

**ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD DERIVADO DE CENIZAS
VOLCÁNICAS UBICADO EN LA VÍA CERRITOS LA VIRGINIA.**

Cristian Andrés Grajales Pescador
Andrés Felipe Ramírez Mesa

UNIVERSIDAD LIBRE
Seccional Pereira
Facultad de Ingenierías
Ingeniería civil
2018

**ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD DERIVADO DE CENIZAS
VOLCÁNICAS UBICADO EN LA VÍA CERRITOS LA VIRGINIA.**

Auxiliares de investigación

Cristian Andrés Grajales Pescador

Andrés Felipe Ramírez Mesa

Investigador (es) principal (es)

Alejandro Álzate Buitrago

Gloria Milena Molina Vinasco

UNIVERSIDAD LIBRE

Seccional Pereira

Facultad de Ingenierías

Ingeniería civil
2018

Contenido

Resumen.....	1
Abstract.....	2
1. Introducción.....	3
2. Descripción del problema.....	4
3. Justificación.....	7
4. Objetivos de la investigación.....	8
4.1 Objetivo general.....	8
4.2 Objetivos específicos.....	8
5. Marco de referencia.....	9
5.1 Marco teórico.....	9
5.1.1 Taludes.....	9
5.1.2 Estabilidad.....	9
5.1.3 Drenajes superficiales.....	11
5.1.4 Drenajes profundos.....	11
5.1.5 Estructuras de contención.....	12
5.1.6 Métodos de círculos de falla.....	15
5.1.7 Determinación de esfuerzos efectivos en suelos no saturados.....	19

5.1.8	Croney.....	20
5.1.9	Métodos de determinación de las curvas de retención de agua.	20
5.1.10	Factores que relacionan las curvas de retención de agua con los taludes y sus consecuencias.	21
5.1.11	Humedad superficial.	22
5.2	Marco de antecedentes	23
5.2.1	Inventario, caracterización, evaluación y propuesta de control y mantenimiento de medidas de mitigación y estabilización de taludes adelantados en el municipio de Pereira, durante la década 1999-2009.....	23
5.2.2	Determinación de la curva de retención de agua de suelos granulares usando redes neuronales artificiales.....	24
5.2.3	Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín – Bogotá en el tramo de la vía entre marinilla y santuario.	25
5.2.4	Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas.	26
5.2.5	Efecto de la succión en la estabilidad de un talud de arena limosa.	27
5.2.6	Estabilización de taludes en el río Portoviejo, Ecuador.	28
5.2.7	Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca Cay, Ibagué, Tolima, Colombia.....	28
5.2.8	Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en la duna de recaña.	30

5.2.9	Consideración de fuerzas de filtración en el análisis de estabilidad de taludes granulares.....	31
5.2.10	Colapso por humedecimiento en los terraplenes de la autopista Pátzcuaro-Uruapan. 32	
5.2.11	Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales.....	34
5.2.12	Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación.....	38
5.2.13	Deslizamiento de taludes en el yacimiento kimberlítico de Catoca, Angola.....	39
5.2.14	Caracterización geotécnica de los limos de la terraza del municipio de Olaya, Antioquia, Colombia.	42
5.2.15	Problema geotécnico del km 6 de la autopista Medellín-Bogotá: antecedentes, causas y soluciones alternativas.	44
5.3	Marco conceptual	46
	Talud	46
	Según (Suarez Diaz, 1998) se conoce con el nombre de talud cualquiera superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra. ..	46
	Estabilidad	47
	Presión de poros	47
	La infiltración	47
	Superficie de talud inundada	48
	Infiltración controlada	48

5.4	Marco legal.....	49
	Norma/Ley.....	49
	Investigación de suelos y rocas para propósitos de ingeniería I.N.V. E – 101 – 13.....	49
	Obtención de muestras para probetas de ensayo mediante tubos de pared delgada. I.N.V. E-105-13.....	50
	Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. I.N.V. E – 122 – 13.	50
	Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V. E – 126 – 13.	52
	Determinación de la gravedad específica de los suelos y de la llenante mineral, empleando un picnómetro con agua I.N.V. E – 128 – 13.	53
	Ensayo de compresión triaxial sobre suelos cohesivos. I.N.V. E – 153 – 13.....	54
	Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD). I.N.V. E – 154 – 13.	55
6.	Diseño metodológico.....	56
6.1	Enfoque de la investigación y tipo de estudio.....	56
6.2	Metodología	56
6.2.	Matriz de diseño metodológico.....	1
6.3	Fases y resultados.....	1
	Topografía: perfiles cada metro.....	1
	Sondeos: sondeos en la corona a media ladera y en la base.	1
	Trabajo de laboratorio.	2

7.	Resultados de la investigación.....	55
7.1	Caracterización físico-mecánica de las propiedades de los suelos del talud objeto de estudio	55
7.2	Determinación del esfuerzo efectivo del suelo del talud objeto de estudio, en condiciones no saturadas	56
7.3	Determinación del factor de seguridad del talud objeto de estudio	56
8.	Conclusiones.....	66
9.	Recomendaciones	67
10.	Bibliografía.	69

Listado de Tablas.

Tabla 1.	Ecuaciones de esfuerzos efectivos presentadas por algunos autores.....	20
Tabla 2.	Métodos para determinar las curvas de retención de humedad.	20
Tabla 3.	Cantidad de ensayos de laboratorio.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.	Características físicas y mecánicas del suelo que compone el talud.....	55
Tabla 5.	Propiedades Físico-Mecánicas.	55
Tabla 6.	Esfuerzo efectivo del suelo en estado no saturado	56
Tabla 7.	Comparación factor de seguridad, método numérico vs método software	64

Listado de Figuras.

Figura 1. Fuerzas actuantes en las dovelas.	15
Figura 2. Fuerzas entre dovelas, método Bishop.	16
Figura 3. Factor de corrección por el método de Jambú.	17
Figura 4. fuerzas entre dovelas son paralelas.	18
Figura 5. Inclinación de las dovelas.	18
Figura 6. Clasificación de los suelos finos.	55
Figura 7. Perfil Geológico del talud, para cálculo de factor de seguridad.	57
Figura 8. Distribución de dovelas para análisis matemático del factor de seguridad.	58
Figura 9. Método por Software para análisis de factor de seguridad (GEO 5).	59
Figura 10. Método por Software para análisis de factor de seguridad (GEO 5).	60
Figura 11. Factor de Seguridad, calculado con el software Geo 5	61

Listado de Ecuaciones.

Ecuación 1. Factor de seguridad por el método de Fellenius	15
Ecuación 2. Factor de seguridad por el método de Bishop.	16
Ecuación 3. Factor de seguridad por el método de Jambu.	17

Resumen

En la vía que de Cerritos conduce a la Virginia en el acceso al barrio de Caimalito en el municipio de Pereira capital del departamento de Risaralda, el cual hace parte del eje cafetero, se ubicó el talud objeto de estudio, que debido a condiciones topográficas, características geomecánicas de los suelos que lo conforman, además de factores climáticos, presenta mayormente durante las épocas de invierno deslizamientos, lo cual es evidencia de la inestabilidad y por lo cual es un riesgo para la comunidad y el diferente tránsito que pasa por la vía, de aquí nació el objetivo principal de la investigación, que consistió en realizar el análisis de estabilidad del talud en condiciones parcialmente saturadas, mediante la determinación de las diferentes características físico-mecánicas necesarias para la clasificación del tipo de suelo, y posteriormente para hallar el factor de seguridad, parámetro base para definir la estabilidad del talud. Para ello, se estableció un diseño metodológico que consistió en: primero realizar perfiles topográficos del talud para luego hacer la ubicación de los sondeos, después de realizado lo anterior se prosiguió con la ejecución de los sondeos y extracción de muestras alteradas, inalteradas y parafinación de las mismas para conservación de propiedades in situ, continuando con las fases metodológicas establecidas se llevaron a cabo los diferentes ensayos de laboratorio planteados inicialmente para la obtención de las propiedades físico-mecánicas del suelo y posterior análisis de los datos conseguidos. Se tomaron como guía para la construcción de toda la investigación las normas INVIAS, las cuales plantean las distintas técnicas, instrumentos y metodologías para el desarrollo correcto de la exploración en campo, y luego en cada uno de los laboratorios propuestos para cumplir con el objetivo, y finalmente el desarrollo de los análisis de resultados, de los cuales se pudieron determinar que el talud analizado estaba conformado principalmente por dos estratos predominantes, el primer estrato una arcilla de baja

compresibilidad en una profundidad desde 0 m hasta 5 m de profundidad, y el segundo estrato a partir de los 5 m de profundidad un limo de baja compresibilidad.

Palabras claves: Análisis de estabilidad, suelos parcialmente saturados, infiltración, factor de seguridad.

Abstract

In the way that from Cerritos leads to Virginia in the access to the Caimalito neighbourhood in the Pereira town capital of the Risaralda department, which is part of the coffee axis, was located the slope to study, which due to topographic conditions, geo-mechanical characteristics of the soils that make it up, as well as climatic factors, mostly during the winter periods landslides, which is evidence of instability and which is a risk to the community and the different traffic that goes through the this, is here where the main objective of the research was born, which consisted in carrying out the stability analysis of the slope in partially saturated conditions, by determining the different physico-mechanical characteristics necessary for the classification of the soil type, and later to find the safety factor, basic parameter to define the stability of the slope. For this end, was established a methodological design, which consisted of: first making topographic profiles of the slope and then making the location of the boreholes, after carrying out the foregoing, the continuation of the drilling and extraction of altered, unaltered samples and to paraffin the same for conservation of in situ properties, continuing with the established methodological phases were carried out the different laboratory tests initially planned to obtain the physical-mechanical properties of the soil and subsequent analysis of the data obtained. The INVIAS standards were taken as a guide for the construction of all the research, which propose the different techniques, instruments and methodologies for the correct development of the field

exploration, and then in each one of the laboratories proposed to fulfil the objective, and finally the development of the results analysis, from which it was possible to determine that the analysed slope was composed mainly of two predominant strata, the first stratum a clay of low compressibility in a depth from 0 m to 5 m deep, and the second layer from 5 m deep, a low compressibility slime.

Keywords: Stability analysis, partially saturated soils, water retention curves, infiltration.

1. Introducción

En el acceso al barrio de Caimalito en el municipio de Pereira Capital del departamento de Risaralda, en la vía que de Cerritos conduce a la Virginia, se ubicó el talud objeto de estudio, que debido a condiciones topográficas, características geo-mecánicas de los suelos que lo conforman, además de factores climáticos, presenta mayormente durante las épocas de invierno deslizamientos, lo cual es evidencia de inestabilidad y por lo cual es un riesgo para la comunidad y el diferente tránsito que pasa por la vía. De aquí nació el objetivo principal de la investigación, que consistió en realizar el análisis de estabilidad del talud en condiciones parcialmente saturadas, mediante la determinación de las diferentes características físico-mecánicas necesarias para la clasificación del tipo de suelo, y posteriormente para hallar el factor de seguridad parámetro base para definir la estabilidad del talud. Se tomaron como guía para la construcción de toda la investigación las normas INVIAS, las cuales planteaban las distintas técnicas, instrumentos y metodologías para el desarrollo correcto de la exploración en campo, y luego en cada uno de los laboratorios planteados para cumplir con el objetivo.

El análisis de los taludes son muy importantes, ya que estos generan impactos socio-económicos y se hace necesario llevar a cabo una investigación acerca de las afectaciones que se puedan dar en la estabilidad del mismo para que se produzcan los correspondientes planes en el control del riesgo, además esto permite prevenir muchos desastres ocasionados por el actuar impredecible de la naturaleza o del hombre, ya que casi siempre no se hace la gestión de la información necesaria para conocer si se puede o no construir en ciertas zonas que son muy vulnerables al proceder de los fenómenos de la tierra. Esto causa que se tengan problemas serios que afectan a la sociedad de manera social, económica y ambiental.

Para evitar estas afectaciones y poder realizar un estudio de estabilidad satisfactorio, se debe tener en cuenta algunos factores como las propiedades físico-mecánicas que componen el suelo, porque estas propiedades nos permiten establecer en qué condiciones se encuentra el talud y si genera un riesgo para la sociedad, por ende este trabajo está basado fundamentalmente en conocer dichas propiedades de un talud y establecer el factor de seguridad que nos indique que tan estable es este y cuáles pueden ser las causas.

2. Descripción del problema.

El eje cafetero está situado en la región andina, que se caracteriza principalmente por tener una topografía de ondulada a quebrada, con altas pendientes, y abundantes precipitaciones a lo largo del año, y que dependiendo de la zona del país varía la composición mineralógica de los suelos, en Risaralda son predominantes los suelos derivados de cenizas volcánicas y que pueden llegar a tener un espesor de hasta 70 m de profundidad, lo que determina la importancia de estudiarlos y

analizar su estabilidad puesto que son necesarios para la construcción de las vías, haciendo cortes y terraplenes.

Se situó un talud en la entrada hacia el barrio Caimalito perteneciente al Municipio de Pereira, el cual presenta evidencias manifiestas de inestabilidad, asociadas a las altas pendientes, precipitaciones locales y a las condiciones geo-mecánicas de los materiales aflorantes.

Con la información obtenida en los resultados del análisis del talud, se puede establecer si las características físico-mecánicas de este son óptimas o si se tiene que intervenir para mejorarlas y evitar un colapso del mismo.

Si a futuro se desea realizar un mejoramiento de la vía, con la información recolectada se puede establecer parámetros o medidas para intervenir de mejor forma este talud. Además de ampliar el conocimiento acerca de suelos derivados de cenizas volcánicas.

Con esta información acerca de la estabilidad del talud se genera un impacto social muy grande e importante, porque si a futuro se quiere implementar una expansión de la vía o se requiere hacer otra infraestructura en dicho talud, se tendrán los criterios necesarios para establecer cómo se comportará el suelo y que obras de mitigación se tendrán que realizar para el éxito de la obra, donde se beneficiarán todas las personas de esta comunidad.

Para la realización de la investigación y la obtención de información certera que garantice el cumplimiento de los objetivos es necesario un generar un proceso investigativo que debe estar direccionado de manera correcta hacia la solución de problema, que comprende los aspectos ideológicos y prácticos que debe llevar a cabo el investigador para culminar la investigación de manera exitosa, si no se establece esto no se podrá delimitar el fenómeno que se pretende

estudiar o el objetivo que se quiere lograr, además de tener una organización que permita dar solución al problema planteado.

¿Cuáles son las medidas de mitigación más eficientes para reducir el escenario de riesgo geotécnico de la comunidad, localizada en el sector de Caimalito, Pereira, y principalmente al diferente tráfico que hace uso de la vía?

3. Justificación

Analizando los riesgos antes mencionados y factores de estudio que se presentan a la hora de construir un talud o analizar una ladera natural, vemos que no es sencillo su estabilización y aunque existen métodos basados en la experiencia estos no son muy precisos o no se pueden aplicar como solución de estabilidad a largo plazo porque al pasar del tiempo, las condiciones del clima y de la intemperie pueden variar mucho, y hacen que las condiciones iniciales del talud cambien y se altere el subsuelo, es por esto que siempre a la hora de estabilizar un talud es mejor realizar un estudio del suelo, de las características ambientales en la ubicación del talud y de su topografía para obtener mejores resultados.

Es muy común que a la hora de estabilizar un talud no se realice a fondo el estudio del mismo, y por ende vemos que en algunos casos dichos taludes han provocado deslizamientos, estos traen como consecuencias la pérdida de vidas humanas, restricción del tráfico vehicular y afectación en la economía si está involucrada una vía. Para un ingeniero civil es indispensable tener conocimiento de cómo resolver este problema a largo plazo y tener el criterio para tomar una decisión que tendrá fundamento en estabilizar la ladera para el beneficio de la sociedad.

