

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES APLICANDO DIFERENTES  
TÉCNICAS DE REVEGETALIZACIÓN**

**YEFFER RODRIGO REYES SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
TUNJA  
2019**

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES APLICANDO DIFERENTES  
TÉCNICAS DE REVEGETALIZACIÓN**

**YEFFER RODRIGO REYES SUÁREZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
MAGISTER EN GEOTECNIA**

**DIRECTOR:  
INGENIERO. Msc. LUIS ALBERTO CÁCERES CÁRDENAS**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
TUNJA  
2019**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del Jurado.

---

Firma del Jurado 1.

---

Firma del Jurado 2.

Tunja, septiembre de 2019

## **DEDICATORIA**

**Por la gloria de Dios!!!**

## CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO .....	17
RESUMEN .....	18
INTRODUCCIÓN.....	19
1. REVISIÓN DE LITERATURA .....	21
1.1. VARIABLES Y CLASIFICACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LOS SUBSUELOS .....	21
1.1.1. Relaciones de fases.....	21
1.1.2. Tamaño de los granos y su distribución .....	22
1.1.3. Límites e índice de plasticidad.....	22
1.1.4. Clasificación de suelos SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) .....	23
1.2. ESTABILIDAD DE TALUDES .....	25
1.2.1. Factores que influyen en la estabilidad de un talud.....	26
1.2.2. Tipos de falla de taludes .....	26
1.2.3. Metodologías para el Análisis de la Estabilidad.....	29
1.2.3.1. Métodos empíricos .....	29
1.3. ENSAYOS IN SITU .....	32
1.3.1. Ensayo de penetración estándar (SPT) .....	32
1.4. BIOINGENIERÍA PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES.....	34
1.4.1. Biotecnología de taludes.....	36
1.4.1.1. Productos enrollados para el control de la erosión.....	37
1.4.2. Siembra de árboles nativos (Revegetalización).....	38

1.4.2.1. Distribución al cuadrado .....	38
1.4.2.2. Distribución rectangular .....	39
1.4.2.3. Distribución en triángulos “Tresbolillos” .....	39
1.4.3. Trasplante de Césped.....	39
1.4.3.1. Proceso de trasplante de césped .....	40
2. DISEÑO METODOLÓGICO.....	41
2.1. ETAPA DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	41
2.2. ETAPA DE CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA .....	41
2.3. ETAPA DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	42
3. CARACTERÍSTICAS GENERALES .....	43
3.1. TERRITORIAL DE CAQUETÁ.....	43
3.1.1. Geología .....	43
3.1.2. Aspectos relacionados con el clima .....	45
3.1.3. Aspectos topográficos .....	47
3.2. TERRITORIAL DE HUILA.....	48
3.2.1. Geología .....	48
3.2.2. Aspectos relacionados con el clima .....	50
3.2.3. Aspectos topográficos .....	51
3.3. TERRITORIAL DE RISARALDA.....	52
3.3.1. Geología .....	53
3.3.2. Aspectos relacionados con el clima .....	54
3.3.3. Aspectos topográficos .....	55
3.4. TERRITORIAL DE BOYACÁ .....	56

3.4.1. Geología .....	56
3.4.2. Aspectos relacionados con el clima .....	58
3.4.3. Aspectos Topográficos.....	59
4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES.....	60
4.1. TERRITORIAL CAQUETA.....	60
4.1.1. Clasificación del material del talud .....	60
4.1.2. Descripción del talud.....	61
4.2. TERRITORIAL HUILA.....	62
4.2.1. Clasificación del material del talud .....	62
4.2.2. Descripción del talud.....	63
4.3. TERRITORIAL RISARALDA.....	65
4.3.1. Clasificación del material del talud .....	65
4.3.2. Descripción del talud.....	68
4.4. TERRITORIAL BOYACÁ .....	70
4.4.1. Clasificación del material del talud .....	70
4.4.2. Descripción del talud.....	78
5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES .....	80
5.1. TERRITORIAL DE BOYACÁ .....	80
5.1.1. Determinación de los Parámetros de Diseño.....	80
5.1.1.1. Corrección N de campo .....	80
5.1.1.2. Determinación del Ángulo de fricción $\phi$ .....	82
5.1.1.3. Determinación de la cohesión $c'$ .....	83
5.1.2. Aplicación de Parámetros de diseño .....	86

5.1.3. Descripción De Materiales y Parámetros Geotécnicos .....	87
5.1.4. Determinación del factor de seguridad mediante software MIDAS GTS NX .....	88
5.1.4.1. Análisis del talud en condición actual.....	89
5.1.4.2. Análisis del talud con retiro del material.....	90
5.2. TERRITORIAL RISARALDA.....	93
5.2.1. Determinación de los Parámetros De Diseño .....	93
5.2.1.1. Corrección N de campo .....	93
5.2.1.2. Determinación de Ángulo de fricción y cohesión mediante correlaciones	94
5.2.2. Determinación de factor de seguridad mediante software SLIDE 6.0 .....	99
5.2.3. Determinación del factor de seguridad mediante Software MIDAS GTS NX .....	102
6. IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE REVEGETALIZACIÓN.....	106
6.1. TERRITORIAL CAQUETA.....	106
6.1.1. Técnica de Revegetalización .....	106
6.1.2. Características de la especie vegetal desde el punto de vista geotécnico	108
6.1.3. Método de implementación.....	109
6.1.4. Seguimiento de los métodos implementados .....	111
6.2. TERRITORIAL HUILA.....	115
6.2.1. Técnica de Revegetalización .....	115
6.2.2. Características de la especie vegetal desde el punto de vista geotécnico	117
6.2.3. Método de implementación.....	117
6.2.4. Seguimiento de los métodos implementados .....	120
6.3. TERRITORIAL RISARALDA.....	122
6.3.1. Técnica de Revegetalización .....	122



6.3.2. Características de la especie vegetal desde el punto de vista geotécnico	123
6.3.3. Método de implementación .....	123
6.3.4. Seguimiento de los métodos implementados .....	126
7. ANÁLISIS COSTOS .....	128
7.1 TERRITORIAL CAQUETÁ .....	128
7.2 TERRITORIAL RISARALDA .....	130
7.3 TERRITORIAL HUILA .....	132
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	134
9. BIBLIOGRAFÍA .....	137
ANEXOS .....	141

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Diagrama de fases de un suelo .....	21
<b>Figura 2.</b> Estados de consistencia de los suelos .....	23
<b>Figura 3.</b> Caídos de bloques por gravedad en roca fracturada .....	27
<b>Figura 4.</b> Volteo o inclinación en materiales residuales .....	27
<b>Figura 5.</b> Nomenclatura de deslizamiento .....	28
<b>Figura 6.</b> Nomenclatura de deslizamiento .....	28
<b>Figura 7.</b> Ensayo SPT.....	33
<b>Figura 8.</b> Trazado cuadrado .....	39
<b>Figura 9.</b> Trazado Tres bolillos .....	39
<b>Figura 10.</b> Esquema metodológico .....	42
<b>Figura 11.</b> Localización del proyecto: Vía San José del Fragua – Florencia, PR 04 +0000 al PR 4+0150.....	43
<b>Figura 12.</b> Geología en la zona del proyecto.....	45
<b>Figura 13.</b> Climograma para el municipio de San José de Fragua.....	46
<b>Figura 14.</b> Variación de Temperatura del municipio de San José del Fragua .....	46
<b>Figura 15.</b> Mapa Topográfico Sector de estudio cerca del San José Del Fragua	47
<b>Figura 16.</b> Vía Plata – Puerto Valencia PR64+0000 Al PR65+250 .....	48
<b>Figura 17.</b> Aspectos geológicos de la zona de estudio .....	49
<b>Figura 18.</b> Climograma del municipio de la Plata - Huila .....	50
<b>Figura 19.</b> Variación de temperaturas en el municipio de la Plata -Huila.....	51
<b>Figura 20.</b> Mapa topográfico del sitio de estudio en el municipio de la Plata -Huila .....	52

<b>Figura 21.</b> Vía Santa Cecilia- Asia PR 27+0800 .....	53
<b>Figura 22.</b> Aspectos Geológicos relacionados con el sitio de estudio.....	53
<b>Figura 23.</b> Climograma del municipio de Santa Cecilia - Risaralda.....	54
<b>Figura 24.</b> Variación de Temperatura para el municipio de Santa Cecilia. Risaralda .....	55
<b>Figura 25.</b> Mapa topográfico del sitio de estudio Santa Cecilia Risaralda .....	55
<b>Figura 26.</b> Vía Belén - Sácama, PR 17+0805 hasta PR 18+0310.....	56
<b>Figura 27.</b> Geología de la zona de estudio.....	57
<b>Figura 28.</b> Climograma para el sector de estudio vía Belén- Sácama .....	58
<b>Figura 29.</b> Variación de la Temperatura para el sector de estudio.....	59
<b>Figura 30.</b> Mapa Topográfico del sector de estudio Boyacá-Sácama.....	59
<b>Figura 31.</b> Carta de Casagrande para clasificación de finos Territorial Caquetá .	61
<b>Figura 32.</b> Panorámica del Talud San José del Fragua – Florencia, PR 04 +0000 al PR 4+0150.....	62
<b>Figura 33.</b> Sondeo realizado para la caracterización del suelo Territorial Huila ...	63
<b>Figura 34.</b> Carta de Casagrande para clasificación de finos Territorial Huila .....	64
<b>Figura 35.</b> Descripción talud Plata – Puerto Valencia PR64+0000 Al PR65+250	64
<b>Figura 36.</b> Sondeos realizados para la caracterización del suelo .....	65
<b>Figura 37.</b> Mapa de localización de sondeos .....	65
<b>Figura 38.</b> Carta de Casagrande para clasificación de finos Territorial Risaralda - Sondeo 1.....	67
<b>Figura 39.</b> Carta de Casagrande para clasificación de finos Sondeo 2 .....	68
<b>Figura 40.</b> Descripción talud Plata – Santa Cecilia- Asia PR 27+0800 .....	69
<b>Figura 41.</b> Sondeos realizados Territorial Boyacá .....	70
<b>Figura 42.</b> Mapa de localización de sondeos .....	71

<b>Figura 43.</b> Sector de estudio Belén – Sácama, Boyacá, sitio crítico .....	78
<b>Figura 44.</b> Sector de estudio Belén – Sácama, Boyacá, sitio crítico .....	79
<b>Figura 45.</b> Número de golpes SPT corregido (N45) sitio crítico .....	82
<b>Figura 46.</b> Ángulo de fricción vs profundidad .....	83
<b>Figura 47.</b> Correlaciones empíricas con el ensayo de penetración estándar (SPT), NAVFAC.....	84
<b>Figura 48.</b> Cohesión sitio crítico.....	84
<b>Figura 49.</b> Modelo geotécnico Territorial Boyacá .....	88
<b>Figura 50.</b> Modelo del talud (Territorial Boyacá) en el software Midas GTS NX, condición actual .....	89
<b>Figura 51.</b> Condición estática (Midas GTS NX).....	90
<b>Figura 52.</b> Modelo del talud (Territorial Boyacá) en el software Midas GTS NX, con retiro de material.....	90
<b>Figura 53.</b> Condición estática (Midas GTS NX), con retiro de material.....	91
<b>Figura 54.</b> Condición pseudoestática (Midas GTS NX) .....	91
<b>Figura 55.</b> Solución planteada para estabilización del talud de Boyacá .....	93
<b>Figura 56.</b> Número de golpes SPT corregido (N45).....	94
<b>Figura 57.</b> Ángulo de fricción vs profundidad .....	96
<b>Figura 58.</b> Relación de esfuerzo cortante vs esfuerzo efectivo para cada estrato	97
<b>Figura 59.</b> Peso unitario vs profundidad .....	98
<b>Figura 60.</b> Modelo geotécnico Territorial Risaralda.....	98
<b>Figura 61.</b> Condición estática sin nivel freático (Slide) .....	100
<b>Figura 62.</b> Condición pseudoestática sin nivel freático (Slide) .....	100
<b>Figura 63.</b> Condición estática con nivel freático (Slide) .....	101
<b>Figura 64.</b> Condición pseudoestática con nivel freático (Slide) .....	101

<b>Figura 65.</b> Modelo del talud (Territorial Risaralda) en el software Midas GTS NX .....	102
<b>Figura 66.</b> Condición estática sin nivel freático (Midas GTS NX) .....	102
<b>Figura 67.</b> Condición pseudoestática sin nivel freático (Midas GTS NX) .....	103
<b>Figura 68.</b> Condición estática con nivel freático (Midas GTS NX) .....	103
<b>Figura 69.</b> Condición pseudoestática con nivel freático (Midas GTS NX) .....	103
<b>Figura 70.</b> Talud antes de Revegetalización .....	106
<b>Figura 71.</b> Proceso de trasplante de césped .....	107
<b>Figura 72.</b> Proceso de Hidrosiembra manual .....	108
<b>Figura 73.</b> Antes y después de revegetalizar el talud .....	111
<b>Figura 74.</b> Seguimiento al 6 de marzo de 2017.....	111
<b>Figura 75.</b> Seguimiento al 11 de Junio de 2017 .....	112
<b>Figura 76.</b> Seguimiento al 21 de septiembre de 2017 .....	112
<b>Figura 77.</b> Seguimiento al 9 de noviembre de 2017.....	112
<b>Figura 78.</b> Seguimiento al 30 de noviembre de 2017.....	113
<b>Figura 79.</b> Seguimiento al 30 de noviembre de 2017.....	113
<b>Figura 80.</b> Seguimiento al 30 de noviembre de 2017.....	113
<b>Figura 81.</b> Seguimiento al 15 de enero de 2018 .....	113
<b>Figura 82.</b> Seguimiento al 13 de junio de 2018 .....	114
<b>Figura 83.</b> Seguimiento al 23 de octubre de 2018 .....	114
<b>Figura 84.</b> Seguimiento al 23 de octubre de 2018 .....	114
<b>Figura 85.</b> Representación gráfica del seguimiento vs condiciones climatológicas .....	115
<b>Figura 86.</b> Semilla utilizada pasto vetiver y brachiaria .....	116
<b>Figura 87.</b> Producto enrollado .....	117

<b>Figura 88.</b> Preparación de la superficie .....	118
<b>Figura 89.</b> Preparación de la mezcla .....	119
<b>Figura 90.</b> Antes y después de revegetalizar el talud .....	119
<b>Figura 91.</b> Seguimiento al 6 de marzo de 2017.....	120
<b>Figura 92.</b> Seguimiento al 9 de agosto de 2017.....	120
<b>Figura 93.</b> Seguimiento al 16 de noviembre de 2017.....	120
<b>Figura 94.</b> Seguimiento al 16 de noviembre de 2017.....	120
<b>Figura 95.</b> Seguimiento al 10 de septiembre de 2018 .....	121
<b>Figura 96.</b> Seguimiento al 5 de febrero de 2018 .....	121
<b>Figura 97.</b> Seguimiento al 5 de febrero de 2018 .....	121
<b>Figura 98.</b> Representación gráfica del seguimiento vs condiciones climatológicas .....	121
<b>Figura 99.</b> Tipos de arbustos utilizados y efecto precolombino .....	122
<b>Figura 100.</b> Talud antes de ser revegetalizado .....	123
<b>Figura 101.</b> Preparación de la superficie e instalación del Biomanto .....	123
<b>Figura 102.</b> Antes y después de revegetalizar el talud .....	126
<b>Figura 103.</b> Seguimiento al 3 de marzo de 2017.....	126
<b>Figura 104.</b> Seguimiento al 9 de agosto de 2017.....	126
<b>Figura 105.</b> Seguimiento al 7 de septiembre de 2017. ....	127
<b>Figura 106.</b> Seguimiento al 3 de febrero de 2018 .....	127
<b>Figura 107.</b> Seguimiento al 06 junio de 2018 .....	127
<b>Figura 108.</b> Representación gráfica del seguimiento vs condiciones climatológicas .....	127

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Determinación del tamaño de las partículas .....	22
<b>Tabla 2.</b> Clasificación del suelo SUCS para material Grueso .....	24
<b>Tabla 3.</b> Clasificación del suelo SUCS para material fino .....	24
<b>Tabla 4.</b> Factores inherentes a la estabilidad de Taludes .....	26
<b>Tabla 5.</b> Listado de ecuaciones para cálculo de estabilidad .....	31
<b>Tabla 6.</b> Valores empíricos de $\phi$ , $D_r$ y $\gamma_{hum}$ obtenidos con el N del SPT en diferentes suelos .....	34
<b>Tabla 7.</b> Resultados obtenidos y caracterización del suelo Territorial Caquetá ....	61
<b>Tabla 8.</b> Resultados obtenidos y caracterización del suelo Territorial Huila .....	63
<b>Tabla 9.</b> Exploración del Subsuelo .....	66
<b>Tabla 10.</b> Resultados obtenidos y caracterización del suelo Territorial Risaralda - Sondeo 1 .....	66
<b>Tabla 11.</b> Resultados obtenidos y caracterización del suelo Territorial Risaralda - Sondeo 2 .....	67
<b>Tabla 12.</b> Resultados de exploración Territorial Boyacá .....	70
<b>Tabla 13.</b> Resultados obtenidos y descripción del suelo en los 4 sondeos Territorial Boyacá .....	71
<b>Tabla 14.</b> Caracterización física y mecánica del suelo en los 4 sondeos Territorial Boyacá .....	76
<b>Tabla 15.</b> Corrección al confinamiento ( $C_n$ ) .....	81
<b>Tabla 16.</b> Correlaciones empíricas para la determinación del ángulo de Fricción	82
<b>Tabla 17.</b> Parámetros de diseño talud Boyacá .....	84
<b>Tabla 18.</b> Parámetros geotécnicos de diseño sitio crítico Territorial Boyacá .....	88

<b>Tabla 19.</b> Factores de seguridad sitio crítico Territorial Boyacá .....	92
<b>Tabla 20.</b> Parámetros para obtención del ángulo de fricción por diferentes correlaciones.....	95
<b>Tabla 21.</b> Parámetros para cálculo del ángulo de fricción.....	96
<b>Tabla 22.</b> Parámetros geotécnicos de diseño sitio crítico Territorial Risaralda .....	99
<b>Tabla 23.</b> Resumen de factores de seguridad con el software SLIDE .....	101
<b>Tabla 24.</b> Resumen de factores de seguridad con Software MIDAS GTS NX....	104
<b>Tabla 25.</b> Resumen de factores de seguridad con Software MIDAS GTS NX y SLIDE .....	104
<b>Tabla 26.</b> Análisis de costos para la territorial de Caquetá .....	128
<b>Tabla 27.</b> Precio Unitario para la técnica de hidrosiembra.....	129
<b>Tabla 28.</b> Precios unitarios para el método de trasplante de césped .....	129
<b>Tabla 29.</b> Análisis de costos para la territorial de Risaralda .....	130
<b>Tabla 30.</b> Precio unitario para la instalación de manto temporal .....	131
<b>Tabla 31.</b> Análisis de costos para la territorial de Huila.....	132
<b>Tabla 32.</b> Precios unitarios para la instalación de Biomanto.....	132



## GLOSARIO

**Antropogénico:** conjunto de efectos producidos por las actividades humanas en el medio ambiente de la Tierra (Chávez, 2006).

**Brachiaria humidícola:** tipo de pasto que crece en Colombia en suelos ácidos y secos, pero ello no deduce que se desarrolle en todos los predios del trópico bajo (Lauforie, 2019).

**Biomanto:** tela de fibra natural (fique) que ayuda a controlar la erosión y el sedimento. Favorece la formación de la capa vegetal. Además, es un excelente aliado para forrar el pilón de los árboles y asegurar un trasplante exitoso (Trejos, 2013).

**Empradización:** sembrar pastos en áreas donde el suelo se haya removido, por medio de cespedones o estolones, tratando siempre de utilizar cespedones del descapote o del despeje de servidumbre o sitios de apoyo, siempre y cuando se conserven en un lugar fresco. La empradización debe hacerse en épocas de lluvias para asegurar el prendimiento. En taludes y terrenos con pendientes mayores al 12%, se deben implementar barreras vivas, como las fajinas, para el control de escurrimiento de agua (Zorrilla, 2006).

**Geomorfología:** forma de la tierra, la configuración general de su superficie y los cambios que tienen lugar en la evolución de las formas terrestres (Vasco, 2007).

**Hidrosiembra:** proyección sobre el terreno de una mezcla acuosa de semillas, fertilizantes y sustancias adherentes. De fácil aplicación a gran escala porque se realiza con medios mecánicos especializados dotados de equipos de bombeo. Se usa frecuentemente en jardinería, restauración de taludes, minas y canteras (Cifuentes, 2015).

**Litoestratigrafía:** estudio basado en las características litológicas en un cuerpo de rocas (Rodríguez, 2012).

**Ladera:** declive de una montaña, de un monte o de una altura en general se puede decir que en este sentido la ladera es uno de los lados de la montaña en cuestión (Pérez & Merino, 2019).

**Litificación:** proceso generalmente de cementación y/o compactación por el cual un sedimento depositado en un determinado medio se convierte lentamente en una roca sedimentaria sólida (Arenas, 2019).

**Revegetalización:** práctica usada en la estabilización de taludes que consiste en devolver el equilibrio o restaurar la cubierta vegetal de una zona donde sus formaciones vegetales originales están degradadas o alteradas (Decorplantas, 2015).

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad realizar análisis de las condiciones de estabilidad para diferentes taludes utilizando técnicas de revegetalización basados en el primer programa piloto de revegetalización y paisajismo de taludes realizado por el Instituto Nacional de Vías en el año 2017, con la participación de las direcciones territoriales a cargo de este Instituto, localizadas en cuatro (4) zonas del territorio Nacional Colombiano, con el objetivo de incentivar la implementación de métodos para la estabilización de taludes, acorde a las características geológicas y geomorfológicas de cada región.

El proyecto consistió en la selección de cuatro (4) taludes localizados en corredores viales a cargo de INVIAS, que hayan presentado problemas de estabilidad y estabilizarlo con una técnica de revegetalización que más se adapte a la zona del proyecto, este proceso fue evaluado por diferentes profesionales de INVIAS de planta central, en el cual se asignó para la participación en el proyecto, así como gestor del proyecto del estudio del talud localizado en Boyacá.

Se seleccionaron cuatro (4) taludes, localizados en los departamentos de Caquetá, Huila, Risaralda y Boyacá los cuales serán denominados en adelante territoriales para identificación de cada zona. En estos taludes se obtuvieron características generales, relacionadas con temas de localización exacta, aspectos climatológicos, geológicos y topográficos, así mismo para cada talud se realizaron exploraciones de campo con el propósito de realizar su caracterización; con esta información y antes de que los taludes fueran revegetalizados, se realizó un análisis de estabilidad en los taludes localizados en las territoriales de Boyacá y Risaralda donde se determinaron parámetros de diseño tales como ángulo de fricción, cohesión y peso unitario, los cuales se utilizaron para la modelación de los taludes en los softwares MIDAS GTS NX y SLIDE, para observar su comportamiento y determinar el factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas.

Con la información obtenida anteriormente, se determinó la técnica de revegetalización a implementar en cada talud y se efectuó un seguimiento de la ejecución de los proyectos mencionados, mediante la realización de visitas de campo con el fin de conocer el estado en el que se encuentra cada técnica de revegetalización implementada en los taludes, esto con el propósito de verificar su efectividad y prendimiento de la cobertura vegetal; finalmente la realización de un análisis costo–beneficio, el cual determinó el costo de la revegetalización de cada talud y el beneficio que dicha estabilización generó en el sitio de estudio.

**PALABRAS CLAVE:** revegetalización, estabilidad de taludes, parámetros de diseño, geotecnia, modelación en software, geomorfología, SPT, relación costo – beneficio.

## INTRODUCCIÓN

A lo largo del territorio nacional se encuentran localizados varios sitios críticos que presentan inestabilidad en sus taludes y que no han sido intervenidos, con métodos económicos como son los diferentes tipos de Revegetalización de Taludes. El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) desarrolló el primer programa de revegetalización y paisajismo de taludes en las direcciones territoriales, los cuales fueron implementados en el periodo de vigencia 2017.

Con esta investigación se busca estudiar el efecto de la vegetación en la estabilización de taludes, por medio de seguimiento y análisis de la implementación de diferentes técnicas de Revegetalización que fueron implantadas acorde con las características geológicas y geomorfológicas de cada talud en el programa de revegetalización y paisajismo impulsado por el Instituto Nacional de Vías en el año 2017.

La Norma Colombiana Sismo Resistente (NSR-10) establece las características de la vegetación de acuerdo con el sistema radicular y profundidad de las raíces con relación a su crecimiento por posición del nivel freático, ya que generalmente se observa que las raíces se desarrollan en el espacio medio entre la superficie y el nivel de agua, así mismo se explica que las raíces se extienden hasta una y media veces la altura del árbol, por lo que se concluye que algunas especies pueden ser nocivas para edificaciones, a diferencia en las laderas que tienen efecto contrario y pueden ser benéficas ya que reducen la erosión y el sistema radicular provee refuerzo al suelo, minimizando la posibilidad de fallas en taludes y que la extracción de agua subterránea reduce las presiones de poros incrementando la estabilidad de las laderas, adicional (Suárez, 1998, pág. 12) recomienda que no se debe implementar técnicas de vegetación en los taludes de más de 60° de pendiente y más aún cuando se encuentra dificultad de revegetalizar los taludes de más de 45° de inclinación.

Con base en lo anterior y para la ejecución de este proyecto es necesario el conocimiento de la geología regional y local de cada talud, sus características climatológicas y topográficas con el propósito de establecer características del suelo donde se implementó cada método; según esta información se deben conocer en detalle los métodos de revegetalización que se emplearon en cada zona y realizar seguimiento del prendimiento de la vegetación en cada talud donde se pretenden realizar un análisis comparativo en cuanto a estabilidad, calidad, costo/beneficio del proyecto y paisajismo.

Como complemento de este proyecto se necesita determinar los factores de seguridad de los taludes ubicados en Boyacá y Risaralda antes de implementar los métodos de revegetalización, y de esta manera conocer a fondo la incidencia y necesidad de la vegetación para la estabilidad de taludes, ya que para conocer los

factores de seguridad es necesario obtener parámetros como peso unitario, cohesión y ángulo de fricción que se obtienen a través de análisis de laboratorio y exploraciones mecánicas o métodos geodésicos; adicional es necesario realizar topografía detallada de los taludes, este proceso ayudará a profundizar la base de este proyecto de investigación.

Finalmente en este estudio se busca realizar un análisis costo/beneficio sobre cada método de revegetalización con el propósito de incentivar la estabilización de taludes a través de técnicas económicas que sean eficientes y que se puedan implementar en diferentes taludes de acuerdo a su nivel de complejidad y de estabilidad, ya que en el País existen muchos sitios críticos sin intervenir que se pueden estabilizar con esta metodología, sin necesidad de estabilizarlos por medio de otros tipos de técnicas de estabilización que generan sobrecostos en los proyectos, con el propósito de identificar la efectividad de estos métodos estabilizantes que permitan optimizar recursos.

Lo contenido en este documento es importante para los profesionales en ingeniería relacionados en el área de geotecnia, ya que da a conocer un poco más los estudios realizados por el INVIAS en Colombia y de la aplicación e implementación de técnicas de revegetalización en taludes para generar mejor estabilidad como una alternativa más económica en comparación con otras técnicas.

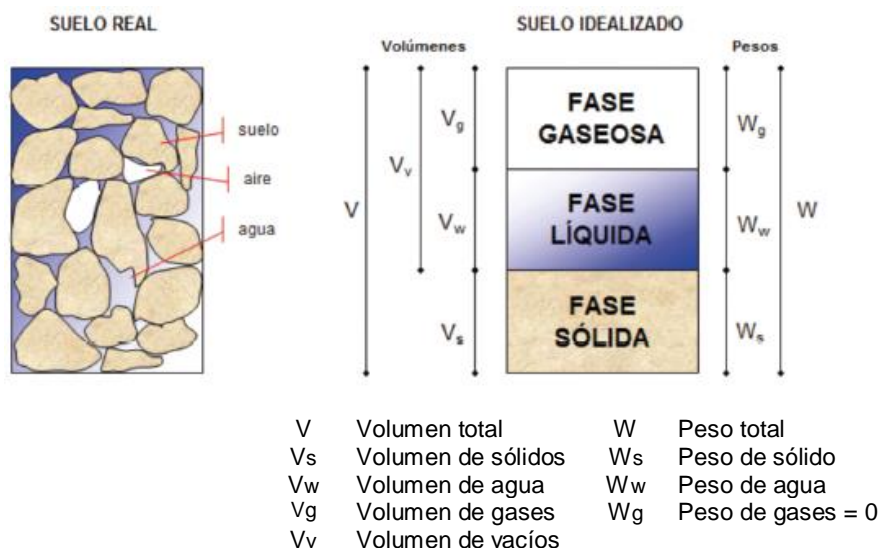
# 1. REVISIÓN DE LITERATURA

## 1.1. VARIABLES Y CLASIFICACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LOS SUBSUELOS

Para el establecimiento de las variables y la clasificación del suelo, se deben seguir los parámetros que se relacionan a continuación:

**1.1.1. Relaciones de fases.** El suelo es un material constituido por el esquema de partículas sólidas rodeado por espacios<sup>1</sup> libres (vacíos), en general ocupados por agua y aire. Para poder describir completamente las características de un depósito de suelo es necesario expresar las distintas composiciones de sólido, líquido y aire, en términos de algunas propiedades físicas, donde para los suelos se tienen tres fases que son: Sólida, líquida y gaseosa donde es preciso definir un conjunto de relaciones que se refieren a sus pesos y volúmenes, las cuales sirven para establecer la necesaria nomenclatura y para contar con conceptos mensurables, a través de cuya variación puedan seguirse los procesos ingenieriles que afectan a los suelos, ver Figura 1.

