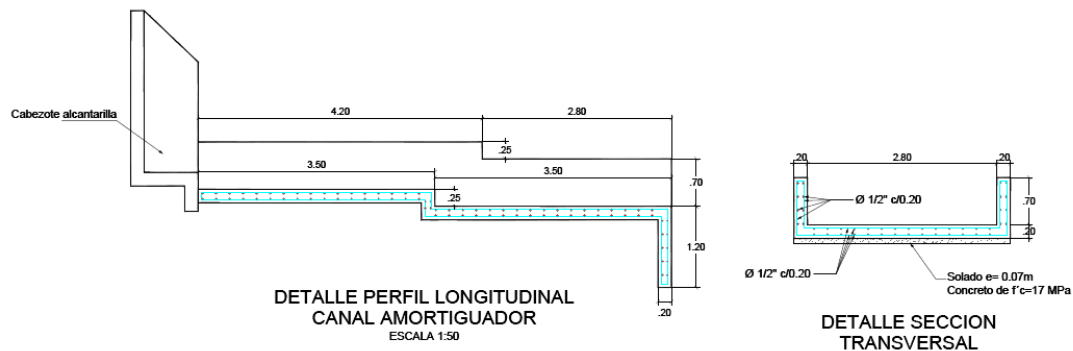
Anexo A-7

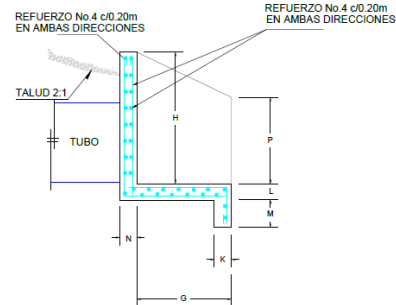
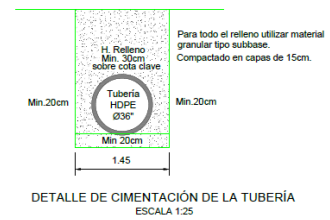
Tabla de Clasificación de Procesos Erosivos.

Tipo de Erosión	Espaciamiento entre Canales					
	< 5m	5 a 15m	15 a 50m	50 a 150m	150 a 500 m	> 500m
Erosión laminar	severa	Moderada	Suave			
surcos (< 50 cm de Prof.)	severa	Severa	Moderada	Suave		
Barrancos (50 - 147 cm de Prof.)	severa	Severa	Severa	Moderada	suave	
Cárcavas (> 150 cm. De Prof.)	severa	Severa	Severa	Severa	moderada	suave

Fuente: Modificado Van Zuidam (1986) en Ingeominas (2004).

Apéndice B Estructuras de manejo de aguas.



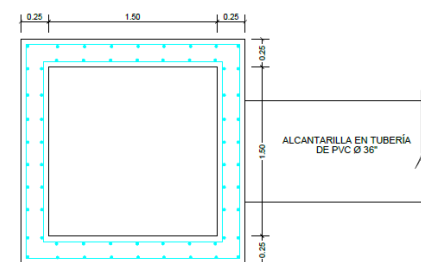
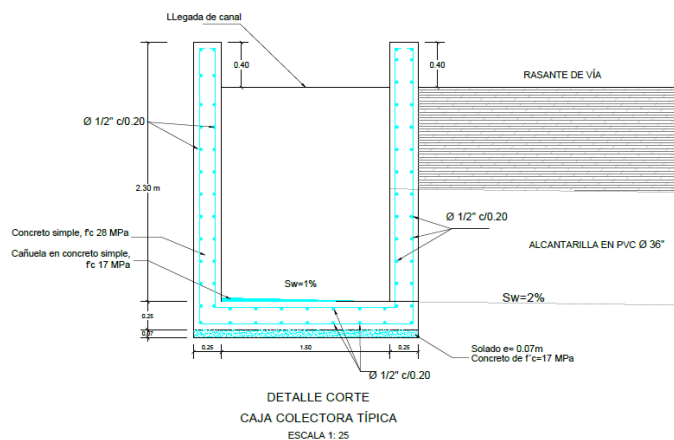


SECCION A-A
SIN ESCALA

DIMENSIÓN DEL CABEZOTE

DIAMETRO Ø mm.	D m	E m	F m	G m	H m	K m	L m	M m	N m	P m	VARILLAS N°
900	0.90	1.20	2.80	0.80	2.35	0.20	0.20	0.70	0.20	1.55	#4