La teoría acerca de los taludes o laderas naturales en un profesional sea de la ingeniería civil o de otra carrera afín es indispensable ya que se tiene como objetivo primordial velar por la seguridad de las personas y aportar beneficios al desarrollo de la sociedad, y esto ayuda a que un ingeniero civil que lleve a cabo un proyecto pueda garantizar dicha seguridad y más si esta seguridad está ligada a la naturaleza que es tan impredecible a la hora de establecer un criterio en general, el conocimiento de un tema permite que las ideas de los profesionales estén mejor respaldadas y su experiencia permita un mejor y acertado criterio en su objetivo principal y en el caso de la estabilidad de un talud esto es muy importante.

4. Objetivos de la investigación

4.1 Objetivo general.

Realizar el análisis de estabilidad de un talud ubicado en la vía Cerritos la Virginia, en condiciones parcialmente saturadas.

4.2 Objetivos específicos.

- Identificar las características físicas y mecánicas del suelo que componen el talud.
- Determinar el valor del esfuerzo efectivo del suelo en estado no saturado.
- Establecer el factor de seguridad en el talud de estudio.

5. Marco de referencia

5.1 Marco teórico

5.1.1 Taludes

Los taludes por ser una de las estructuras más importantes a la hora de realizar un trabajo ingenieril y por las consecuencias que deriva su falla, exigen un mayor cuidado y estudio para lograr su estabilidad, para que la obra no se vea afectada por el mal análisis de los mismos, por esto el desarrollo de las vías, la expansión de canales entre otras obras provocaron que se hiciera un buen estudio para la estabilidad de los taludes, esto con la ayuda de la mecánica de suelos que apporto normas y criterios de estudio para estos.

En ciertos trabajos de la ingeniería civil es necesario formar taludes de manera artificial como parte de la obra. Tal es el caso de terraplenes en caminos viales, en presas de tierra, canales, etc. Donde se requiere estudiar la estabilidad de este para darle estabilidad a la obra. Este estudio es muy importante ya que un mal cálculo en estos puede provocar el fracaso de la obra. (Perez, 2005, págs. 1-2)

5.1.2 Estabilidad

A diferentes inclinaciones del talud corresponden diferentes masas de material terreo por mover y por ende diferentes costos.

La estabilización de un talud comprende los siguientes factores:

- Determinar los sistemas de estabilidad o combinación de los mismos más apropiados según sea el tipo de talud, los tipos de suelo y todo aspecto que afecte su estabilidad.
- Realizar el diseño de cómo se llevarán a cabo estos métodos sea uno solo o combinados, con ayuda de planos y especificaciones como normas y criterios.

- Llevar a cabo un seguimiento y control después de realizar la estabilización para observar cómo se comporta el talud.

los sistemas de estabilización se pueden clasificar en cinco categorías principales.

Conformación del talud o ladera: dar forma a el talud para lograr en este un equilibrio.

Recubrimiento de la superficie: se recubre el terreno con un material que ayude a evitar infiltración de agua, que evite la erosión superficial o que refuerce la superficie para mayor estabilidad, materiales como concreto o la misma corteza vegetal. (Quintero Figueroa, 2012, págs. 37-40).

Un ejemplo de recubrimiento de la superficie puede ser el recubrimiento con mallas o redes metálicas.

Según (De Matteis, 2003), el sistema consiste en instalar unas mallas y redes metálicas en la superficie del talud esto para evitar o amortiguar el deslizamiento de material o suelo de la superficie de dicho talud. La fijación de dichas mallas contribuye a la consolidación de los estratos del talud. (pág. 38).

Control de agua superficial y subterránea: sistemas que tienden a controlar el agua y sus efectos, disminuyendo la presión que esta ejerce sobre el suelo ya que el agua no carga y produce deslizamientos y más si el tipo de suelo es granular.

Una de las causas principales de deslizamiento en taludes o inestabilidad del mismo es la infiltración de agua y para controlar esta hay que aplicar métodos de drenaje, pero estos métodos no dan una solución a largo plazo ya que no se puede predecir los cambios climatológicos al pasar del tiempo con exactitud.

Las funciones de los drenajes se pueden resumir en las tres siguientes.

- Control del desplazamiento del agua en la superficie del talud.
- Control de la influencia que tiene el agua al infiltrarse en los estratos profundos del suelo.
- Reducción de la presión de poros ejercida en el suelo. (De Matteis, 2003, págs. 38-41)

5.1.3 Drenajes superficiales.

Los drenajes superficiales son esenciales ya que permiten evacuar el agua de escorrentías superficiales.

La escorrentía superficial se puede recoger en canales en forma de U o V y aplicándoles una capa de hormigón o construirlos con tuberías cilíndricas de acero corrugado u hormigón, para evacuar el agua lo más lejos posible de la zona afectada por el deslizamiento.

Los drenajes superficiales pueden situarse en:

- la cara del talud. Bajantes longitudinales en forma de espina de pez.
- En la cresta y el pie del talud. Cunetas o zanjas con una capa de hormigón o materiales que garanticen su impermeabilidad y rellenas con grava para mayor drenaje. (Fariñas & Bermudez, 2002, pág. 239).

5.1.4 Drenajes profundos.

El propósito principal de los drenajes profundos es modificar el régimen de infiltración y con ello modificar el nivel freático.

A continuación, los posibles sistemas de drenes profundos.

- Mantos drenantes. Cuando existe una delgada capa, de no más de 3m de espesor, de terreno saturado y de baja calidad, resulta de gran ayuda cambiar dicha capa por un material que permita mejor drenaje
- Zanjas de drenaje. se construyen zanjas cuando exista un flujo de aguas subterráneas. Cualquier zanja de drenaje debería profundizar más allá del nivel del manto freático. La zanja se suele rellenar con un material permeable.
- Drenes horizontales o californianos. Estos se utilizan cuando la cantidad de agua infiltrada es tanta que resulta muy costoso remover terreno o construir zanjas por lo que se instalan tubos horizontales a través del talud.
- Pozos verticales. Su función es reducir el nivel de las presiones de poro.
Galerías de drenaje. Es un sistema de drenaje que debe ser considerado cuando se necesite desaguar un talud que sea muy amplio, presenta problemas por los elevados costos de construcción. (Fariñas & Bermudez, 2002, pág. 244).

5.1.5 Estructuras de contención.

Métodos en los cuales se transmiten las fuerzas a una estructura que permite distribuir mejor las fuerzas que actúan en el talud y provocan su deslizamiento.

Entre las estructuras de contención encontramos los muros de hormigón ejecutados in situ, este tipo de muros se construyen con hormigón. Se suelen construir en el lugar donde se van a situar definitivamente.

Según se utilice o no armadura, los muros de hormigón se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Muros de hormigón en masa o de gravedad.

- Muros de hormigón armado.

5.1.5.1 *Muros de hormigón en masa o gravedad.*

En este tipo de muros el propio peso actúa como elemento estabilizador.

Los inconvenientes de este tipo de obras son principalmente que, si tenemos un tipo de suelo arcilloso este se ira asentando, lo que no es apropiado y otro problema es que son muy costosos (Fariñas & Bermudez, 2002).

5.1.5.2 *Muros de hormigón armado.*

Son muros armados interiormente con acero y se le agrega el acero para que soporte mejor los esfuerzos de tracción.

Estos exigen menor cantidad de hormigón que los muros en masa.

Tipos más comunes:

- De semi-gravedad. Similar al de gravedad, pero ligeramente armado.
- Con contrafuerte en el intradós. Muro de gravedad aligerado, ligeramente armado.
- Con contrafuerte en el trasdós. Es una variante del caso anterior, pero el contrafuerte queda oculto contra la cara del talud.
- Con plataforma estabilizadora. El empuje de las tierras se contrarresta con una plataforma estabilizadora situada en el trasdós.
- De bóvedas horizontales. Presenta características similares al anterior.

5.1.5.3 *Muros de fábrica.*

Son muros de piedras naturales ejecutados de forma natural.

Muros jaula. Básicamente son estructuras compuestas por cajas de madera que forman una jaula y que posteriormente se rellenan con materiales granulares, incrementando así la resistencia del talud.

Mejoramiento del suelo: Mejoramiento del suelo: métodos que aumentan la resistencia del suelo. Se puede mejorar el suelo mezclándolo con otro tipo de suelo, agregándole productos químicos o productos que mejoren las propiedades del mismo según sea la necesidad.

Algunos tratamientos para mejorar las características físico-químicas del terreno son:

Tratamientos químicos. Los tratamientos más utilizados han sido las inyecciones de cementos portland, cloruros cálcicos, inyecciones de cal y las cenizas.

Tratamientos eléctricos. Otra técnica especial que incrementa la resistencia al corte de los suelos es la denominada como electroósmosis. El tratamiento consiste en drenar el agua infiltrada en el talud no con ayuda de la gravedad sino por la electricidad que atrae las moléculas de agua.

Tratamientos térmicos. Los tratamientos de altas temperatura secan los materiales arcillosos, provocando el pegado de las partículas y como consecuencia se incrementa la estabilidad del terreno. El método consiste en la perforación de dos barrenos, donde se conduce aire y se calienta el suelo mediante combustible.

Como tratamiento térmico además del calentamiento, también se debe considerar el proceso opuesto, es decir, la congelación del terreno. Esta técnica ha resultado ser muy efectiva para la estabilización temporal de grandes excavaciones o de túneles (Fariñas & Bermudez, 2002).

5.1.6 Métodos de círculos de falla.

5.1.6.1 Método Ordinario de Fellenius.

Es conocido también como método sueco, método de las dovelas o método U.S.B.R (*Figura 1*). este método toma superficies de falla circulares, divide el área de la falla en tajadas verticales, consigue las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo se obtiene el factor de seguridad, el cual se halla con la *Ecuación 1*.

(Suarez Diaz J. , 2009, pág. 153)

Ecuación 1. Factor de seguridad por el método de Fellenius

$$F.S. = \frac{\sum [C' \Delta l + (W \cos \alpha - u \Delta l \cos^2 \alpha) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha}$$

Fuente. SUAREZ Jaime. 2009, Pág 153.

Donde:

α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

W = Peso total de cada tajada. μ

μ = Presión de poros = $\gamma_w \cdot h_w$.

Δl = Longitud del arco de círculo en la base de la tajada.

$C' \phi'$ = Parámetros de resistencia del suelo.

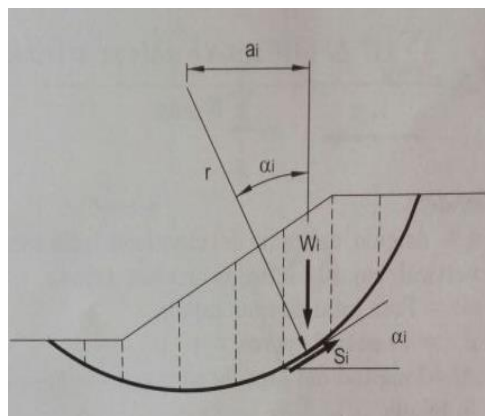


Figura 1. Fuerzas actuantes en las dovelas.

Nota: Se presenta la descripción del método de dovelas.

Fuente: SANTANDER, U industrial de Santander. Deslizamientos, análisis geotécnico, Suarez Díaz, 2009, pág. 153.

5.1.6.2 Método de Bishop.

“Este método utiliza las dovelas, teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. Bishop toma que las fuerzas entre dovelas son horizontales, quiere decir, que no toma en cuenta las fuerzas de cortante, como se puede ver en la Figura 2. Este sistema solo admite superficies circulares, aunque el método solo satisface equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos con respecto al método ordinario. El factor de seguridad se puede hallar con la Ecuación 2”.

(Suarez Diaz J. , 2009, pág. 155)

Ecuación 2. Factor de seguridad por el método de Bishop.

$$F.S. = \frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W' - u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\sum W_i}$$

Fuente. SUAREZ Jaime. 2009, pag 155.

Donde:

Δl = Longitud del arco de círculo en la base de la tajada.

$c' \phi'$ = Parámetros de resistencia del suelo.

α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

W = Peso total de cada tajada. μ

μ = Presión de poros = $\gamma_w h_w$.

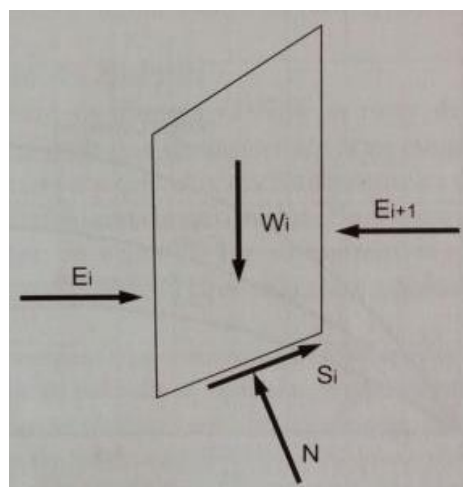


Figura 2. Fuerzas entre dovelas, método Bishop.

Fuente: SANTANDER, U industrial de Santander. Deslizamientos, análisis geotécnico, Suarez Díaz, 2009, pág. 155.

5.1.6.3 Método de Janbú.

El método simplificado de Janbú supone que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tiene en cuenta las fuerzas de corte. Este método toma en cuenta que las superficies no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección f_o , el factor f_o depende de la curvatura de la superficie de falla, como se muestra en Figura 3.

En algunas ocasiones el asumir el factor de corrección provoca inexactitud en el cálculo del factor de seguridad, que se calcula con la *Ecuación 3*. No obstante, en otros casos la consideración de este factor representa el mejoramiento del análisis (Suarez Diaz J. , 2009, pág. 156).

Ecuación 3. Factor de seguridad por el método de Jambu.

$$F.S. = \frac{f_o \sum \left\{ [c'b + (W - ub) \tan \phi] \frac{1}{\cos \alpha \, ma} \right\}}{\sum (W \tan \alpha)}$$

Fuente. SUAREZ Jame. 2009, pág 156.

Dónde:

f_o = factor de corrección que depende de la curvatura de la superficie de falla

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

b = ancho de la dovela.

W = peso de cada dovela.

$C' \phi'$ = Parámetros de resistencia del suelo.

α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

μ = Presión de poros = $\gamma_w h_w$.

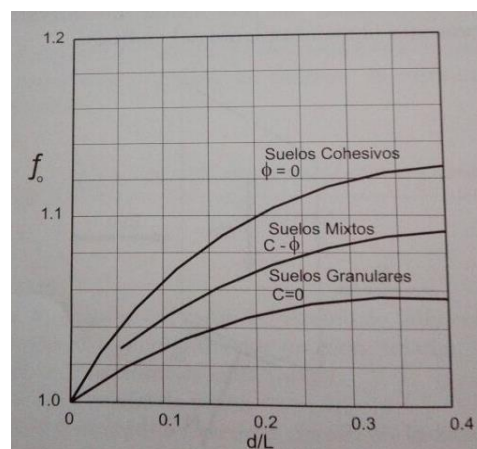


Figura 3. Factor de corrección por el método de Jambú.

Fuente: SANTANDER, U industrial de Santander. Deslizamientos, análisis geotécnico, Suarez Díaz, 2009, pág. 156.

5.1.6.4 Método sueco modificado.

En este sistema de análisis la inclinación en las fuerzas entre dovelas es seleccionada por el analista y tiene igual valor para cada una de las dovelas.

Este método recomienda que la inclinación debe ser igual al promedio de la pendiente del talud.

Este análisis satisface el equilibrio de fuerzas, pero no satisface el equilibrio de momentos.

(Suarez Diaz J. , 2009, pág. 156).