**Figura 1.** Diagrama de fases de un suelo



**Fuente:** GARCÍA OROZCO, Francisco y ESCOBAR GARCÍA, Diego. Representación de estados y trayectorias volumétricas y gravimétricas en suelos. Disponible en [http://www.unilibre.edu.co/revistaavances//avances-10-1/Tema\\_02\\_estados\\_y\\_trayectorias\\_volumetricas.pdf](http://www.unilibre.edu.co/revistaavances//avances-10-1/Tema_02_estados_y_trayectorias_volumetricas.pdf)

<sup>1</sup> (Correa, García, & Escobar, (2013)

Las relaciones volumétricas comúnmente usadas para las tres fases en un elemento de suelo son relaciones de vacíos, porosidad y grado de saturación. Mientras tanto, las relaciones gravimétricas más comunes son el contenido de humedad, el peso específico y peso específico seco (DAS, (2011).

Donde:

- e: Relación de vacíos.
- W(%): Porcentaje de humedad en el suelo.
- $\gamma$ : Peso específico o densidad.
- $\gamma_d$ : Peso específico seco.
- Gs : Gravedad específica del suelo.

**1.1.2. Tamaño de los granos y su distribución.** A continuación, se muestra el tamaño de las partículas que se tiene para la clasificación de un suelo, donde esta se puede realizar por dos métodos los cuales son el análisis granulométrico establecido por la norma INV-E- 123-13 y el análisis hidrométrico.

**Tabla 1.** Determinación del tamaño de las partículas

TIPO DE SUELO	ABERTURA
Bloques	>30 cm
Bolos	15 - 30 cm
Gravas	#4 -14 cm
Arena	#200 - #4 mm
Limo- arcilla	#200- 2 mm
Arcilla	<0.002 mm

**Fuente:** Elaboración propia a partir de Normas de ensayo INVIAS, I.N.V.E-123, 2013.

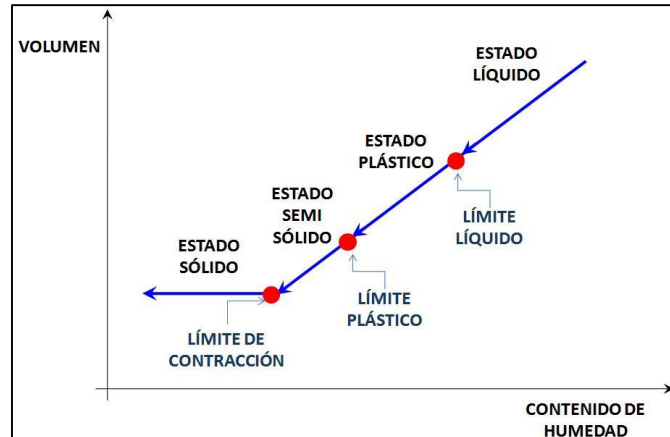
**1.1.3. Límites e índice de plasticidad.** Los límites de Atterberg de un suelo están representados por contenidos de humedad. Los principales se conocen con los nombres de: Límite Líquido, Límite Plástico<sup>2</sup> y Límite de Contracción o Retracción, así:

- Límite Líquido: Es el límite entre los estados líquido y plástico de un suelo.
- Límite Plástico: Es el límite entre los estados plástico y semisólido.
- Límite de Contracción o Retracción: Es el límite entre los estados semisólido y sólido.

Los cuatro estados de consistencia son: Sólido, Semisólido, Plástico y Líquido. A continuación, se presenta la Figura 2, que explica tanto los estados de consistencia como los límites de consistencia o Límites de Atterberg de un suelo.

<sup>2</sup> (González, (2013)

**Figura 2.** Estados de consistencia de los suelos



**Fuente:** FRANKIE, Descriptores geotécnicos (5): plasticidad, límites de Atterberg y consistencia, Disponible en <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>

Por otra parte, el Índice de Plasticidad es un parámetro del suelo empleado en la práctica con diferentes propósitos, especialmente<sup>3</sup> para la clasificación de los suelos. Teóricamente el índice de plasticidad corresponde al rango de humedad dentro del cual el suelo se comporta como plástico, es decir la diferencia matemática entre el valor de límite líquido y el límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

*Ecuación (1)*

**1.1.4. Clasificación de suelos SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).** Este es un sistema de clasificación creado por Arthur Casagrande, se deberá realizar un análisis visual del suelo<sup>4</sup> para determinar si es altamente orgánico, de partículas gruesas o de partículas finas.

**Suelo Altamente Orgánico:** Fácilmente identificable por su olor, color, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa.

**Suelo de Partículas Gruesas:** Más del 50% de la muestra es retenido en la malla No. 200.

**Suelos de Partículas Finas:** Más del 50% de la muestra pasa la malla No. 200.

<sup>3</sup> Ibid

<sup>4</sup> (Chávez, (2006)

**Tabla 2.** Clasificación del suelo SUCS para material Grueso

SISTEMA CLASIFICACION USCS							
GRUESOS (< 50 % pasa 0.08 mm)							
Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa 5 mm.***	% pasa 0.08 mm.	CU	CC	** IP	
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3	< 0.73 (wl-20) ó <4	
	GP			≤ 6	<16>3		
	GM		> 12				
	GC					> 0.73 (wl-20) ó >7	
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3	< 0.73 (wl-20) ó <4	
	SP			≤ 6	<16>3		
	SM		> 12				< 0.73 (wl-20) ó <4
	SC					> 0.73 (wl-20) y >7	
* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM,SW-SM, SP-SC.							
*** respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm							
** Si $IP \geq 0.73 (wl-20)$ ó si IP entre 4 y 7 e $IP > 0.73 (wl-20)$ , usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.							
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej: GW-GM en vez de GW-GC.							
$C_U = (D_{60}) / (D_{10})$				$C_C = (D_{30}^2) / (D_{60} \cdot D_{10})$			

**Fuente:** CUCHILLO CAYTUIRO, Olga. Apuntes del Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.) [En línea] civilgeeks.com. Disponible en <https://civilgeeks.com/2015/07/11/apuntes-del-sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-s-u-c-s/>

**Tabla 3.** Clasificación del suelo SUCS para material fino

FINOS ( $\geq 50$ % pasa 0.08 mm)			
Tipo de Suelo	Símbolo	Lim. Liq. wl	Indice de Plasticidad * I <sub>p</sub>
limos inorgánicos	ML	< 50	< 0.73 (w <sub>L</sub> - 20) ó < 4
	MH	> 50	< 0.73 (w <sub>L</sub> - 20)
arcillas inorgánicas	CL	< 50	> 0.73 (w <sub>L</sub> - 20) y > 7
	CH	> 50	> 0.73 (w <sub>L</sub> - 20)
limos y arcillas orgánicos	OL	< 50	** w <sub>L</sub> seco al horno ≤ 75 % de w <sub>L</sub> seco al aire
	OH	> 50	
turba	P <sub>t</sub>	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.	
Si $I_p \geq 0.73 (w_L - 20)$ ó si IP entre 4 y 7 e $I_p > 0.73 (w_L - 20)$ , usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH			
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente w <sub>L</sub> seco al horno			
En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej: CH-MH en vez de CL-ML.			
Si w <sub>L</sub> = 50; CL-CH ó ML-MH			

**Fuente:** CUCHILLO CAYTUIRO, Olga. Apuntes del Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.) [En línea] civilgeeks.com. Disponible en <https://civilgeeks.com/2015/07/11/apuntes-del-sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-s-u-c-s/>



## 1.2. ESTABILIDAD DE TALUDES

Según Paredes<sup>5</sup>, se define como talud, a una masa de suelo con una superficie externa inclinada con respecto a la horizontal. Cuando el talud se forma de manera natural, sin la intervención del hombre, se denomina ladera natural o ladera. Cuando la inclinación en la masa de suelo es generada por la intervención de la actividad humana, excavaciones o rellenos, se denomina talud.

También lo conceptualizan como “cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de suelo”, pero también menciona que no se puede tomar a la ligera porque se trata de una estructura sometida a muchas fuerzas, lo que la hace compleja y se deben hacer estudios de mecánica de suelos, movimientos de aguas, mecánica de rocas y evaluar el papel de la vegetación. Como otra parte de su denominación, depende el origen del proceso erosivo, si el talud se forma naturalmente, se conoce como ladera. Si es de origen antrópico, según el corte se realiza una excavación y se forman taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes

Por otro lado Rico y del Castillo, citados por Escobar y Duque (2016)<sup>6</sup> comentan que son estructuras de tierra producidas por los cortes o excavaciones, que se realizan en proyectos de ingeniería y a diferencia de las laderas, éstos necesitan diferentes materiales que se utilizan según la génesis del suelo o el origen del material, la circunstancia de formación, el clima y lo más importante la influencia del hombre.

La falla de un talud se presenta tanto en taludes naturales como en los construidos por el hombre. Muchos proyectos de ingeniería resultan afectados o afectan la estabilidad de taludes al producir modificaciones en la topografía, condiciones de flujo de agua, pérdida de resistencia, cambios en el estado de esfuerzos, por mencionar algunos factores.

En este caso, la finalidad de los análisis de estabilidad de taludes es estimar la posibilidad de falla de éstos al provocarse un deslizamiento de la masa de suelo que lo forma, buscando que el diseño de excavaciones y rellenos que den lugar a un talud o afecten la estabilidad de una ladera se realicen de forma segura y económica.

El análisis convencional de estabilidad de taludes en dos dimensiones busca el determinar la magnitud de las fuerzas o momentos actuantes (que provoquen el movimiento) y determinar la magnitud de las fuerzas o momentos resistentes (que se opongan al movimiento) que actúan en los suelos que forman al talud.

---

<sup>5</sup> (Paredes, (2019, pág. 3)

<sup>6</sup> (Escobar & Duque, (2016)

Para lograr lo anterior se calcula la relación entre las fuerzas o momentos resistentes y las fuerzas o momentos actuantes obteniendo un factor seguridad que está afectado por las magnitudes de los parámetros que le dieron origen, por lo cual, a todo factor de seguridad intrínsecamente va ligado un grado de incertidumbre.

**1.2.1. Factores que influyen en la estabilidad de un talud:** La falla de un talud o ladera se debe a un incremento en los esfuerzos actuantes o a una disminución de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Esta variación, en general, es causada por efectos naturales y actividades humanas.

Según el capítulo 11 del libro de deslizamientos<sup>7</sup>, los factores principales que afectan la estabilidad de un talud, natural o diseñado son: Erosión, Lluvia, Sismo, Aspectos geológicos, Cargas externas, Excavaciones y/o rellenos y Condición de presión de poro y vaciado rápido.

**1.2.2. Tipos de falla de taludes:** Toda masa de suelo que constituya un talud natural, terraplén o corte, presenta una tendencia a desplazarse hacia la parte baja y al frente por efecto de su propio peso. Cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo contrarresta esa tendencia, el talud es estable; en caso contrario, se produce un deslizamiento.

Según el Manual para la inspección visual de obras de estabilización (INVIAS, 2006, pág.1), los factores que intervienen en los procesos de inestabilidad se pueden clasificar como internos y externos; dentro de los internos se encuentran aquellas características que definen la susceptibilidad de la ladera, Sin embargo, los factores externos pueden eventualmente construirse como agentes contribuyentes. La tabla 4 presenta la clasificación general de los factores.

**Tabla 4.** Factores inherentes a la estabilidad de Taludes

<b>Factores Internos</b>	Geológicos
	Geomorfológicos
	Geotécnicos
	Vegetación
<b>Factores Externos</b>	Climatológicos
	Sísmicos
	Antropogénicos

**Fuente:** (Rodríguez, 2006).

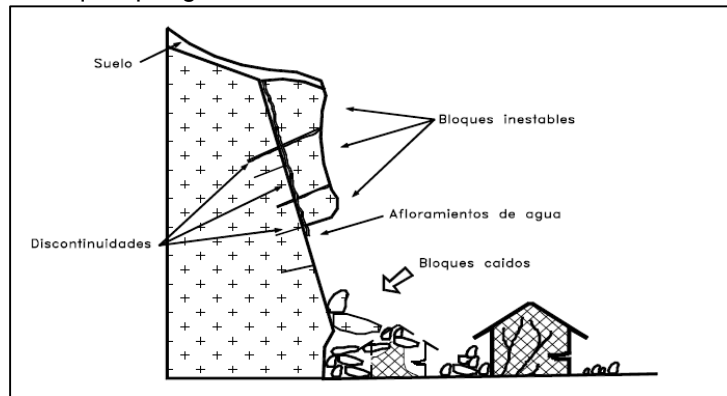
Se indica que la clasificación de movimientos de falla de taludes se divide en seis grandes grupos:

<sup>7</sup> (Suárez, (1998, pág. 7)

- Caídas.
- Volcamientos.
- Deslizamientos.
- Propagación Lateral.
- Flujos.
- Movimientos complejos.

También se indica que las caídas de una masa de cualquier tamaño, se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y descende principalmente, a través del aire por caída libre, a saltos o rodando, como se observa en la figura 3.

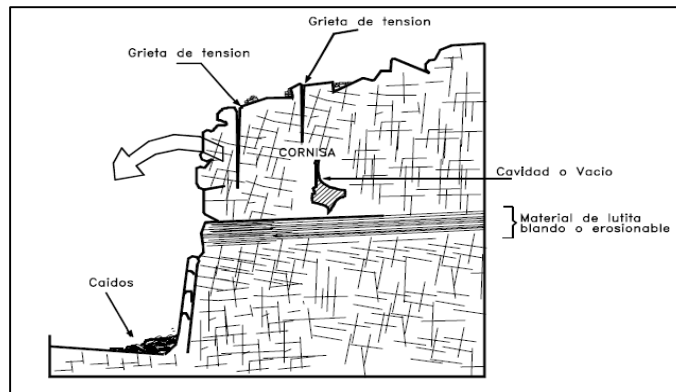
**Figura 3.** Caídos de bloques por gravedad en roca fracturada



**Fuente:** (Suárez, (1998).

El Volcamiento<sup>8</sup> consiste en la rotación hacia adelante de una unidad o varias, alrededor de un punto de giro o pivote en su parte inferior, debajo de la unidad, por acción de la gravedad y de fuerzas ejercida por unidades adyacentes o por flujos en las grietas.

**Figura 4.** Volteo o inclinación en materiales residuales

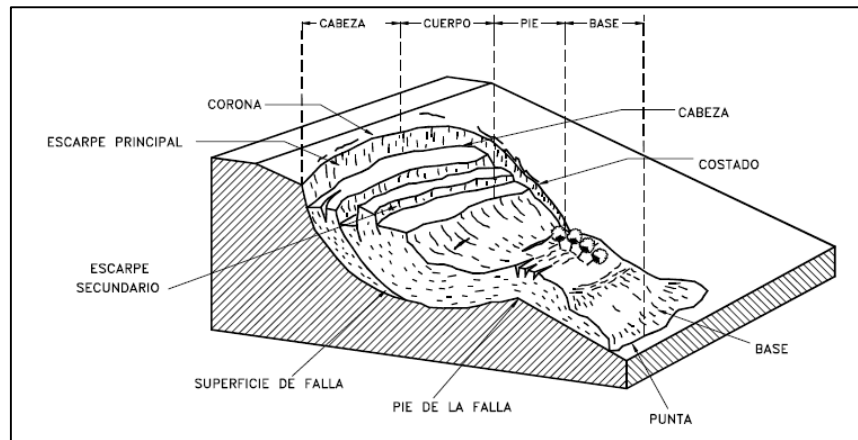


**Fuente:** (Suárez, (1998).

<sup>8</sup> (Costa, (2004)

En la figura 5 se indican los términos descriptivos de los componentes de un deslizamiento.

**Figura 5.** Nomenclatura de deslizamiento

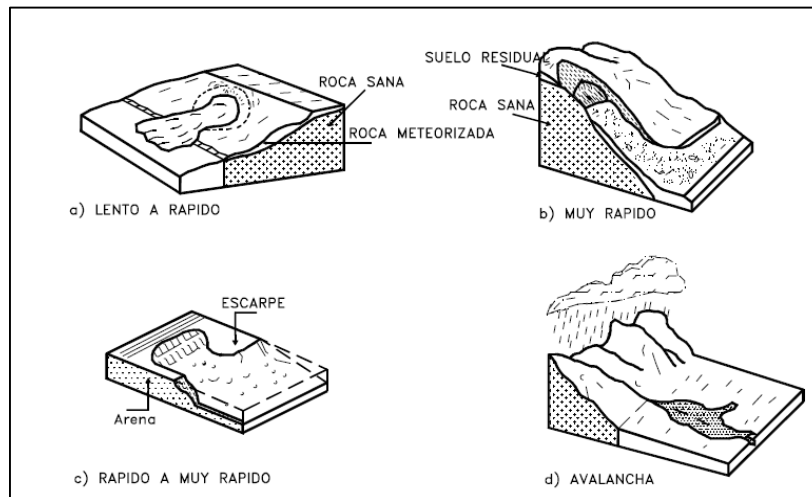


**Fuente:** (Suárez, (1998).

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas<sup>9</sup> o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla.

La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales subsuperficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta saturación conduce a la formación de un flujo.

**Figura 6.** Nomenclatura de deslizamiento



**Fuente:** (Suárez, (1998).

<sup>9</sup> (Suárez, (1998, pág. 23)

**1.2.3. Metodologías para el Análisis de la Estabilidad.** <sup>10</sup>indica que, dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de límite de equilibrio, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros.

Los métodos numéricos son la técnica que muestra la mejor aproximación al detalle, de las condiciones de estabilidad en la mayoría de los casos de evaluación de estabilidad de taludes.

Sin embargo, los métodos de límite de equilibrio son más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación (“Toppling”) y las fallas en cuña.

En el caso de los sistemas de falla complejos, es conveniente utilizar metodologías de modelación que tengan en cuenta los factores que producen los movimientos.

Igualmente, se pueden integrar al análisis modelaciones de hidrogeología y las sollicitaciones sísmicas.

**1.2.3.1. Métodos empíricos.** Se basan en observaciones de campo y en la experiencia previa de los diseñadores tomando en cuenta las condiciones geológicas y geotécnicas de la zona donde se encuentra el talud. Permiten un análisis simple y relativamente rápido cuando las condiciones reales se apegan a las hipótesis en que se basan estos métodos; la incertidumbre inherente a estos métodos es alta debido a que no se realiza exploración, ensayos de laboratorio o cálculos rigurosos de estabilidad.

El método de observaciones de campo presenta un sumario de recomendaciones de inclinación de cortes en diversos materiales<sup>11</sup>, utilizadas en el diseño empírico de taludes para vías terrestres. La tabla desarrollada hace más de 3 décadas toma en cuenta los requerimientos usuales de las vías terrestres, pero debe utilizarse con reserva y revisar sus resultados aplicando una metodología rigurosa.

**Métodos Límite de equilibrio.** Los parámetros utilizados para este método son topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.

Entre su limitación está que genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones.

---

<sup>10</sup> (Suárez, (1998, pág. 129)

<sup>11</sup> (Rico, (2009)

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

El concepto de equilibrio límite corresponde a sistemas de fuerza que están justo en el punto de falla<sup>12</sup>. Permite combinar expresiones para equilibrio de fuerza y resistencia al corte en la misma ecuación, pero no predice los desplazamientos.

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

$$F.S. = \text{Resistencia al corte} / \text{Esfuerzo al cortante.} \qquad \text{Ecuación ( 2)}$$

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

$$F.S. = \text{Momento resistente} / \text{Momento actuante.} \qquad \text{Ecuación ( 3)}$$

Existen, además, otros sistemas para plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud, métodos probabilísticos, así como tablas empíricas locales basadas en el comportamiento típico de los taludes.

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “límite de equilibrio” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie. Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del factor de seguridad.

En la siguiente tabla (listado de ecuaciones para cálculo de estabilidad); se presentan otros métodos de cálculo para el análisis de estabilidad de taludes.

---

<sup>12</sup> (Costa, (2004)

**Tabla 5.** Listado de ecuaciones para cálculo de estabilidad.

Autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
Taylor (1948)	Cu C, $\phi$	0-90° 0-90°	$\phi = 0$ Círculo de Fricción.	Análisis no drenado, taludes secos solamente.
Bishop y Morgensten (1960)	ru C, $\phi$	11-26.5°	Bishop	Primero en incluir efectos del agua.
Gibsson y Morguesten (1960)	Cu	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con cero resistencias en la superficie y Cu aumenta linealmente con la profundidad.
Spencer (1967)	ru C, $\phi$	0-34°	Spencer	Círculos de pie solamente.
Janbú (1968)	Cu C, $\phi$ , ru	0-90°	$\phi = 0$ Jambú GPS	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.
Hunter y Schuster (1968)	Cu	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y Cu aumenta linealmente con la profundidad.
Chen y Giger (1971)	C, $\phi$	20-90°	Analisis Limite	
O' Connor y Mitchell (1977)	ru C, $\phi$	11-26°	Bishop	Bishop y Morgensten (1960) extendido para incluir $N_c=0.1$
Hoek y Bray (1977)	C, $\phi$ C, $\phi$	0-90° 0-90°	Círculo de Fricción Cuña	Incluye agua subterránea y grietas de tensión, Analisis de bloque en tres dimensiones.

**Fuente:** (Suárez, (1998).

**Tabla 6.** Continuación. Listado de ecuaciones para cálculo de estabilidad

Autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
Cousins (1978)	$C, \phi$	0-45°	Círculo de Fricción.	Extension del metodo de taylor (1948)
Charles y Soares(1984)	$\phi$	26-63°	Bishop	Envolvente de Falla no lineal de Mohr Coulumb
Barnes (1991)	$r_u C, \phi$	11-63°	Bishop	Extension de Bishop y Morgesten (1960) para um rango mayor de angulos del talud.

Fuente: (Suárez, (1998).

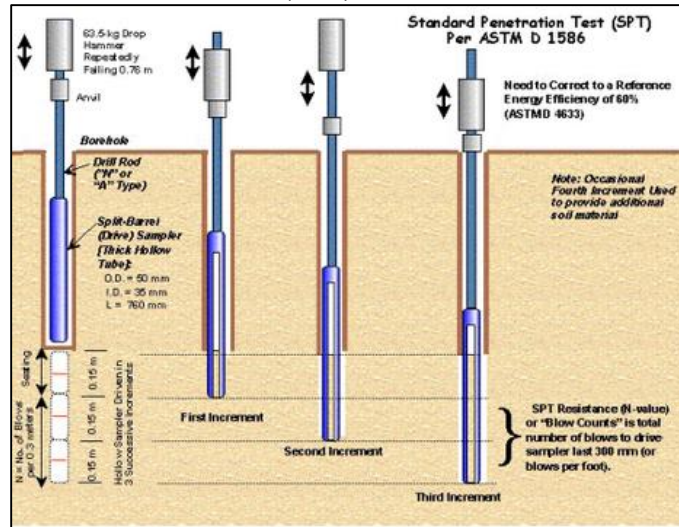
### 1.3. ENSAYOS IN SITU

**1.3.1. Ensayo de penetración estándar (SPT).** El ensayo SPT busca determinar las propiedades ingenieriles de los suelos, es un procedimiento que, debido a la sencillez de su ejecución, se caracteriza por ser el más económico<sup>13</sup> y usado en la exploración del subsuelo. Se realiza en el fondo de una perforación determinando el número N de golpes, de un martillo con peso de 63.5 Kg y 762 mm de altura de caída, necesarios para hincar en el suelo inalterado la toma muestras partido normal en una distancia de 305 mm (Figura 7). Cuando la toma de muestras toca el fondo, que para este caso es una cuchara partida, el martillo debe golpearlo a través de las barras hasta penetrarlo 150 mm, de ahí en adelante es donde dará inicio el ensayo.

<sup>13</sup> (Correa, García, & Escobar, (2013)



**Figura 7.** Ensayo de Penetración Estandar (SPT)



**Fuente:** Geotechnical and Foundation Engineering Disponible en <http://foundationeng.blogspot.com.co/2015/07/243-standard-penetration-test-astm-d1586.html>

Una vez se ejecuta el ensayo, se habla de rechazo si N resulta ser mayor a 50 golpes en los 15 cm, o si N es igual a 100 golpes por pie o si no hay avance luego de 10 golpes.

Este ensayo es una herramienta útil que permite cuantificar la resistencia de un suelo, la clasificación del mismo y determinar la capacidad portante. La prueba de SPT tiene un número de factores que afectan los resultados, como la energía que llega a la toma muestras, la cual depende del equipo empleado, por lo que es necesario aplicar factores de corrección en función de la energía que se ejerce y entrega el equipo. La relación de energía (ER) del martillo debe ser del 60% de la energía teórica de 475 J.

De acuerdo con los resultados de campo obtenido con el SPT y resultados de ensayos de laboratorio se han obtenido correlaciones para determinar parámetros como la densidad relativa ( $D_r$ ), el peso unitario húmedo ( $\gamma_{hum}$ ), el ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi$ ), entre otros (tabla 6).

**Tabla 7.** Valores empíricos de  $\phi$ ,  $D_r$  y  $\gamma_{hum}$  obtenidos con el N del SPT en diferentes suelos

Descripción	Muy suelta	Suelta	Mediana	Densa	Muy densa
Densidad relativa, $D_r$	0 - 0.15	0.15 - 0.35	0.35 - 0.65	0.65 - 0.85	0.85 - 1.0
$N_{70}$ SPT: fino	1 - 2	3 - 6	7 - 15	16 - 30	?
medio	2 - 3	4 - 7	8 - 20	21 - 40	> 40
grueso	3 - 6	5 - 9	10 - 25	26 - 45	> 45
$\phi^\circ$ : fino	26 - 28	28 - 30	30 - 34	33 - 38	
medio	27 - 28	30 - 32	32 - 36	36 - 42	< 50
grueso	28 - 30	30 - 34	33 - 40	40 - 50	
$\gamma_{hum}$ (kN/m <sup>3</sup> )	11 - 16	14 - 18	17 - 20	17 - 22	20 - 23

Fuente: (DAS, (2011).

El registro de datos se realiza en tres fracciones N1, N2, N3 en donde el primero corresponde a la carga de asentamiento afectada por la perforación previa. También es necesario tener en cuenta que el diámetro de perforación es de 2" a 4"; de ahí en adelante es posible corregir este parámetro N para obtener principalmente la resistencia al corte del material, el ángulo de fricción y la cohesión.

#### 1.4. BIOINGENIERÍA PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

La bioingeniería fue definida como “el diseño de ecosistemas sostenibles que integran la sociedad humana con su medio natural para el beneficio de ambos” Los objetivos que persigue la bioingeniería<sup>14</sup> son restaurar los ecosistemas que han sido alterados sustancialmente por las actividades humanas como lo es la contaminación ambiental o alteración de la tierra; y desarrollar nuevos ecosistemas sostenibles que tienen tantos valores humanos y ecológicos.

Una definición de bioingeniería referida directamente a la restauración de taludes es propuesta citado por Bernal y Suescun<sup>15</sup> donde afirman que la bioingeniería se refiere a la prevención y control de erosión, protección y estabilización de taludes y problemas de fallas en donde se tienen en cuenta los procesos físicos, químicos y biológicos de los fenómenos de falla de los taludes.

Lo anterior permite la construcción de estructuras con partes vivas, usando diferentes estructuras de las plantas, tales como: raíces y tallos principalmente. La bioingeniería es considerada como algo único en el sentido que las mismas partes de las plantas (raíces y tallos) sirven como elementos mecánicos a la estructura principal en los sistemas de protección de laderas y se transforman a través del tiempo de los taludes intervenidos. Estas estructuras, se convierten en refuerzo,

<sup>14</sup> (Mitsch, (2012)

<sup>15</sup> (Bernal & Suescún, (2016)

drenajes hidráulicos y barreras para contener erosión y fallas de taludes por movimientos de masas citado por Flórez (2014)<sup>16</sup>.

Como lo expresa Suárez, el efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes ha sido muy debatida<sup>17</sup> en los últimos años; el estado del arte actual deja muchas dudas e inquietudes y la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo, no ha tenido una explicación universalmente aceptada. Sin embargo, la experiencia ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de erosión, reptación y fallas subsuperficiales.

En Colombia en suelos residuales arcillosos se han observado procesos nuevos de reptación después de la quema de bosques en áreas de alta pendiente. Los procesos de deforestación en suelos residuales tropicales han activado procesos de crepitación subsuperficial de áreas muy grandes; sin embargo, no se ha encontrado evidencia de fallas profundas activadas por procesos de deforestación e incluso se han reportado casos de fallas catastróficas con múltiples deslizamientos, debidos a fenómenos sísmicos en áreas de bosques primarios densos, con raíces relativamente profundas con suelos saturados, en altas pendientes.

Para poder analizar los fenómenos del efecto de la vegetación sobre el suelo se requiere investigar las características específicas de la vegetación, en el ambiente natural que se esté estudiando.

Entre los factores importantes se sugiere analizar los siguientes: Volumen y densidad de follaje, tamaño, ángulo de inclinación y aspereza de las hojas, altura total de la cobertura vegetal, presencia de varias capas diferentes de cobertura vegetal, tipo, forma, profundidad, diámetro, densidad, cubrimiento y resistencia del sistema de raíces.

La vegetación que se establece trae múltiples ventajas, ya que la existencia de una cobertura vegetal bien desarrollada reduce significativamente las tasas de escorrentía y erosión en los taludes<sup>18</sup>. La planta protege la superficie del suelo de las gotas de agua que impactan, reduciendo la energía cinética, la capacidad de desprendimiento, y el proceso de formación de escorrentía<sup>19</sup>. La vegetación aumenta la estabilidad de agregados y promueven la infiltración, lo que reduce las tasas de flujo superficial<sup>20</sup>. El desarrollo de sistemas de raíces de la planta es esencial para aumentar la estabilidad de taludes Los efectos de refuerzo de las

---

<sup>16</sup> (Avellaneda, (2013)

<sup>17</sup> (Suárez, (1998)

<sup>18</sup> (Fuller & Booth, (2005)

<sup>19</sup> (Olorunnaiye & Ayuba, (2014)

<sup>20</sup> (Fuller & Booth, (2005)

raíces de la vegetación dependen de las características morfológicas del sistema radical, la resistencia a la tracción de las raíces individuales y la distribución espacial de las raíces en el suelo.