NOTA :
Las medidas se dan en m.
CONCRETO $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$
ACERO $f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$



VISTA EN PLANTA
CAJA COLECTORA TÍPICA
ESCALA 1: 25

**Apéndice C Ensayos de corte directo tomados de estudios preliminares en el sector,
suministrados por INGEOEXPLORACIONES.**

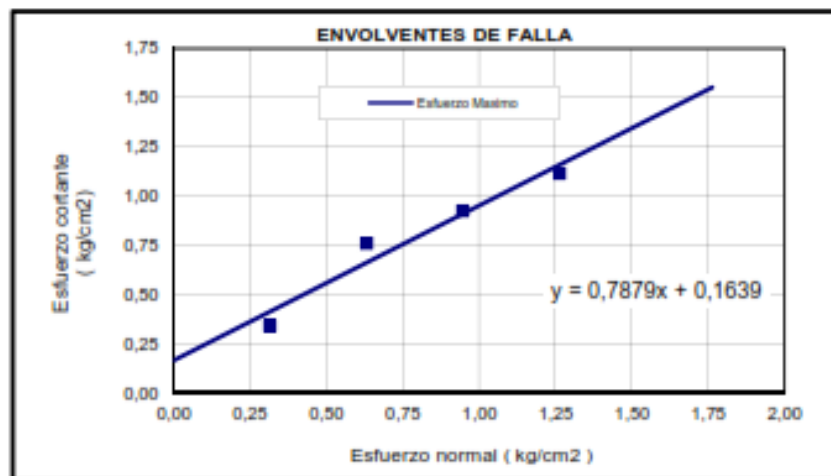
SONDEO	1	Muestra	3	Profundidad	3 mts
---------------	----------	----------------	----------	--------------------	--------------

Descripción del suelo : Arenas limosas, algo húmedas, poco resistentes, muy sueltas, algo permeables, color rojo y gris

Estado de la muestra Alterada ☒ Húmeda ☒
 Inalterada ☐ Saturada ☐

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Prueba Numero	Esfuerzo Normal Kg/cm ²	Esfuerzo Cortante Máximo Kg/cm ²
1	0,316	0,3417
2	0,632	0,7607
3	0,947	0,9255
4	1,263	1,1156



Parámetros	Máximos
Angulo de fricción interna	38,233
Cohesión kg/cm ²	0,164

Anexo C-1

SONDEO	2	Muestra	7	Profundidad	7.5 mts
--------	---	---------	---	-------------	---------

descripción de la muestra: Arenas limosas, algo permeables, sueltas, saturadas, poco resistentes de color marrón y gris con gravas

Estado de la muestra

Alterada

Humeda

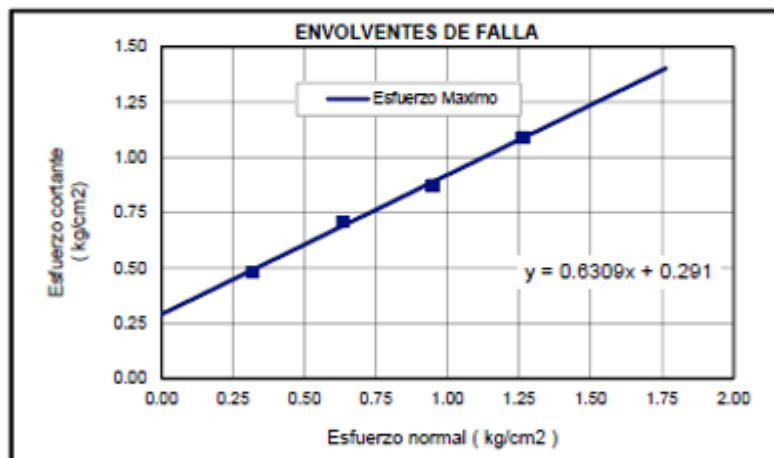
Inalterada

Saturada



RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Prueba Numero	Esfuerzo Normal Kg/cm ²	Esfuerzo Cortante Máximo Kg/cm ²
1	0.316	0.4815
2	0.632	0.7099
3	0.947	0.8748
4	1.263	1.0902



Parámetros	Máximos
Angulo de fricción interna	32.249
Cohesión kg/cm ²	0.291