2.2.1.1 Método de Spencer.

La inclinación específica de las dovelas es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Inicialmente el método fue propuesto para superficies circulares, pero fácilmente se puede extender a superficies no circulares (Figura 4)

Es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, o sea que tiene el mismo ángulo de inclinación, como se ilustra en la Figura 5. (Suarez Diaz J. , 2009, págs. 156-157)

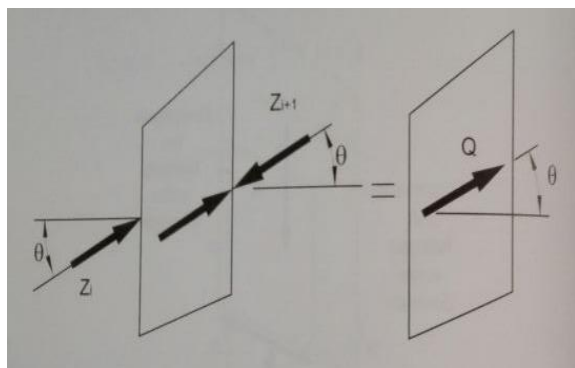


Figura 4. **fuerzas entre dovelas son paralelas.**

2009, pág. 156.

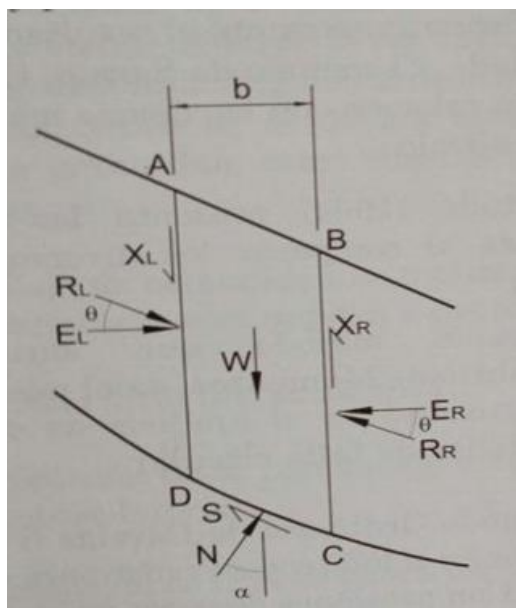


Figura 5. **Inclinación de las dovelas.**

Fuente: SANTANDER, U industrial de Santander. Deslizamientos, análisis geotécnico, Suarez Díaz, 2009, pág. 157.

5.1.6.5 Método de Morgenstern y Price.

Este sistema de análisis asume una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas.

La función puede considerarse constante como en la de Spencer, pero también puede tomar otro tipo de función. La posibilidad de tomar demás funciones para hallar los valores de las fuerzas entre las dovelas lo hace un método más riguroso, más sin embargo el impacto sobre el análisis de factor de seguridad es muy poco en comparación con el método anterior. Este método como el de Spencer son muy precisos y son aplicables a todas las geometrías y perfiles del suelo. (Suarez Diaz J. , 2009, pág. 157).

5.1.7 Determinación de esfuerzos efectivos en suelos no saturados.

El comportamiento de resistencia y variaciones en el volumen de suelos saturados esta controlados por los esfuerzos efectivos, no obstante, en el caso de los suelos no saturados no ha sido posible clarificar este argumento. No existe una ecuación de esfuerzos efectivos para los suelos no saturados que sea aplicable a todos los tipos de suelos. Bishop planteo una ecuación para esfuerzos efectivos para suelos no saturados, esta ecuación contiene el parámetro χ ; para obtener este factor existen varias ecuaciones, pero ninguna incluye todos los casos. Por otra parte, en la mecánica de suelos se ha considerado que la resistencia al corte de los suelos finos se incrementa con la succión; aunque, esto no sucede con todos los tipos de suelos. (Leal Vaca & Gallegos Fonseca, 2010, pág. 1).

En la *Tabla 1* se ilustran las ecuaciones para obtener los esfuerzos efectivos presentadas por diversos autores. Existen algunos suelos cuya resistencia alcanza un máximo para cierta succión y luego se reduce para valores mayores de succión, no obstante, tales casos aún no han sido completamente documentados y analizados.

Tabla 1. Ecuaciones de esfuerzos efectivos presentadas por algunos autores.

EXPRESION	COMPONENTES	REFERENCIA
$\sigma' = \sigma - \mu a + X (\mu a - \mu w)$	X= parametro relacionado cono el SR. U= presion de gas y fase de vapor	BISHOP (1959)
$\sigma' = \sigma - \beta' \mu w$	β = factor de union	CRONEY (1958)
$\sigma = \sigma - \alpha m + \mu a a a + \mu w \mu w + R - A$	a_a = fracion del area total que esta en contacto coon el aire-aire	LAMBE (1960)
$\sigma' = \sigma - \Psi p''$	Ψ = parametro de cero a uno. P'' = presion de poro-agua negativa	AITCHISON (1961)
$\sigma' = \sigma - \beta p''$	β = factor estadistico	JENINGS (1961)
$\sigma = \sigma \mu a + X_m (h_m + \mu a) + X_s (h_s + \mu a)$	X_m = parametro de esfuerzo efectivo (succion matricial). h_m = succion matricial. X_s = parametro de esfuerzo efectivo (succion soluto). h_s = succion soluto	RICHARD (1966)

Fuente: Sanfandila, Qro, Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres, Barrera b and Garnica A, 2002, pág. 57.

5.1.8 Croney

En la ecuación presentada por Croney el σ' es el esfuerzo normal efectivo, σ es el esfuerzo normal total, β' es un factor de unión, que representa una medida del número de vínculos bajo tensión entre las partículas y uw es la presión de poro. (Barrera and Anguas, 2002, pág. 23)

5.1.9 Métodos de determinación de las curvas de retención de agua.

A continuación se presenta en la

Tabla 2 algunos de los métodos utilizados para la determinación de las curvas de retención de agua (Gomez Castro, 2009, pág. 9).

Tabla 2. Métodos para determinar las curvas de retención de humedad.

METODOS PARA SUELOS EQUILIBRADOS A UN POTENCIAL MATRICO CONOCIDO	succiones 0-1500 kpa	metodos de succion	embudo de Bucher	
			plato de poros de succion	
			tabla de succion de arenas	
			metodos de presion de gas	plato extractor de presion
				aparato de membrana de presion
	succiones >1 500kPa	membrana de presion		
		transferencia de vapor		
osmosis				
otros metodos de laboratorio	consolidacion			
METODOS DE MEDICION DIRECTA	papel de filtro			
	psicrometro			
	metodos de campo			
METODOS BASADOS EN MODELOS	funciones de pedotransferencia			
	modelos fractales de la estructura del suelo			

Fuente: Bucaramanga, U industrial de Santander, Escuela de ingeniería civil, Determinación de la curva de retención de agua de suelos granulares usando redes neuronales artificiales, GOMEZ CASTRO A, 2009, pág. 9.

5.1.10 Factores que relacionan las curvas de retención de agua con los taludes y sus consecuencias.

El agua es el factor que más comúnmente se le asocia con las fallas de los taludes en zonas tropicales, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de las lluvias fuertes o

durante periodos lluviosos y el control de agua subterránea es uno de los sistemas más efectivos para la estabilización de deslizamientos. (Suarez Diaz, 1998, pág. 233)

Hacer los estudios respecto al comportamiento del ciclo hidrológico es un conocimiento de gran valor para determinar las diferentes opciones de control de riesgo, los cuales son originados por los cambios de contenido de humedad debidos a las precipitaciones, que pueden variar tanto en su cantidad, duración y fortaleza, que determinan diferentes reacciones en el suelo.

5.1.11 **Humedad superficial.**

La humedad de la superficie del terreno determina factores tales como los porcentajes de escorrentía e infiltración y en algunos casos el comportamiento de los taludes.

La humedad superficial está controlada por:

- a) Características topográficas de la pendiente del terreno.
- b) Tipo de suelo.
- c) Características climáticas.
- d) Vegetación.

Estas condiciones que establecen los procesos de escorrentía e infiltración, son importantes a la hora de determinar las curvas de retención de agua y sus posibles variaciones, pues dependen de la forma como interactúan las condiciones topográficas y el tipo de suelo cuando hallan precipitaciones o no. (Suarez Diaz, 1998, pág. 236)

5.2 Marco de antecedentes

5.2.1 **Inventario, caracterización, evaluación y propuesta de control y mantenimiento de medidas de mitigación y estabilización de taludes adelantados en el municipio de Pereira, durante la década 1999-2009.**

El propósito de esta investigación es hacer inventario, caracterización, evaluación, estado y vida útil de las medidas de mitigación y/o estabilización de taludes ejecutados en el municipio de Pereira, durante la década 1999-2009, de igual manera adelantar el inventario de obras y medidas de mitigación y/o estabilización de taludes ejecutadas en el perímetro urbano del municipio de Pereira, durante la última década.

Los estudios descriptivos únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre conceptos o las variables a las que se refieren, esto es su objetivo, no es indicar como se relacionan estas variables medidas. (Quintero Figueroa, 2012, pág. 33)

Durante el proceso se desarrollaron las siguientes actividades metodológicas.

- Selección y planeación del universo de datos a partir de las bases de datos suministrado por el FOREC, municipio de Pereira y CARDER, ello posibilitó la definición del plan de acción de las visitas realizadas.
- Ejecución de visitas a los sitios seleccionados.
- Procesamiento de información recolectada en campo, como, por ejemplo.
Localización, tipología, estado, geometría, cuantificación de longitudes y volúmenes, entre otros aspectos.
- Georreferenciar cada obra de mitigación asociada a la información recolectada en campo.

- Manejo estadístico de las variables halladas en campo.
- Evaluación de las obras bajo los estándares de la normatividad vigente.
- Elaboración de protocolo para proyectos de estabilización según normatividad.
- Conformación de manual y mantenimiento de obras de estabilización de acuerdo a estándares y experiencias obtenidas durante todo el proceso investigativo.
- Mantenimiento periódico a las estructuras de desagüe para que el talud no tenga que asumir la responsabilidad de contener el agua que se desborda saturándose considerablemente.
- Se analizaron algunas estructuras en concreto y mampostería que presentaban fisuras muy pronunciadas y deterioradas, es importante que se realice una revisión periódica a estas para evitar posibles colapsos inesperados como ocurrió con un ejemplar que colapso antes que fuera visitado.
- De igual manera es importante que el sitio estabilizado cuente con repoblamiento vegetal adecuado que actúe con la acción erosiva que causa la lluvia, es recomendable propiciar características deseables en el suelo, también se debe tener presente de no incluir especies arbóreas en los programas de estabilidad de taludes, por su elevado peso. (Quintero Figueroa, 2012, págs. 80-81)

5.2.2 Determinación de la curva de retención de agua de suelos granulares usando redes neuronales artificiales.

El fundamento principal de este estudio es proponer un método que se aproxime a la realidad o mejor o por lo menos de la misma forma que los métodos propuestos hasta ahora.

El camino de se utilizó para cumplir los objetivos, fue desarrollar un marco teórico sobre las curvas de retención de agua en suelos, con sus principales características y métodos de

determinación. Luego se describió que son las redes neuronales artificiales, su funcionamiento, los algoritmos y arquitecturas más comunes. (Gomez Castro, 2009, págs. 1-2)

Según (Gomez Castro, 2009) en toda la investigación expuesta se demostró que las redes neuronales artificiales dan buenos resultados con porcentajes de error de ajustes muy bajos, tanto para los datos de laboratorio como para los datos de modelos teóricos (pág. 49).

5.2.3 Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín – Bogotá en el tramo de la vía entre marinilla y santuario.

La finalidad de esta investigación está dirigida en obtener el factor de seguridad y adicionalmente la probabilidad de falla, el índice de confianza y el parámetro del suelo de mayor peso en la estabilidad, con el fin de determinar el talud de corte más seguro en la ejecución de este tramo de vía. (Escobar Toro & Valencia Gonzales , 2011, pág. 52)

La metodología desarrollada fue obtener las muestras para la determinación de los diferentes parámetros geotécnicos, que fueron colectadas en el horizonte residual a una profundidad con relación a la superficie del terreno de 15m por debajo de la capa orgánica. La selección de cada sitio y horizonte de suelo a estudiar obedeció a que visiblemente presentaran características de avanzado estado de meteorización, facilidad de acceso y principalmente, a que en cada uno de ellos se originan suelos provenientes de rocas provenientes de la región.

Con respecto a los resultados, la disminución de la resistencia en los suelos de los taludes está dada por las pérdidas en la cohesión y las perdidas en el valor de succión el pasar del estado natural al estado saturado.

Es importante darse cuenta que, a pesar de obtener resultados de factores de seguridad en algunos casos mayores de 1, no significa que sus posibilidades de ruptura sean menores de 1% (Escobar Toro & Valencia Gonzales , 2011, págs. 62-63).

5.2.4 Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas.

Es objetivo para esta investigación fue proponer una metodología para determinar el efecto de la saturación en la estabilidad de taludes, utilizando los conocimientos sobre el flujo de agua, la resistencia y estabilidad de taludes en suelos no saturados.

En el sitio se realizó la extracción de dos muestras inalteradas representativas del suelo que conforma el cuerpo del talud. Se le hicieron todas las pruebas de laboratorio pertinentes para luego realizar una modelación del comportamiento mecánico del talud antes y durante el periodo de lluvias utilizando dos programas de cómputo especializados. El primero para simular el flujo de agua en los suelos no saturados y el segundo en el análisis de la estabilidad de taludes.

Por medio de algunas pruebas de laboratorio y el análisis de la estabilidad estructural del talud, se ha podido establecer la relación entre el grado de saturación del suelo y el factor de seguridad del talud analizado.

Este análisis demuestra que el humedecimiento del suelo fue la causa del deslizamiento de tierra en la comunidad de San Juan de Grijalva, Chiapas.

Aquellos taludes susceptibles al deslizamiento y que ponen en peligro vidas humanas es conveniente protegerlos contra el humedecimiento excesivo. Esto se puede realizar mediante la colocación de drenes y/o membranas que canalicen el agua de lluvia hacia otras zonas (Mora Ortiz & Rojas Gonzales , 2012, págs. 56-57).

5.2.5 Efecto de la succión en la estabilidad de un talud de arena limosa.

En este trabajo investigativo se expone la revisión de algunos modelos que se han propuesto para estimar la resistencia al cortante de los suelos no saturados. Los resultados teóricos obtenidos mediante estos modelos se confrontan con los resultados de una serie de ensayos triaxiales a succión controlada, desarrollados sobre un suelo areno limoso con diferentes valores de succión, con el fin de seleccionar el modelo teórico que mejor se apegue a los resultados experimentales, tomando en cuenta que el suelo en análisis exhibe una resistencia al esfuerzo cortante que se atribuye a la cohesión entre las partículas finas.

En la literatura especializada existen distintas propuestas para predecir la resistencia de los suelos, por ejemplo: Coulomb (1776), Terzaghi (1936), Bishop (1959), Freulund (1778) y Vanapalli (1996).

El programa experimental consistió en desarrollar una serie de ensayos triaxiales bajo succión controlada, en trayectoria de secado y humedecido para un esfuerzo isotrópico de 150 kpa, practicados a una arena limosa SW.

La variación de la resistencia al corte con el grado de saturación presenta un máximo en algunos suelos.

El modelo teórico que más aproxima a los datos experimentales analizados es el de Bishop (1959). (Gallegos Fonseca , Rojas Gonzales, Leal Vaca, & Mora Ortiz , 2012, págs. 271-273).