Las raíces aumentan la resistencia tangencial al corte en los taludes, la cual es definida como la resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y al deslizamiento a lo largo de cualquier plano<sup>21</sup>, también se hacen amplios estudios acerca del efecto que tienen las raíces en la resistencia al corte de los taludes, explicando las relaciones suelo raíz; Stokes et al. (2009) sostienen que para entender estas interacciones, reconocidas ampliamente en la fijación del suelo, se requiere identificar rasgos como la distribución, longitud, orientación y diámetro de la raíz, además de las dimensiones espaciales y temporales de las raíces dentro del sistema donde se encuentren. Se afirma, además, que las raíces gruesas actúan como clavos en los taludes y la posición espacial de estas raíces determina la disposición de las raíces delgadas asociadas; las raíces delgadas actúan en tensión durante un deslizamiento y si atraviesan la zona de corte potencial, ofrecen una contribución importante en la protección contra deslizamientos (Stokes et al., 2009).

Además, enfatizan en que el tipo de especies vegetales que se establecen en un talud pueden tener diferentes funciones en la prevención de erosión dependiendo de las raíces que desarrollen. Para tratar problemas de erosión a profundidad se deben establecer plantas con raíces profundas y fuertes que tenga algunas raíces verticales rígidas que penetran profundamente en el suelo y de anclaje en estratos firmes, así como un gran número de raíces finas que se ramifiquen lateralmente de las raíces principales. Para controlar procesos erosivos causados por el agua que operan en la capa superior del suelo, se deben establecer especies que colonicen los horizontes superiores del suelo con un sistema radicular altamente ramificado y de rápido crecimiento que tenga capacidad de mantener las partículas del suelo unidas (Reubens et al., 2007).

**1.4.1. Biotecnología de taludes.** Para la estabilización de taludes por el uso combinado de vegetación y elementos estructurales adicionales<sup>22</sup> trabajando de una manera conjunta e integrada, se le conoce como estabilización Biotecnológica de taludes. Esta biotecnología de taludes que ha cumplido con parámetros ambientales y ha desempeñado de manera efectiva su trabajo, basa su existencia en diferentes técnicas en las que el componente vegetal es la parte esencial y que son enunciadas a continuación:

---

<sup>21</sup> (Li, Dick, & Tuovinen, (2006)

<sup>22</sup> (Suárez, (1998)

**1.4.1.1. Productos enrollados para el control de la erosión. (PECE).** según las especificaciones generales de construcción de INVIAS (2013)<sup>23</sup>. Es un material fabricado en rollos y diseñado para reducir la erosión del suelo y ayudar en el crecimiento, el asentamiento y la protección de la vegetación. Los productos enrollados para control de erosión podrán tener el carácter de temporales o permanentes.

Producto enrollado temporal para control de erosión; Para aplicaciones donde la vegetación natural (por sí sola) provee suficiente protección contra la erosión. Los productos que se utilizan en estos casos tienen la duración y las propiedades necesarias para establecer la vegetación a corto plazo bajo las condiciones naturales del sitio.

Producto enrollado permanente para control de erosión: Para aplicaciones donde la vegetación natural (por sí sola) no es suficiente para resistir las condiciones de flujo y no provee la protección suficiente para la erosión a largo plazo. Los productos que se emplean en estos casos tienen las propiedades necesarias para reforzar la vegetación bajo las condiciones del sitio a largo plazo.

Los productos enrollados para control de erosión podrán ser de los siguientes tipos según se necesite:

**Textil de tejido abierto (TTA):** es un Producto enrollado para el control de la erosión (PECE) temporal integrado por hilos naturales o sintéticos, tejidos dentro de una matriz bidimensional, utilizado para brindar control de erosión y facilitar el establecimiento de la vegetación.

**Manto para control de erosión (MCE):** Es un PECE temporal, degradable, compuesto de fibras naturales o sintéticas unidas mecánica, estructural o químicamente, para formar una matriz continua que provee control de erosión y facilita el establecimiento de vegetación.

**Manto para refuerzo de la vegetación (MRV):** Es un PECE permanente, compuesto por fibras sintéticas no degradables estabilizadas UV, hilos y/o filamentos procesados en matrices de refuerzo tridimensionales, diseñadas para aplicaciones hidráulicas críticas en donde las descargas proyectadas excedan las velocidades y los esfuerzos cortantes soportados por la vegetación natural. Los MRV deben tener el espesor, la resistencia y los vacíos suficientes para retener partículas de suelo y permitir el desarrollo de la vegetación a través de la matriz.

Suárez<sup>24</sup> comenta el uso de mallas de fibras naturales o artificiales para el recubrimiento de superficies expuestas de los taludes. En donde participan diferentes materiales de origen natural como la fibra de coco o cabuya, igualmente

---

<sup>23</sup> (INVIAS, Especificaciones generales de construcción de carreteras, (2013)

<sup>24</sup> (Suárez, (1998)

materiales sintéticos que contienen polivinilos o derivados plásticos. Según Morgan (1986) “Estas mallas no son suficiente para el manejo de la erosión, por lo cual deben combinarse con algún tipo de mantillo o cobertura ya que es ampliamente identificada su ineficiencia”.

Según Suárez, los mayores beneficios de los Geomantos se dan por el aumento de la capacidad de absorción de agua (hasta de tres veces); aporte de materia orgánica cuando estas fibras son verdes, protección de la siembra del golpe de lluvia o los animales que comen la semilla y tratamientos que se realicen por debajo del Geomanto se reporta su utilización para estos últimos propósitos en la protección del “empaquetado de taludes” que es una mezcla de materia orgánica con agua de 5 a 8 cm y una fibra en la parte superior protegida o fijada con grapas o estacas aprovechando el sistema de enmallado del producto.

Las ventajas que se obtienen del empleo de técnicas de recubrimiento de taludes se dan en el control de pérdidas de suelo<sup>25</sup>, quienes compararon diferentes materiales y encontraron que hay una reducción de pérdidas de suelo bajo intensidades de precipitación de 75 mm h<sup>-1</sup> y oscilaba entre 22 y 72% dependiendo del material y las variables propias del talud como sustrato y pendiente.

**1.4.2. Siembra de árboles nativos (Revegetalización).** Este concepto se aplica a una práctica de conservación y recuperación de suelos, empleando especies de gran poder de enraizamiento arbustivas o arbóreas para la estabilización de taludes o gramíneas que den anclaje al suelo. Estas según consideración del INVIAS deberán ser nativas y en lo posible<sup>26</sup>, deberán provenir de los viveros existentes de la región; se utilizarán plántulas (pequeños árboles) que, al momento de su plantación, tengan una altura entre 1.20 m y 1.50 m, en lo posible.

La forma de revegetalizar puede cambiar según el trazado, este dependerá de las características del terreno y del tipo de modelo a desarrollar y hace referencia a la manera como se van a distribuir los árboles en una plantación, existen tres clases de trazado:

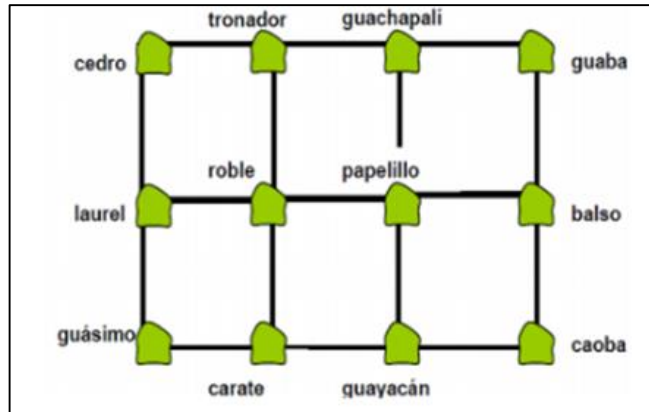
**1.4.2.1. Distribución al cuadrado.** Consiste en colocar las plántulas a distancias iguales entre líneas y dentro de las líneas, es decir se coloca cada plántula en el vértice de un cuadrado cuyo lado es igual a la distancia de plantación. Esta distribución es aconsejable en terrenos planos, tal como lo indica la Figura 8.

---

<sup>25</sup> (Giraldo, 2017)

<sup>26</sup> (INVIAS, Especificaciones generales de construcción de carreteras, (2013)

**Figura 8.** Trazado cuadrado

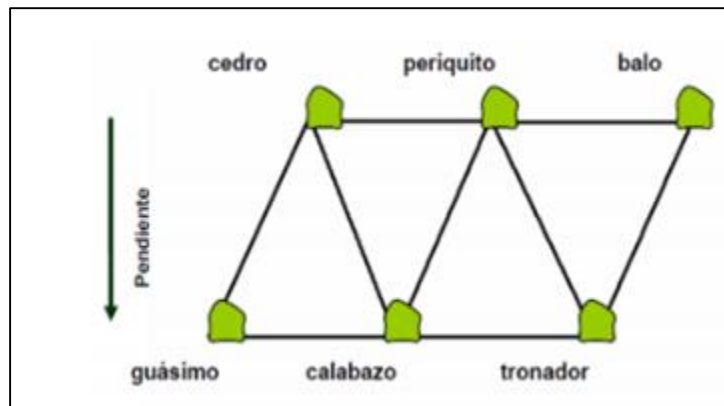


**Fuente:** Manual de Reforestación Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá.

**1.4.2.2. Distribución rectangular.** Cuando la distancia entre líneas es mayor, que la distancia dentro de las líneas, este trazado se realiza con el fin de facilitar la circulación de maquinaria.

**1.4.2.3. Distribución en triángulos “Tresbolillos”.** Consiste en disponer los árboles a manera de triángulos de lados iguales, cuyo lado es igual a la distancia de plantación. Es aconsejable para terrenos pendientes y donde es necesario conservar los suelos y facilitar la penetración y retención del agua. Ver Figura 9.

**Figura 9.** Trazado Tres bolillos



**Fuente:** Manual de Reforestación Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá, Volumen 1.

**1.4.3. Trasplante de Césped.** El establecimiento de pastos a partir de “cespedones” cortes en cuadro de porciones de pasto establecido, generalmente se utilizan de 0,3 m de ancho por 2 a 3 m de longitud, siendo fijadas mediante estacas o ganchos de alambre, pero el costo de estos cortes más la mano de obra es sumamente alta. Otra técnica usada es el “coctel de semillas” consiste en el uso de costales de fique rellenos de tierra abonada y una mezcla de semillas, tapando las terrazas, pero no son efectivos por que los costales se rajan y se sale el material

no consolidado, además las semillas de pasto no tienen como germinar ya que no tienen las condiciones de luz necesarias.

Algunos autores<sup>27</sup>, recomiendan la propagación asexual de plantas a partir de estacas, estolones y rizomas para las especies de gramíneas o leguminosas que tiene un crecimiento mayor en estos métodos que por semilla, además su cubrimiento es mayor que las plantas que crecen por semilla ya que tienen un nivel de exploración mayor pero el problema es la mano de obra para la siembra ya que por semilla el cañón de la hidro sembradora aplica la semilla pero por estaca, estolón o rizoma debe ser manual.

Es el proceso por el cual se toma una cobertura vegetal deteriorada o que no cumple con unos requisitos y se cambia por una que sí lo haga, de esta tarea es importante definir el tipo de césped a implementar e identificar de manera inicial la forma en que se va a regar.

**1.4.3.1. Proceso de trasplante de césped.** Sobre la superficie preparada se aplicará fertilizante del tipo y en la cantidad que lo indiquen los documentos del proyecto y, a continuación, se extenderán los bloques de césped haciéndolos casar en la mejor forma posible, evitando traslapos y vacíos y buscando que los extremos del área empradizada empalmen armónicamente con el terreno natural adyacente.

En las uniones de los bloques, se colocará tierra orgánica. Una vez plantada la superficie, se deberá regar de manera abundante y en lo sucesivo diariamente sin limitación o de acuerdo a las indicaciones de un experto, y se apisonará con frecuencia con un cilindro manual, con el fin de emparejarla y detectar las irregularidades, la cuales deberán ser corregidas tal cual el experto mencionado lo considere.

---

<sup>27</sup> (Rojas, García, & Alarcón, (2004)



## **2. DISEÑO METODOLÓGICO**

Con este proyecto se pretende analizar la incidencia de la empradización en cuanto a su aporte a la estabilización de taludes en donde el Instituto Nacional de Vías adelantó el primer programa piloto de revegetalización y paisajismo. Para ésto, el proyecto se desarrolla en tres etapas metodológicas descritas a continuación.

### **2.1. ETAPA DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

Se investiga la mayor información posible de los cuatro sitios en estudio por medio del cual el Instituto Nacional de Vías, adelantó el primer programa piloto de Revegetalización y paisajismo de taludes.

Con base en esta información se localizan los taludes, identificando las posibles fallas y definiendo las unidades lito estratigráficas, mediante información secundaria generada por las planchas a escala 1:100.000 o mayores del Servicio Geológico Colombiano; ya que los taludes ubicados en los Departamentos de Risaralda, Huila y Caquetá ya fueron revegetalizados, se realizará descripción de la implementación de cada método usado para la estabilización de cada talud.

### **2.2. ETAPA DE CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA**

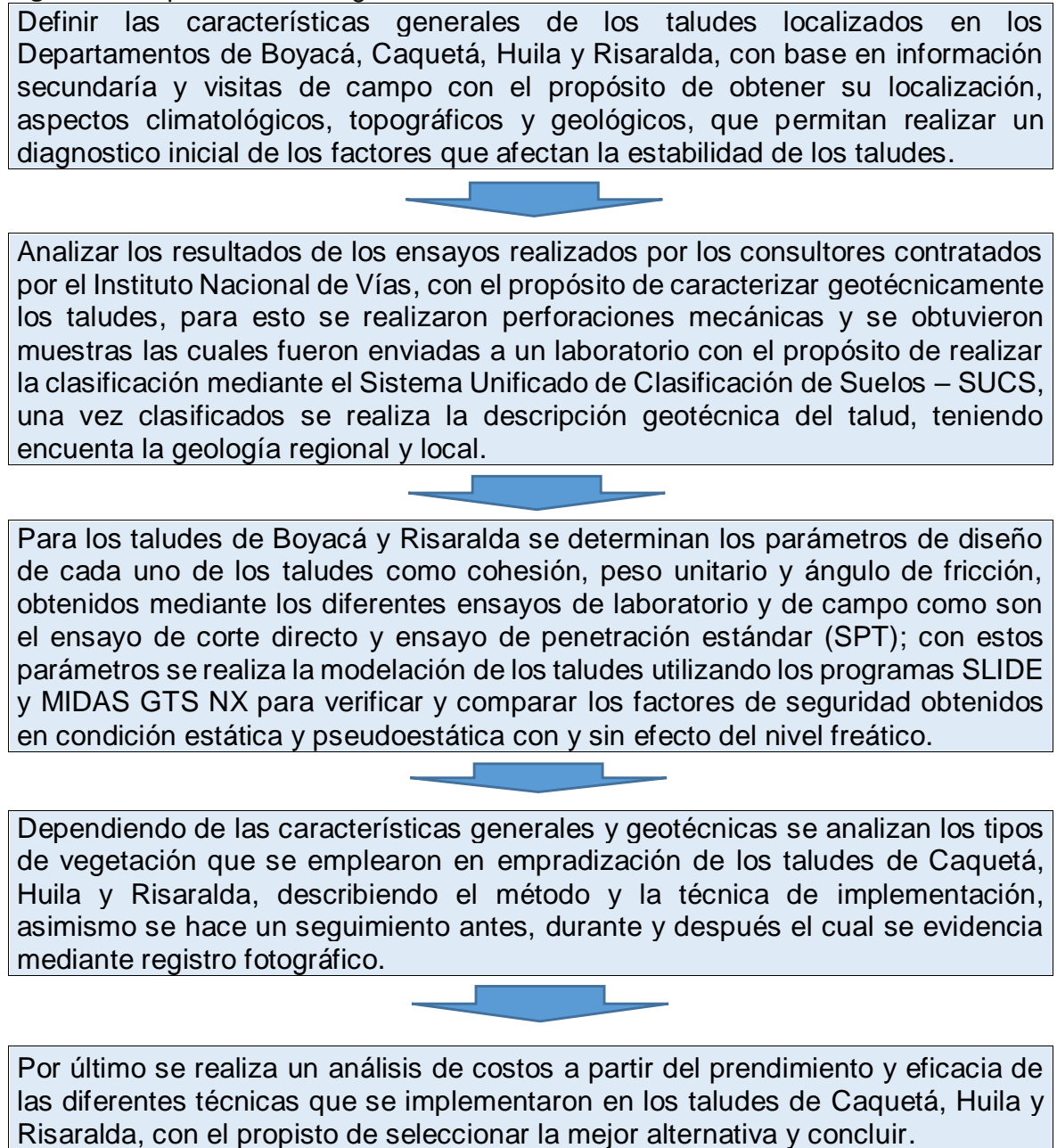
Para la caracterización Geotécnica de los taludes se requiere realizar clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos – SUCS, el cual permite describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se realiza a través de determinar previamente una granulometría del suelo mediante tamizado, así mismo para realizar el análisis de estabilidad de taludes ubicados en los departamentos de Risaralda y Boyacá y mediante ensayos mecánicos determinar los parámetros de diseño a partir de curvas de correlación mediante la realización del ensayo S.P.T y del cual se obtuvo ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas, con el propósito de determinar los factores de seguridad de los taludes antes de ser empradizados.

Una vez caracterizados los taludes se analizaron los tipos de vegetación que se emplearon en cada zona, dependiendo de las condiciones climáticas, de suelos y del mecanismo de falla del talud para las diversas zonas; así mismo se hará seguimiento del prendimiento y crecimiento de la vegetación.

### 2.3. ETAPA DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Se realiza el desarrollo y procesamiento de datos obtenidos de las diferentes territoriales donde se siguen los objetivos establecidos en el siguiente esquema metodológico.

**Figura 10.** Esquema metodológico



**Fuente:** Elaboración propia.

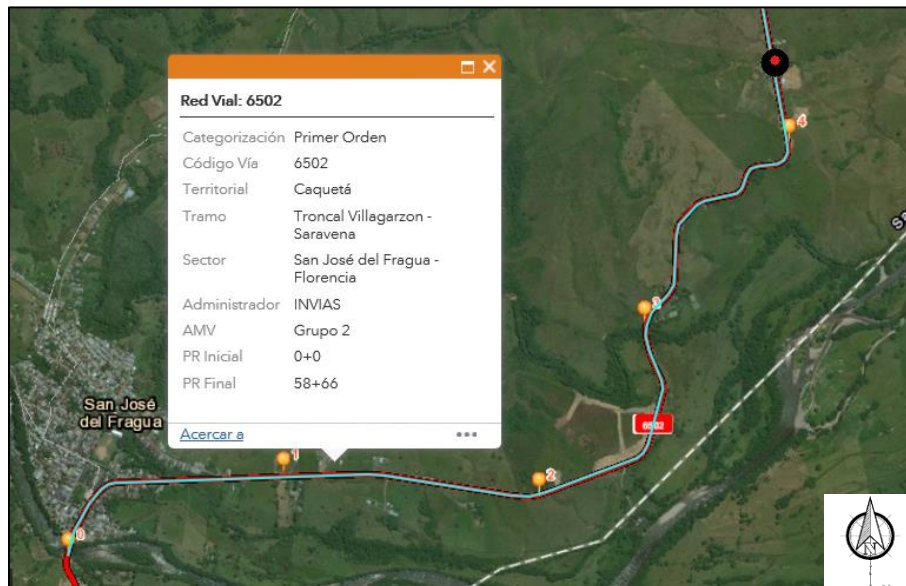
### 3. CARACTERISTICAS GENERALES

En este capítulo se definir las características generales de los taludes localizados en los Departamentos de Boyacá, Caquetá, Huila y Risaralda, con base en información secundaria y visitas de campo con el propósito de obtener su localización, aspectos climatológicos, topográficos y geológicos, que permitan realizar un diagnóstico inicial de los factores que afectan la estabilidad de los taludes.

#### 3.1. TERRITORIAL DE CAQUETÁ

El talud se encuentra localizado en el PR 04+0150 de la Vía San José del Fragua – Florencia en el Departamento de Caquetá.

**Figura 11.** Localización del proyecto: Vía San José del Fragua – Florencia, PR 04 +0000 al PR 4+0150



**Fuente:** Elaboración Propia a partir del Sistema de Información Geográfica HERMES.

La vía 6502: San José del Fragua-Florencia, hace parte del Proyecto Transnacional Marginal de la Selva; tiene una longitud de 58,14 kilómetros los cuales están totalmente pavimentados con ancho de calzada de 7,30. Se presentó inestabilidad en el talud margen izquierda en el PR 04+0000. Este talud se intervino con el programa de Revegetalización y Paisajismo de Taludes mediante dos metodologías como son: el trasplante de césped y la hidrosiembra manual, para disminuir al máximo la erosión constante que se presentaba en el lugar.

**3.1.1. Geología.** De acuerdo con la plancha 413 Florencia a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, el municipio de San José del Fragua y el PR4+000 se desarrolla en la región del Piedemonte Amazónico, en la transición entre las

formaciones montañosas de la Cordillera Oriental y las de la Planicie Amazónica, como se describen a continuación:

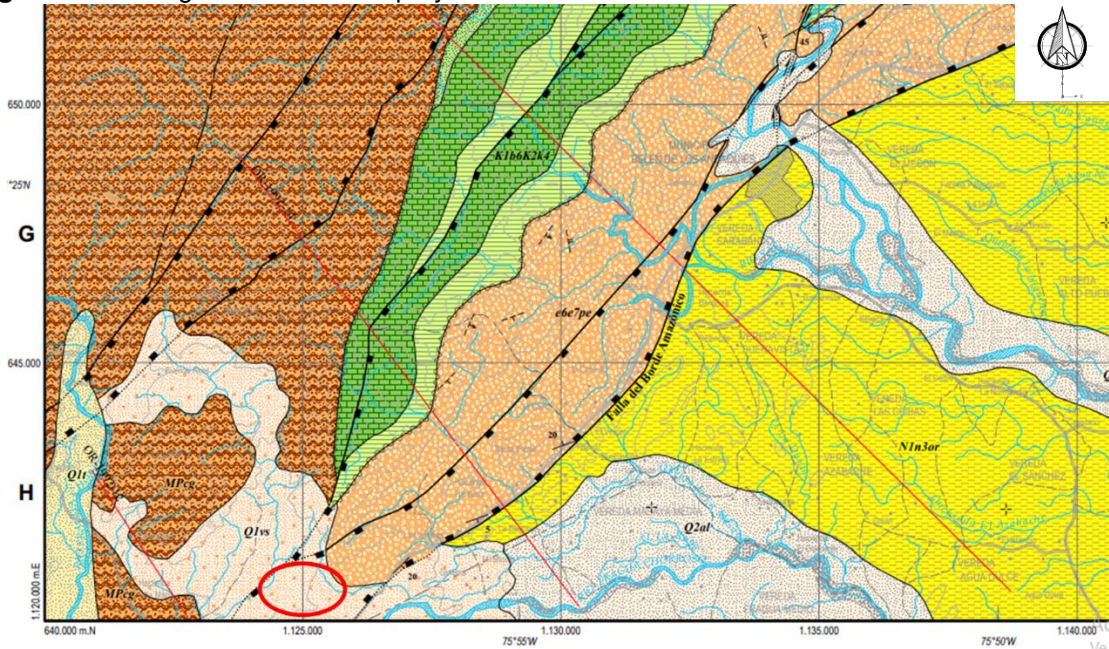
- **Complejo Garzón (MPcg):** Corresponde a afloramientos de rocas metamórficas, básicamente neises cuarzo feldespáticos, migmatitas granulitos, anfibolitas, ortoneises, cuarcitas y mármoles, que se exponen en una franja al occidente de la zona de estudio.
- **Formación Villeta (K1b6k2k4):** Se trata de lodolitas oscuras y margas con intercalaciones de calizas, cuarzo arenitas y limolitas silíceas en contacto fallado, con el Complejo Garzón.
- **Formación Pepino (e6e7pe):** Son intercalaciones de capas gruesas de conglomerados polimicticos clasto soportados subangulaes, arenitas líticas, arcillolitas y cuarzoarenitas que. La unidad se encuentra en contacto fallado con las formaciones de la Planicie Amazónica en el piedemonte.

Las formaciones que pueden considerarse como parte de la Planicie Amazónica, y en la cual se encuentra el sitio de estudio, son las siguientes:

- **Grupo Orito (N1n3or):** Son lodolitas, areniscas líticas y e intercalaciones de conglomerados ferruginosos, con la presencia de costras de yeso y capas intercaladas de carbón.
- **Depósitos fluviales volcanosedimentarios (Q1vs):** depósitos de materiales volcánicos compuestos por fragmentos de limos hasta cantos de tobas riolíticas y lavas de composición basáltica-andesítica junto con fragmentos de rocas metamórficas.
- **Depósitos aluviales (Q2al):** están constituidos por aluviones de arenas con guijos y cantos de rocas ígneas, metamórficas y volcánicas y limos de llanura de inundación, los cuales están distribuidos formando depósitos no consolidados de barras puntuales, terrazas y en algunos tramos de los ríos también forman barras de canal.

El área de estudio tiene influencia directa de las fallas del Piedemonte Amazónico y de la Cordillera Oriental, cuyo alineamiento predominante es NNE-SSW. En general, las fallas son activas de acuerdo con la información del Servicio Geológico Colombiano, son de tipo inverso o de cabalgamiento y revelan un ambiente tectónico compresivo en el sur de Colombia.

**Figura 12.** Geología en la zona del proyecto



**Fuente:** Modificado de la plancha 413 Florencia a escala 1:100.000 del mapa geológico de Colombia.

Las principales fallas geológicas que tienen incidencia directa sobre la zona cercana al proyecto son las siguientes:

- Falla del Borde Amazónico
- Falla Urcusique
- Falla Churumbel
- Falla Acevedo Norte y Sur
- Falla San Francisco Yunguilla

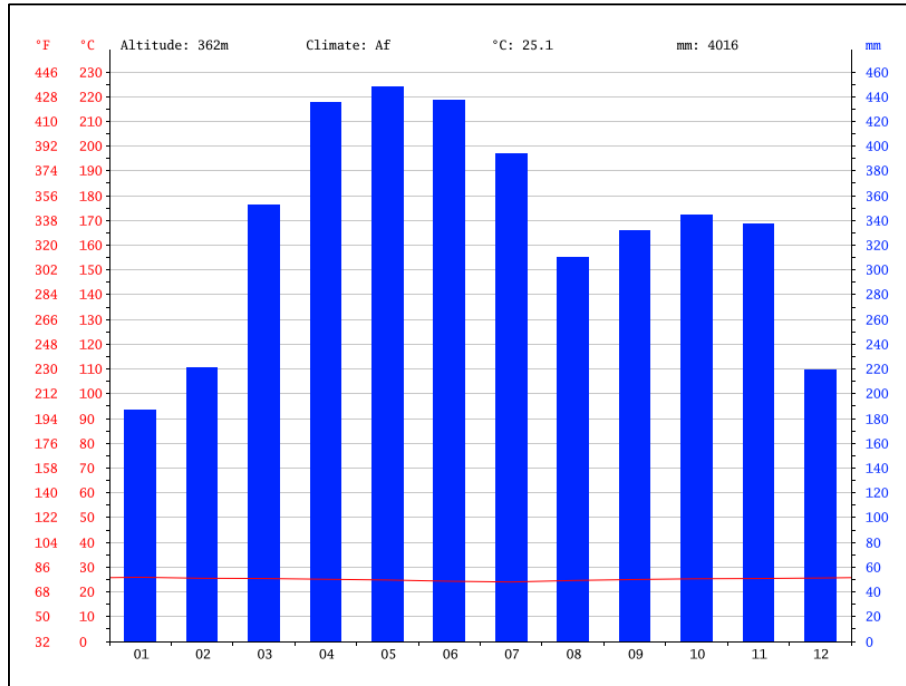
Todas estas fallas pueden causar sismos con alta liberación de energía considerando su cercanía con la zona del proyecto; la Figura 12 muestra las fallas más importantes identificadas por la información secundaria consultada.

**3.1.2. Aspectos relacionados con el clima.** Este municipio<sup>28</sup> tiene un clima tropical. La precipitación en San José del Fragua es significativa, con precipitaciones incluso durante el mes más seco. De acuerdo con Köppen y Geiger el clima se clasifica como Tropical Húmedo (**Af**) teniendo en cuenta que las lluvias están repartidas a lo largo del año por lo que no hay una estación seca, ya que todos los meses superan los 60 mm. La temperatura promedio en San José del

<sup>28</sup> Merkel, A. (05 de febrero de 2019). CLIMATE-DATA.ORG. Obtenido de CLIMATE-DATA.ORG: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/caqueta/san-jose-del-fragua-48159/>

Fragua es 25.1 °C. Las precipitaciones en promedio son de 4016 mm anuales (Merkel, 2019).

**Figura 13.** Climograma para el municipio de San José de Fragua



**Fuente:** CLIMATE-DATA.ORG, disponible en <https://es.climate-data.org/americas-del-sur/colombia/caqueta/san-jose-del-fragua-48159/>

**Figura 14.** Variación de Temperatura del municipio de San José del Fragua

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	25.9	25.5	25.4	25.1	24.8	24.3	24	24.6	25	25.3	25.4	25.6
Temperatura mín. (°C)	21	20.8	21	20.9	20.7	20.3	19.9	20.1	20.5	20.6	20.9	21
Temperatura máx. (°C)	30.8	30.3	29.8	29.3	29	28.4	28.2	29.1	29.5	30.1	30	30.3
Temperatura media (°F)	78.6	77.9	77.7	77.2	76.6	75.7	75.2	76.3	77.0	77.5	77.7	78.1
Temperatura mín. (°F)	69.8	69.4	69.8	69.6	69.3	68.5	67.8	68.2	68.9	69.1	69.6	69.8
Temperatura máx. (°F)	87.4	86.5	85.6	84.7	84.2	83.1	82.8	84.4	85.1	86.2	86.0	86.5
Precipitación (mm)	187	221	352	435	448	437	394	310	332	344	337	219

**Fuente:** CLIMATE-DATA.ORG, disponible en <https://es.climate-data.org/americas-del-sur/colombia/caqueta/san-jose-del-fragua-48159/>

La menor cantidad de lluvia ocurre en enero. El promedio de este mes es 187 mm. En mayo, la precipitación alcanza su pico, con un promedio de 448 mm y con respecto a la variación de temperaturas son más altas en promedio en enero, alrededor de 25.9 °C a 24.0 °C en promedio, julio es el mes más frío del año.

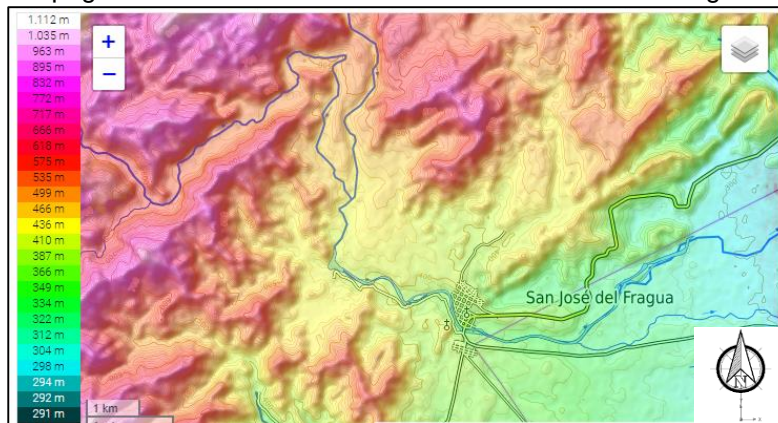
Por último, la variación en la precipitación entre los meses más secos y más húmedos es 261 mm. La variación en la temperatura anual está alrededor de 1.9°C observado en la figura 14.

En sitios aledaños al talud, la vegetación de árboles es casi nula y está compuesta por pasturas de brachiaria.

**3.1.3. Aspectos topográficos.** El relieve del Municipio de San José del Fragua puede ser agrupado en cuatro (4) grandes unidades mayores o paisajes: montaña, piedemonte, lomerío (planicie ondulada) y valles. Para este municipio existen estudios de suelos con diferente nivel de detalle que cubren totalmente el área Municipal<sup>29</sup>, los cuales permiten determinar el contenido pedológico de las unidades, la descripción de cada perfil representativo y los análisis físico-químicos pertinentes, con el fin de determinar la aptitud de los mismos, clasificándolos así:

- Suelos de Montaña
- Suelos de Piedemonte
- Suelos de la Superficie de Denunciación
- Suelos de Tierra Firme (Lomerío)
- Suelos de las Formas Aluviales (Valles)
- Suelos de las formas aluviales de ríos de origen andino (terrazas y llanura aluvial).

**Figura 15.** Mapa Topográfico Sector de estudio cerca del San José Del Fragua



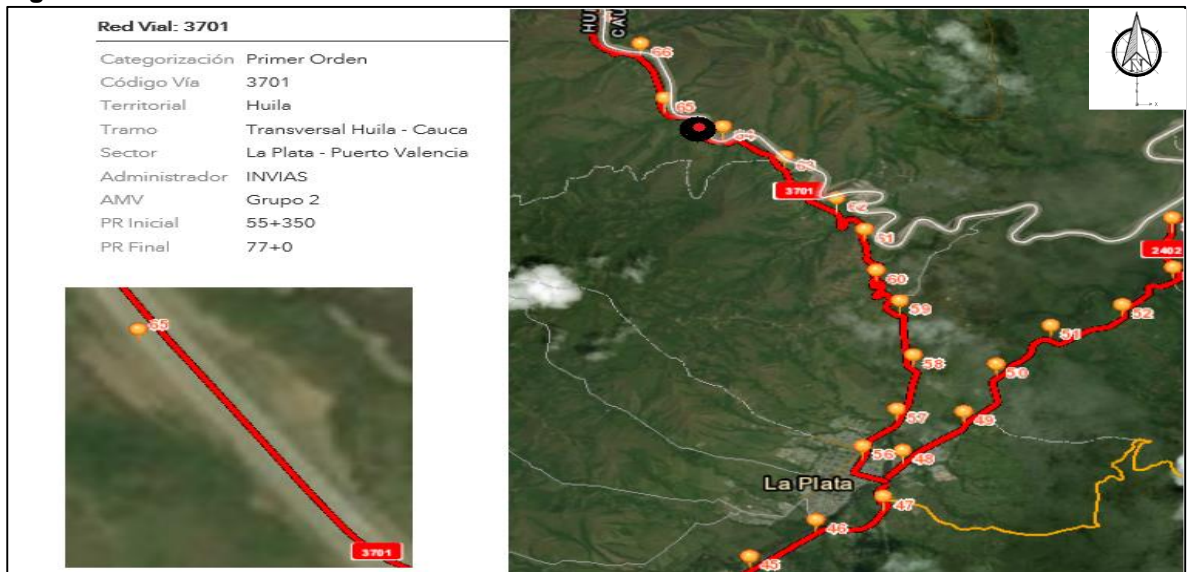
**Fuente:** TOPOGRAPHIC-MAP, disponible en URL <http://es-co.topographic-map.com/places/San-Jos%C3%A9-del-Fragua-621565/>

<sup>29</sup> Aspectos Ambientales para el Ordenamiento Territorial del Occidente del Caquetá IGAC, 1991; Estudio Preliminar de Suelos y Bosques del Proyecto de Colonización Caquetá – Putumayo CIAF-INCORA, 1974)

## 3.2. TERRITORIAL DE HUILA

El talud se encuentra localizado en la Vía Plata – Puerto Valencia, ubicado exactamente en el PR 65+150.

**Figura 16.** Vía Plata – Puerto Valencia PR64+0000 Al PR65+250



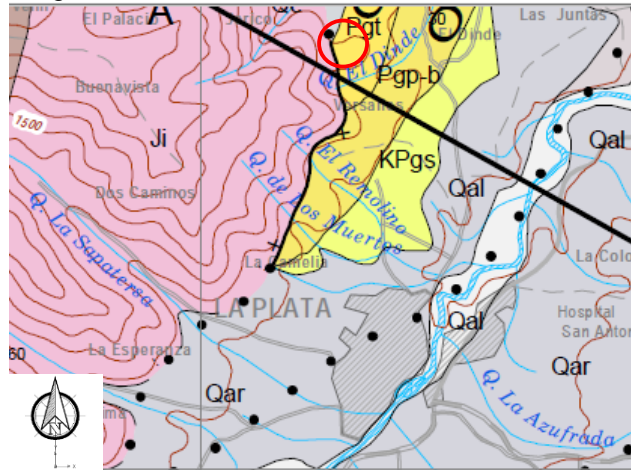
**Fuente:** Elaboración Propia a partir del Sistema de Información Geográfica HERMES.

La vía 3701: Plata – Puerto Valencia, hace parte del Proyecto Transversal Huila - Cauca; tiene una longitud de 21,65 kilómetros, el sector en donde se encuentra localizado el talud está en una zona rural del municipio de La Plata en el centro occidente del departamento del Huila de la carretera que de La Plata conduce al municipio Inzá en el departamento del Cauca.

**3.2.1. Geología.** La descripción de las unidades geológicas regionales aflorantes en la zona de estudio está dada por la Plancha 366 Garzón a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano. Las unidades litológicas aflorantes a nivel regional corresponden a rocas antiguas del Paleozoico y del Cuaternario y se encuentran localizadas en el flanco oriental de la cordillera central. Las principales formaciones están dadas por las siguientes unidades:



**Figura 17.** Aspectos geológicos de la zona de estudio



**Fuente:** Modificado a partir de plancha 366 - Garzón del mapa geológico de Colombia a escala 1:100.000.

**Formación Tesalia (Pgt):** La Formación Tesalia está conformada por una secuencia de conglomerados polimícticos, estratificados en capas muy gruesas lenticulares, separadas por niveles de areniscas en capas delgadas a medias. Los conglomerados están compuestos por guijos de cuarzo lechoso, chert negro, pardo y gris, con matriz de arena fina y cemento ferruginoso.

Las areniscas son cuarzosas, de tono rojizo y amarillento, de grano fino a conglomerático, localmente arcillosas, con gradación normal e inversa. Los contactos entre las capas de conglomerados y areniscas son netos paralelos a levemente ondulados.

**Batolito de Ibagué (Ji):** Es de composición monzogranítica y cuarzomonzodiorítica, localmente se encuentra atravesada de diques de composición diorítica. Son de color blanco-grisáceo dominante, con moteado negro; su textura es fanerítica granular de grano fino a medio y localmente es inequigranular de grano medio a grueso.

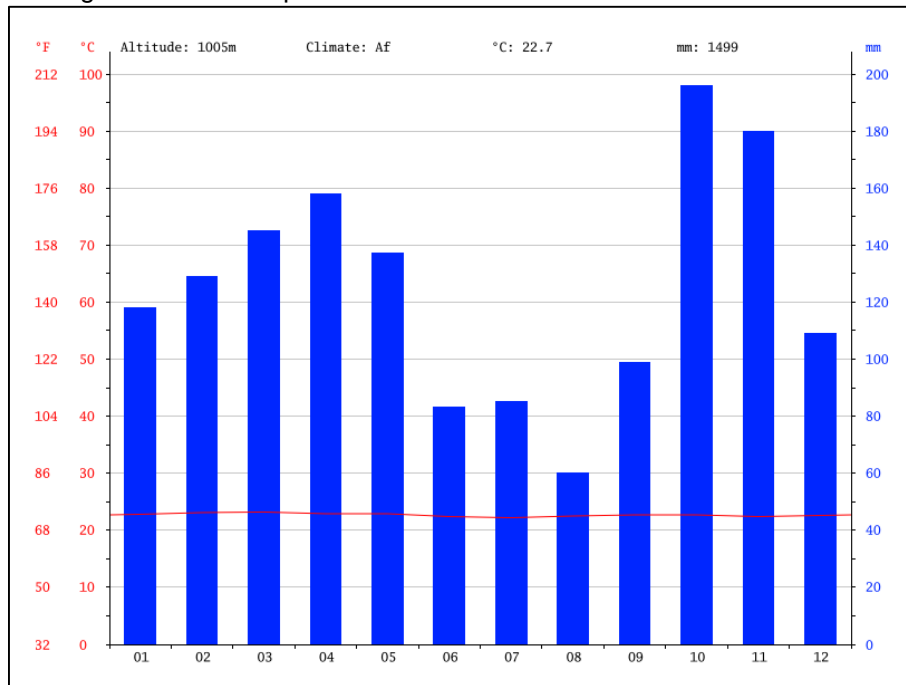
**Depósitos Aluviales (Qal):** Agrupan los sedimentos aluviales transportados como material de arrastre, ubicados en los cauces principales y las terrazas bajas de los ríos. El material que compone en tamaño y composición es variado y depende de la dinámica de las corrientes y las unidades geológicas aflorantes en las cuencas que drenan.

La presencia activa de la “falla de La Plata” que atraviesa el sector La Plata – Puerto Valencia aproximadamente entre el PR60 al PR61 (tomado de la plancha 344 Tesalia), convierte al sector en una zona activa de deslizamientos y desprendimientos.

Los taludes del sector tienen una altura que oscila entre los 3 y los 20m, con cortes verticales que, dada su reciente construcción, muestran desprendimiento de detritos y derrumbes en forma permanente que obstruyen a diario la calzada.

**3.2.2. Aspectos relacionados con el clima.** El clima de La Plata está clasificado como tropical, es una ciudad con precipitaciones significativas. Incluso en el mes más seco hay mucha lluvia. Esta ubicación está clasificada como tropical húmedo (**Af**) por Köppen y Geiger. En La Plata, la temperatura media anual es de 22.7 °C. La precipitación es de 1499 mm al año.

**Figura 18.** Climograma del municipio de la Plata - Huila



**Fuente:** CLIMATE-DATA.ORG, disponible en <https://es.climate-data.org/americas-del-sur/colombia/huila/la-plata-49718/>

La precipitación es la más baja en agosto, con un promedio de 60 mm. La mayor parte de la precipitación aquí cae en octubre, promediando 196 mm, respecto a la temperatura una media de 23.2 °C, marzo es el mes más caluroso del año. julio es el mes más frío, con temperaturas promediando 22.2 °C.

**Figura 19.** Variación de temperaturas en el municipio de la Plata -Huila

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	22.8	23.1	23.2	22.9	22.9	22.4	22.2	22.5	22.7	22.7	22.4	22.6
Temperatura mín. (°C)	17.5	17.7	17.9	17.9	17.8	17.2	16.8	16.8	16.8	17.1	17.5	17.5
Temperatura máx. (°C)	28.1	28.5	28.5	27.9	28	27.7	27.7	28.2	28.7	28.4	27.4	27.8
Temperatura media (°F)	73.0	73.6	73.8	73.2	73.2	72.3	72.0	72.5	72.9	72.9	72.3	72.7
Temperatura mín. (°F)	63.5	63.9	64.2	64.2	64.0	63.0	62.2	62.2	62.2	62.8	63.5	63.5
Temperatura máx. (°F)	82.6	83.3	83.3	82.2	82.4	81.9	81.9	82.8	83.7	83.1	81.3	82.0
Precipitación (mm)	118	129	145	158	137	83	85	60	99	196	180	109

**Fuente:** CLIMATE-DATA.ORG, disponible en <https://es.climate-data.org/americas-del-sur/colombia/huila/la-plata-49718/>

Entre los meses más secos y más húmedos, la diferencia en las precipitaciones es 136 mm. A lo largo del año, las temperaturas varían en 1.0 °C.

**3.2.3. Aspectos topográficos.** El área que involucra el perímetro del municipio de La Plata corresponde a cuatro grandes paisajes que son: Gran paisaje de montaña asociado a la cadena montañosa de la Cordillera Central; Gran Paisaje de Altiplanicie asociado con los flujos de lava antiguos, Gran Paisaje Aluvial correspondiente al valle del río de la Plata y Gran Paisaje de Piedemonte asociado a los depósitos de ladera de los valles, su topografía comprende un terreno montañoso y escarpado.

**Figura 20.** Mapa topográfico del sitio de estudio en el municipio de la Plata -Huila



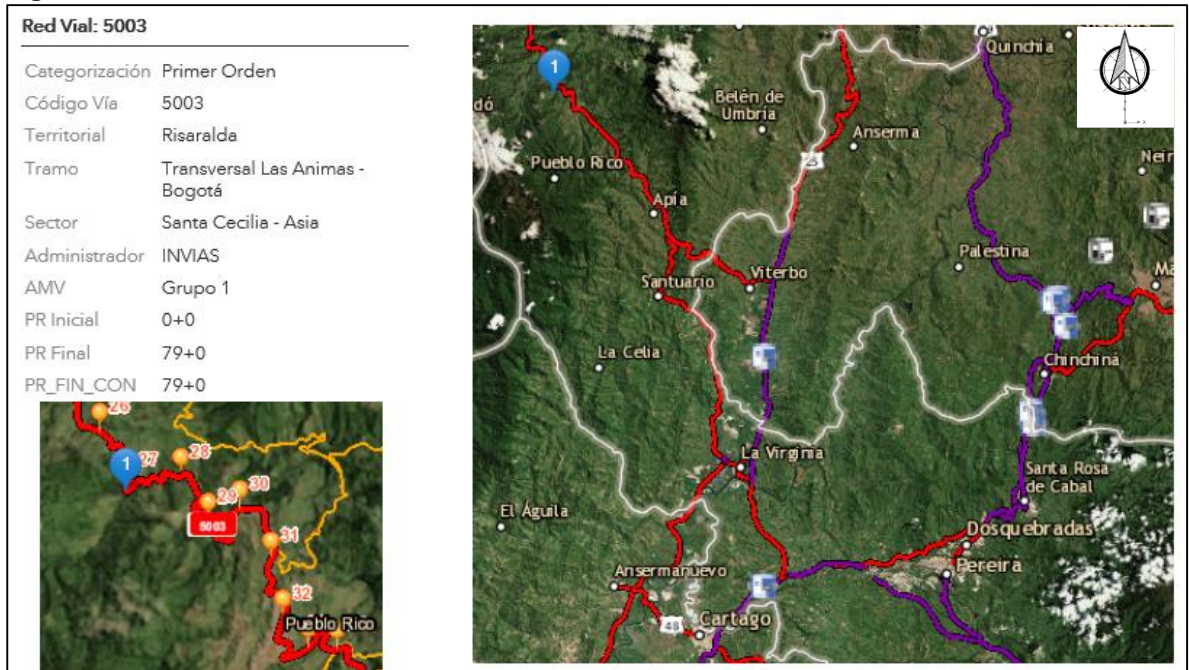
**Fuente:** TOPOGRAPHIC-MAP, disponible en <http://es-co.topographic-map.com/places>.

### 3.3. TERRITORIAL DE RISARALDA

El talud se encuentra localizado en la Vía Santa Cecilia- Asia PR 27+0800 “La Soledad”.

El tramo de vía Itaurí - Pueblo Rico tiene una longitud de 19.87 kilómetros y se encuentra localizado al oeste del departamento de Risaralda a 20 Km del límite con el departamento del Chocó. Hace parte de la conexión vial entre el departamento del Chocó y el centro del País.

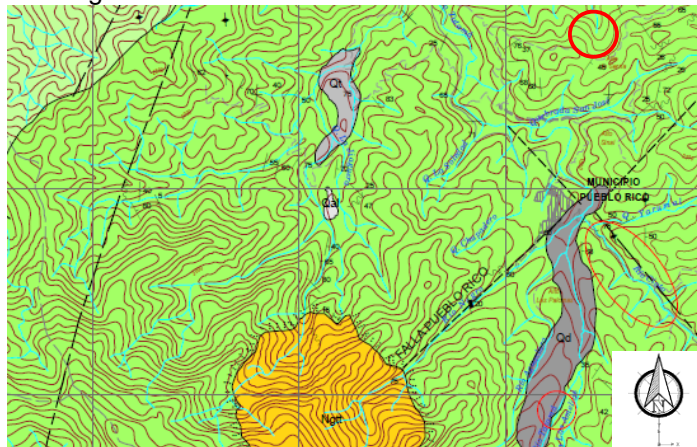
**Figura 21.** Vía Santa Cecilia- Asia PR 27+0800



**Fuente:** Elaboración Propia a partir del Sistema de Información Geográfica HERMES.

**3.3.1. Geología.** De acuerdo con la plancha 204 Pueblo Rico a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, el talud de estudio se encuentra localizado en la Formación Penderisco (Ksu) del Grupo Cañas Gordas.

**Figura 22.** Aspectos Geológicos relacionados con el sitio de estudio



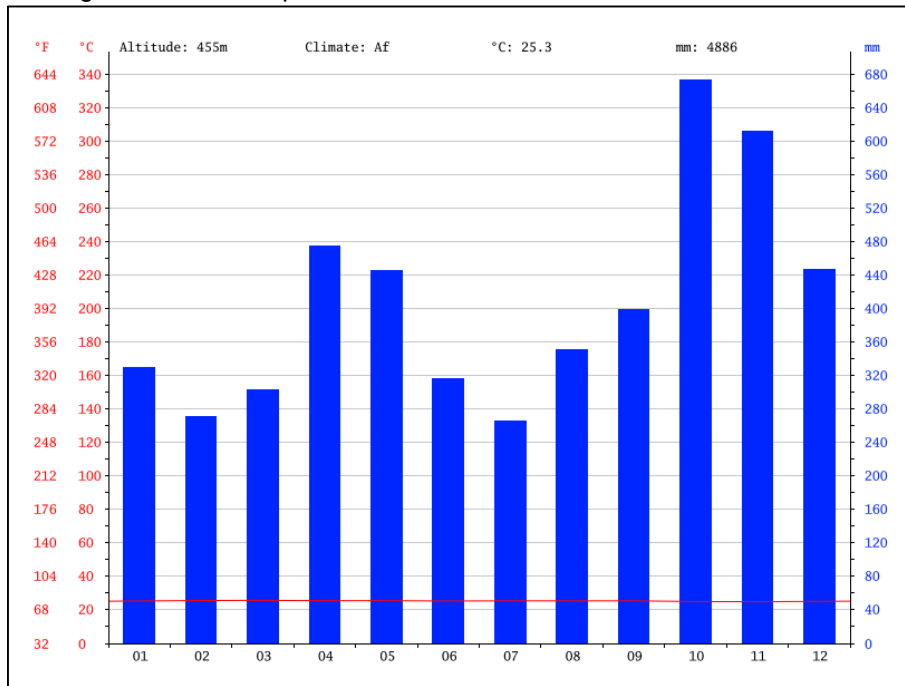
**Fuente:** Modificado de la plancha 204 Pueblo Rico del Servicio Geológico Colombiano a escala 1:100.000.

**Formación Penderisco – Miembro Urrao (Ksu).** El Miembro Urrao de la Formación Penderisco está conformado por intercalaciones de arcillolitas de 5 a 20 cm, limolitas, areniscas (5 a 30cm) y conglomerados. Generalmente las rocas se

encuentran meteorizados y solamente se localiza roca fresca en las cabeceras de los ríos y quebradas.

**3.3.2. Aspectos relacionados con el clima.** El clima del municipio de Santa Cecilia posee unas precipitaciones significativas. Incluso en el mes más seco hay mucha lluvia. Esta ubicación está clasificada como tropical húmedo (**Af**) por Köppen y Geiger. La temperatura aquí es en promedio 25.3 °C. Hay alrededor de precipitaciones de 4886 mm.

**Figura 23.** Climograma del municipio de Santa Cecilia - Risaralda



**Fuente:** CLIMATE-DATA.ORG, disponible en <https://images.climatedata.org/location/875658/climate-graph.png>

El mes más seco es julio, con 266 mm de lluvia. La mayor parte de la precipitación aquí cae en octubre, promediando 673 mm, marzo es el mes más cálido del año. La temperatura promedio en marzo es de 25.7 °C. Noviembre es el mes más frío, con temperaturas promediando 24.9 °C.

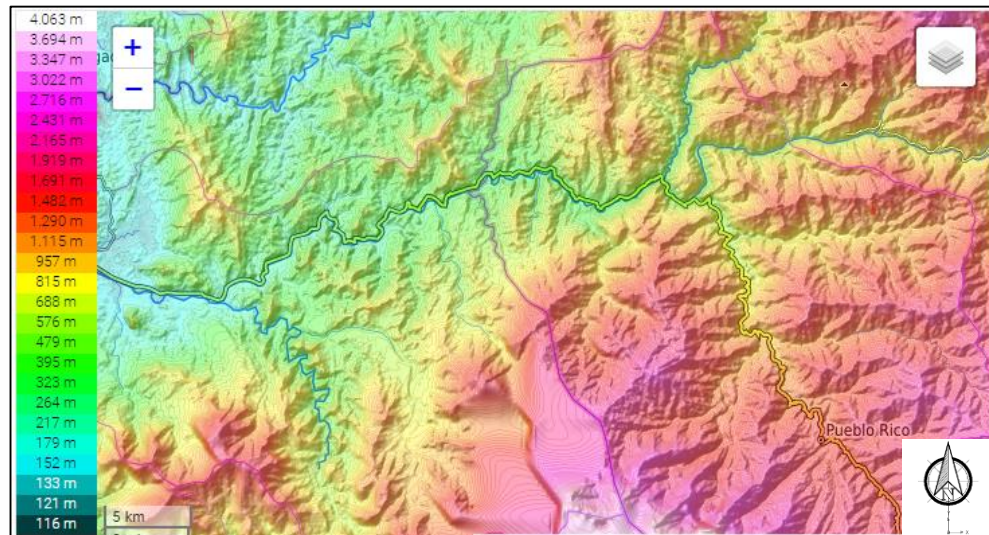
**Figura 24.** Variación de Temperatura para el municipio de Santa Cecilia. Risaralda

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	25.3	25.6	25.7	25.5	25.5	25.3	25.4	25.4	25.4	25	24.9	25.1
Temperatura mín. (°C)	19.9	19.9	20.2	20.3	20.5	20.1	19.8	19.9	20.1	19.8	19.9	19.9
Temperatura máx. (°C)	30.8	31.3	31.3	30.8	30.5	30.5	31	31	30.7	30.2	30	30.3
Temperatura media (°F)	77.5	78.1	78.3	77.9	77.9	77.5	77.7	77.7	77.7	77.0	76.8	77.2
Temperatura mín. (°F)	67.8	67.8	68.4	68.5	68.9	68.2	67.6	67.8	68.2	67.6	67.8	67.8
Temperatura máx. (°F)	87.4	88.3	88.3	87.4	86.9	86.9	87.8	87.8	87.3	86.4	86.0	86.5
Precipitación (mm)	329	271	303	474	445	316	286	351	399	673	612	447

**Fuente:** CLIMATE-DATA.ORG, disponible en <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/risaralda/santa-cecilia-875658/>

Hay una diferencia de 407 mm de precipitación entre los meses más secos y los más húmedos. A lo largo del año, las temperaturas varían en 0.8 °C.

**3.3.3. Aspectos topográficos.** En el sitio conocido como “La Soledad” en la vía a Santa Cecilia; su exposición es alta debido a que está expuesto a los vientos, a la luz solar; la pendiente es del 80% con una lectura de talud de 1.0H:0,8V la longitud de la ladera es de 34 metros en la vía Itauri- Pueblo Rico se muestra en el mapa topográfico, Figura 25 que se posee un terreno montañoso. **Figura 25.** Mapa topográfico del sitio de estudio Santa Cecilia Risaralda

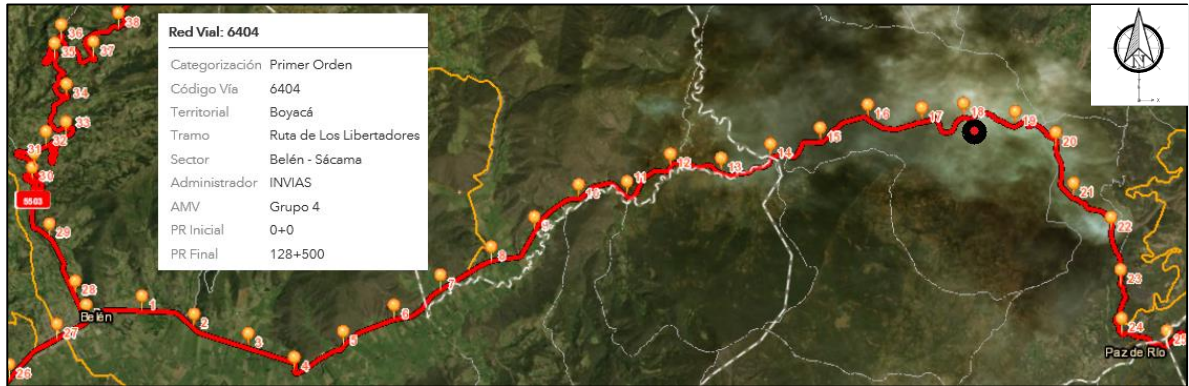


**Fuente:** TOPOGRAPHIC-MAP, tomado de URL <http://es-co.topographic-map.com/places>

### 3.4. TERRITORIAL DE BOYACÁ

El talud se encuentra localizado en la Vía Belén - Sácama, PR 17+0805 hasta PR 18+0310.

**Figura 26.** Vía Belén - Sácama, PR 17+0805 hasta PR 18+0310



**Fuente:** Elaboración Propia a partir del Sistema de Información Geográfica HERMES.

El proyecto se localiza al Nororiente del Departamento de Boyacá, jurisdicción del municipio de Paz de Río, en límites de las veredas Soapaga y Socotacito, sobre el corredor vial que comunica al Departamento de Boyacá con los Departamentos de Casanare y Arauca, el sector de estudio se identifica inicialmente entre el PR 17+0805 hasta PR 18+0310 y una afectación aproximada mínima de 505 metros.

**3.4.1. Geología.** Según la Plancha 172 Paz de Río, a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, la zona de estudio, geológicamente se sitúa en el extremo sur del Macizo de Floresta y en ella afloran rocas cuyas edades oscilan entre el Paleozoico y el Cenozoico. Las rocas del Paleozoico y parte basal del Mesozoico conforman el Macizo de Floresta y las rocas del Mesozoico medio y superior y las del Cenozoico, constituyen las rocas que bordean el macizo con afloramientos al sur, este y oeste.

**Macizo de Floresta (Df):** Está conformado por esquistos y filitas de metamorfismo regional; además de un ortoneis siendo esta la roca más antigua del área; y por rocas intrusivas que constituyen stocks Paleozoicos y alguno más reciente, posiblemente Triásico Jurásico (Stock de Otengá). Dentro del mismo Paleozoico se presentan igualmente rocas de las formaciones Tíbet, Floresta y Cuche que forman el cuerpo principal que da el nombre al Macizo.

**Formación Girón (Jg):** Está constituida, en su parte basal, por una sucesión de conglomerados formados por bloques, guijos y guijarros de cuarcitas, arenitas, limolitas moradas y cuarzo, principalmente; localmente por guijarros de granito, en una matriz arenosa limolítica; la parte media está compuesta por arenitas y conglomerados, y la superior, por una alternancia de arenitas, conglomerados y



limolitas de colores morados, a verde morados. Se presenta en una franja delgada de 4,5 km. de longitud por un ancho máximo de 300m. La franja aflora hacia la parte alta de la cuchilla denominada Loma Careperro. El espesor es de 212 m.

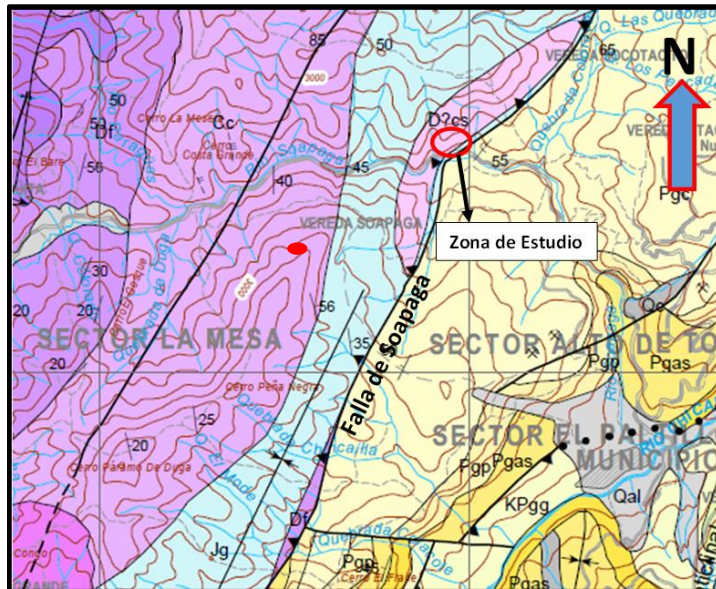
**Formación Concentración (Pgc):** Está compuesta por arcillolitas comúnmente yesíferas y areniscas de grano fino a grueso, con estratos de hierro oolítico de hasta 2.5m de espesor. La formación tiene un espesor que oscila entre 1368 a 1554 m.