5.2.6 Estabilización de taludes en el río Portoviejo, Ecuador.

El río Portoviejo está ubicado en la ciudad homónima de la provincia Manabí, Ecuador. Las transformaciones ocurridas en el cauce del río y la construcción de obras de urbanización sobre una de sus márgenes han originado un talud inestable, susceptible a la ocurrencia de deslizamientos y desprendimientos que ocasionan daños a las construcciones.

Dado lo anterior se propone aplicar una inyección de lechada de cemento reforzada con varillas de acero para probar la eficiencia de la combinación de ambos métodos en el aumento de la resistencia a la erosión, con la finalidad de detener el proceso de pérdida de estabilidad sin afectar el equilibrio natural del río y su capacidad de flujo.

La solución de estabilización consistió en la inyección de lechadas de cemento en barrenos perforados y reforzados con barras de acero en los sectores en la orilla considerados inestables y potencialmente inestables. Los barrenos se perforaron con profundidades de 9 a 12 m para que atravesaran toda la masa de suelo. La barrera resistente consistió en una pantalla de barras pasivas verticales, de cuatro a seis metros por debajo del fondo del cauce.

La combinación de los métodos de la inyección de soluciones cementantes con la inserción de elementos resistentes (pilotes, micro pilotes, varillas de acero) constituye una alternativa eficaz y viable para la estabilización de taludes afectados por la erosión fluvial. (Chavez Moncayo , Blanco Torrens, & Watson Quesada , págs. 1-9)

5.2.7 Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca cay, Ibagué, Tolima, Colombia.

En las últimas décadas se han presentado cambios fundamentales en la relación hombre medio ambiente. La actividad antrópica ha ocasionado una aceleración de los agentes naturales, al

tiempo que el desarrollo económico ha incrementado la vulnerabilidad y, por ende, los riesgos de las actividades socioeconómicas derivadas de estos. Bajo estas premisas, se ha registrado un aumento en la cantidad de eventos catastróficos asociados a fenómenos naturales (inundaciones, avenidas torrenciales, incendios forestales, movimientos de remoción en masa, entre otros), algunos de los cuales están relacionados con una de las consecuencias del cambio climático global: el aumento en la frecuencia o intensidad de los fenómenos climáticos extremos.

Desde esta perspectiva, los movimientos en masa se constituyen en un peligro latente que es importante caracterizar y prevenir.

Por tal motivo el propósito a desarrollar es evaluar el riesgo asociado a vulnerabilidad física (RVF) asociado a fenómenos de remoción en masa causadas por taludes y laderas inestables en una de las microcuencas que conforman la cuenca del río Cobeima, la de la quebrada Cay (Ibagué-Tolima, Colombia).

En el desarrollo de la investigación fueron identificados 26 sitios (taludes inestables) activos en la microcuenca Cay, que hace parte de la cuenca del río Cobeima. Cada uno fue caracterizado con un formulario de inspección geotécnica, que permitía conocer el fenómeno relacionado en una base de datos, comprobar la infraestructura física afectada y la que se encontraba en amenaza, describir el fenómeno en cuanto a la morfología y geometría, clasificar el material del sitio, verificar la presencia de agua, determinar el posible mecanismo de falla, identificar las posibles causas del fenómeno (factores internos, detonantes naturales y antrópicos), estado de avance y desarrollo, y grado de actividad.

Los resultados que se consiguieron mediante la evaluación del riesgo asociado a la vulnerabilidad física (RVF) son una valiosa fuente de información para los encargados de tomar

decisiones sobre cómo invertir los recursos públicos, de manera que se prioricen estas inversiones en obras de infraestructura, lo cual permitiría mayor eficiencia y racionalidad de los dineros para prevenir y mitigar los impactos de este tipo de eventualidades que sacuden con frecuencia en el país. (Hernandez Atencia & Ramirez Arcila , 2016, págs. 1-4)

5.2.8 Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en la duna de recaña.

Varios estudios han demostrado que la vegetación cumple un importante rol en la prevención de movimientos en masa de suelos, especialmente, los relativos a deslizamientos superficiales de taludes. De esta forma, las raíces de los árboles proporcionan un sistema de refuerzo que depende en gran medida de la conformación y de la distribución del sistema radicular que presenten.

Expuesto lo anterior se desprende el objetivo principal que es analizar la influencia de la cohesión aparente generada por las raíces de los arboles sobre la estabilidad de un talud natural en un sector de Recaña, Chile. (Sanhueza & Villavicencio , 2012) .

Se llevaron a cabo una serie de visitas técnicas, con el propósito de recopilar información tanto en poder del mandante como aquella disponible en los archivos municipales.

A partir de los antecedentes topográficos de la zona en estudio, se seleccionaron dos perfiles considerados representativos de la geometría del talud, determinándose: altura y pendiente del talud; inclinación de los arboles presentes (según su grado de reptación); y sobre cargas existentes en la cara y/o coronamiento del talud.

Después se realizó la exploración del terreno en basa a cinco calicatas, distribuidas en dos perfiles. De ellas se extrajeron muestras de suelo representativas, para efectuar ensayos de

caracterización física como: granulometrías, límites de atterberg, contenido de humedad, densidad in situ y densidad relativa, y caracterización mecánica, a partir de los resultados obtenidos de estas pruebas, se procedió a la caracterización geotécnica de los suelos presentes.

El adecuado comportamiento bajo condiciones sísmicas de los taludes analizados, se vio reflejado durante el terremoto del 3 de marzo de año 1985 al no generarse deslizamientos de masa, como los que fueron observados en una serie de taludes pertenecientes al campo de dunas existentes en el sector de Recaña.

Por otra parte, los arboles existentes pueden disminuir considerablemente la generación de deslizamientos poco profundos o superficiales, debido, principalmente, a la acción de sus raíces que actúan como sistema de refuerzo, aumentando la resistencia al corte del suelo de los primeros metros de profundidad (Sanhueza & Villavicencio , 2012, págs. 17-30) .

5.2.9 Consideración de fuerzas de filtración en el análisis de estabilidad de taludes granulares.

Para estudiar materiales porosos se presenta un modelo elasto-plástico. Mediante dicho modelo es factible determinar las condiciones bajo las que sucede el colapso de taludes formados por materiales granulares saturados sujetos a un campo de fuerzas de filtración en régimen estacionario. Los análisis de estabilidad de talud desarrollados en este trabajo permiten calcular, con un adecuado nivel de precisión, el campo de flujo de agua y la condición de colapso de las masas de suelo bajo el flujo de agua y la carga interna, ambos generados por la gravedad.

Para estudiar materiales granulares con un modelo elasto-plástico. Con el cual es factible determinar las condiciones bajo las que sucede el colapso de taludes conformados por materiales granulares saturados sujetos a un campo de fuerza de filtración en régimen estacionario. Los

análisis de estabilidad de talud que se presentan en esta investigación permiten calcular, con una buena exactitud, el campo de flujo de agua y la condición de colapso de las masas de suelo bajo el flujo de agua y carga interna, ambos generados por la gravedad. (Xiangyue, Rendon, & Espinoza , 2010, pág. 89)

En el desarrollo del trabajo el procedimiento utilizado fue formular el análisis de la inestabilidad inducida por la filtración, usando la teoría de consolidación de Biot, considerando el comportamiento elastoplastico y poroso de los materiales granulares saturados. Tanto en el campo del flujo estacionario como la condición de colapso se determinan rigurosamente, abriendo la posibilidad de analizar situaciones que otros métodos no pueden manejar. Se analizan, en primera instancia, los taludes homogéneos de una sola inclinación; luego, se procede a comparar entre la solución del elemento finito y el método del talud infinito y, por último, se analizan los taludes no homogéneos que tienen capas en diferentes permeabilidades.

Los análisis de estabilidad de talud que se presentaron en este trabajo permitieron calcular, con un adecuado nivel de precisión, el campo de flujo de agua y la condición de colapso de las masas de suelo bajo el flujo de agua y carga interna, ambos generados por la gravedad. La ventaja de esta metodología es que no se requiere ninguna hipótesis a priori sobre las condiciones de flujo subterráneo o superficiales de falla, de manera que se puede establecer un panorama completo del campo de flujo y el patrón de falla (Xiangyue, Rendon, & Espinoza , 2010, págs. 92-94).

5.2.10 Colapso por humedecimiento en los terraplenes de la autopista Pátzcuaro-Uruapan.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento mecánico de un limo compactado característico de la región nororiente del estado de Michoacán, para explicar las deformaciones de algunos terraplenes de la autopista Pátzcuaro-Uruapan.

Realizando una caracterización del limo en laboratorio, basada en los conceptos de la mecánica de suelos parcialmente saturados y calibrando el modelo elastoplástico básico de Barcelona, con el que se simula el comportamiento de colapso de terraplenes sometidos a infiltración provocada por las lluvias de la zona.

El material se muestreó de los taludes de corte de la autopista Pátzcuaro-Uruapan en el km 51+000. Se practicaron ensayos de rutina necesarios para su clasificación e identificación. Los resultados se resumen. El suelo es un limo de alta compresibilidad, con un límite líquido mayor de 50% que es el máximo que marca la norma para terraplén (N CMT 1 01/02). Se realizó la prueba de compactación AASHTO estándar, de donde se obtuvo una masa volumétrica máxima de 12.16 Kn/m^3 y un contenido de humedad óptimo de 42.1% por otro lado, se estimó la permeabilidad saturada de una prueba de consolidación.

Se realizaron ensayos de suelos parcialmente saturados con un consolidómetro con control de succión, para obtener la curva característica o de retención del suelo. En este caso se impuso una succión aplicándose una presión de aire a la muestra en la parte superior y se instaló un disco de alto valor de entrada de aire en la parte inferior de la muestra para evitar la de saturación. Se aplicó una pequeña carga en la parte superior para asegurar el contacto entre pistón del consolidómetro y la muestra de suelo. La muestra se montó en el contenido de humedad óptimo y densidad que corresponde a 90% del grado de compactación, se procedió a saturar permitiendo la expansión, que fue baja, posteriormente se aplicó presión de aire en distintas etapas, después se midió el agua desalojada para cada una de las etapas por la parte inferior de una bureta.

En los ensayos de laboratorio se obtuvieron colapsos de 2.9% con el grado de compactación típico de 90% y de 1% con un grado de compactación mayor al establecido, 93%. De acuerdo con la normatividad española el suelo no es colapsable, si el suelo se compactase a 93% pero

dadas las condiciones de compactación de la normatividad mexicana de compactación de terraplenes considera un grado de compactación bajo que favorece al colapso por humedecimiento para este tipo de suelo. Los datos de los ensayos se utilizaron para solucionar la ecuación de flujo transitorio para el caso de infiltración en una dimensión y calcular los asentamientos por infiltración.

El cálculo de los asentamientos por colapso se llevó a cabo de manera desacoplada de la infiltración con el modelo elastoplástico, con base en la variación de la succión que se obtuvo durante el periodo de la infiltración. Asimismo, se obtuvieron deformaciones de colapso para infiltraciones de 10 cm para un periodo de 50 días, este se podría presentar en la primera temporada de lluvias y si se toman las condiciones de contorno generales del camino se puede reducir el tiempo o aumentar, con ello se concluye que las deformaciones son significativas, pero que dependen fuertemente del tiempo de infiltración y las condiciones del contorno (Espinosa Arreola , Alarcon Ibarra , Arreygue Rocha , & Chavez Negrete, págs. 1-5).

5.2.11 Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales.

El propósito ha sido comparar los FS obtenidos para las superficies potenciales de falla (SPF), bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, determinando la condición de rotura del terreno en algún tipo de superficie, permitiendo el movimiento de la masa contenida en dicha superficie y haciendo el análisis de la estabilidad de una ladera o talud natural.

El caso de estudio considera una ladera natural emplazada en la zona costera de la V Región de Valparaíso, Chile.

Dada la presencia de la Cordillera de la Costa, el sector costero de la región de Valparaíso emerge sobre gran cantidad de cerros, por lo que los fenómenos de inestabilidad de taludes

resultan ser algo frecuente y, por ende, muy considerado para proyectos relacionados con la ingeniería y la construcción.

Los suelos de Valparaíso se componen, principalmente, de arenas finas, limos y algo de arcilla, que corresponden a deposiciones eólicas.

La investigación geotécnica desarrollada para obtener los antecedentes del sector en estudio, se ha basado en una campaña de trabajos en terreno que ha considerado visitas técnicas para la recopilación de antecedentes, inspecciones del sitio para definir los trabajos a desarrollar, exploración del terreno por métodos directos (calicatas) e indirectos (ensayo de penetración) y ejecución de ensayos en terreno y de laboratorio, para la obtención de parámetros del suelo.

En la ladera en investigación, se llevaron a cabo 5 calicatas (Ci) de distintas profundidades, con el objeto de obtener los perfiles estratigráficos del terreno, extraer muestras representativas de suelo y ejecutar ensayos en terreno, de penetración PANDA y de densidad in situ (DIS) en el fondo de estas.

La estratigrafía tipo del sector se ha desarrollado en función de la inspección visual de las calicatas, considerando los antecedentes bibliográficos con los que se cuenta.

Una vez conocidos los antecedentes del terreno en estudio, se ha procedido a analizar la situación de la ladera mediante el uso del software Geo-Slope 2007, con el objetivo de obtener la estabilidad del talud. (Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes , págs. 19-20).

Para ello, se han establecido las siguientes hipótesis:

- Para la ladera del terreno se ha considerado uno de los perfiles topográficos más representativos.

- Para la modelación del terreno se han considerado los tres estratos de suelo presentados en la estratigrafía tipo y su espesor medio.
- Los parámetros del suelo asignados a cada uno de los estratos del suelo han sido obtenidos a partir de los antecedentes geotécnicos recopilados, de los resultados de la campaña geotécnica y de otras investigaciones de los autores (Sanhueza y Villavicencio, 2012).
- Se ha asumido para los suelos el criterio de rotura de Mohr - Coulomb.
- Los análisis estáticos y pseudoestáticos se han efectuado considerando las hipótesis de los modelos planteados por Fellenius, Bishop y Janbú.
- Para la condición pseudoestática se han tomado como base los datos del terremoto de Valparaíso (1985; $M_w = 8,0$) y del Maule (2010; $M_w = 8,8$), Los valores de la aceleración máxima horizontal y vertical considerados para cada sismo, han sido los medidos en Viña del Mar.

Los movimientos del terreno dependen de la resistencia al corte que presente el suelo en cuestión, por lo tanto, los parámetros del suelo (densidad, cohesión y ángulo de fricción) que definen dicho valor, resultan ser los que determinan el comportamiento que tendrá la ladera. La presencia de nivel freático es también un factor de vital importancia, esto en concordancia con los postulados de Terzaghi en relación con las tensiones efectivas.

Las metodologías de cálculo utilizadas para analizar la estabilidad de un talud, basadas en el método de las dovelas, sigue siendo el de mayor uso, incrementándose aún más con la incorporación de herramientas computacionales. Por ello, en esta investigación se ha empleado el

software GeoSlope, el cual se basa en los 3 parámetros del suelo (densidad, cohesión y ángulo de fricción). Sin embargo, se obvian otros de gran importancia como el módulo de deformación.

La determinación del FS para el caso de estudio se ha realizado tanto para condiciones estática como pseudoestáticas, considerando los eventos sísmicos de Valparaíso de 1985 y del Maule de 2010.

De los resultados obtenidos en el caso estático, se ha podido concluir que el método menos conservador resulta ser el propuesto por Janbú, en el cual se cumple el equilibrio de fuerzas, a diferencia de Bishop y Fellenius, quienes se basan en el equilibrio de momentos. Lo anterior se ve reforzado con las simplificaciones que cada método realiza.

Considerando lo anterior, al comparar los resultados de ambas situaciones se ha podido determinar que, ante la presencia de un sismo, el FS disminuye en aproximadamente un 70%.