**Formación Cataclastitas de Soapaga (D<sup>cs</sup>):** la formación está limitada al este por la Falla de Soapaga que la pone en contacto con las rocas sedimentarias del Terciario superior, pertenecientes a la Formación Concentración y su límite noroccidental, igualmente fallado, es contra rocas de la Formación Girón. Esta formación está constituida por granitos brechados, de tonos verdes, en sectores se observa textura neísica, cataclástica, brechoide y milonítica.

**Cuaternario, Depósitos de origen aluvial (Qal):** se compone por guijos, cantos y excepcionalmente bloques redondeados y subredondeados de areniscas y algunos conglomerados, dentro de una matriz arenosa; y de arenas y limos formando depósitos de terrazas muy planas. La Llanura Aluvial presenta disección por el río Soapaga pudiéndose observar un valle aluvial actual tallado en los aluviones.

**Depósitos de origen coluvial (Qc):** se compone por grandes bloques de arenisca dispuestos caóticamente y englobados en una matriz arenoarcillosa o limoarcillosa. Se detallaron depósitos coluviales en el límite oriental del sector crítico, en contacto discordante con rocas de la Formación Cataclastitas de Soapaga

**Figura 27.** Geología de la zona de estudio

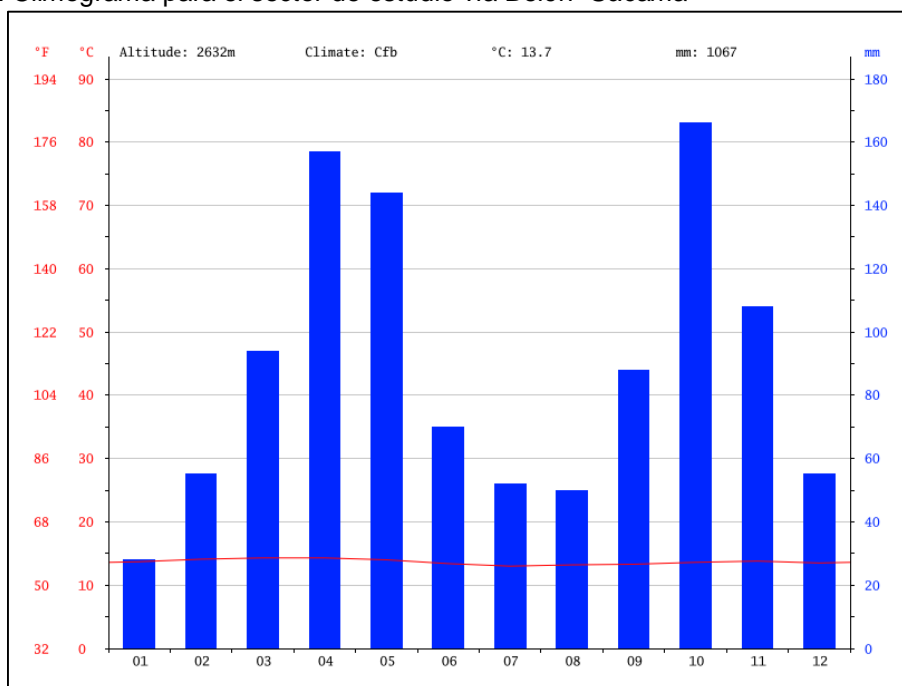


**Fuente:** Modificado de la plancha 172 Paz del Rio a escala 1:100.000 del mapa geológico de Colombia.

En la geología estructural se identificó dos provincias que están separadas por la **Falla de Soapaga**, la primera es el macizo de Floresta que corresponde a una zona compleja levantada y la segunda una cobertera plegada formada por la serie sedimentaria neocretácico – terciaria.

**3.4.2. Aspectos relacionados con el clima.** El clima de este sector se clasifica como cálido y templado. La precipitación en los municipios de Belén y Sacama, es significativa, con precipitaciones incluso durante el mes más seco. De acuerdo con Köppen y Geiger clima se clasifica como templado con precipitaciones constantes a lo largo del año, también es llamado como clima oceánico, templado y húmedo, **Cfb**. La temperatura media anual es 13.7 °C en Belén. Precipitaciones aquí promedios 1067 mm.

**Figura 28.** Climograma para el sector de estudio vía Belén- Sácama



**Fuente:** CLIMATE-DATA.ORG, disponible en <https://images.climate-data.org/location/50179/climate-graph.png>

La menor cantidad de lluvia ocurre en enero. El promedio de este mes es 28 mm. En octubre, la precipitación alcanza su pico, con un promedio de 166 mm. Las temperaturas son más altas en promedio en marzo, alrededor de 14.3 °C. a 13.0 °C en promedio, julio es el mes más frío del año.

**Figura 29.** Variación de la Temperatura para el sector de estudio

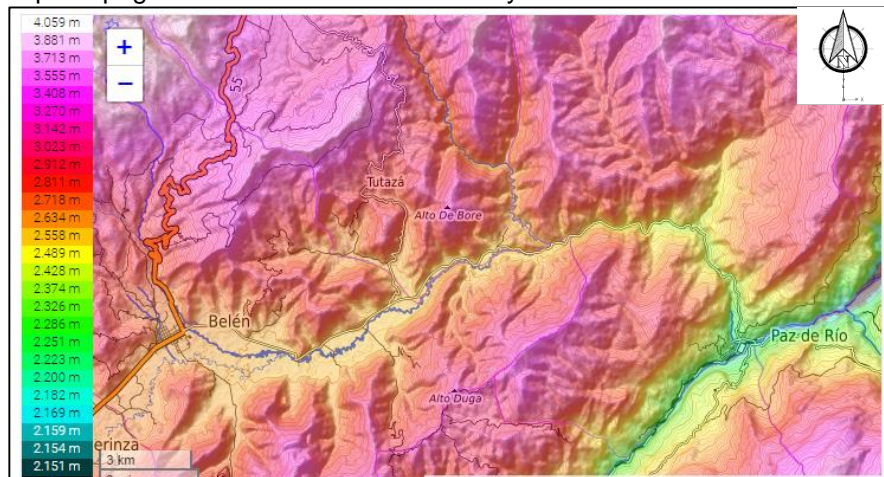
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	13.7	14.1	14.3	14.3	14	13.4	13	13.2	13.3	13.6	13.8	13.5
Temperatura mín. (°C)	7	7.5	8	9	9.1	8.6	7.8	7.9	7.9	8.6	8.4	7.3
Temperatura máx. (°C)	20.4	20.7	20.7	19.6	18.9	18.3	18.2	18.5	18.7	18.6	19.2	19.7
Temperatura media (°F)	56.7	57.4	57.7	57.7	57.2	56.1	55.4	55.8	55.9	56.5	56.8	56.3
Temperatura mín. (°F)	44.6	45.5	46.4	48.2	48.4	47.5	46.0	46.2	46.2	47.5	47.1	45.1
Temperatura máx. (°F)	68.7	69.3	69.3	67.3	66.0	64.9	64.8	65.3	65.7	65.5	66.6	67.5
Precipitación (mm)	28	55	94	157	144	70	52	50	88	188	108	55

**Fuente:** CLIMATE-DATA.ORG, disponible en <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/boyaca/belen-50179/>

La variación en la precipitación entre los meses más secos y más húmedos es 138 mm. La variación en la temperatura anual está alrededor de  $\pm 1.3$  °C

**3.4.3. Aspectos Topográficos.** En este sector de estudio se corresponde a una zona de extracción de materiales para construcción, sobre la ladera interna o superior de la vía, en parte de la vertiente norte del río Soapaga, este sigue una dirección en la zona, sentido oeste-este y es un afluente del río Chicamocha, la topografía del terreno es montañosa con varias prolongaciones ya que se encuentra sobre la cordillera oriental con pendientes entre el 10 y el 25% y alturas de 2489 a los 3023 según el mapa topográfico de la figura 30.

**Figura 30.** Mapa Topográfico del sector de estudio Boyacá-Sácama



**Fuente:** Tomado de la URL <http://es-co.topographic-map.com/place>

## 4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES

En este capítulo se pretende realizar un análisis de los resultados de ensayos realizados por los consultores contratados por el Instituto Nacional de Vías, con el propósito de caracterizar geotécnicamente los taludes.

Todas las muestras obtenidas fueron identificadas visualmente, rotuladas y empacadas cuidadosamente para su posterior envío al laboratorio y sobre un número representativo de los diferentes materiales encontrados, se ejecutaron ensayos tendientes a conocer su comportamiento geomecánico, con las que se emplearon las siguientes pruebas:

**Clasificación:** se emplean para identificar y clasificar los tipos de suelo dominantes en cada sitio explorado y para desarrollar correlaciones entre propiedades básicas y parámetros de resistencia y deformabilidad. Entre los ensayos realizados se encuentran los límites de Atterberg y la distribución granulométrica.

**Condiciones In Situ:** Permiten establecer las condiciones geostáticas del suelo natural, representando condiciones de frontera y características de los materiales fundamentales para el diseño. Se determinó la humedad natural y el peso unitario. Estas pruebas junto con las de clasificación, permiten establecer una primera aproximación del comportamiento de los materiales encontrados.

**Resistencia al corte:** Se ejecutaron ensayos de campo de penetración estándar (SPT) los cuales fueron reportados en el registro de perforación en los taludes de Risaralda, Boyacá y Huila.

### 4.1. TERRITORIAL CAQUETA

**4.1.1. Clasificación del material del talud.** Se llevó a cabo una exploración geotécnica, consistente en la realización de 2 apiques que permitieron explorar el terreno natural del talud en análisis.

En cada uno de los apiques se realizó recuperación de muestras para ensayos de laboratorio y se localizó en terreno con ayuda de un navegador GPS de campo.

En términos generales, en el sector de PR04+000 se encontró superficialmente un suelo de matriz limosa y plástico (MH), con humedad natural del 37.2%, Límite Líquido del 64% e índice de plasticidad del 28%.

Las muestras recuperadas de suelo fueron sometidas a ensayos de clasificación y humedad y algunos de estos especímenes fueron ensayados para determinar

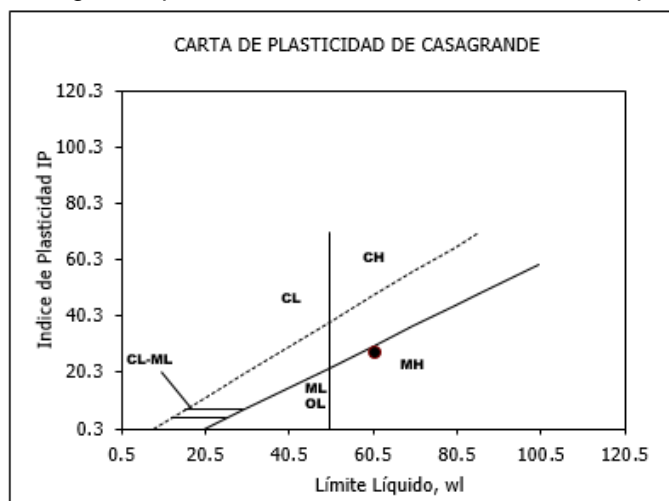
parámetros de resistencia. En la siguiente tabla se resumen los resultados de los ensayos de laboratorio.

**Tabla 8.** Resultados obtenidos y caracterización del suelo Territorial Caquetá

Muestra	Pasa No. 200 (%), Máximo	Límite Líquido (%)	Índice Plástico (%)	Clasificación USCS	Descripción del suelo
1.00	83.9	61.0	27.0	MH	Limo de alta plasticidad color café claro
2.00	93.2	64.0	28.0	MH	Limo de alta plasticidad color gris claro

**Fuente:** Elaboración Propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**Figura 31.** Carta de Casagrande para clasificación de finos Territorial Caquetá



**Fuente:** Elaboración Propia.

**4.1.2. Descripción del talud.** El talud de estudio de 10m de altura, se desarrolla en una zona de colinas bajas con cimas alargadas, lo cual relaciona el paisaje con dinámicas de depositación de materiales de origen volcánico sedimentario procedentes de la cordillera.

El talud está conformado por suelos limosos generados a partir de los depósitos volcánicos sedimentarios no consolidados de la unidad Q1vs y por los mismos depósitos que presentan un grado de meteorización medio a alto, lo que ha facilitado la generación de erosión superficial y procesos morfodinámicos a través del tiempo, especialmente en épocas de alta pluviosidad. El material genera superficies de falla, además de desprendimiento de las partículas superficiales del suelo al impacto de la gota de agua, y posterior arrastre hasta la pata del talud, generando surcos y cárcavas a su paso y evolucionando posteriormente a superficies de falla profunda.

Dadas las condiciones de suelos y pluviosidad de la zona, una vez realizados los cortes para la implantación de la vía que actualmente se encuentra en servicio, se presentaron una serie de desprendimientos, erosión y deslizamientos que han afectado la transitabilidad normal y seguridad de los que utilizan el corredor.

El talud se encuentra expuesto a las lluvias y por ende a la constante erosión; su vegetación es escasa o nula, la pendiente es del orden de 0,5:1 y tiene una longitud de 150 metros aproximadamente, la altura promedio del talud es de 5 metros, su superficie de 750 m<sup>2</sup>.

**Figura 32.** Panorámica del Talud San José del Fragua – Florencia, PR 04 +0000 al PR 4+0150



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías, INVIAS.

Condiciones de inestabilidad: Se observa que el talud se encuentra expuesto a ocurrencia de lluvias y vientos, adicional se puede evidenciar la presencia de erosión superficial y surcos que podrían evolucionar a cárcavas sí el talud no se protege con una capa vegetal, la pendiente del talud tan inclinada es un factor determinante para la evolución de la erosión.

## **4.2. TERRITORIAL HUILA**

**4.2.1. Clasificación del material del talud.** Con el fin de establecer las características del perfil del subsuelo, se realizó visita de campo y la ejecución de una perforación mecánica (Figura 33), haciendo una descripción detallada en conjunto con la información geológica recolectada a partir de información secundaria obtenida de la plancha 366 - Garzón del mapa geológico de Colombia a escala 1-100.000.

**Figura 33.** Sondeo realizado para la caracterización del suelo Territorial Huila



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

**Tabla 9.** Resultados obtenidos y caracterización del suelo Territorial Huila

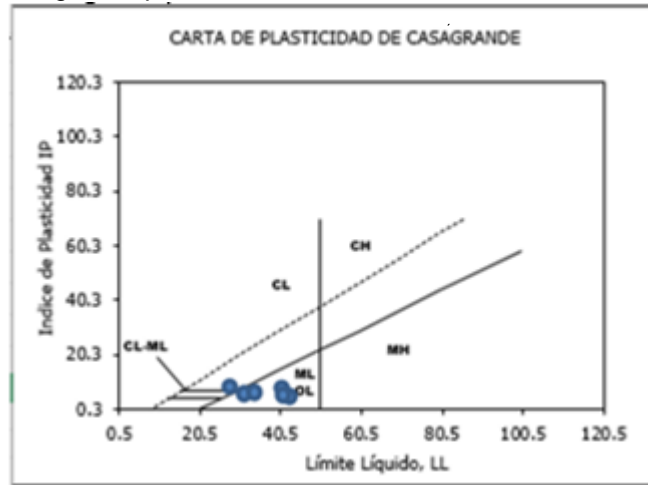
Profundidad (m)	Humedad (%)	Límite Líquido (%)	Índice Plástico (%)	Clasificación USCS	Descripción del suelo
0.50	16.5	34.4	6.0	SM	Arenas limosas color café con trazas verdosas
1.00					
1.50	18.9	33.6	4.8	SM	
2.00					
2.50	24.3	28.0	7.4	SC	Mezcla de arenas y gravas en matriz limoarcillosa color gris y trazas cafés claras
3.00					
3.50					
4.00	15.9	31.0	5.2	GM	
4.50					
5.00	20.4	37.1	5.9	SM	
5.50					
6.00					
6.50	22.0	40.8	6.4	SM	
7.00					

**Fuente:** Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**4.2.2. Descripción del talud.** El talud está conformado en la base por conglomerados polimictos subredondeados dispuestos en capas muy gruesas, lenticulares, separadas por niveles delgados de areniscas. Los conglomerados están compuestos por guijos de cuarzo lechoso, chert negro, pardo y gris, con matriz de arena fina y cemento ferruginoso.

La sección superior está conformada por una alternancia de areniscas cuarzosas, de tono rojizo y amarillento, de grano fino a conglomerático, localmente arcillosas, con gradación normal e inversa.

**Figura 34.** Carta de Casagrande para clasificación de finos Territorial Huila



**Fuente:** Elaboración Propia.

La topografía del terreno es montañosa con pendientes superiores a los 45° y la cara del talud es casi vertical. El proyecto se localiza la margen derecha del río Páez, en las inmediaciones de la ciudad de La Plata. La permeabilidad de los suelos de la zona permite que durante todo el año se observe alta presencia del nivel freático en los taludes inestables del sector.

**Figura 35.** Descripción talud Plata – Puerto Valencia PR64+0000 Al PR65+250



**Fuente:** Elaboración propia.

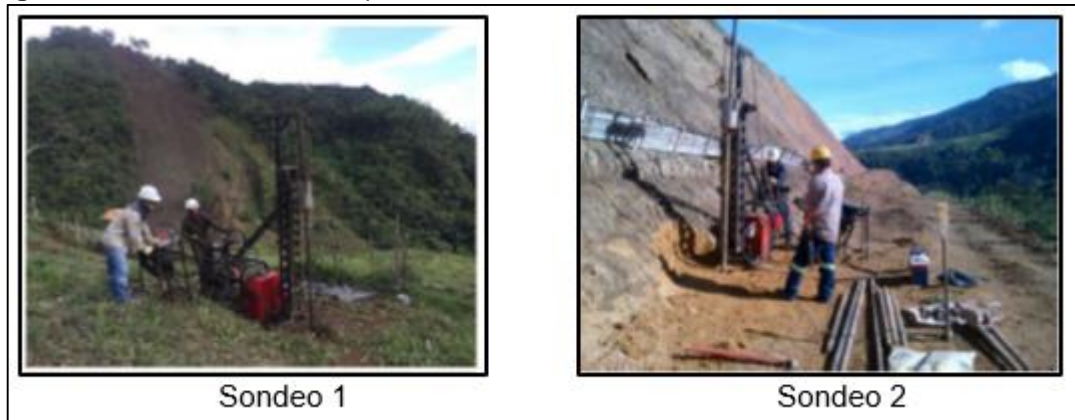


Condiciones de inestabilidad: Se observa que el talud se encuentra expuesto a ocurrencia de lluvias y vientos, adicional se puede evidenciar la presencia de surcos en el horizonte A de mayor profundidad que en el horizonte B, estos procesos erosivos podrían evolucionar a cárcavas si el talud no se protege con una capa vegetal; en el horizonte c se observa desprendimiento de material granular, la pendiente del talud tan inclinada es un factor determinante para la evolución de la erosión.

### 4.3. TERRITORIAL RISARALDA

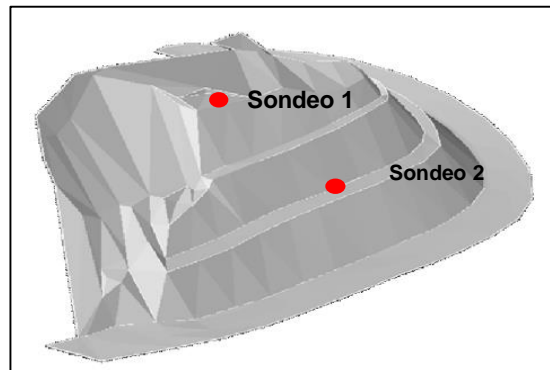
**4.3.1. Clasificación del material del talud.** Con el fin de establecer las características del perfil del subsuelo, se llevó a cabo el programa de exploración directa, que consistió en la realización de sondeos mecánicos en dos sectores del talud, uno en la parte alta, y otra en la terraza mediana del talud de corte de interés como se puede observar a continuación en las figuras 36 y 37.

**Figura 36.** Sondeos realizados para la caracterización del suelo



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

**Figura 37.** Mapa de localización de sondeos



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 10.** Exploración del Subsuelo

SONDEO No.	PROFUNDIDAD	LOCALIZACIÓN
Sondeo 1	15,08 m	Parte inferior del talud interno, costado occidental
Sondeo 2	12,65 m	Parte inferior del talud interno, zona central

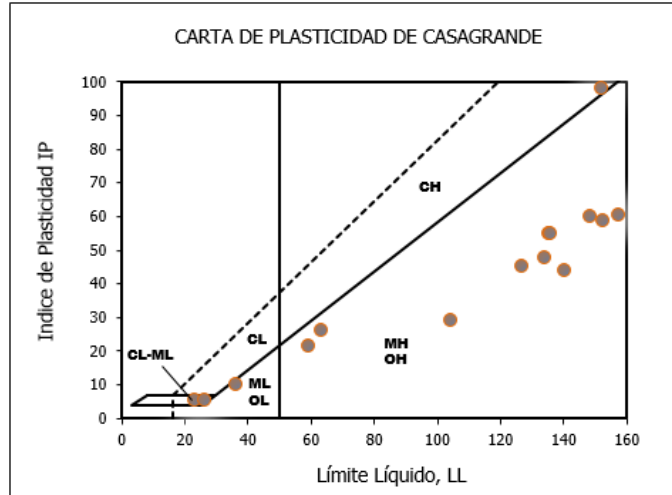
Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 11.** Resultados obtenidos y caracterización del suelo Territorial Risaralda - Sondeo 1

Prof. (m)	W (%)	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	% Gravas	% Arenas	% Finos	Clasificación USCS	Descripción del suelo
0.65-1.35	93.7	152.4	93.9	58.5	21.7	52.4	25.9	SM	arena limosa de alta plasticidad color amarillo con vetas de óxido, presencia de materia orgánica, consistencia blanda
2.18	146.9	148.2	88.4	59.8	19.5	68.1	12.4	SM	arena limosa de alta plasticidad color amarillo con vetas de óxido, presencia de materia orgánica, consistencia blanda
3.21	117.8	157.3	97	60.3	0.0	25.3	74.7	MH	limo de alta plasticidad color café con vetas de óxido, consistencia moderada
4.18	162.2	135.2	80.4	54.8	0.0	19.4	80.6	MH	limo de alta plasticidad color café oscuro con vetas rojizas, consistencia moderada
5.23	116.7	104.3	75.1	29.2	4.0	31.0	64.9	MH	limo de alta plasticidad color café oscuro con vetas rojizas, consistencia moderada
6.14	109.4	140.3	96.2	44.1	4.2	19.9	75.9	MH	limo de alta plasticidad color café oscuro con vetas de óxido, consistencia blanda
7.19	60.0	63.3	37	26.3	0.0	7.2	92.8	MH	limo de alta plasticidad color rojizo con vetas de óxido, consistencia moderada
8.15	50.5	135.6	80.7	54.9	0.0	11.2	88.8	MH	limo de alta plasticidad color amarillo con vetas rojizas, consistencia moderada
9.17	50.5	23.2	17.8	5.4	0.0	1.9	98.1	CL-ML	arcilla limosa de baja plasticidad color rojizo, con vetas de óxido, vetas blancas consistencia firme
10.22	29.1	26.3	20.7	5.6	5.0	12.8	82.2	CL-ML	limo areno arcilloso color rojizo, con vetas de óxido, vetas blancas consistencia firme
11.32	25.4	126.8	81.8	45.0	3.7	48.1	48.1	SM	arena limosa de alta plasticidad rojizo con vetas negras consistencia dura
12.21	36.6	134.0	86.3	47.7	0.0	6.1	93.9	MH	limo de alta plasticidad rojizo con vetas negras consistencia dura
13.23	40.0	152.1	54	98.1	0.0	7.2	92.8	CH	arcilla de alta plasticidad color rojizo vetas blancas y de óxido, consistencia dura
14.32	36.8	59.2	37.5	21.7	15.3	8.0	76.7	MH	limo de alta plasticidad color rojizo con vetas blancas y vetas de óxido
15.08	17.9	36.2	26.3	9.9	27.1	43.6	29.3	SM	arena limosa baja plasticidad color rojizo con vetas blancas y de óxido, consistencia dura

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**Figura 38.** Carta de Casagrande para clasificación de finos Territorial Risaralda - Sondeo 1



**Fuente:** Elaboración Propia.

**Tabla 12.** Resultados obtenidos y caracterización del suelo Territorial Risaralda - Sondeo 2

Prof. (m)	W (%)	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	% Gravas	% Arenas	% Finos	Clasificación USCS	Descripción del suelo
0.5-1.00	41.9	51.3	38.7	12.6	13.8	47.9	38.3	SM	arena limosa de alta plasticidad color café amarilloso con vetas rojizas y presencia de residual, humedad alta consistencia media
2.00	41.0	61.4	40.7	20.7	15.7	55.0	29.3	SM	arena limosa de alta plasticidad color café amarilloso con vetas de oxidación y presencia de residual, humedad alta consistencia media
3.00	41.0	33.8	25.8	8.0	6.3	53.5	40.2	SM	arena limosa de baja plasticidad color café amarilloso con vetas de oxidación y presencia de residual, humedad alta consistencia media
4.00	23.3	44.8	34.4	10.4	12.9	58.9	28.2	SM	arena limosa de baja plasticidad color café rojiza con residual y vetas de oxidación humedad alta consistencia media consistencia media
5.00	31.1	36.4	28.6	7.8	4.7	57.2	38.1	SM	arena limosa de baja plasticidad color café amarilloso con vetas de oxidación y presencia de residual, humedad alta consistencia media
6.00	19.8	34.2	26.8	7.4	9.3	47.7	43.1	SM	arena limosa de baja plasticidad color café amarilloso con vetas de oxidación y presencia de residual, humedad alta consistencia media
7.00	25.0	37.0	23.1	13.9	9.3	33.4	57.3	CL	Aglomerado arcilla limosa color rojizo con vetas de oxidación, humedad media consistencia alta
8.00	14.5	33.8	25.8	8.0	23.9	23.6	52.4	ML	aglomerado limo arcilloso color rojizo con vetas de oxidación, humedad media consistencia alta

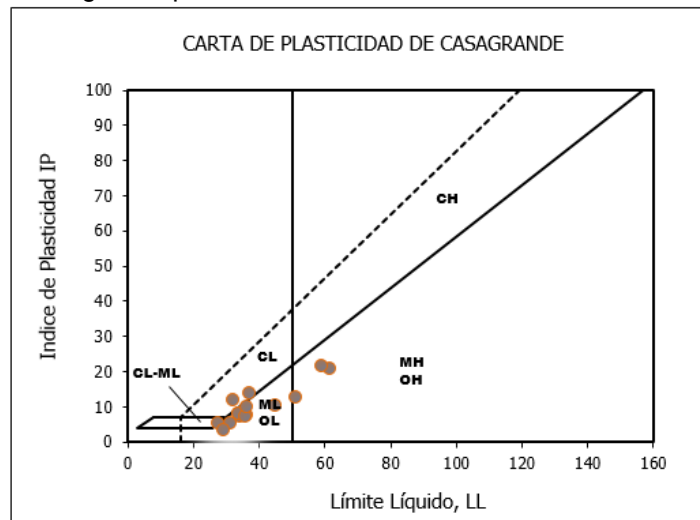
**Fuente:** Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**Tabla 13.** Continuación. Resultados obtenidos y caracterización del suelo Territorial Risaralda - Sondeo 2

Prof. (m)	W (%)	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	% Gravas	% Arenas	% Finos	Clasificación USCS	Descripción del suelo
9.00	17.5	32.1	20.3	11.8	14.8	54.9	30.3	SC	aglomerado arena arcillosa color rojizo con vetas de oxidación, humedad media consistencia alta
10.00	16.2	27.4	22	5.4	50.5	37.7	11.8	GM-GC	aglomerado gravas limo arcillosas color rojizo con vetas de oxidación, humedad media consistencia alta
11.00	21.5	35.9	28.7	7.2	20.4	51.8	27.8	SM	aglomerado areno limoso de baja plasticidad rojizo con vetas de oxidación, humedad media consistencia alta
12.00	20.0	31.2	25.9	5.3	10.9	55.4	33.7	SM	aglomerado areno limoso de baja plasticidad rojizo con vetas de oxidación, humedad media consistencia alta
12.65	14.2	29.2	25.9	3.3	13.4	79.9	6.7	SM	aglomerado arena limosa color rojizo con vetas de oxidación, humedad media consistencia alta

**Fuente:** Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**Figura 39.** Carta de Casagrande para clasificación de finos Sondeo 2



**Fuente:** Elaboración Propia.

**4.3.2. Descripción del talud.** El talud se localiza en el PR 27+0800 de la vía Santa Cecilia- Asia, ruta 5003, sitio conocido como "La Soledad"; de acuerdo con los 2 sondeos realizados, el talud presenta un primer estrato conformado por intercalaciones de arenas limosas y arcillas limosas, en su mayoría de alta plasticidad. Las capas de los diferentes materiales son de aproximadamente 1.0 m

y 2.0 m, se observa presencia de procesos activos naturales (erosión, desprendimientos, etc.).

En el segundo estrato se observa un aglomerado de arena limosa color rojizo con vetas de oxidación, humedad media, consistencia alta con presencia de arcilla en los primeros metros.

La pendiente del talud es del 80% con una lectura de talud de 1.0h:0,8v; la longitud de la ladera es de 34 metros y se localiza a una altitud de 1560 m.s.n.m; la pluviometría de la zona es media con precipitaciones entre los 2000 a 4000 mm/año. En este tipo de suelos se adaptan fácilmente diferentes especies vegetales.