Por otro lado, se ha determinado que el menor FS y, por ende, la situación menos segura, se logra para el terremoto de Valparaíso, el cual ha tenido la menor magnitud. Esto tiene relación con la distancia entre la zona de estudio y el epicentro, pues esta es menor para el sismo de 1985 que para el de 2010.

Se concluye que el efecto de un sismo sobre un talud finito depende tanto de la magnitud Richter del terremoto, como de los valores de los coeficientes de aceleración sísmica (horizontal y vertical), los que dependen de la distancia entre el punto evaluado y el epicentro.

La aceleración sísmica ha tomado aún más importancia luego del terremoto de 2010, pues, tal y como se pudo comprobar en la presente investigación, este valor representa el efecto de un sismo sobre una zona en particular en función del tipo de suelo que allí se encuentre. En otras palabras, ante una determinada magnitud Richter no todos los suelos reaccionan del mismo modo, por lo

tanto, evaluar y clasificar los tipos de suelos considerando su respuesta ante movimientos telúricos, más que sus capacidades mecánicas, resulta adecuado para zonas de alta actividad sísmica como Chile.

Finalmente, la ladera es estable tanto para una condición estática como pseudoestática, lo cual también se debe a las buenas características mecánicas que tiene el suelo del talud (Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes , págs. 25-29).

5.2.12 Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación.

La finalidad de este estudio es exponer un diseño experimental y metodológico que permite, a partir de la medición en laboratorio de nueve puntos el cálculo de la curva de retención de humedad, llevando a cabo la medición y estimación de curvas de retención en diferentes tipos de suelos, con el análisis del fenómeno de histéresis.

La medición de la curva de retención de agua en el campo, tiene como principal ventaja el estudio del proceso en condiciones naturales. Sin embargo, las dificultades técnicas y teóricas mencionadas, así como la gran cantidad de tiempo necesaria para su realización, hacen que no siempre sea viable.

Para la medición de la relación (ϕ) en laboratorio se ha empleado el método del recipiente de tensión hídrica, combinado con la membrana de presión, el citado método se basa en el principio del medio poroso, que consiste en la aplicación de una succión al suelo a través de un medio poroso, variable en función de la tensión ejercida, se fundamenta en la equiparación de la tensión de la humedad del suelo a una presión (negativa o positiva), aplicada a un medio poroso saturado en agua, en el que se encuentra en estrecho contacto.

En total, este método permite medir hasta nueve puntos de la curva de retención, número más que suficiente para afrontar la estimación de la curva completa, que es el objetivo final, para esto se ha utilizado el modelo de Van Genuchten (1980).

En todos los casos estudiados se observa un buen ajuste entre valores medidos y estimados, incluso entre curvas de materiales que se comportan de manera diferente como las margas o los coluvios calizos. El error de estimación es sumamente reducido en todos los casos, aun teniendo en cuenta aspectos que varían tanto de un caso a otro, como la pendiente de la curva o sus inflexiones.

Si bien el diseño experimental no permite la medición de las curvas principales, es posible, al menos, la determinación de la magnitud del fenómeno.

Con el dispositivo experimental y el diseño metodológico expuesto, es posible llevar a cabo la medición y estimación de la curva de retención de humedad del suelo completa. La combinación del recipiente de tensión hídrica con la membrana a presión, permite obtener experimentalmente un número suficiente de puntos de la curva, para calcularla en toda su extensión de una manera adecuada y precisa.

Materiales bastantes distintos, y no necesariamente edáficos, pueden ser objeto de modelización de su comportamiento hídrico en condiciones no saturadas, mediante la metodología utilizada. Asimismo, es posible abordar algo complejo e inédito como el fenómeno de la histéresis (Martinez Fernandez, 1995, págs. 193-196).

5.2.13 Deslizamiento de taludes en el yacimiento kimberlítico de Catoca, Angola.

La investigación se basó en hacer un análisis de los mecanismos que desencadenan los movimientos para proponer métodos y metodologías de estabilización, estudiando los sistemas

de drenaje superficial y subterráneo. Realizando además catálogos de deslizamientos en la zona de estudio de manera que se pueda tener la cobertura completa de los lugares afectados por deslizamientos.

Para evaluar los deslizamientos en el yacimiento kimberlítico de Catoca se realizó un estudio de las condiciones ingeniero-geológicas con el fin de diagnosticar en el polígono minero la diversidad, condiciones de estabilidad, causales y condicionales de los deslizamientos, así como para identificar la tipología de los movimientos de masa en el yacimiento, todo ello con la finalidad de establecer un ordenamiento minero ambiental estable de construcción y explotación de los taludes. (Domingos Mateus , Dos santos , & Guardado lacaba, 2011, págs. 26-28).

Se estudiaron los sistemas de drenaje superficial y subterráneo, así como otros factores que favorecieran el movimiento de las rocas en los taludes y cortes de la mina. Se propuso entonces que el estudio ingeniero-geológico de estabilización de los taludes como apoyo al Plan Director Minero Técnico (PDMT) en la mina de Catoca estaría basado en cuatro etapas de trabajo denominadas como módulos:

- Módulo I: Inventario. Investigaciones geotécnicas preliminares.
- Módulo II: Diagnóstico. Elaboración de un plan detallado de investigación.
- Módulo III: Pronóstico. Análisis del mecanismo de fallo. Análisis del modelo de estabilidad (equilibrio).
- Módulo IV: Evaluación de la estabilización del talud. Examen del factor de seguridad. Plan de actividades y medidas ingenieras.

Como derivación de lo anteriormente propuesto se identificaron algunas líneas de trabajo que contribuyen a mejorar los procedimientos de cartografía, la calidad de las evaluaciones y la predicción de los riesgos. En cuanto a la forma de perfeccionar los modelos de probabilidad espacial (susceptibilidad) existen varias alternativas que podrían mejorar los resultados en las predicciones, tales como:

- Considerar todos los indicadores geo mecánicos disparadores o desencadenantes; mejorar la calidad y precisión de las variables utilizadas, por ejemplo, la resolución de determinadas variables continuas como las derivadas de los modelos digitales del terreno; o bien, delimitar con mayor exactitud los límites de las variables categóricas.
- Determinar con exactitud la frecuencia de los deslizamientos pasados en las zonas de estudio con el fin de que las estimaciones de frecuencias futuras sean lo más consistente posibles.

En mina de Catoca se identificaron dos tipos de mecanismos de deslizamientos: estructurales, cuando la rotura es por un bloque rocas que falla a través de una superficie de deslizamiento; y plásticos, cuando el desplazamiento de la masa de roca o suelos se realiza de manera viscoso - plástica.

La erosión por sifonamiento, típica de este tipo de suelo, se produce en aquellos suelos arenosos-arcillosos residuales de cobertura de la mina. En los taludes superiores tiene lugar un proceso intenso de erosión que origina acarcavamientos de enormes proporciones.

Los deslizamientos más comunes en la mina de Catoca son los desprendimientos de rocas y suelos; los deslizamientos traslacionales; deslizamientos en cuña; deslizamientos combinados y movimientos de flujos. Los principales riesgos asociados a estos deslizamientos en Catoca están

relacionados con la obstrucción y rotura de la red de caminos mineros, la inestabilidad de los cortes, las afectaciones en los sistemas de desagüe y drenajes, y de las labores de extracción.

La mina de Catoca requiere de un sistema de gestión de riesgos que permita establecer taludes más estables, lo que conduciría a una mejor y más racional explotación basada en un sistema de ordenamiento territorial y minero ambiental responsable. (Domingos Mateus , Dos santos , & Guardado lacaba, 2011, págs. 31-33)

5.2.14 Caracterización geotécnica de los limos de la terraza del municipio de Olaya, Antioquia, Colombia.

Determinar posibles causas del deslizamiento ocurrido en la zona. Dar a conocer los resultados de los ensayos de laboratorio del material que compone la terraza Olaya y finalmente realizar un análisis en conjunto de los ensayos de laboratorio para validar las hipótesis planteadas.

(Echeverri Ramirez , 2016, págs. 49-50)

Las hipótesis de las causas del movimiento manejadas por distintas entidades competentes, en su momento, se encuentra en primer lugar que los materiales estudiados no presentan cohesión, por lo tanto, su estabilidad depende exclusivamente del parámetro de ángulo de fricción interna.

En segundo lugar, la causa del movimiento presentado podría estar asociada a la sensibilidad del terreno a la generación de procesos erosivos y movimientos en tierra. Durante las visitas de campo no fue posible comprobar la incidencia directa de factores tales como: socavación de la margen izquierda de la quebrada La Barbuda y/o infiltración de aguas provenientes de las redes de acueducto y alcantarillado presentes a lo largo de la calle 10 del municipio; aunque no se descartó que éstos hubieran podido contribuir con el evento.

Teniendo en cuenta lo anterior, el plan de ensayos de laboratorio fue diseñado para verificar las hipótesis mencionadas, determinar los parámetros de resistencia en diferentes condiciones de drenaje y tratar de cuantificar, de alguna manera, la sensibilidad del material a la generación de procesos erosivos y pérdida de resistencia mecánica en presencia de agua.

Una de las hipótesis planteadas en el artículo fue comprobada, y es la relacionada con los parámetros de resistencia del suelo; para las condiciones in situ el suelo experimenta una cohesión aparente como resultado de la generación de presiones de poros negativas (succión matricial, que para humedades inferiores al 10% puede alcanzar 100 kPa), sin embargo, cuando dicho material se pone en contacto con agua, dicha cohesión se pierde rápidamente, lo cual conduce a que la resistencia al corte solo dependa del ángulo de fricción. Además, considerando que en la zona son comunes los taludes casi verticales, si la anterior situación se presenta, la posibilidad de que ocurra un movimiento en masa es muy alta.

Los ensayos de caracterización mineralógica, y el ensayo de colapso mostraron que el material no es expansivo, a pesar de contener vermiculita y montmorillonita. Además del ensayo de colapso se puede inferir que, para las condiciones de carga actual, la población no tendría problemas de asentamientos súbitos.

Los ensayos de desagregación y de pinhole, muestran que el suelo es susceptible tanto a la erosión externa como a la interna. El ensayo de desagregación, a pesar de ser un ensayo cualitativo, fue en el que mejor se pudo observar el fenómeno de cómo se pierde la succión cuando el suelo se encuentra en contacto con el agua.

No se puede concluir a ciencia cierta que el detonante del movimiento de tierras en Olaya haya sido causado por problemas de fuga de agua, por la falta de información disponible. No obstante,

existe la probabilidad de que ocurra un movimiento en masa si se tiene en cuenta el registro histórico, si se alteraran las condiciones de saturación y/o las condiciones de carga externa sobre los taludes. (Echeverri Ramirez , 2016, págs. 50-52)

5.2.15 Problema geotécnico del km 6 de la autopista Medellín-Bogotá: antecedentes, causas y soluciones alternativas.

Objetivo.

Realizar un estudio independiente, basado principalmente en lo observable en campo sobre las características de la zona, la naturaleza del problema geotécnico, los trabajos de mitigación realizados y las fallas que se presentaron en estos.

Llegar a conclusiones que permitan esclarecer las causas del problema geotécnico y la relación de este con el deslizamiento que afecto la comunidad aledaña a la autopista, además, resaltar la necesidad de mejores estudios geotécnicos en un departamento montañoso como Antioquia y con gran cantidad de vías construidas y por construir para así evitar que problemas como este se repitan. (CARMONA & ORDÓÑEZ, 2013, pág. 26)

El primer paso para entender y delimitar el problema geotécnico fue una reconstrucción histórica de este, se buscó conocer desde cuando se presenta y como se ha manifestado a lo largo del tiempo. Para tal fin se consultaron 3 fuentes de información:

Fotografías aéreas de las oficinas de Catastro Departamental de Antioquia y Catastro Municipal de Copacabana, se analizaron fotografías en el intervalo desde 1985 hasta el 2012, la mayoría de ellas son de los últimos 5 años pues es en este periodo de tiempo que se ha observado más claramente el problema y sus consecuencias en las obras civiles y privadas de la zona.

Imágenes satelitales de multitemporales disponibles en Google Earth.

Consultas a personas encargadas del mantenimiento de la vía y que participaron en las obras, por motivos de confidencialidad se mantendrán sus nombres en privado. También se tuvieron en cuenta los testimonios de los viajeros frecuentes de la autopista.

Como segundo paso se realizó trabajo de campo en la zona, este se realizó parte en época de verano y parte en época de invierno para poder comparar las condiciones del lugar, este trabajo se centró principalmente en:

Observar los daños que ha causado el problema geotécnico, tanto en la autopista Medellín-Bogotá como en las distintas propiedades de la zona, analizar las obras actuales y los restos de las obras pasadas.

Estudiar la geomorfología de la zona y los rasgos de las laderas en la zona.

Determinar las condiciones geotécnicas mediante la caracterización del macizo rocoso y el perfil de meteorización del lugar.

Para entender el problema geotécnico se analizaron cuidadosamente los factores que generan el problema, las soluciones que se adoptaron y la razón por la cual estas no han sido suficientes, adicionalmente, se analizan los costos de soluciones alternativas al problema.

Los problemas geotécnicos que actualmente se presentan en la zona del kilómetro 6 de la autopista Medellín-Bogotá y en el entorno se deben a la reactivación de un deslizamiento antiguo, esta reactivación es detonada por la infiltración de aguas subterráneas que llegan a la base de la masa de suelo a través de las diaclasas y fracturas en el macizo rocoso.

No existen evidencias geológicas que responsabilicen al consorcio DEVIMED por el deslizamiento, las evidencias indican que el factor detonante para este evento fueron las fuertes

lluvias asociadas a condiciones que ya existían que hacían a la ladera más propensa a deslizamientos.

Las características del problema geológico no fueron estudiadas y entendidas correctamente, esto condujo a malas decisiones para solucionar el problema. De comprender bien el problema se habría optado por buscar soluciones, que, aunque mucho más costosas, podrían dar fin a la problemática que afecta la vía.

En la actualidad el problema geotécnico en la autopista Medellín-Bogotá está sin solución, el descenso de la bancada continua y a pesar de las grandes inversiones realizadas no se observa una solución definitiva en un futuro cercano. (CARMONA & ORDÓÑEZ, 2013, págs. 26-31)

5.3 Marco conceptual

Talud.

Según (Suarez Diaz, 1998) se conoce con el nombre de talud cualquiera superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra.

Se puede definir taludes según de (De Matteis, 2003) como:

Talud natural: cuando se produce sin la intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera.

Talud artificial: cuando los taludes son hechos por el hombre se denomina cortes o taludes artificiales. (pág. 3)

Estabilidad.

Según (De Matteis, 2003) se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. Este estudio nos permite definir la inclinación adecuada del talud que es casi el criterio más importante para el estudio del mismo, pero ya que a veces es muy costoso remover grandes cantidades de tierra se deben realizar otros métodos de estabilidad. (pág. 4)

Presión de poros.

Según (Suarez Diaz, 1998) la presión de los poros es la presión interna del agua de saturación. La presión de poros dentro del suelo depende de la localización de los niveles freáticos, presiones internas de los acuíferos, y las características geológicas del sitio.

La presión de poros tiene variaciones de acuerdo con el régimen de aguas subterráneas que a su vez dependen de la intensidad, frecuencia o ausencias de estas. Un aumento en la presión de poros positiva o una disminución de la presión de poros negativa, es equivalente a una reducción de la resistencia al cortante y de la estabilidad. (pág. 248).

La infiltración.

La infiltración es el movimiento del agua desde la superficie del terreno hacia el interior del suelo o roca por la porosidad y las discontinuidades de la masa de la tierra. El porcentaje de infiltración es aquella parte de lluvia que se infiltra, y que a su vez puede dividirse en dos clases, la infiltración que contribuye a aumentar la cantidad de humedad en la zona no saturada y la

infiltración que recarga el sistema saturado del suelo que se encuentra por debajo del nivel freático o por el fenómeno de la capilaridad. (Suarez Diaz, 1998, pág. 237)

Superficie de talud inundada.

En este caso la succión del suelo en la superficie es cero debido a que la capacidad del suelo de dejar infiltrar agua es menor que la intensidad de la lluvia, por lo tanto, tan solo una pequeña parte de la lluvia se infiltra mientras que la otra parte se convierte en escorrentía. (Suarez Diaz J. , 2009, pág. 226)

Infiltración controlada.

La capacidad de flujo del suelo para permitir la infiltración del agua es mayor que la intensidad de la lluvia. En este caso la infiltración es controlada intensidad de la lluvia.

Pueden existir puntos de infiltración masiva de agua, arriba de un talud ya sea por la presencia de un rio o cuerpo de agua, como de depresiones topográficas y zonas de pendiente muy suave. Su localización es importante para analizar las condiciones de estabilidad de un talud. (Suarez Diaz J. , 2009, pág. 226)

5.4 Marco legal		
Norma/Ley	Descripción de la norma	Utilidad de la norma en el proceso investigativo
Investigación de suelos y rocas para propósitos de ingeniería I.N.V. E – 101 – 13.	Esta norma hace referencia a los métodos por medio de los cuales se pueden determinar las condiciones de suelos, rocas y agua freática.	El objetivo de la investigación consiste en la identificación y localización, tanto vertical como horizontalmente, de los tipos significativos de suelos y rocas y las condiciones de agua freática presentes en un área dada (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, 2013, pág. 1)

<p>Obtención de muestras para probetas de ensayo mediante tubos de pared delgada. I.N.V. E-105-13.</p>	<p>Este método establece un procedimiento para el uso de un tubo metálico de paredes delgadas para la obtención de muestras relativamente inalteradas de suelos, apropiadas para pruebas de laboratorio destinadas a establecer propiedades empleadas en ingeniería, tales como resistencia, compresibilidad, permeabilidad y densidad (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS , 2013, pág. 1)</p>	<p>Este método descrito en esta norma se emplea cuando es necesario obtener muestras relativamente inalteradas intactas, adecuadas para la determinación de sus propiedades mediante ensayos de laboratorio.</p>
<p>Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. I.N.V. E – 122 – 13.</p>	<p>Este método cubre la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca, y mezclas de suelo-agregado por peso.</p>	<p>La aplicación práctica de la determinación del contenido de agua en un material, es conocer la masa del agua removida al secar dicho material cuando está húmedo (espécimen de prueba) hasta peso constante, en un horno controlado a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C ($230^{\circ} \pm 9^{\circ}$ F). (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS , 2013, pág. 1)</p>

<p>Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. I.N.V. E – 123 – 13.</p>	<p>El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.</p>	<p>Esta norma describe el método para determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el de 75 μm (No.200). (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS , 2013, pág. 1)</p>
<p>Determinación del límite líquido de los suelos I.N.V. E – 125 – 13.</p>	<p>El límite líquido se determina mediante tanteos, en los cuales una porción de la muestra se esparce sobre una cazuela de bronce que se divide en dos partes con un ranurador, permitiendo que estas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos de la caída repetida de la cazuela.</p>	<p>La de terminación del límite líquido interviene en varios sistemas de clasificación de los suelos, dado que contribuye en la caracterización de la fracción fina de los suelos. Se usa con otras propiedades del suelo para establecer correlaciones sobre su comportamiento ingenieril.</p>

<p>Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V. E – 126 – 13.</p>	<p>El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico</p>	<p>La determinación del límite plástico interviene en varios sistemas de clasificación de suelos. El límite plástico solo o en conjunto con el límite líquido y el índice de plasticidad se usa con otras propiedades del suelos para definir su comportamiento, como la compresibilidad, la permeabilidad ,la expansión, resistencia al corte entre otros.</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Determinación de la gravedad específica de los suelos y de la llenante mineral, empleando un picnómetro con agua</p> <p>I.N.V. E – 128 – 13.</p>	<p>Este método de ensayo se utiliza para determinar la gravedad específica de los suelos y de la llenante mineral (filler) por medio de un picnómetro. Cuando el suelo está compuesto solo de partículas mayores que el tamiz de 4.75 mm (No.4), se deberá seguir el método de ensayo para determinar la Gravedad Específica y la Absorción del Agregado Grueso, norma INV E – 223. Cuando el suelo está compuesto por partículas mayores y menores que el tamiz de 4.75 mm (No.4), se utilizará el método de ensayo correspondiente a cada porción (normas INV E – 222 e INV E – 223).</p>	<p>La gravedad específica de los sólidos se usa en casi toda en ecuación que exprese relaciones de fases de aire, agua y sólidos en un volumen dado de material.</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Ensayo de compresión triaxial sobre suelos cohesivos. I.N.V. E – 153 – 13.</p>	<p>Los métodos descritos en esta norma se refieren a la determinación de los parámetros de resistencia de los suelos mediante el ensayo de compresión triaxial. Los métodos descritos son: el ensayo no consolidado no drenado (UU) con o sin medición de las presiones de poros y el ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado (CU) con o sin medición de la presión de poros. Los parámetros obtenidos son la cohesión no drenada del suelo (c_u), o el ángulo de fricción interna (f) y la cohesión (c). (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS , 2013, pág. 1)</p>	<p>En este método se determina la resistencia a la compresión de un suelo en términos de esfuerzos totales, razón por la cual, la resistencia resultante depende de la presión de poros desarrollada durante la carga.</p>
------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD). I.N.V. E – 154 – 13.</p>	<p>Esta norma tiene por objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo. El ensayo se podrá hacer con un corte sencillo o un corte doble como se ilustra en la Figura 1. Este ensayo se puede realizar sobre todos los tipos de suelos, ya sean muestras inalteradas o remoldeadas.</p> <p>(INSTITUTO NACIONAL DE VIAS , 2013, pág. 1)</p>	<p>El ensayo de corte directo es adecuado para la determinación, relevante rápida, de las propiedades de resistencia de materiales consolidados y drenados. Debido a que las trayectorias de drenaje a través de la muestra son cortas, se permite que el exceso de presión en los poros se disipe con mayor rapidez que en otros ensayos drenados. El ensayo se puede realizar sobre cualquier tipo de suelo, inalterado, remoldeado o compactado.</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

6. Diseño metodológico

6.1 Enfoque de la investigación y tipo de estudio

Esta investigación comprende la descripción, registro, análisis cuantitativo e interpretación de la naturaleza actual en este caso la ladera en situ, además analiza la composición o proceso de los fenómenos. El enfoque de la investigación se hace sobre las conclusiones dominantes acerca de la estabilidad del talud

6.2 Metodología

La metodología se desarrolla bajo el concepto de investigación descriptiva basado en (Tamayo y Tamayo, 2003) puesto que se pretende presentar las características más partícular y representativas del suelo, como las propiedades físico-mecánicas de este (humedad, peso específico, curvas de retención de agua entre otras), lo cual permite tener una idea del comportamiento del suelo mediante la descripción de sus características propias dadas por la zona y tipo de suelo que lo conforman.

6.2. Matriz de diseño metodológico

Objetivo específico	Actividad	Técnica	Instrumento	Método
Identificar las características físicas y mecánicas del suelo que componen el talud objeto de estudio	Selección y ubicación del talud objeto de estudio	Recorrido de campo y observación directa	Cartografía y GPS	Observación y descripción
	Exploración geotécnica	Exploración manual	Barrenos, tubos Shelby, bolsas plásticas, papel aluminio, parafina.	Geotecnia de exploración de suelos
	Realización de ensayos de laboratorio	Normas INVIAS	Equipos de laboratorio para cada ensayo específico	Estadística descriptiva
Determinar el valor del esfuerzo efectivo del suelo en estado no saturado	Laboratorio de corte directo	Norma INV-E 154 -13	Equipos de laboratorio para cada ensayo específico	Estadística descriptiva
	Análisis de resultados	Norma INV-E 154 -13	Métodos matemáticos.	Estadística descriptiva

Establecer el factor de seguridad en el talud de estudio	Realización de ensayos de laboratorio	Normas INVIAS	Equipos de laboratorio para cada ensayo específico	Estadística descriptiva
	Análisis de resultados	Normas INVIAS	Métodos matemáticos y uso de software	Estadística descriptiva

6.3 Fases y resultados

Topografía: perfiles cada metro.

Se realizará un levantamiento topográfico por toda la zona donde se encuentra ubicado el talud, este permitirá establecer mejor la forma del terreno, y se obtienen datos como la naturaleza, y que clase de vegetación cubre el talud, pues esta tiene incidencia en el agua de escorrentía o infiltración, y además la estabilidad de los materiales que conforman la ladera.

- Instrumentos
 - Nivel de precisión
 - Mira topográfica
 - Plomada
 - Trípode
 - Estacas

Sondeos: sondeos en la corona a media ladera y en la base.

Para conocer las características específicas del suelo que conforma la ladera, se realizara sondeos en la corona, a media ladera y en la base, para establecer perfiles estratigráficos, detallar las propiedades físico-mecánicas del suelo, detallar la influencia del agua en la estabilidad y tener una idea de cómo solucionar posibles problemas del terreno.

Se extraerán muestras del subsuelo para permitir identificar los suelos y tener el material para realizar los diferentes ensayos de laboratorio, estas muestras serán alteradas, que conservan solo algunas de las propiedades del terreno IN SITU, y muestras inalteradas que conservan las mismas propiedades del terreno IN SITU.

Se realizarán ensayos de laboratorio con el fin de obtener parámetros que relacionen las propiedades del suelo como parámetros de resistencia, de deformación, de permeabilidad, humedad, entre otros.

Trabajo de laboratorio.

Se llevará a cabo la realización de cada uno de los ensayos establecidos en las normas anteriormente expuestas en el marco legal para establecer entonces las características y propiedades que tiene el suelo. Construyendo los informes correspondientes para cada uno de los laboratorios, para luego conjuntamente hacer el análisis de la estabilidad del talud y sus principales vulnerabilidades.

7. Resultados de la investigación

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos mediante el desarrollo de cada uno de los laboratorios planteados inicialmente, donde se mostrarán las principales propiedades físico-mecánicas del suelo, las características y la clasificación de los estratos predominantes de los materiales que conforman el talud. Además, se hallará el factor de seguridad parámetro clave para definir la estabilidad con que cuenta el talud.

7.1 Caracterización físico-mecánica de las propiedades de los suelos del talud objeto de estudio

En la *Tabla 4* se muestran las principales características físicas que tiene el talud, con un rango de humedad que varía entre 24.61% y 64.69%, además de esto se presenta la descripción visual realizada mientras se hacían los sondeos. El índice de plasticidad tiene una variación desde 0.27 hasta 9.78.

Tabla 3. Características físicas y mecánicas del suelo que compone el talud

PROPIEDADES FISICO-MECANICAS							
Sondeo	# de Muestra	Espesor	Descripción Visual en Campo	Humedad	LP	LQ	IP
				%	%	%	%
1	1	0.6-2.2	Limo-arcillo arenoso, café amarilloso.	58.04	24.80	33.50	8.70
	2	2.2 - 2.8	Limo-arcillo arenoso granular, con material ferro-finoso café claro.	36.01	14.64	21.04	6.40
	3	2.8 - 4.3	Arcilla limosa, color rojo.	50.06	24.00	32.12	8.12
	4	4.3 - 5	Suelo residual arcilla limosa granular con material ferro-finoso, capas pequeñas de color rojo y betas grises.	43.82	23.63	33.41	9.78
	5	5 - 7.5	Suelo residual arcilla limosa, color rojo con betas grises.	42.53	24.29	30.45	6.16
	6	7.5 - 10	Suelo residual, arcilla limosa, color café claro, con pequeñas betas grises y pequeñas betas de material ferro-finoso.	64.69	31.72	33.70	1.98
2	1	0-0.6	Lleno, arcilla-limosa, café rojizo.	44.53	28.67	28.94	0.27
	2	0.6-2	Lleno, arcilla-limosa, café rojizo.	38.64	30.22	33.37	3.15
	3	2-3.5	Lleno, arcilla-limosa, café rojizo.	41.88	27.72	33.27	5.55
	4	3.5-4.3	Lleno, arcilla-limosa, café rojizo.	53.28	27.02	32.89	5.87
	5	4.3- 4.7	Lleno, arcilla-limosa, café rojizo.	48.15	27.35	30.49	3.14
	6	4.7-6.5	Lleno, arcilla-limosa, café rojizo.	34.65	26.12	31.67	5.55
3	1	0-2	Lleno, limo-arcilloso granular, café rojizo	38.72	25.06	30.68	5.62
	2	2-2.5	Limo arcilloso granular	24.51	22.98	30.05	7.07

Fuente: Propia.

A continuación, se presenta la *Tabla 5* donde se muestran las propiedades físico-mecánicas, como la gravedad específica valor que es muy regular entre todas las capas de suelo, la cohesión con valores altos sobre 47 Mpa pertenecientes a arcillas y valores alrededor de 25 Mpa que pertenecen a un limo

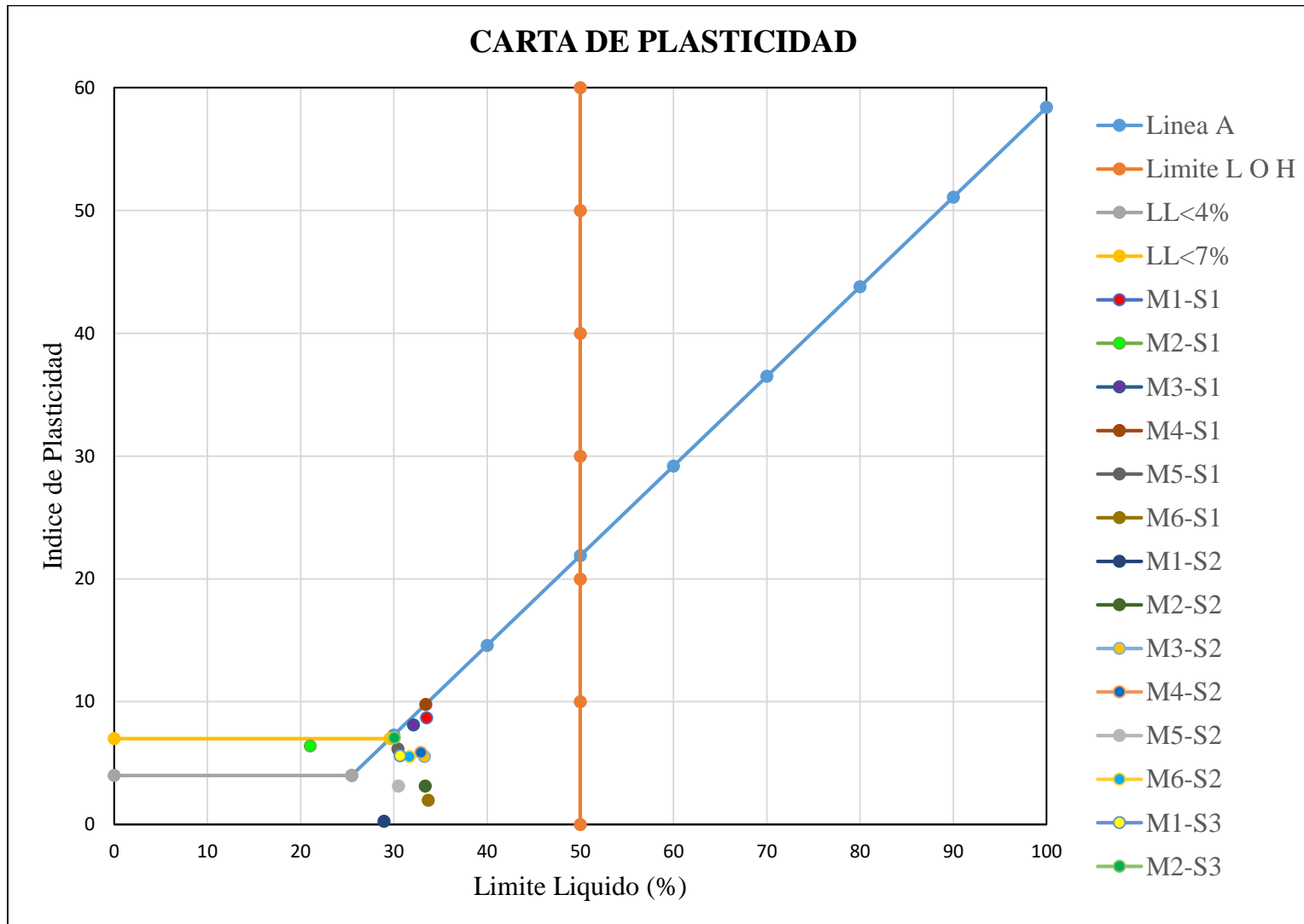
Tabla 4. **Propiedades Físico-Mecánicas.**

PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS					
Sondeo	# de Muestra	Tipo de Suelo	Gravedad Especifica (Gt)	Cohesión (τ)	Angulo de fricción
			g/cm³	Kpa	ϕ
1	1	CL (Arcilla de baja compresibilidad)	2.97	65.2	9.9
	2	CL-ML (Arcilla Limosa)	2.63		
	3	CL (Arcilla de baja compresibilidad)	2.88	47.6	11.5
	4	CL (Arcilla de baja compresibilidad)	2.91		
	5	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.67	23.8	23.5
	6	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.87	25.8	34.2
2	1	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.58		
	2	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.74	31.4	28.4
	3	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.72		
	4	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.84	34.0	23.4
	5	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.89	22.6	24.0
	6	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.75		
3	1	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.74		
	2	ML (Limo de baja Compresibilidad)	2.87		

Fuente: Propia.