El talud a nivel global tiene una altura de 27 metros; la superficie está conformada por 3 taludes con dos terrazas:

Talud 1: con una inclinación de  $37^\circ$ , con lectura (1,0h: 0,76v), pendiente 76,9%

Terraza de ancho 2.70m

Talud 2: Con una inclinación de  $44^\circ$ , lectura talud (1h: 1v).

Terraza 2 con un ancho de 1.20 m.

Talud 3: Con una inclinación de  $43^\circ$ , lectura talud (1h: 1v).

**Figura 40.** Descripción talud Plata – Santa Cecilia- Asia PR 27+0800



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías, INVIAS.

Se observa que el talud presenta problemas erosivos, como presencia de surcos y erosión laminar, formado por la concentración de agua de escorrentía, ya que se observa un arrastre de partículas formando canales poco profundos paralelos siguiendo la dirección de la pendiente del talud.

De acuerdo con los datos de pluviometría mencionados anteriormente el agua tiene un papel importante en lo que se refiere al transporte del material erosionado, por lo que se hace necesaria la protección del talud con una capa vegetal.

#### 4.4. TERRITORIAL BOYACÁ

**4.4.1. Clasificación del material del talud.** Se ejecutaron cuatro (4) sondeos efectuados con equipo mecánico de rotación relacionados en la tabla 12. En las fotografías mostradas a continuación se presenta el proceso de las labores de exploración realizadas en el sector de estudio.

**Figura 41.** Sondeos realizados Territorial Boyacá



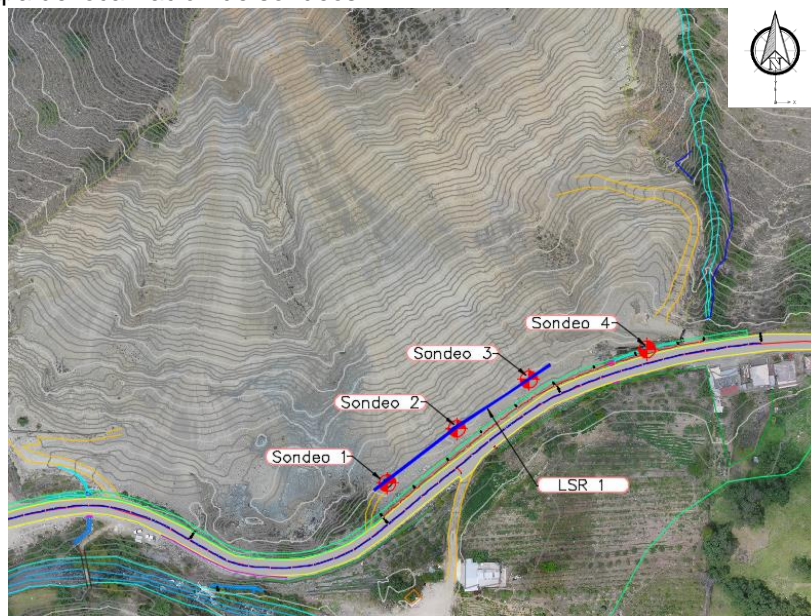
**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

**Tabla 14.** Resultados de exploración Territorial Boyacá

SONDEO No.	PROFUNDIDAD	LOCALIZACIÓN
Sondeo 1	15,0 m	Parte inferior del talud interno, costado occidental
Sondeo 2	15,0 m	Parte inferior del talud interno, zona central
Sondeo 3	15,0 m	Parte inferior del talud interno, costado oriental
Sondeo 4	15,0 m	Nivel de vía, costado oriental

**Fuente:** Elaboración Propia a partir de Estudio realizado por INVIAS.

**Figura 42.** Mapa de localización de sondeos



**Fuente:** Tomado de INVIAS (2018).

Con base en los trabajos de exploración del subsuelo y los resultados de los ensayos de laboratorio mostrados en las tablas 13 y 14, fue posible establecer la secuencia estratigráfica para el sector en estudio.

**Tabla 15.** Resultados obtenidos y descripción del suelo en los 4 sondeos Territorial Boyacá

Sondeo	Profundidad (m)		TIPO	SPT			RECOBRO (%)	Descripción
	Desde	Hasta						
Sondeo 1	0.00	0.5	SS	4	5	4	40.0	Gravas de diferentes tamaños, color gris con matriz limosa de color café. Humedad media a baja, compacidad baja.
	0.50	1.0	SS	8	7	8	62.0	
	1.00	1.5	SS	6	11	4	55.0	
	1.50	2.0	SS	9	15	11		No recobra muestra.
	2.00	2.5	SS	13	6	9	53.0	Arenas de grano fino y grueso con gravas de diferentes tamaños de color gris con poca matriz limosa color café. Humedad media a baja.
	2.50	3.0	SS	11	14	7	44.0	
	3.00	3.5	BR				31.0	Gravas de arenisca color gris verdoso con bloques del mismo material, bastantes fracturados. Se pierde completamente el agua de la perforación.
	3.50	4.0	BR					
	4.00	4.5	SS	18	6	9	62.0	Arenas de grano medio grueso con gravas de diferentes tamaños, con poca matriz limosa de color café.
	4.50	5.0						

**Fuente:** Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**Tabla 16.** Continuación. Resultados obtenidos y descripción del suelo en los 4 sondeos Territorial Boyacá

S	P (m)		TIPO	SPT			RECOBRO (%)	Descripción
Sondeo 1	5.00	5.5	SS	10	16	7	68.0	Arenas de grano medio grueso con gravas de diferentes tamaños, con poca matriz limosa de color café.
	5.50	6.0						
	6.00	6.5	BR				27.0	Bloques de metacuarcita gris verdosa, fracturados con oxidaciones muy fracturado. Se pierde toda el agua de la perforación.
	6.50	7.0	BR					
	7.00	7.5	BR				34.0	Metacuarcita gris verdosa con vetas de cuarzo bastante fracturada y con oxidaciones entre las fracturas, se pierde completamente el agua de la perforación. Se intenta SPT pero rechaza y no penetra.
	7.50	8.0	BR					
	8.00	8.5	BR				40.0	Metacuarcita gris verdosa con vetas de cuarzo bastante fracturado y con oxidaciones en las fracturas. Se intenta SPT pero rechaza y no penetra.
	8.50	9.0	BR					
	9.00	9.5	BR				45.0	
	9.50	10.0	BR					
	10.00	10.5	BR				0.0	No recobra muestra, se intenta SPT pero rechaza y no penetra.
	10.50	11.0	BR					
	11.00	11.5	BR				33.0	Metacuarcita gris fracturada con cuarzos y oxidaciones en las fracturas. La mayor parte del material se destruye al rotar. Se intenta SPT pero rechaza y no penetra.
	11.50	12.0	BR					
	12.00	12.5	BR				24.0	
	12.50	13.0	BR					
13.00	13.5	BR				40.0		
13.50	14.0	BR						
14.00	14.5	BR				48.0	Metacuarcita gris fracturada, vetas de cuarzo y oxidaciones entre las fracturas. Se intenta SPT pero rechaza y no penetra.	
14.50	15.0	BR						
Sondeo 2	0.00	0.5	SS	2	1	2	68.0	Arena de grano medio y grueso color habana oscuro con matriz limo arenosa fina y gravas de diferentes tamaños, humedad media a alta.
	0.50	1.0						
	1.00	1.5	SS	2	1	2	66.0	
	1.50	2.0						
	2.00	2.5	SS	1	2	2	64.0	Arena de grano medio y grueso color habana oscuro con matriz limo arenosa fina y gravas de diferentes tamaños, humedad alta.
	2.50	3.0						
	3.00	3.5						
	3.50	4.0	SS	3	6	4	62.0	
4.00	4.5							

**Fuente:** Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.



**Tabla 17.** Continuación. Resultados obtenidos y descripción del suelo en los 4 sondeos Territorial Boyacá

S	P (m)		TIPO	SPT			RECOBRO (%)	Descripción
Sondeo 2	5.00	5.5	SS	8	6	7	55.0	Arena de grano medio y grueso color habana oscuro con matriz limo arenosa fina y gravas de diferentes tamaños, humedad alta.
	5.50	6.0						
	4.50	5.0						
	6.00	6.5						
	6.50	7.0	SS	6	11	8	77.0	Metacuarcita gris verdosa con cuarzos blancos, fracturada. Presenta oxidaciones. Se intenta SPT pero rechaza.
	7.00	7.5						
	7.50	8.0	BR				31.0	
	8.00	8.5	BR				35.0	
	8.50	9.0	BR					No recobra muestra, se intenta SPT pero rechaza y no penetra.
	9.00	9.5	BR				0.0	
	9.50	10.0	BR					El material se destruye completamente. Muestra de lavado, arena color gris con tamaño de grano medio. Se intenta SPT pero rechaza y no penetra.
	10.00	10.5	BL				0.0	
	10.50	11.0	BL					Metacuarcita gris con vetas de cuarzo bastante fracturada.
	11.00	11.5	BR				36.0	
	11.50	12.0	BR					
	12.00	12.5	BR				41.0	
12.50	13.0	BR					Metacuarcita gris bastante fracturada con algunos cuarzos.	
13.00	13.5	BR				37.0		
13.50	14.0	BR						
14.00	14.5	BR				50.0		
14.50	15.0	BR						
Sondeo 3	0.00	0.5	SS	1	2	2	62.0	Arena de grano medio con matriz areno limosa fina de color café, con humedad alta y gravas de diferentes tamaños.
	0.50	1.0	SS	3	1	3	66.0	
	1.00	1.5						
	1.50	2.0	SS	8	4	13	66.0	Arena de grano medio con matriz areno limosa fina de color café, con humedad alta y gravas de diferentes tamaños, humedad media a alta y granos de cuarzo.
	2.00	2.5						
	2.50	3.0						
	3.00	3.5	SS	16	7	11	82.0	

**Fuente:** Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**Tabla 18.** Continuación. Resultados obtenidos y descripción del suelo en los 4 sondeos Territorial Boyacá

S	P (m)		TIPO	SPT			RECOBRO (%)	Descripción
	3.80	4.3	BR				42.0	Bloques de metacuarcita gris verdosa con gravas de diferentes tamaños. Se pierde completamente el agua de la perforación.
	4.30	4.8	BR					
Sondeo 3	4.80	5.3	BR				50.0	Bloques de metacuarcita gris verdosa con gravas de diferentes tamaños. Se presenta cambio a una arcillolita gris oscura hasta 5,60m
	5.30	5.8	BR					
	5.80	6.3	SS					Arcillolita gris oscura con presencia de gravas medianas, humedad media a baja.
	6.30	7.0	BR	10	21	26	60.0	Arcillolita gris oscura con presencia de gravas medianas. Se intenta SPT pero rechaza (50 golpes 1,5").
	7.00	7.5	BR				98.0	
	7.50	8.0	BR				83.0	
	8.00	8.5						No recobra la barrena.
	8.50	9.0						
	9.00	9.5	SS	12	18	24	53.0	La barrena no recobra se toma muestra con SPT, limo arcilloso gris oscuro con vetas negras, contenido de humedad media.
	9.50	10.0						
	10.00	10.5						
	10.50	11.0	SS	14	14	19	48.0	
	11.00	11.5						
	11.50	12.0						
	12.00	12.5	SS	16	24	28	57.0	
	12.50	13.0						
	13.00	13.5						
13.50	14.0	SS	20	27	32	53.0	Limo negro arcilloso color gris oscuro con vetas negras y humedad media a baja.	
14.00	14.5							
14.50	15.0	SS	23	32	37	37.0	Limo negro arcilloso color gris oscuro con vetas negras y humedad media a baja.	
Sondeo 4	0.00	0.5	SS	59	31	20	86.0	Gravas de diferentes tamaños con matriz areno limosa habana humedad baja.
	0.50	1.0	SS	19	23	17	80.0	
	1.00	1.5						
	1.50	2.0	SS	4	3	6	77.0	Arena de grano medio, color café con gravas grises de diferentes tamaños y algunos lentes arcillosos.
	2.00	2.5						

**Fuente:** Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**Tabla 19.** Continuación. Resultados obtenidos y descripción del suelo en los 4 sondeos Territorial Boyacá

S	P (m)		TIPO	SPT			RECOBRO (%)	Descripción
Sondeo 4	2.50	3.0	SS	8	7	7	55.0	Arena de grano medio, color café con gravas grises de diferentes tamaños y algunos lentes arcillosos.
	3.00	3.5						
	3.50	4.0	SS	11	17	21	66.0	
	4.00	4.5	SS	9	11	17	66.0	A una profundidad de 4,05m cambia a una arcilla limosa gris con algunas vetas negras, humedad media.
	4.50	5.0						
	5.00	5.5						
	5.50	6.0	SS	10	13	19	71.0	Arcilla limosa gris oscura con humedad media.
	6.00	6.5						
	6.50	7.0						
	7.00	7.5	SS	8	12	18	66.0	
	7.50	8.0	BR				27.0	En 7,70m se presenta una arenisca gris bastante fracturada con vetas habanas y pintas negras de grano fino.
	8.00	8.5	BR					
	8.50	9.0	BR				30.0	Arenisca de color gris, altamente fracturada con vetas habanas y pintas negras de grano fino.
	9.00	9.5	BR					
	9.50	10.0	BR				50.0	Arenisca gris de color café claro altamente fracturada. Se pierde el agua de la perforación.
	10.00	10.5	BR					
	10.50	11.0	BR				58.0	Arenisca café claro de grano fino altamente fracturado con oxidaciones en las fracturas.
	11.00	11.5	BR					
	11.50	12.0	BR					A 11,60m se identifica una Arena de grano fino de colores café y amarillo con vetas grices y gravas de arenisca de diferentes tamaños, humedad media a baja.
	12.00	12.5	SS	11	16	18	75.0	
12.50	13.0							
13.00	13.5	SS	15	22	27	75.0	Arena de grano fino color amarillo con vetas grices y gravas de diferentes tamaños humedad media a baja.	
13.50	14.0							
14.00	14.5							
14.50	15.0	BR				35.0	Arenisca gris fracturada y friable. Se intenta SPT pero rechaza.	

Convenciones: SS (SPT) – BR (Barreno)

**Fuente:** Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**Tabla 20.** Caracterización física y mecánica del suelo en los 4 sondeos Territorial Boyacá

Sondeo	Prof. desde (m)	Prof. hasta (m)	USC	Wn (%)	LL(%)	LP(%)	IP(%)	% Finos	% Arenas	% Gravas	$\gamma$ (Kn/m <sup>3</sup> )	C. puntal en roca (Mpa)
Sondeo 1	0	0,5	GW-GM	3,1	N.L.	N.P.		9	39	52	20	
	1	1,5	GW-GM	1,0	N.L.	N.P.		9	43	48		
	2,5	3	GW-GM	1,2	N.L.	N.P.		8	35	57		
	3	4									30	34,5
	5	5,5	GW-GM	1,9	N.L.	N.P.		6	37	57		
	7	8									30	37
	9	10									30	11,1
	11	12									30	15,7
	14	15									30	25,5
Sondeo 2	1	1,5	SM	5,0	N.L.	N.P.		13	64	23		
	3,5	4	SM	5,3	N.L.	N.P.		14	52	33		
	6,5	7	GW-GM	3,5	N.L.	N.P.		10	40	49		
	8	9									30	35,3
	10	11	SW-SM	12,0	N.L.	N.P.		11	90	0		
	12	13									30	7
	14	15									30	101,3
Sondeo 3	0,5	1	SW-SM	4,0	N.L.	N.P.		10	48	43		
	3	3,5	SW-SM	5,1	N.L.	N.P.		10	60	30		
	3,8	4,8									30	
	4,8	5,8										6
	5,8	6,3	CL	12,0	37	18	19	81	19	0		
	11	11	CL	14,0	31	20	11	91	9	0		
	14	14	CL	13,0	25	15	10	91	9	0		
	15	15									20	
Sondeo 4	0,1	0,6	SM	2,4	N.L.	N.P.		23	52	25		
	1,5	2	SM	7,3	N.L.	N.P.		18	55	27		
	2,5	3									20	
	3,5	4	SM	6,0	N.L.	N.P.		23	45	31		
	5,5	6	CL	12,0	25	15	10	96	4	0		
	7	7,5									20	
	7,8	8,8										2,6
	11	12										22,4
	12	12									20	
	13	14	SM	9,2	N.L.	N.P.		20	54	26		

**Fuente:** Elaboración propia a partir de análisis de laboratorios realizados por INVIAS.

**Sondeo 1:** Desde la superficie actual del terreno y hasta la profundidad de 6,0 metros hay presencia de una mezcla de bloques embebidos en matriz lítica, con una compacidad media para los suelos granulares y una consistencia muy firme para la matriz, de color café, gris y verdosa, con una humedad baja, los cuales se clasifican en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS como GW-GM. Presenta un porcentaje de finos entre 6% y 9%, arenas entre 35% y 43%, gravas

entre 48% y 57%; no presenta plasticidad y los valores de resistencia al ensayo de penetración estándar (SPT) oscilan entre 9 y 26 golpes/pie. Subyaciendo y hasta la profundidad de exploración (15 metros) se detecta la presencia de roca altamente meteorizada de tipo granito y cuarcitas afectadas por el tectonismo, presentan texturas gneísicas, miloníticas y brecholdes, de color gris y verdosa, con un índice RQD de 15% y una compresión en roca de 37,62 Mpa. No reporta nivel freático hasta la profundidad de exploración.

**Sondeo 2:** Desde la superficie actual del terreno y hasta la profundidad de 6,5 metros se reporta una mezcla de bloques embebidos en matriz lítica, de color habana oscuro, con humedad baja, sin plasticidad, compacidad suelta para los suelos granulares y una consistencia firme para la matriz, los cuales se clasifican en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS como SM. Presenta un porcentaje de finos entre 10% y 14%, arenas entre 40% y 64%, gravas entre 23% y 49%. Los valores de resistencia al ensayo de penetración estándar (SPT) oscilan entre 3 y 19 golpes/pie. Subyaciendo y hasta la profundidad de exploración (15 metros) se detecta la presencia de roca altamente meteorizada de tipo granito y cuarcitas afectadas por el tectonismo, presentando texturas gneísicas, miloníticas y brecholdes, de color gris, con un índice RQD de 11%. No reporta nivel freático hasta la profundidad de exploración.

**Sondeo 3:** Desde la superficie actual del terreno y hasta la profundidad de 6,0 metros se compone de una mezcla de bloques embebidos en matriz lítica, de color café, humedad media, sin plasticidad, con una compacidad media para los suelos granulares y una consistencia firme para la matriz, los cuales se clasifican en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS como SW-SM. Presenta un porcentaje de finos de 10%, arenas entre 48% y 60%, gravas entre 30% y 43%, no presenta plasticidad y los valores de resistencia al ensayo de penetración estándar (SPT) oscilan entre 4 y 18 golpes/pie. Subyaciendo y hasta la profundidad de exploración (15,0 metros) se detecta la presencia de roca moderadamente meteorizada de tipo granito y cuarcitas afectadas por el tectonismo con presencia de arcillas, con presencia de texturas gneísicas, miloníticas y brecholdes, de color gris oscuro con vetas negras, de humedad baja con plasticidad media y compacidad densa; el suelo se clasifica en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS como CL, con un porcentaje de finos entre 81% y 91%, arenas entre 9% y 19%, humedad natural entre 12% y 14%, límite líquido entre 25% y 37%, índice de plasticidad entre 10% y 19%, un índice RQD de 52%; los valores de resistencia al ensayo de penetración estándar (SPT) oscilan entre 33 y 69 golpes/pie. No reporta nivel freático hasta la profundidad de exploración.

**Sondeo 4:** Desde la superficie actual del terreno y hasta la profundidad de 6,0 metros, se reporta la existencia de bloques en matriz fino granular con presencia de arenas limosas, de color gris, humedad baja, sin plasticidad, con una compacidad densa para los suelos granulares y una consistencia dura para la matriz, los cuales se clasifican en el Sistema Unificado de Clasificación de los

Suelos USCS como SM, excepto un estrato de arcilla de baja plasticidad entre 5 m y 6 m de profundidad. Presenta un porcentaje de finos entre 18% y 96%, arenas entre 4% y 55%, gravas entre 0% y 31%; los valores de resistencia al ensayo de penetración estándar (SPT) oscilan entre 9 y 51 golpes/pie. Subyaciendo y hasta la profundidad de exploración (15,0 metros) se detecta la presencia de roca altamente meteorizada de tipo granito y cuarcitas afectadas por el tectonismo que presentan texturas gneísicas, miloníticas y brecholdes, de color gris y café, humedad baja sin plasticidad, con compacidad densa, las cuales se clasifican en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS como SM. Presenta un porcentaje de finos de 20%, arenas de 54%, gravas de 26%, el porcentaje índice RQD varía entre 14% y 20%, compresión en roca de 4,18 Mpa y los valores de resistencia al ensayo de penetración estándar (SPT) oscilan entre 34 y 49 golpes/pie. No reporta nivel freático hasta la profundidad de exploración.

**4.4.2. Descripción del talud.** El talud se localiza en la Vía Belén - Sácama, PR 17+0805 hasta PR 18+0310, corresponde a una zona de extracción de materiales para construcción según lo que reporta INVIAS y como se puede verificar en los contratos de concesión de extracción minera. Los materiales que conforman el talud son granitos brechados, de tonos verdes, en sectores se observa textura neísica, cataclástica, brechoide y milonítica.

**Figura 43.** Sector de estudio Belén – Sácama, Boyacá, sitio crítico



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

De manera general, el material movilizado (procesos de remoción en masa) corresponde a partículas angulares de diferentes tamaños con poca matriz limosa, que se encuentran en un estado de equilibrio inestable, cualquier variación en las condiciones perturba el equilibrio y produce la movilización del material, provocando recurrentemente la necesidad de efectuar mantenimientos y causando cierres ocasionales.

**Figura 44.** Sector de estudio Belén – Sácama, Boyacá, sitio crítico



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

Se observa que se trata de flujo localizado en la parte central del talud en estudio, la causa principal del origen de dicho proceso está directamente relacionada con las deficientes prácticas de explotación de materiales.

El fenómeno de remoción en masa aparte de la situación que causa por la movilización del material, tiene como agravante la presencia de bloques de roca que pueden inestabilizarse al interior de la masa amenazando con generar caídas de roca. La inestabilidad de los bloques de roca se incrementa asimismo por la presencia de cárcavas y surcos en la masa inestable, inexistente manejo y control de drenaje superficial, entre otros.

Según información por parte de INVIAS, la atención al sitio crítico ha consistido en el retiro del material de la vía y reconfiguración parcial de la base del deslizamiento con la construcción adicional de un dique de protección construido con los mismos materiales del movimiento en masa. En la actualidad el fenómeno de remoción (flujo de detritos) tiene una condición con alto potencial de reactivación con similares consecuencias a las acontecidas en periodos de tiempo anteriores.

## 5. ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

En el desarrollo del capítulo se determinarán los parámetros de diseño de cada uno de los taludes, como cohesión, peso unitario y ángulos de fricción, obtenidos mediante los diferentes ensayos de laboratorio para las territoriales de Boyacá y Risaralda; con estos parámetros se realiza la modelación en los programas SLIDE y MIDAS GTS NX para verificar y comparar el factor de seguridad, que se obtiene en diferentes situaciones como, el efecto de las aguas lluvias y efectos producidos por sismos.

### 5.1. TERRITORIAL DE BOYACÁ

**5.1.1. Determinación de los Parámetros de Diseño.** Para los diferentes estratos fueron identificados los materiales característicos. Para la selección de los parámetros de diseño, se emplearon los datos de resistencia<sup>30</sup> derivados de ensayos de campo y laboratorio como: Penetración estándar SPT, Corte Directo Cargas puntuales en roca; adicionalmente, fueron tenidos en cuenta aspectos como el porcentaje de finos, índice de plasticidad y la presión de confinamiento para la evaluación y selección de los parámetros.

**5.1.1.1. Corrección N de campo.** Con el fin de realizar los ajustes al número de golpes obtenido del ensayo de penetración estándar en campo, éste se ha corregido con la siguiente fórmula<sup>31</sup>:

$$N_{corr} = N_{Campo} * Cn * n1 * n2 * n3 * n4 \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde,

<b><i>N<sub>corr</sub></i></b> :	Número de golpes corregido
<b><i>N<sub>campo</sub></i></b> :	Números de golpes en campo
<b><i>Cn</i></b> :	Factor de corrección por confinamiento efectivo
<b><i>n1</i></b> :	Factor por energía del martillo
<b><i>n2</i></b> :	Factor por longitud de la varilla
<b><i>n3</i></b> :	Factor revestimiento interno toma muestra
<b><i>n4</i></b> :	Factor por diámetro de la perforación

---

<sup>30</sup> (Padilla, (2014)

<sup>31</sup> Ibid, pág. 30



De los factores de corrección antes mencionados, los que más tienen incidencia es el  $C_n$  y  $n_1$ , razón por la cual para los demás factores se adopta un valor igual a 1 ( $n_2 = n_3 = n_4 = 1,0$ ). Para el factor por energía del martillo ( $n_1$ ) se ha tomado  $e=45\%$ , valor conservador para Colombia<sup>32</sup>, en cuanto al factor por confinamiento efectivo ( $C_n \leq 2$ ) que está en función de  $R_s$  ( $R_s = \sigma'_v/Pa$ ), se ha tomado la mediana estadística de las siguientes propuestas:

**Tabla 21.** Corrección al confinamiento ( $C_n$ )

<b>Peck (1948)</b>	$C_n = \log(20/R_s)/\log(20)$
<b>Seed (1985)</b>	$C_n = 1,0 - (1,25 * \log(R_s))$
<b>Meyerhof-Ishihara (1975)</b>	$C_n = 1,7/(0,7 + R_s)$
<b>Liao-Whitman (1986)</b>	$C_n = (1/R_s)^{0,5}$
<b>Skempton (1986)</b>	$C_n = 2/(1 + R_s)$
<b>Seed-Idris (1893)</b>	$C_n = 1 - (K * \log(R_s))$ $K = 1,41(R_s < 1); 0,92(R_s > 1)$
<b>Schmertmann (1983)</b>	$C_n = 32,5/(12,2 + (20,3 * R_s))$
<b>González (1999)</b>	$C_n = \log(10/R_s)$

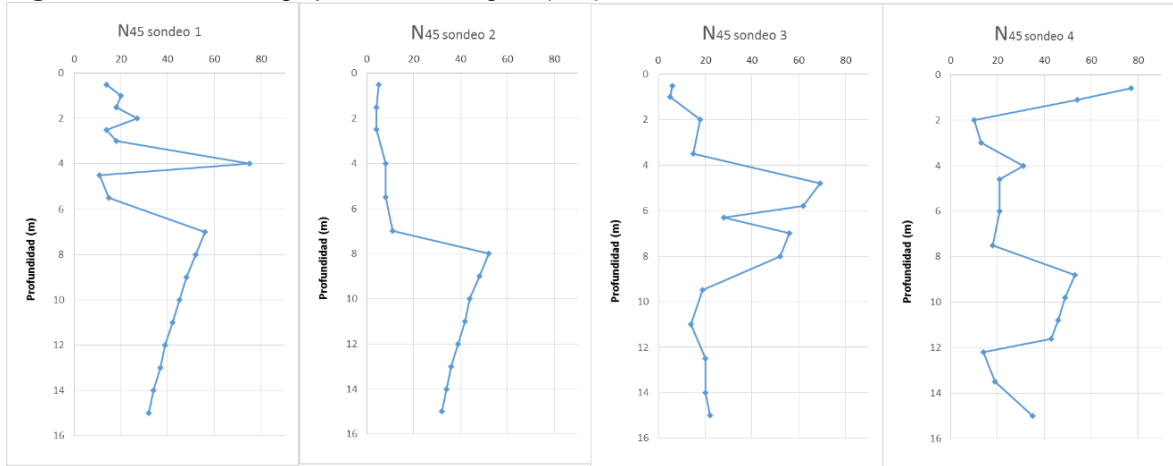
**Fuente:** Tomado de González, 1999, pág. 3.

Se realiza esta corrección porque el valor de  $N$  se encuentra influenciado por la sobrecarga debido al peso de la columna de suelo (Devincenci & Frank, 2004, pág. 14). Vale la pena anotar que este factor fue identificado en 1957 por Gibz y Holtz.

A continuación, se presentan los valores de número de golpes en campo y número de golpes corregidos por confinamiento y energía.

<sup>32</sup> Ibid, pág. 34

**Figura 45.** Número de golpes SPT corregido (N45) sitio crítico



**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio realizados por INVIAS (2018).

**5.1.1.2. Determinación del Ángulo de fricción  $\phi$ .** Así las cosas, los ángulos de fricción fueron seleccionados a partir de diferentes metodologías de análisis<sup>33</sup>, como son correlaciones empíricas con el ensayo de penetración estándar corregido por confinamiento y energía, considerando entre las cuales se pueden mencionar a Peck, Peck et al, Kishida, Schmertman, JNR y JRBA; a continuación, se citan las formulaciones de las correlaciones relacionadas previamente.

**Tabla 22.** Correlaciones empíricas para la determinación del ángulo de Fricción

<b>Peck (1948)</b>	$\phi' = 28,5 + (0,25 * N_{45})$
<b>Peck et al (1953)</b>	$\phi' = 26,3 * (2 - \exp(-N_{45}/62))$
<b>Kishida (1969)</b>	$\phi' = 15 + (12,5 * N_{45})^{0,5}$
<b>Schmertmann (1970)</b>	$\phi' = \arctan[(N_{45}/43,3)^{0,34}]$
<b>JNR (1999)</b>	$\phi' = 27 + (0.1875 * N_{45})$
<b>JRB (1986)</b>	$\phi' = 15 + (9,375 * N_{45})^{0,5}$

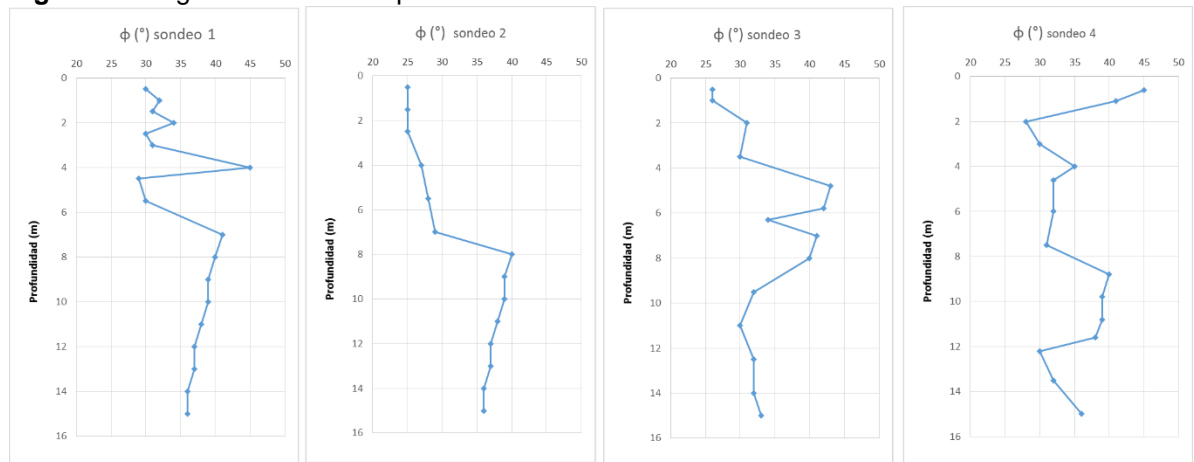
**Fuente:** Tomado de González, 1999, pág.8.

En el caso de Colombia, se deben reemplazar a una energía del 45% por el tipo de martillo de golpe (tipo donut), motivo por el cual se aplica de manera conservativa la eficacia de transformación de energía con dicho porcentaje.

<sup>33</sup> Ibid, pág. 69

De las anteriores correlaciones se ha tomado la mediana estadística para cada uno de los valores de  $N_{45}$ , teniendo en cuenta la incertidumbre de las correlaciones empíricas para la determinación del ángulo de Fricción que se muestran en la tabla 16, ya que la obtención de las ecuaciones se no se realizan en suelos Colombianos, en la siguiente grafica se presenta los valores de ángulo de fricción obtenidos mediante las anteriores correlaciones las cuales se pueden observar en la tabla 17.

**Figura 46.** Ángulo de fricción vs profundidad



**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio realizados por INVIAS.

**5.1.1.3. Determinación de la cohesión  $c'$ .** En cuanto a la componente cohesiva, se ha considerado teniendo en cuenta los porcentajes de finos reportados en la matriz<sup>34</sup>, ya que por encima del 12 a 15% esta componente tiene incidencia en la resistencia al corte del material, aunque sea en baja magnitud dependiendo de su composición granulométrica. Para tal fin fueron empleadas las correlaciones de Stroud and Butler (1974) y de la NAVFAC (1971), este último en función del índice de plasticidad de la fracción fina para valores de cohesión.

**Stroud and Butler (1974)**

$$C_u = K \cdot N$$

**Ecuación (5)**

Donde,

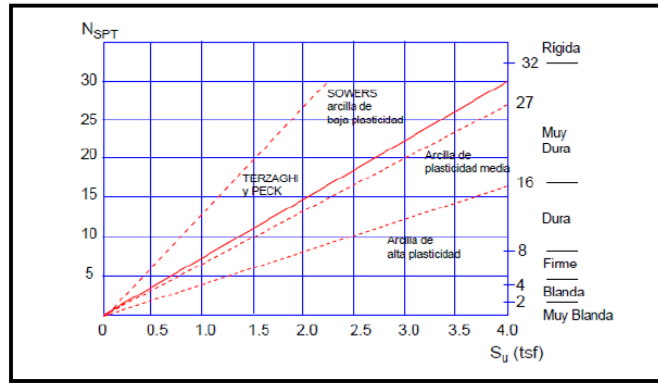
K = constante = 3.5-6.5 kN/m<sup>2</sup>

N = número de penetración estándar obtenido en campo

NAVFAC (1971)

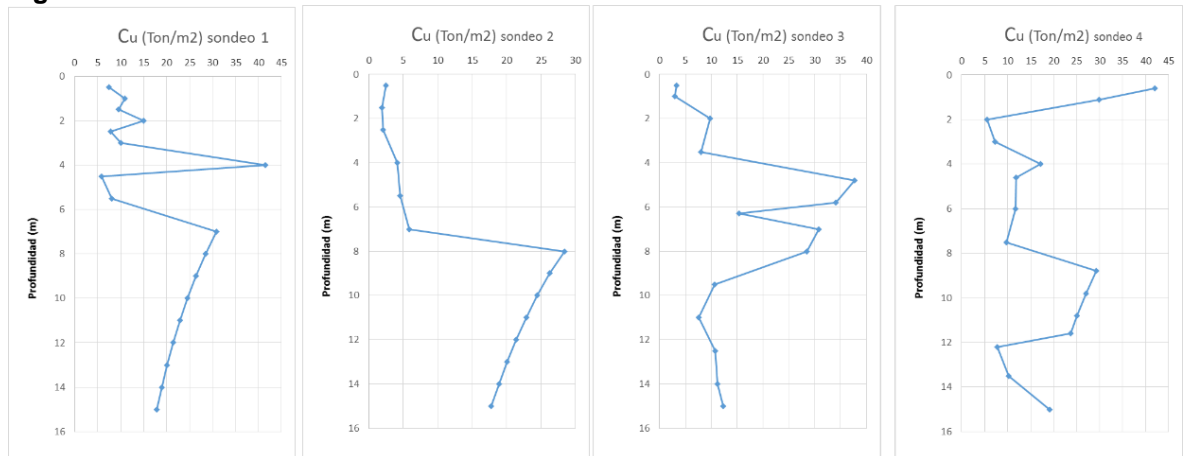
<sup>34</sup> Ibid, Pág. 64

**Figura 47.** Correlaciones empíricas con el ensayo de penetración estándar (SPT), NAVFAC



**Fuente:** Tomado de la URL <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6570/03.pdf>

**Figura 48.** Cohesión sitio crítico



**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio realizados por INVIAS.

**Tabla 23.** Parámetros de diseño talud Boyacá

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	N <sub>45</sub>	C <sub>u</sub> (t/m <sup>2</sup> )	Correlaciones para determinar el ángulo de fricción $\phi$						$\phi$ prom	
					Peck	Peck, Hanson Thornburn	Kishida	Schmertmann	JRB	JNR		
1	1	0.5	14	7.43	32	31	28	34	30	26	30	Material movilizado
1	2	1	20	10.98	33	34	31	38	31	29	32	
1	3	1.5	18	9.55	33	33	30	36	30	28	31	
1	4	2	27	15.02	35	36	33	41	32	31	34	
1	5	2.5	14	7.83	32	32	28	34	30	27	30	
1	6	3	18	10.05	33	33	30	37	30	28	31	

**Fuente:** Elaboración Propia a partir de ensayos de laboratorio elaborados por INVIAS.

**Tabla 24.** Continuación. Parámetros de diseño talud Boyacá

S	Muestra	Profundidad (m)	N45	C <sub>u</sub> (t/m <sup>2</sup> )	Peck	Peck, Hanson Thornburn	Kishida	Schmertmann	JRB	JNR	φ <sub>prom</sub>	
1	7	4	75	41.43	47	45	46	50	41	42	45	
1	8	4.5	11	5.85	31	30	27	32	29	25	29	
1	9	5.5	15	8.08	32	32	29	35	30	27	30	
1	10	7	56	30.81	43	42	41	48	38	38	41	Roca meteorizada
1	11	8	52	28.44	41	41	40	47	37	37	40	
1	12	9	48	26.35	40	40	39	46	36	36	39	
1	13	10	45	24.52	40	40	39	45	35	35	39	
1	14	11	42	22.89	39	39	38	45	35	35	38	
1	15	12	39	21.43	38	39	37	44	34	34	37	
1	16	13	37	20.11	38	38	36	43	34	34	37	
1	17	14	34	18.91	37	37	36	43	33	33	36	
1	18	15	32	17.82	37	37	35	42	33	32	36	
2	1	0.5	5	2.48	30	28	23	25	28	21	25	
2	2	1.5	4	1.93	29	28	22	23	28	21	25	
2	3	2.5	4	2.09	29	28	22	24	28	21	25	
2	4	4	8	4.14	30	29	25	29	28	23	27	
2	5	5.5	8	4.56	31	30	25	30	29	24	28	
2	6	7	11	5.84	31	30	27	32	29	25	29	
2	7	8	52	28.36	41	41	40	47	37	37	40	
2	8	9	48	26.28	40	40	39	46	36	36	39	Roca meteorizada
2	9	10	44	24.45	40	40	39	45	35	35	39	
2	10	11	42	22.84	39	39	38	45	35	35	38	
2	11	12	39	21.38	38	39	37	44	34	34	37	
2	12	13	36	20.07	38	38	36	43	34	33	37	
2	13	14	34	18.88	37	37	36	43	33	33	36	
2	14	15	32	17.78	37	37	35	42	33	32	36	
3	1	0.5	6	3	30	29	24	27	28	23	26	Material movilizado
3	2	1	5	3	30	28	23	26	28	22	26	
3	3	2	18	10	33	33	30	36	30	28	31	
3	4	3.5	15	8	32	32	28	35	30	27	30	
3	5	4.8	69	38	46	44	44	49	40	40	43	
3	6	5.8	62	34	44	43	43	48	39	39	42	
3	7	6.3	28	15	35	36	34	41	32	31	34	
3	8	7	56	31	42	42	41	48	37	38	41	
3	9	8	52	28	41	41	40	47	37	37	40	Roca mete

Fuente: Elaboración Propia a partir de ensayos de laboratorio elaborados por INVIAS.

**Tabla 25.** Continuación. Parámetros de diseño talud Boyacá

S	Muestra	Profundidad (m)	N45	$C_u$ (t/m <sup>2</sup> )	Peck	Peck, Hanson Thornburn	Kishida	Schmertmann	JRB	JNR	$\phi_{prom}$	
3	10	9.5	19	11	33	33	31	37	31	28	32	Roca meteorizada
3	11	11	14	8	32	32	28	34	30	26	30	
3	12	12.5	20	11	33	33	31	37	31	29	32	
3	13	14	20	11	34	34	31	38	31	29	32	
3	14	15	22	12	34	34	32	39	31	29	33	
4	1	0.6	77	42.08	48	45	46	51	41	42	45	Material movilizado
4	2	1.1	54	29.9	42	42	41	47	37	38	41	
4	3	2	10	5.55	31	30	26	31	29	25	28	
4	4	3	13	7.26	32	31	28	34	29	26	30	Material movilizado
4	5	4	31	17.16	36	37	35	42	33	32	35	
4	6	4.6	21	11.78	34	34	31	38	31	29	32	
4	7	6	21	11.74	34	34	31	38	31	29	32	
4	8	7.5	18	9.75	33	33	30	36	30	28	31	
4	9	8.8	53	29.24	42	41	41	47	37	37	40	Roca meteorizada
4	10	9.8	49	27.05	41	41	40	46	35	36	39	
4	11	10.8	46	25.13	40	40	39	46	35	36	39	
4	12	11.6	43	23.76	39	39	38	45	35	35	38	
4	13	12.2	14	7.76	32	32	28	34	30	26	30	
4	14	13.5	19	10.27	33	33	30	37	31	28	32	
4	15	15	35	19.09	37	38	36	43	34	33	36	

**Fuente:** Elaboración Propia a partir de ensayos de laboratorio elaborados por INVIAS.

**5.1.2. Aplicación de Parámetros de diseño.** Si bien es cierto, las metodologías anteriormente mencionadas plantean la evaluación de los parámetros de resistencia al corte para suelos netamente cohesivos o friccionantes, para la elección de los parámetros utilizados durante la ejecución de los análisis geotécnicos, se determinó el aporte de la componente cohesiva y friccionante en la resistencia al corte, teniendo en cuenta las características físicas de los materiales.

Así las cosas, a continuación, se presenta la metodología utilizada para la obtención de los parámetros de diseño  $c'$  y  $\phi$ .

A partir de los números de golpes (SPT) y las diferentes correlaciones, se calcula los parámetros netos de  $C'$  y  $\phi$ .

Los parámetros netos son utilizados para calcular el cortante netamente cohesivo y netamente friccionante según el criterio de Mohr-Coulomb (Suárez, 1998, pág. 76).

$$\tau = c + \sigma' * \text{tang}\phi \quad \text{Mohr - Coulomb(1900)} \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$\tau_{\text{cohesivo}} = c'; \quad [\phi = 0] \quad \text{Ecuación (7)}$$

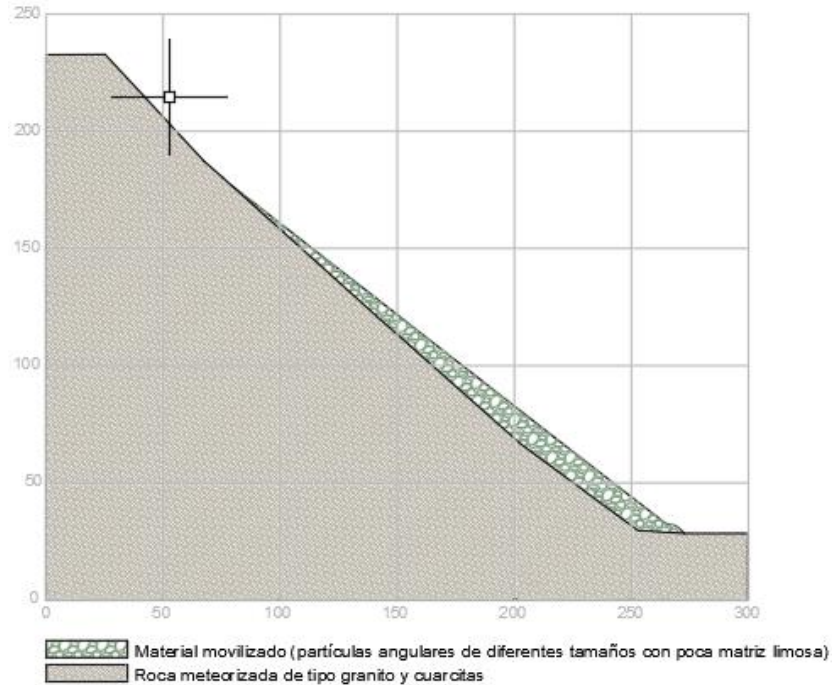
$$\tau_{\text{friccionante}} = \sigma' * \text{tang}\phi; \quad [c' = 0] \quad \text{Ecuación (8)}$$

Con este cortante seleccionado se aplica de nuevo el criterio de Mohr Coulomb y se obtienen los parámetros C' y  $\phi$  de diseño por cada muestra de SPT.

Con base en la metodología anterior se ha determinado los valores de cohesión y ángulo de fricción ( $\phi$ ) en función de N(SPT), estos datos han sido tabulados y comparados con otros ensayos, con el fin de determinar los parámetros definitivos.

**5.1.3. Descripción de Materiales y Parámetros Geotécnicos.** Con base en el apartado anterior, en la figura y tabla mostrados a continuación se presenta el modelo geotécnico y los parámetros de diseño seleccionados para la ejecución del análisis del talud, en el cual se han definido dos estratos que tienen en cuenta la información obtenida en los ensayos de laboratorio y cálculos de algunos parámetros realizados en estudios proporcionados por INVIAS. El primer estrato está conformado por material que corresponde a partículas angulares de diferentes tamaños con poca matriz limosa, en estado de equilibrio inestable lo que ha originado su movilización; el estrato subyacente es roca meteorizada de tipo granito y cuarcitas afectadas por tectonismo y presentan texturas gneísicas, miloníticas y brechoides.

**Figura 49.** Modelo geotécnico Territorial Boyacá



**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos tomados del estudio realizado por INVIAS (2018).

**Tabla 26.** Parámetros geotécnicos de diseño sitio crítico Territorial Boyacá

Estrato	Descripción	Parámetros geotécnicos			
		$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	C' (t/m <sup>2</sup> )	$\Phi$ (°)	E (t/m <sup>2</sup> )
1	Material movilizado (procesos de remoción en masa) corresponde a partículas angulares de diferentes tamaños con poca matriz limosa, que se encuentran en un estado de equilibrio inestable	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	C' (t/m <sup>2</sup> )	$\Phi$ (°)	E (t/m <sup>2</sup> )
		1,8	0	31,9	1900
2	Roca meteorizada de tipo granito y cuarcitas afectadas por tectonismo. Presentan texturas gneísicas, miloníticas y brechoides	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	C' (t/m <sup>2</sup> )	$\Phi$ (°)	E (t/m <sup>2</sup> )
		2,1	47,4	36,7	110000
		mb: 0.619490436 s: 3.92747972e-005 a: 0.522343775			

**Fuente:** Elaboración Propia a partir de ensayos de laboratorio elaborados por INVIAS (2018).

#### 5.1.4. Determinación del factor de seguridad mediante software MIDAS GTS NX

Los análisis para el sitio crítico consistieron en modelaciones con la sección más crítica a lo largo de la zona, en la cual se tuvo en cuenta el talud interno con una altura cercana a los 200 metros; con esta sección se llevó a cabo el análisis de estabilidad, tendiente a la determinación del factor de seguridad en condición inicial y también con el retiro del material del fenómeno de remoción en masa.



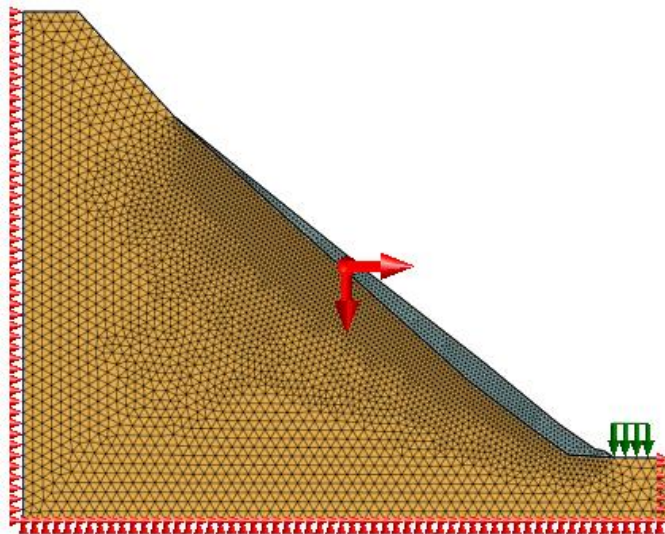
Para la modelación se emplea el método de reducción de la resistencia (SRM) en el software Midas GTS NX ejecutando un análisis de estabilidad por elementos finitos; el método SRM disminuye gradualmente la resistencia al corte hasta que no converge el cálculo y en ese punto se considera la falla del talud. El empleo de elementos finitos proporciona información sobre deformaciones y desplazamientos que no es posible con métodos de equilibrio límite; además tiene en cuenta que es un proceso progresivo logrando resultados más cercanos al comportamiento real del talud. El comportamiento de los estratos fue establecido mediante un modelo constitutivo Mohr-Coulomb para el fenómeno de remoción en masa y el modelo generalizado Hoek Brown para la roca que subyace.

Para el análisis pseudoestático se toma  $2/3$  de la aceleración pico horizontal efectiva  $A_a$  de la región (0,35) que corresponde a 0,23. Se incluye una carga distribuida uniformemente sobre la vía de 1.5 t/m para tener en cuenta el tránsito que transcurre por ésta. Las modelaciones se realizaron en condición estática y pseudo-estática, sin nivel freático ya que en ninguna de las profundidades de exploración de los sondeos fue reportado.

#### 5.1.4.1. Análisis del talud en condición actual

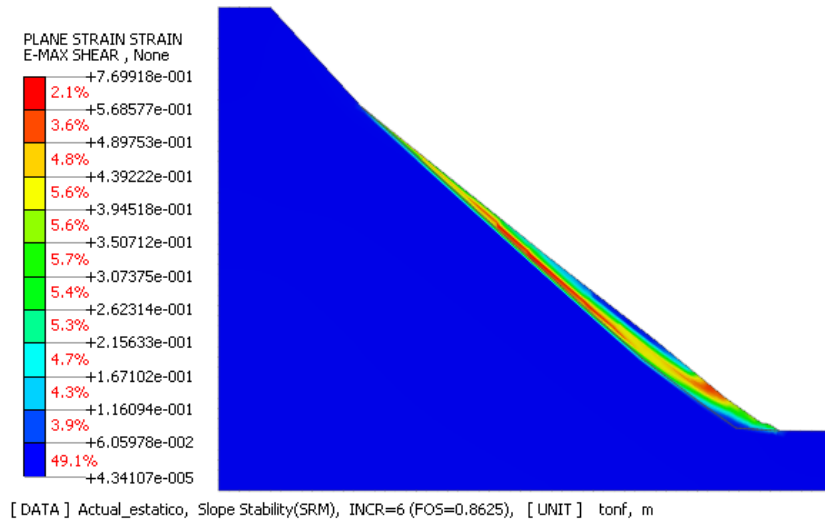
En la condición actual del talud y teniendo en cuenta el modelo geotécnico junto con los parámetros de diseño, se obtiene un factor de seguridad en condición estática de 0,86 pero no fue posible obtener un valor de factor de seguridad en condición pseudoestática pues la modelación no converge y se asume que el resultado es menor que 0,10 (ver figuras 50 y 51).

**Figura 50.** Modelo del talud (Territorial Boyacá) en el software Midas GTS NX, condición actual



**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

**Figura 51.** Condición estática (Midas GTS NX)

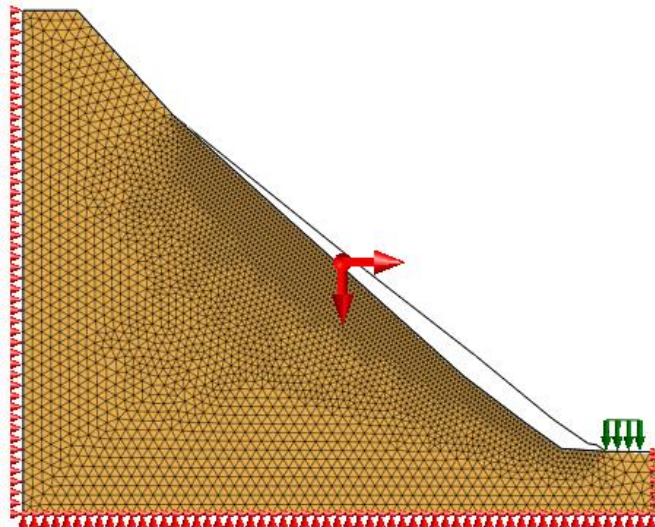


**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

#### 5.1.4.2. Análisis del talud con retiro del material

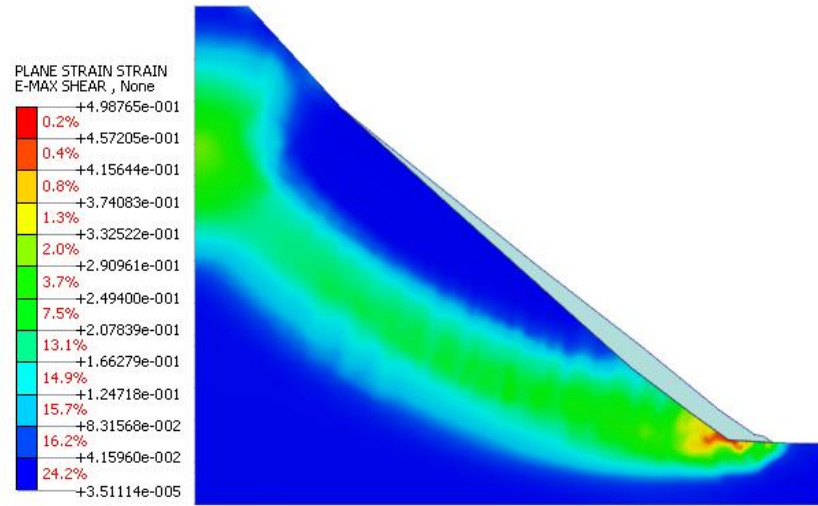
El talud de la Territorial Boyacá también fue modelado asumiendo un retiro del material correspondiente a partículas angulares de diferentes tamaños con poca matriz limosa, que se encuentran en un estado de equilibrio inestable (ver figura 52). Los resultados de factores de seguridad son mayores a los obtenidos en la condición actual, pues son: 2,21 en condición estática y 1,63 en condición pseudoestática (ver figuras 53 y 54).

**Figura 52.** Modelo del talud (Territorial Boyacá) en el software Midas GTS NX, con retiro de material



**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

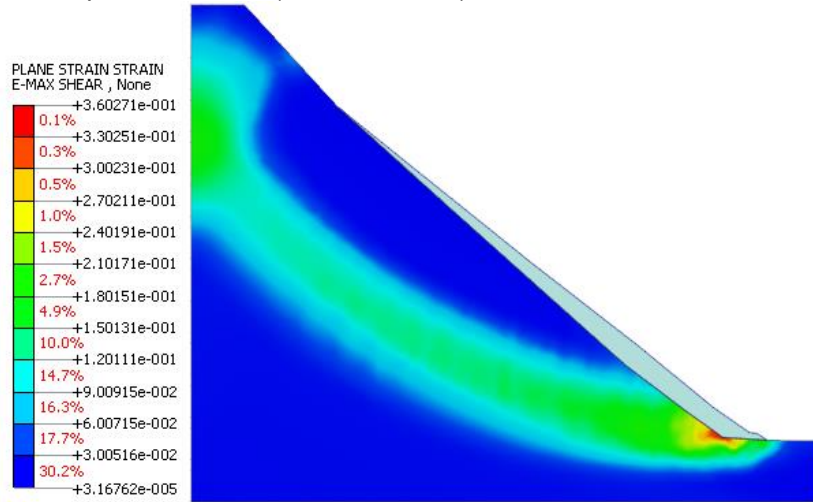
**Figura 53.** Condición estática (Midas GTS NX), con retiro de material



[ DATA ] Estático\_con\_retiro\_material, Slope Stability(SRM), INCR=18 (FO5=2.2125), [ UNIT ] tonf, m

**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

**Figura 54.** Condición pseudoestática (Midas GTS NX)



[ DATA ] Pseudoestático\_con\_retiro\_material, Slope Stability(SRM), INCR=16 (FO5=1.6258), [ UNIT ] tonf, m

**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

La tabla 19 presenta los factores de seguridad obtenidos para las dos condiciones de modelación, donde el retiro del material se ha calculado en aproximadamente 80000 m<sup>3</sup>.

**Tabla 27.** Factores de seguridad sitio crítico Territorial Boyacá

Condición	Factor de Seguridad Estático	Factor de Seguridad Pseudoestático
Condición inicial	0,86	Indeterminado
Con retiro del material Aprox. 80000 m <sup>3</sup>	2,21	1,63

**Fuente:** Elaboración propia.

### **Análisis de resultados obtenidos en el talud de Boyacá**

De acuerdo con las modelaciones, se observa que en las condiciones actuales el factor de seguridad se encuentra muy por debajo de lo que indica la NSR-10 mostrado en la tabla H.2.4-1, factores de seguridad básicos mínimos directos, el cual indica que para el diseño en condiciones estáticas y agua subterránea normal el factor de seguridad recomendado es de 1.5 y en condición seudo-estática con agua subterránea normal es de 1.05.

Como se ha descrito, el talud presenta procesos de remoción en masa que se encuentran en un estado de equilibrio inestable, cualquier variación en las condiciones perturba el equilibrio y produce la movilización del material, provocando recurrentemente la necesidad de efectuar mantenimientos.

Al hacer el retiro del material el Factor de Seguridad aumenta considerablemente tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas, por esta razón se recomienda que el talud no sea revegetalizado sin el retiro de este material suelto, ya que la solución consiste en el retiro total del material movilizado de forma controlada, conservando las pendientes de 2V;1H; por otra parte, es necesario atender la afectación de la vía debido a la caída de rocas, por tal razón, luego del retiro del material se recomienda la construcción de un muro en concreto que funcione como barrera, así mismo sea protegido de los agentes ambientales; esta protección estaría encaminada al refuerzo del macizo rocoso meteorizado, toda vez que por el tipo de material es poco probable que una especie vegetal se adapte a la zona de estudio, la estabilización puede lograrse mediante el refuerzo utilizando elementos estructurales como mallas ancladas para el control de caídas de rocas, así como la utilización de pernos con el propósito de generar resistencia a la tensión dentro del macizo y uniendo así las discontinuidades, adicional se deben ejecutar obras de drenaje y subdrenaje.

**Figura 55.** Solución planteada para estabilización del talud de Boyacá



**Fuente:** Estudio realizado por INVIAS.

Este capítulo muestra la importancia de realizar un estudio detallado antes de implementar una técnica de revegetalización, toda vez que si se hubiera instalado una capa vegetal en condiciones actuales, ésta no sólo induciría a que el talud continuara presentado condiciones de falla, sino que aumentaría la ocurrencia de estos eventos, por lo tanto no siempre la revegetalización de taludes es una solución adecuada para la estabilidad de los mismos.

## 5.2. TERRITORIAL RISARALDA

Para la territorial de Risaralda se realizó la misma metodología descrita en el capítulo anterior para la determinación de los parámetros de diseño, con el apoyo de correlaciones a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de SPT, donde se calcularon los valores de la cohesión y del ángulo de fricción; es importante indicar que para la obtención de peso unitario de las diferentes unidades de suelo, se determinó de acuerdo a la norma INVIAS-128, en donde se realizó ensayo a las primeras 15 muestras y del cual se anexa el reporte de laboratorio.

El método aproximado para la evaluación de los parámetros efectivos de resistencia  $c'$  y  $\phi'$ , mediante el empleo de los datos de SPT (N en golpes/pie) se soporta en la obtención de valores estimados, para tener valores razonables de los materiales granulares o intermedios.

**5.2.1. Determinación de los Parámetros de Diseño.** Para los diferentes estratos fueron identificados los materiales característicos. Para la selección de los parámetros de diseño se emplearon los datos de resistencia y se empleó la misma metodología de acuerdo con los ensayos de campo y laboratorio, adicionalmente, fueron tenidos en cuenta aspectos como el porcentaje de finos, índice de plasticidad y la presión de confinamiento para la evaluación y selección de los parámetros.