En la *Figura 6* que se muestra a continuación se presenta la distribución de la clasificación de las diferentes muestra de laboratorio analizadas las que en su mayoría son limos de baja compresibilidad.

Figura 6. Clasificación de los suelos finos.



Fuente: Propia.

7.2 Determinación del esfuerzo efectivo del suelo del talud objeto de estudio, en condiciones no saturadas

A continuación, se ilustran los esfuerzos efectivos hallados (Tabla 5).

Tabla 5. Esfuerzo efectivo del suelo en estado no saturado

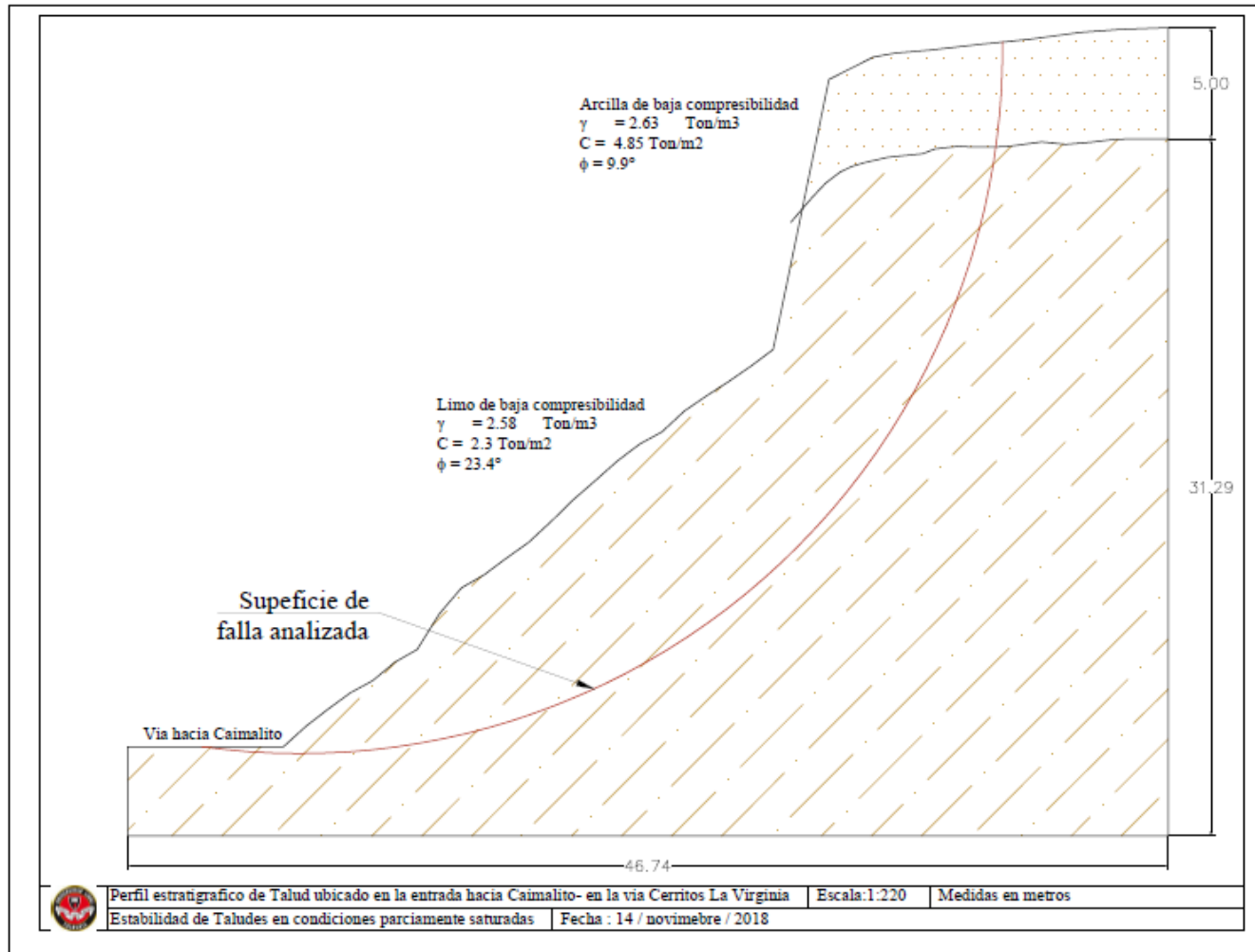
Profundidad	Esfuerzo efectivo (σ')
m	Kn/m²
2.2	64.1
2.8	136.3
4.3	257.8
5	400.6
7.5	597
10	878.6
0.6	15.2
2	68.9
3.5	162.3
4.3	282.1
4.7	415.4
6.5	590.7
2	53.8
2.5	124.1

Fuente: Propia.

7.3 Determinación del factor de seguridad del talud objeto de estudio

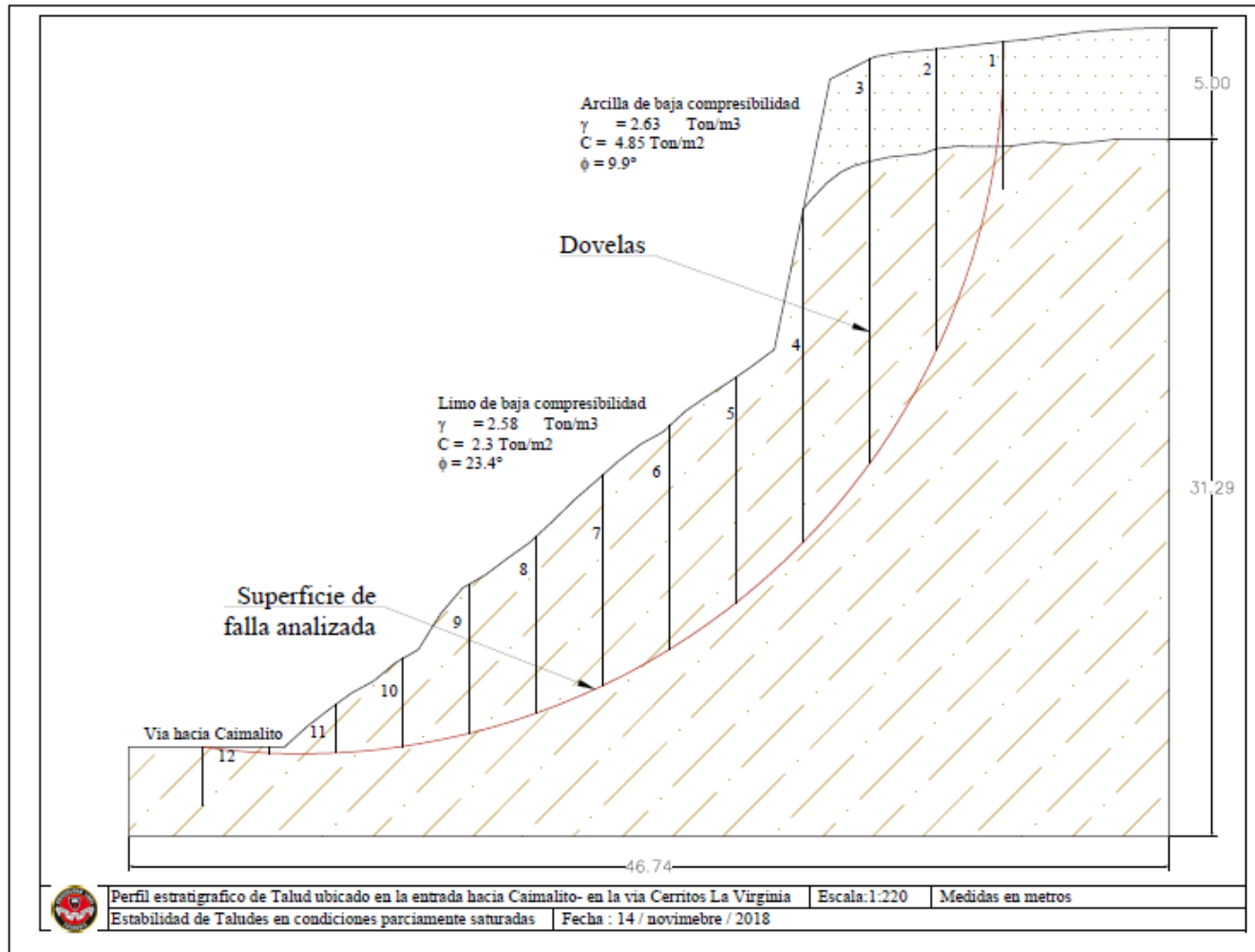
En el siguiente numeral se presentara el cálculo de factor de seguridad hallado por dos métodos, el matemático y software, para realizar una comparación posterior.

Figura 7. Perfil Geológico del talud, para cálculo de factor de seguridad.



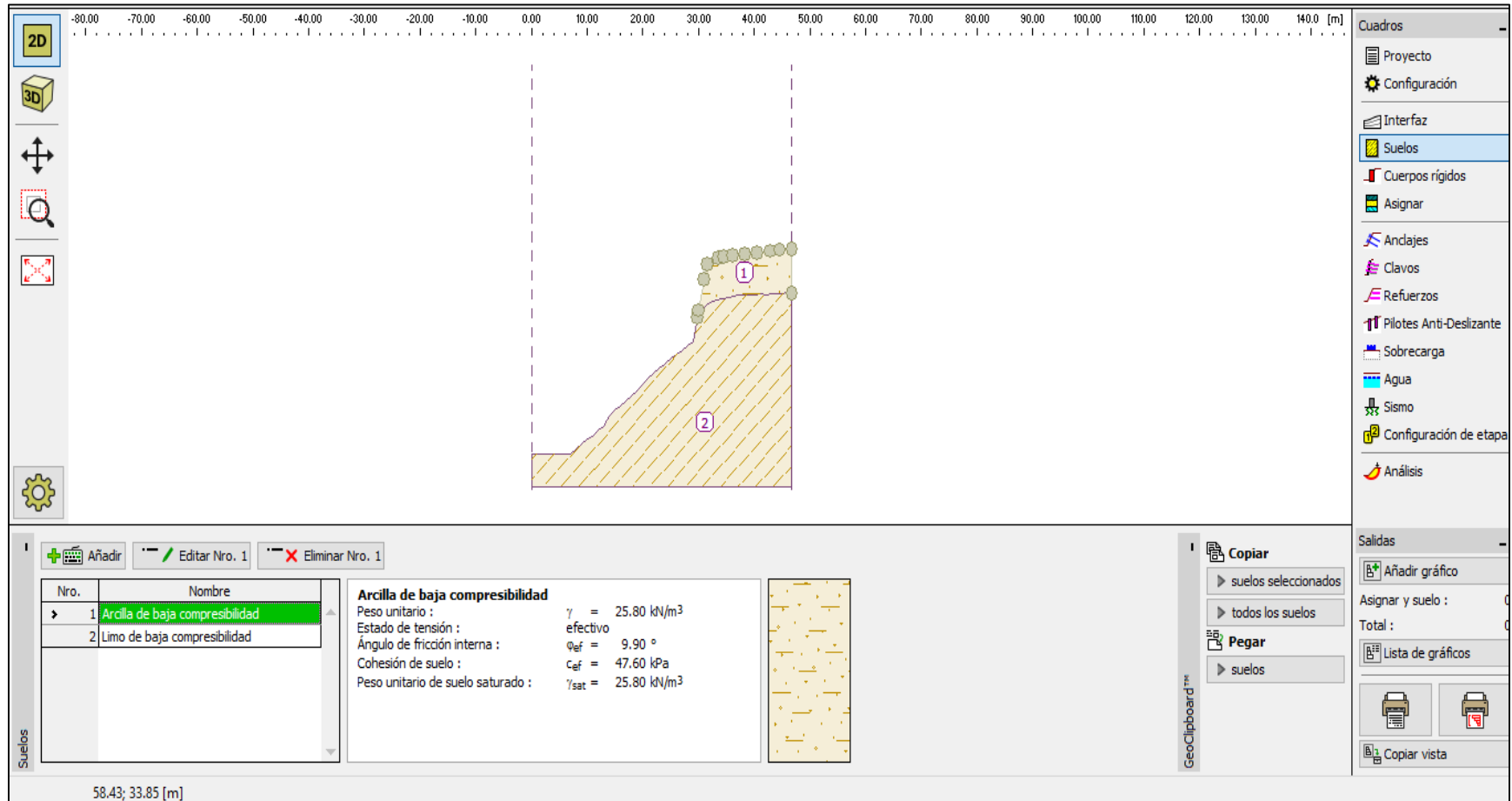
Fuente: Propia.

Figura 8. Distribución de dovelas para análisis matemático del factor de seguridad.



Fuente: Propia.

Figura 9. Método por Software para análisis de factor de seguridad (GEO 5).



Fuente: Propia.

Figura 10. Método por Software para análisis de factor de seguridad (GEO 5).

The screenshot displays the GEO 5 software interface for a 2D slope analysis. The main workspace shows a cross-section of a slope with two soil layers. The top layer is labeled '1' and the bottom layer is labeled '2'. The horizontal axis at the top ranges from -80.00 to 140.00 meters. The right-hand sidebar contains a menu with categories: Cuadros (Project, Configuration, Interface), Suelos (Soils), Cuerpos rígidos (Rigid bodies), Asignar (Assign), Andajes (Nails), Clavos (Nails), Refuerzos (Reinforcements), Pilotes Anti-Deslizante (Anti-sliding piles), Sobrecarga (Overload), Agua (Water), Sismo (Seismic), Configuración de etapa (Stage configuration), and Análisis (Analysis). Below the workspace is a detailed property panel for the selected soil layer '2'.

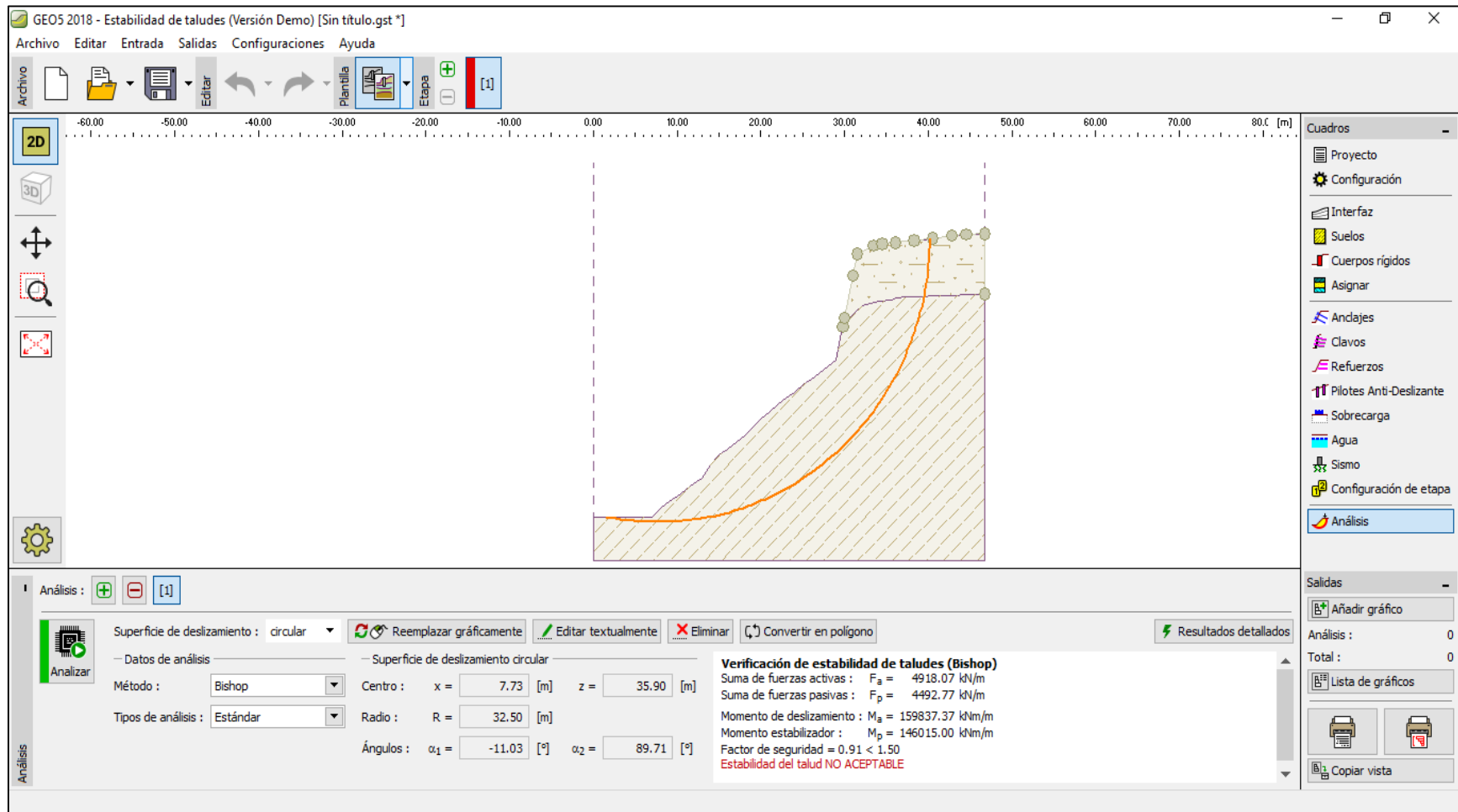
Nro.	Nombre
1	Arcilla de baja compresibilidad
2	Limo de baja compresibilidad

Limo de baja compresibilidad

Peso unitario : $\gamma = 25.31 \text{ kN/m}^3$
 Estado de tensión : efectivo
 Ángulo de fricción interna : $\phi_{ef} = 23.40^\circ$
 Cohesión de suelo : $c_{ef} = 22.60 \text{ kPa}$
 Peso unitario de suelo saturado : $\gamma_{sat} = 25.31 \text{ kN/m}^3$

Fuente: Propia.

Figura 11. Factor de Seguridad, calculado con el software Geo 5



Fuente: Propia.

A continuación, en la *Tabla 6* se hace un paralelo entre los factores de seguridad obtenidos, uno por medio de un software (GO5) y el otro del resultado de un método determinístico (Bishop Simplificado).

El método utilizando en software GO5 hace su análisis a partir de las iteraciones de infinitas superficies de falla, toma como referencia algunos métodos de círculo de falla, para el análisis realizado tomo como base el método de Bishop simplificado, para luego escoger la superficie de falla más crítica y con esta hacer el análisis del factor de seguridad.

Con el método matemático se realizó el mismo procedimiento en hojas de cálculo con ayuda de AutoCAD y Excel, introduciendo la geometría y los parámetros necesarios como el peso específico de los estratos de suelo, la cohesión y el ángulo de fricción.

Tabla 6. Comparación factor de seguridad, método numérico vs método software

FACTOR DE SEGURIDAD				
Parámetros de Suelo	Estrato		Método Matemático (Bishop simplificado)	Método por Software
	1	2		
C (ton/m²)	4.85	2.3	1.05	0.91
γ (ton/m³)	2.63	2.58		
ϕ (°)	9.9	23.4		
ϕ (rad)	0.173	0.408		

Fuente. Propia.

Como se puede observar en los resultados obtenidos anteriormente de factor de seguridad que están alrededor de 1, lo que nos indica que el talud presenta baja estabilidad y que no es confiable y en cualquier momento puede colapsar, existen circunstancias críticas en el entorno que son evidencia de la desestabilidad como los deslizamientos y desprendimientos de material

que conforma el talud, otras causas que pueden ser origen de la baja estabilidad es el la alta pendiente, de disminución de la cohesión por el aumento de la presión de poros en la época de invierno, además de la falta de cobertura en la parte expuesta del talud producto de deslizamientos anteriores, también la intervención antrópica es una actividad que influye en la disminución de la inestabilidad del talud factores que pueden ser los detonantes de posibles deslizamientos y disminución de la estabilidad.

Para mejorar las condiciones de estabilidad que actualmente presenta el talud existen varios métodos para aumentar el factor de seguridad del mismo, la recomendación es realizar una evaluación acerca de cuál de estos métodos es el efectivo tanto en seguridad como en los costos.

8. Conclusiones

- Mediante el desarrollo de todos los laboratorios propuestos para cumplir con los objetivos planteados inicialmente, se ha podido determinar los diferentes parámetros físico-mecánicos que identifican el talud. Se pudieron identificar dos estratos predominantes en el talud, los cuales son: en la parte superior del mismo se puede encontrar una arcilla de baja compresibilidad este estrato va desde 0 m de profundidad a 5m, además de un estrato que limo de baja compresibilidad que va desde los 5m en adelante.
- Estos suelos con condiciones de baja compresibilidad nos indica que cuando el talud se somete a condiciones de carga tiene una baja deformación.
- Se encontró que el primer estrato mencionado tiene un valor importante de cohesión, de 65.2 Kn/m² hasta los primeros 2.2 metros de profundidad y ángulo de fricción de 9.9°, seguidamente un estrato con 47.6 Kn/m² de cohesión y un ángulo de fricción de 11.7° hasta los 5 metros de profundidad.
- Después de los 5 metros de profundidad se halló un limo de baja compresibilidad con ángulos de fricción en un rango de 23.4° hasta 34.2° y con valores de cohesiones de 22.6 Kn/m² hasta 34 Kn/m².
- La gravedad específica encontrada en las diferentes muestras analizadas varía desde 2.58 hasta 2.97 correspondiente a los rangos más usuales de suelos derivados de cenizas volcánicas (Anexo 6).
- Con la disposición de los estratos geológicos encontrados se procedió a hacer el análisis del factor de seguridad mediante un Software y un método Matemático (Bishop

simplificado) para comparar los resultados y poder establecer cuál era el más crítico y poder definir la estabilidad del talud.

- El software dio un Factor de seguridad de **0.91**, mientras que en método matemático dio un Factor de Seguridad de **1.05**, con lo cual podemos observar que ambos datos son cercanos y menores de **1.5**, valor que determina la frontera de estabilidad aceptable, por lo tanto, se puede decir que el talud no es estable, y puede presentar algún riesgo de colapso en temporada de invierno al incrementarse los esfuerzos desestabilizadores del talud (Anexo 9).

9. Recomendaciones

Los datos suministrados anteriormente del factor de seguridad se obtuvieron por medio de los sondeos realizados en una sección transversal del talud, sondeos que fueron ubicados con la ayuda del perfil topográfico, estos sondeos tuvieron una profundidad de 10 m en la corona, 7.5 en la media ladera y 2.5 en la parte baja del talud, se recomienda realizar mayores sondeos para tener más confiabilidad de los datos obtenidos, pues las propiedades físico-mecánicas de los suelos son muy variantes en cortas distancias, y con el análisis y la caracterización de solo una sección transversal no se logra tener una amplitud y cobertura sobre toda el área del talud objeto de estudio, y de esta manera ampliar la base de información de este talud y su posible comportamiento futuro además de garantizar los resultados del análisis.

Con los datos suministrados de propiedades físico-mecánicas y el valor encontrado de factor de seguridad se puede proceder a determinar que método es el más apropiado para mejorar la estabilidad del talud, bien sea, disminuyendo la pendiente o aplicando tratamientos de

recubrimiento superficial, para esto se recomienda hacer un análisis beneficio costo para poder establecer cuál es la mejor alternativa de solución.

Crear obras de mitigación contra el riesgo que minimicen la vulnerabilidad de deslizamiento además de preservar la seguridad de las comunidades más cercanas al sitio del talud, también de evitar problemas de tráfico producto del taponamiento de la vía.

10. Bibliografía.

- Barrera and Anguas, M. B. (2002). *INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE SUELOS NO SATURADOS EN VÍAS TERRESTRES*. Sanfandila: Qro.
- CARMONA & ORDÓÑEZ, W. G. (2013). PROBLEMA GEOTÉCNICO DEL KM 6 DE LA AUTOPISTA MEDELLÍN-BOGOTÁ: ANTECEDENTES, CAUSAS Y SOLUCIONES ALTERNATIVAS. *Ingeniería Geológica, Universidad Nacional de Colombia*.
- Chavez Moncayo , m. A., Blanco Torrens, R., & Watson Quesada , R. (s.f.). Estabilización de taludes en el rio portoviejo, ecuador. *Minería y geología, instituto superior minero metalurgico de MOA*.
- De Matteis, A. F. (2003). Estabilidad de taludes. *Universidad nacional del Rosario*, 3.
- Domingos Mateus , Dos santos , n., & Guardado lacaba, R. (2011). Deslizamiento de taludes en el yacimiento Kimberlítico de catoca, Angola, Doctorado departamento de geologia.
- Echeverri Ramirez , O. (2016). Caracterización getecnica de los limos de la terraza del municipio de Olaya, Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 56.
- Escobar Toro , L. J., & Valencia Gonzales , Y. (2011). Analisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellin-Bogota, en el tramo de la via entre marinilla y santuario. . *Boletin de ciencias de la tierra*.
- Espinosa Arreola , J., Alarcon Ibarra , J., Arreygue Rocha , J. E., & Chavez Negrete, c. (s.f.). Colapso por humedecimiento en los terraplenes de la autopista Patzcuaro-Uruapan.
- Fariñas, & Bermudez, G. (2002). Manual de estabilización y revegetación de taludes. *Lopez Jimero Carlos*.
- Gallegos Fonseca , G., Rojas Gonzales, E., Leal Vaca, J. C., & Mora Ortiz , R. S. (2012). Efecto de la succion en la estabilidad de un talud de arena limosa . *universidad autonoma de mexico*.
- Gomez Castro, A. A. (2009). Determinación de la curva de retención de agua de suelos granulares usando redes neuronales artificiales. *Trabajo de grado*, 1-2.
- Hernandez Atencia , Y., & Ramirez Arcila , H. (2016). Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad fisica por taludes y laderas inestables en la microcuenca cay, ibague, tolima. *universidad cooperativa de colombia*.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS . (2013). *Obtención de muestras para probetas de ensayo mediante tubos de pared delgada. I.N.V. E-105-13. BOGOTA D.C.*
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS . (2013). *Determinación de la succión de un suelo usando papel de filtro. I.N.V. E – 159 – 13. BOGOTA D.C.*

- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS . (2013). *Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. I.N.V. E – 123 – 13*. BOGOTA D.C.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS . (2013). *Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. I.N.V. E – 122 – 13*. BOGOTA D.C.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS . (2013). *Ensayo de compresión triaxial sobre suelos cohesivos. I.N.V. E – 153 – 13*. BOGOTA D.C.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS . (2013). *Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD). I.N.V. E – 154 – 13*. BOGOTA D.C.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS . (2013). *Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V. E – 126 – 13*. BOGOTA D.C.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. (2013). *Determinación de la gravedad específica de los suelos y de la llenante mineral, empleando un picnómetro con agua I.N.V. E – 128 – 13*. BOGOTA D.C.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. (2013). *Determinación del límite líquido de los suelos I.N.V. E – 125 – 13*. BOGOTA D.C.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. (2013). *Investigación de suelos y rocas para propósitos de ingeniería I.N.V. E – 101 – 13*. BOGOTA D.C.
- Leal Vaca, J. C., & Gallegos Fonseca, G. (2010). Estimación de esfuerzos efectivos a partir del parámetro X de bishop en una arena limosa. *universidad autonoma de queretano*.
- Martinez Fernandez, J. (1995). Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. *universidad de salamanca, pto de geografia*.
- Mora Ortiz , & Rojas Gonzales . (2012). Efecto de la saturación en el deslizamiento de un talud en la comunidad san juan de grijalva, chiapas. *investigación y tecnologia (universidad nacional autonoma de mexico)*.
- Perez, E. A. (2005). Estabilidad de taludes. *Departament d'Enginyeria del terrenv, cartografica i Geofiica*.
- Perez, E. A. (2005). Estabilidad de taludes. *Departament d'Enginyeria del terrenv, cartografica i Geofiica*, 1-2.
- Quintero Figueroa, C. y. (2012). Inventario, caracterización, evaluación y propuesta de control y mantenimiento de medidas de mitigación y estabilización de taludes adelantados en el municipio de pereira. *Universidad libre seccional pereira*.
- Sanhueza Plaza, C., & Rodriguez Cifuentes , L. (s.f.). Analisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *universidad catolica de chile*.
- Sanhueza, c., & Villavicencio , G. (2012). Influencia de la cohesion aparente generada por raices sobre la estabilidad de un talud natural en las dunas de Recaña. *Revista de la construccion, universidad catolica de chile*.
- Suarez Diaz. (1998). Estabilidad de taludes en zonas tropicales. En Freudlund, *The scope of unsaturated soil mechanics* (pág. 240). paris.

Suarez Diaz, J. (2009). Deslizamientos Analisis Geotecnico. *Analisis de estabilidad*, 152.

Xiangyue, L., Rendon, I., & Espinoza, M. (2010). Consideración de fuerzas de filtración en el análisis de estabilidad de taludes granulares. *Tecnología y Ciencias del agua*.