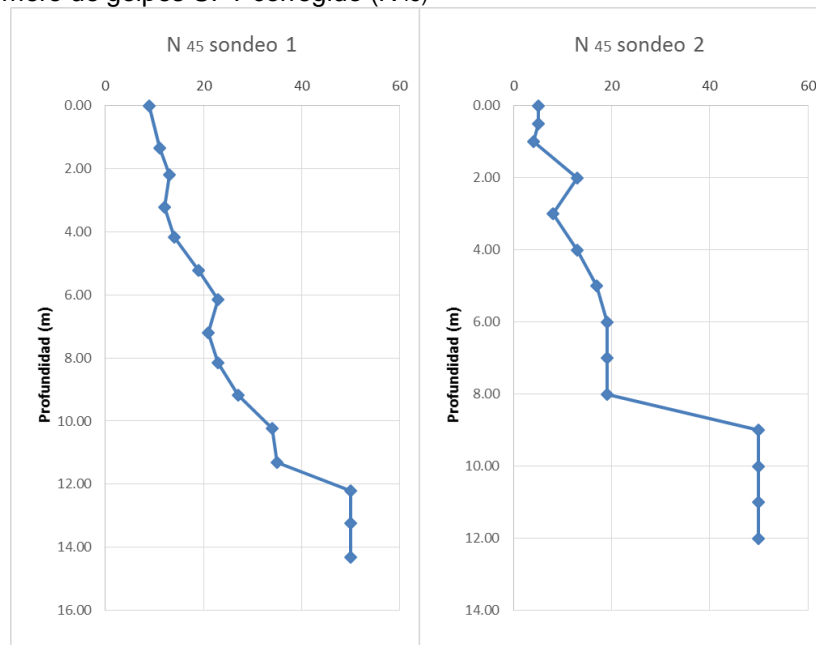
**5.2.1.1. Corrección N de campo.** Se empleó la misma metodología indicada en el talud de Boyacá, los resultados se muestran a continuación para cada sondeo.

Como se indicó anteriormente el ensayo SPT permite encontrar las condiciones ideales para el ángulo de fricción. Los resultados de la prueba de penetración estándar son útiles para establecer correlaciones con el ángulo de fricción del material y la resistencia al corte sin drenar.

En atención a lo anterior, se utilizaron las fórmulas dadas por la literatura especializada para determinar las correcciones respectivas a presión de confinamiento, energía y de número de golpes.

Para aumentar el porcentaje de satisfacción en la corrección de número de golpes se utilizó el método de corrección por confinamiento propuesto por González (1999), por su acercamiento teórico en los parámetros del país.

**Figura 56.** Número de golpes SPT corregido (N45)



**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio realizados por INVIAS.

Se observa un cambio a la profundidad de 12 metros en el sondeo 1 y a 9 metros para el sondeo 2, lo cual indica un cambio de material.

**5.2.1.2. Determinación de Ángulo de fricción y cohesión mediante correlaciones.** Para la territorial de Risaralda la determinación de los parámetros de diseño se realiza mediante correlaciones con el ensayo de SPT y los resultados se muestran a continuación.

La siguiente tabla muestra los valores de ángulo de fricción obtenidos por diferentes correlaciones y al final con un valor promedio para cada muestra, concluyendo que es posible definir en cada sondeo la presencia de dos estratos con diferente

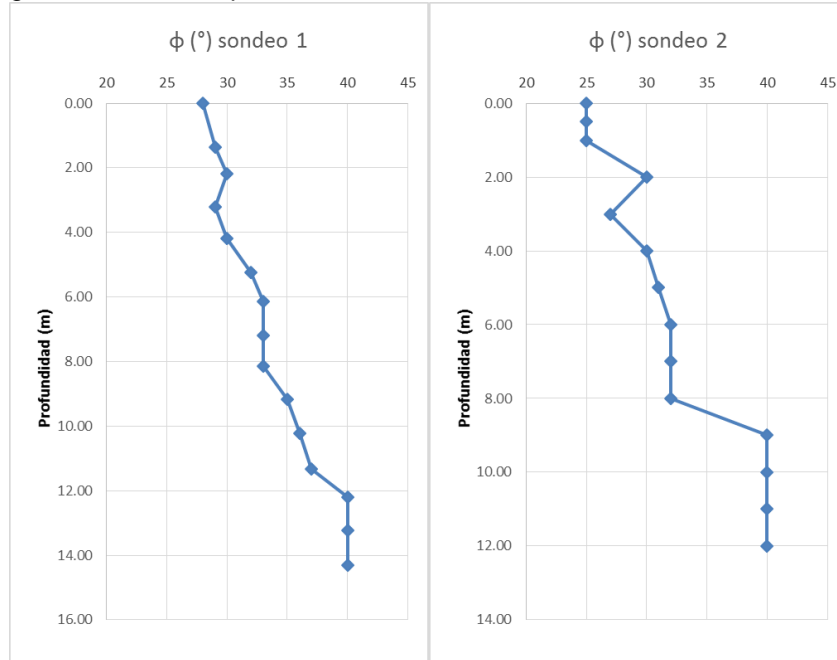
comportamiento, similar a lo presentado en la variación del número de golpes  $N_{45}$  en profundidad y que conlleva a la consecución del modelo geotécnico del talud. El ángulo de fricción (ver figura 57) aumenta generalmente con la profundidad, existiendo un cambio significativo entre los 8 m y 9 m.

**Tabla 28.** Parámetros para obtención del ángulo de fricción por diferentes correlaciones

Son-deo	Profun-didad (m)	N45	$\gamma$ ( $t/m^3$ )	Correlaciones para determinar el ángulo de fricción $\phi$						$\phi_{prom}$	
				Peck	Peck, Hanson Thornburn	Kishida	Schmertmann	JRB	JNR		
1	0.7	9	1.32	31.00	30.16	25.00	31.28	23.66	28.50	28	Estrato 1
1	1.8	11	1.39	31.50	30.87	26.18	32.88	24.68	28.88	29	
1	2.7	14	1.52	32.25	31.89	27.25	34.89	25.61	29	30	
1	3.7	13	1.34	31.75	31.22	26.73	33.59	25.16	29	29	
1	4.7	14	1.40	32.50	32.22	27.75	35.48	26.04	29	30	
1	5.7	20	1.44	34.00	34.09	30.00	38.46	27.99	30	32	
1	6.7	22	1.23	35.25	35.52	31.58	40.42	29.36	31	33	
1	7.7	21	1.72	34.50	34.68	30.81	39.29	28.69	31	33	
1	8.7	24	1.40	35.00	35.24	31.58	40.06	29.36	31	33	
1	9.7	31	2.00	36.25	36.58	33.03	41.75	30.61	32	35	
1	10.8	40	2.01	38.25	38.51	35.31	43.98	32.59	33	36	
1	11.8	45	1.81	38.75	38.95	35.62	44.47	32.85	33	37	
1	12.7	>50	1.77	41.00	40.78	40.00	46.40	36.65	36	40	Estrato 2
1	13.8	>50	1.95	41.00	40.78	40.00	46.40	36.65	36	40	
1	14.7	>50	1.82	41.00	40.78	40.00	46.40	36.65	36	40	
2	0.3	5	1.42	29.75	28.28	22.07	25.64	21.12	28	25	Estrato 1
2	0.8	5	1.42	29.75	28.28	22.07	25.64	21.12	28	25	
2	1.5	4	1.42	29.50	27.89	21.12	23.99	20.30	28	25	
2	2.5	14	1.42	32.25	31.89	27.25	34.89	25.61	29	30	
2	3.5	8	1.42	30.50	29.43	24.35	29.39	23.10	28	27	
2	4.5	13	1.42	32.25	31.89	27.25	34.89	25.61	29	30	
2	5.5	18	1.42	33.50	33.49	29.14	37.56	27.25	30	31	
2	6.5	18	1.42	33.75	33.79	30.00	38.02	27.99	30	32	
2	7.5	19	1.42	33.75	33.79	30.00	38.02	27.99	30	32	
2	8.5	20	1.42	34.00	34.09	30.00	38.46	27.99	30	32	
2	9.5	>50	1.85	41.00	40.78	40.00	46.40	36.65	36	40	
2	10.5	>50	1.85	41.00	40.78	40.00	46.40	36.65	36	40	
2	11.5	>50	1.85	41.00	40.78	40.00	46.40	36.65	36	40	
2	12.3	>50	1.85	41.00	40.78	40.00	46.40	36.65	36	40	

**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio elaborados por INVIAS.

**Figura 57.** Ángulo de fricción vs profundidad



**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio realizados por INVIAS.

Para el cálculo del ángulo de fricción de los dos estratos definidos se grafica el esfuerzo cortante contra el esfuerzo vertical efectivo, tal como se muestra en la siguiente tabla y gráfica. Al realizar la regresión lineal, la pendiente de la recta corresponde al ángulo de fricción interna, que para el material o estrato 1 es de 35,3° y para el estrato subyacente es de 40°. Al analizar las rectas de la figura 58 y su punto de intersección en el eje de las ordenadas, es posible determinar que no hay cohesión en ambos casos.

**Tabla 29.** Parámetros para cálculo del ángulo de fricción

	Sondeo	Profundidad (m)	$\sigma_v'$ (t/m <sup>2</sup> )	$\tau$ (t/m <sup>2</sup> )
L 5	1	0.7	0.23	0.11
	1	1.8	0.63	0.31
	1	2.7	1.07	0.55
	1	3.7	1.52	0.77
	1	4.7	1.92	1.01
	1	5.7	2.35	1.35
	1	6.7	2.69	1.65
	1	7.7	3.17	1.89
	1	8.7	3.74	2.30
	1	9.7	4.49	2.92

**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio elaborados por INVIAS.

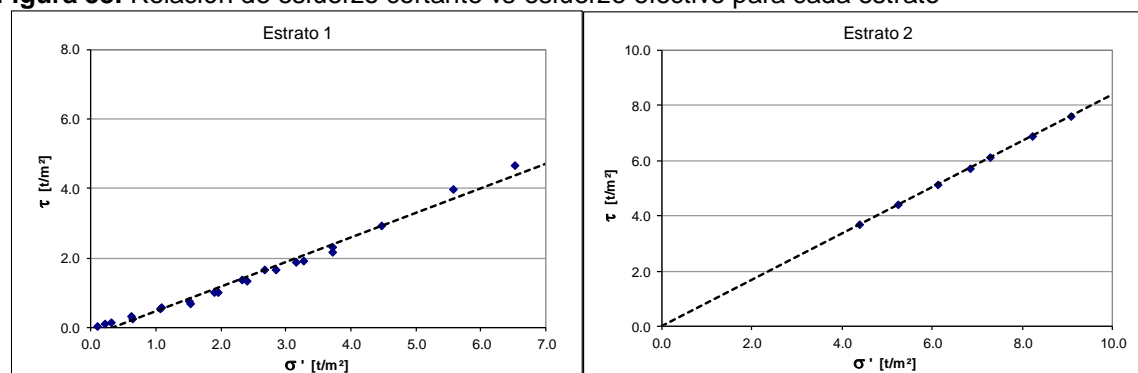


**Tabla 30.** Continuación Parámetros para cálculo del ángulo de fricción

	Sondeo	Profundidad (m)	$\sigma'_v$ ( $t/m^2$ )	$\tau$ ( $t/m^2$ )
	1	10.8	5.59	3.96
	1	11.8	6.53	4.68
	2	0.3	0.11	0.04
	2	0.8	0.33	0.13
	2	1.5	0.66	0.25
	2	2.5	1.10	0.57
	2	3.5	1.54	0.70
	2	4.5	1.98	1.02
	2	5.5	2.41	1.35
	2	6.5	2.85	1.65
Estrato 2	2	7.5	3.29	1.90
	2	8.5	3.73	2.15
	1	12.7	7.30	6.13
	1	13.8	8.23	6.91
	1	14.7	9.08	7.62
	2	9.5	4.39	3.68
	2	10.5	5.25	4.41
2	11.5	6.12	5.14	
2	12.3	6.84	5.74	

**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio elaborados por INVIAS.

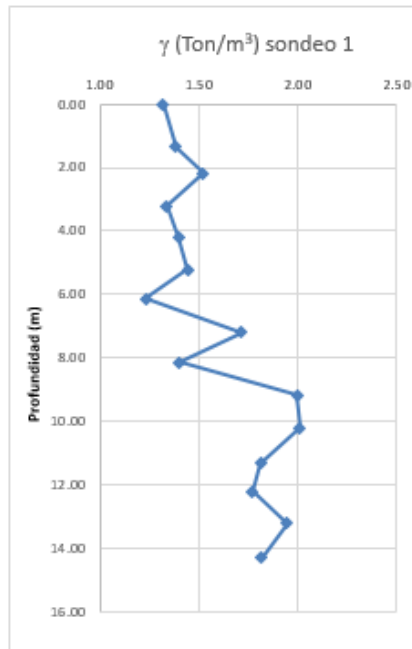
**Figura 58.** Relación de esfuerzo cortante vs esfuerzo efectivo para cada estrato



**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio realizados por INVIAS.

El Peso unitario de la muestra se determinó para cada muestra del primer sondeo a partir del ensayo denominado determinación del peso específico de los suelos según norma INVIAS-128.

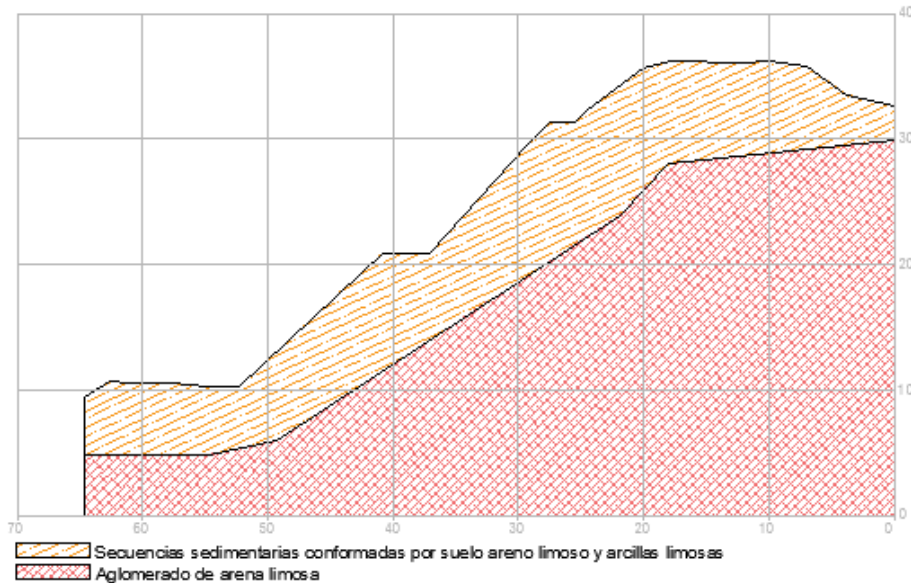
**Figura 59.** Peso unitario vs profundidad



**Fuente:** Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio realizados por INVIAS.

Con base en el apartado anterior, en la tabla 22 se presentan los parámetros de diseño seleccionados para la ejecución del análisis del talud y así definir el modelo geotécnico mostrado en la figura 60.

**Figura 60.** Modelo geotécnico Territorial Risaralda



**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos tomados del estudio realizado por INVIAS.

**Tabla 31.** Parámetros geotécnicos de diseño sitio crítico Territorial Risaralda

Estrato	Descripción	$\gamma$	C'	$\Phi$
		(t/m <sup>3</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )	(°)
1	Secuencias sedimentarias conformadas por suelo areno limoso color café amarilloso con vetas rojizas y arcillas limosas a una profundidad entre 9 m y 10 m	1.49	1.0	35.3
2	Aglomerado de arena limosa color rojizo con vetas de oxidación, humedad media y consistencia alta	1.85	1.8	40.0

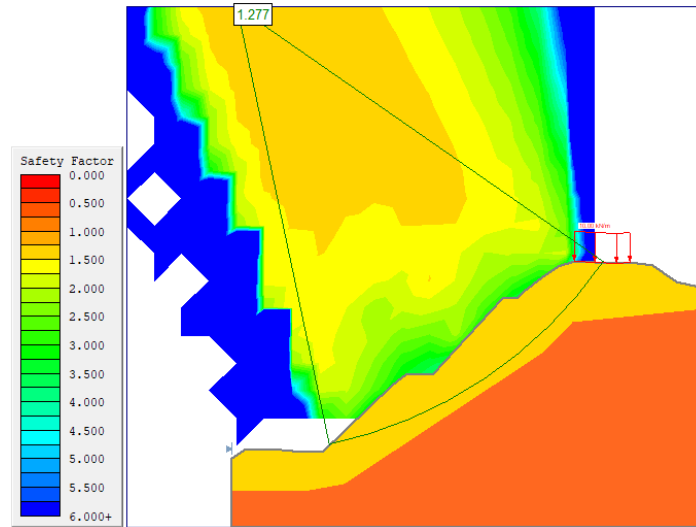
**Fuente:** Elaboración Propia a partir de ensayos de laboratorio elaborados por INVIAS.

### 5.2.2. Determinación de factor de seguridad mediante software SLIDE 6.0.

Para el análisis de estabilidad de taludes, se toma la sección transversal 27+900 por considerarse representativa en el talud de interés, con esta sección se construye el modelo geotécnico para el análisis mediante metodologías de equilibrio límite utilizando el software SLIDE 6.0, donde se realiza la respectiva modelación, cuyos parámetros geotécnicos están resumidos en la Tabla 22.

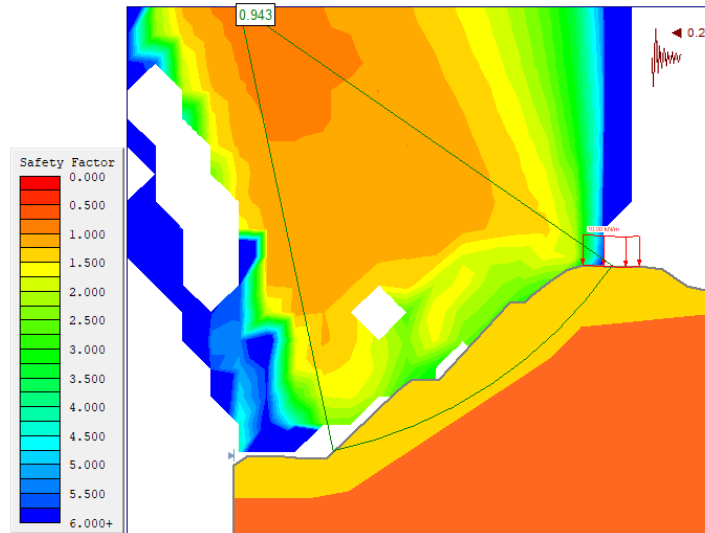
De acuerdo con el perfil promedio del sitio, los inventarios de fuentes sísmicas del País y especialmente con el contenido de la NSR-10 capítulo A.2 denominado zonas de amenaza sísmica y movimientos sísmicos de diseño, es posible establecer que el área del proyecto se encuentra en la región 6 con parámetro de aceleración pico horizontal efectiva  $A_a$  de 0,30, tomando para las modelaciones un valor correspondiente a  $2/3$  de  $A_a$  que equivale a 0,20. El talud incluye una sobrecarga en su parte superior de 10 kN/m<sup>2</sup>. El modelo constitutivo es Mohr Coulomb para los dos estratos. Las modelaciones se realizaron en condición estática y pseudo-estática, con y sin nivel freático; los factores de seguridad corresponden a los obtenidos por el método de Spencer según (Suárez, 1998, pág. 156) este es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación, ya que este es un método completo y conservador y es de los métodos más usados en estudios de Consultoría en Colombia, adicionalmente teniendo en cuenta que se iba a realizar una comparación entre el método de equilibrio límite utilizando SLIDE y elementos finitos utilizando Midas GTS NX, se necesitaba utilizar un método conservador ya que en otras investigaciones se observa que las modelaciones con elementos finitos los resultados del factor de seguridad son menores.

**Figura 61.** Condición estática sin nivel freático (Slide)



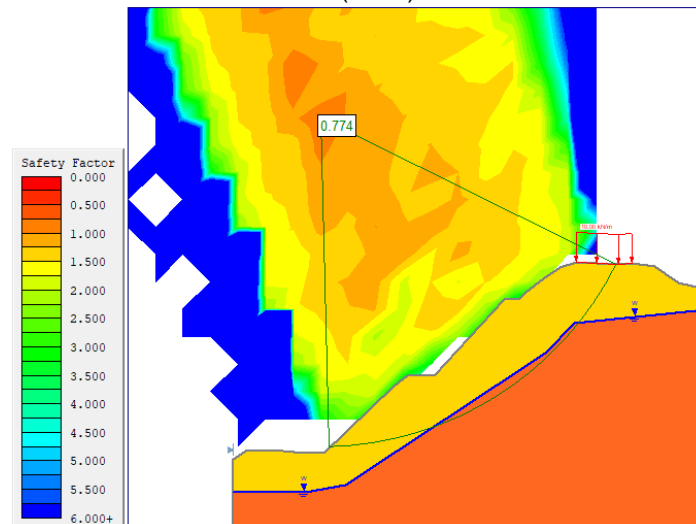
**Fuente:** Elaboración propia a partir de software SLIDE 6.0.

**Figura 62.** Condición pseudoestática sin nivel freático (Slide)



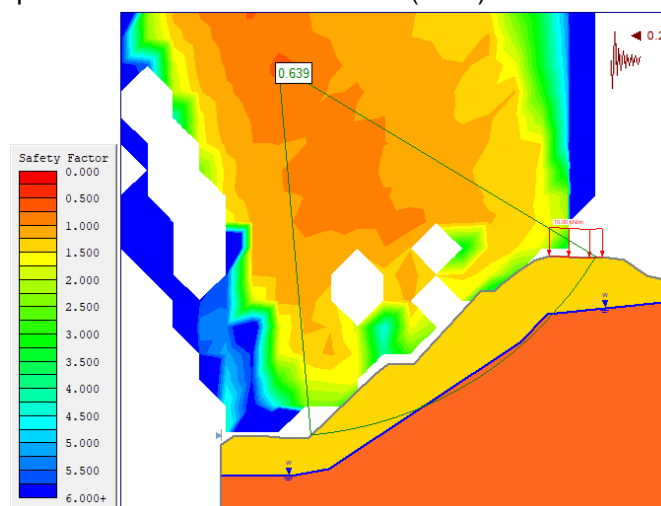
**Fuente:** Elaboración propia a partir de software SLIDE 6.0.

**Figura 63.** Condición estática con nivel freático (Slide)



**Fuente:** Elaboración propia a partir de software SLIDE 6.0.

**Figura 64.** Condición pseudoestática con nivel freático (Slide)



**Fuente:** Elaboración propia a partir de software SLIDE 6.0.

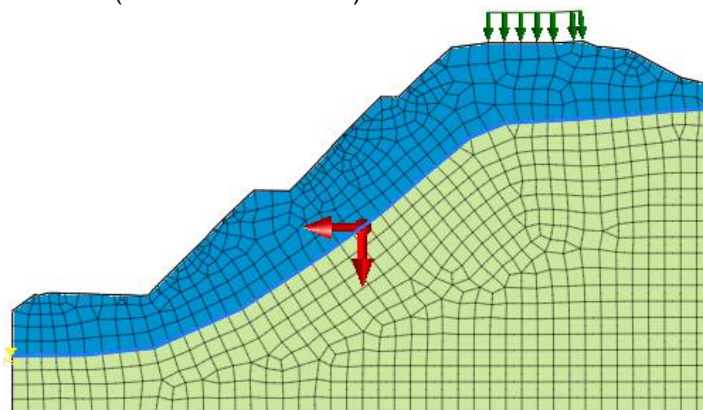
**Tabla 32.** Resumen de factores de seguridad con el software SLIDE

Condición	Factor de Seguridad
Estática sin nivel freático	1.28
Pseudoestática sin nivel freático	0.94
Estática con nivel freático	0.77
Pseudoestática con nivel freático	0.64

**Fuente:** Elaboración propia.

**5.2.3. Determinación del factor de seguridad mediante Software MIDAS GTS NX.** El talud en estudio corresponde a la sección transversal K27 + 900 el cual se encuentra localizado entre las abscisas k27+770 y k27+950 margen derecha de la vía entre Santa Cecilia y Pueblo Rico de la ruta 5003 (PR13+130 – PR33+000). Los parámetros geotécnicos del modelo son los mismos implementados en la determinación de los factores de seguridad con el software Slide. Para el análisis pseudoestático se emplea una aceleración pico horizontal  $A_a$  de 0,20 (corresponde a  $2/3$  de  $A_a$  para la región 6 con valor de 0.3 según NSR-10). El talud incluye una sobrecarga en su parte superior de  $10 \text{ kN/m}^2$ . El modelo constitutivo es Mohr Coulomb para los dos estratos.

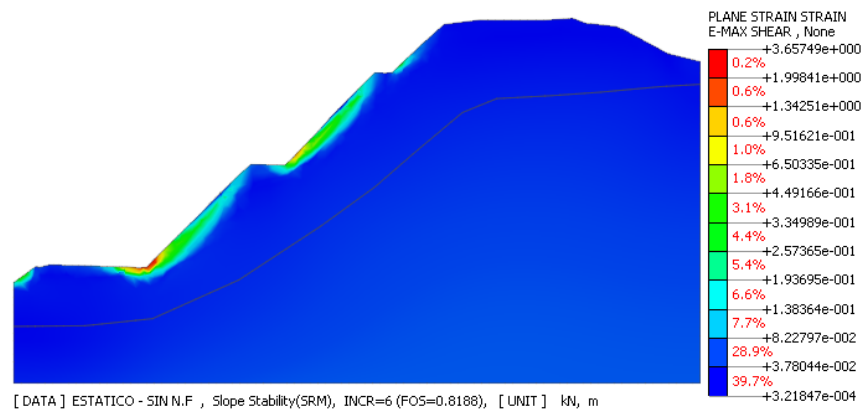
**Figura 65.** Modelo del talud (Territorial Risaralda) en el software Midas GTS NX



**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

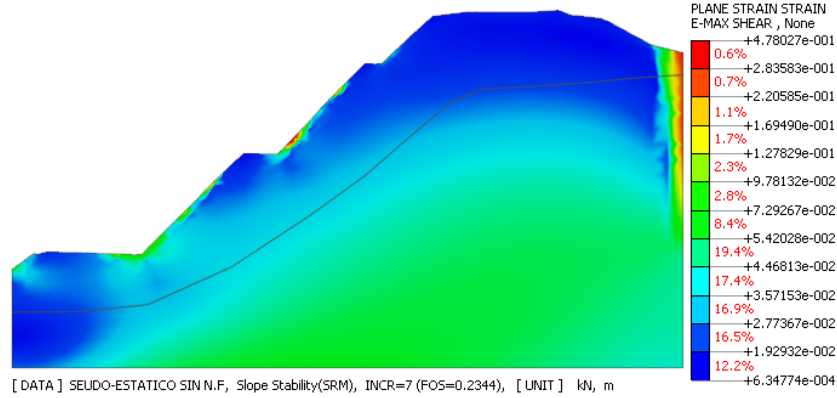
Para la modelación se emplea el método de reducción de la resistencia (SRM) en el software Midas GTS NX ejecutando un análisis de estabilidad por elementos finitos.

**Figura 66.** Condición estática sin nivel freático (Midas GTS NX)



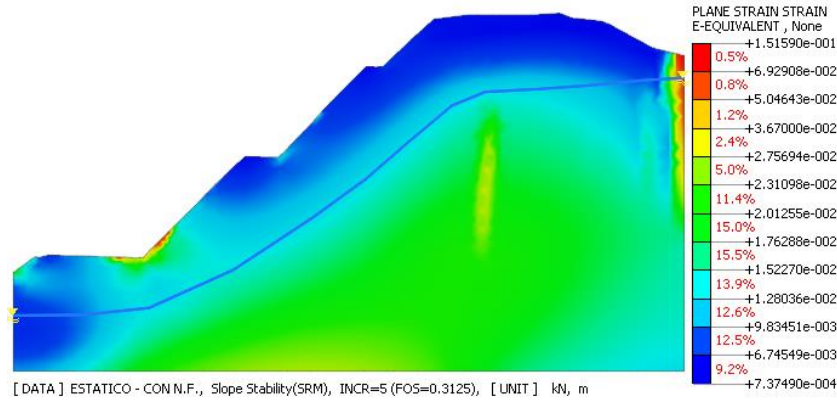
**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

**Figura 67.** Condición pseudoestática sin nivel freático (Midas GTS NX)



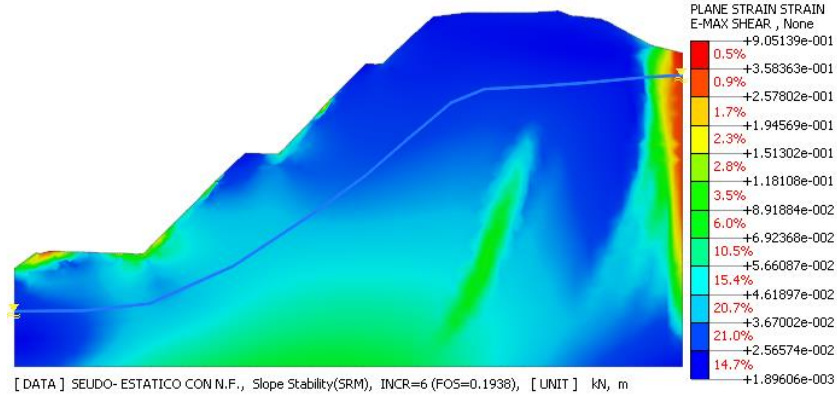
**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

**Figura 68.** Condición estática con nivel freático (Midas GTS NX)



**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

**Figura 69.** Condición pseudoestática con nivel freático (Midas GTS NX)



**Fuente:** Elaboración propia a partir de software MIDAS GTS NX.

**Tabla 33.** Resumen de factores de seguridad con Software MIDAS GTS NX

Condición	Factor de Seguridad
Estática sin nivel freático	0.82
Pseudoestática sin nivel freático	0.23
Estática con nivel freático	0.31
Pseudoestática con nivel freático	0.19

**Fuente:** Elaboración propia.

### **Análisis de resultados obtenidos en el talud de Risaralda**

Los factores de seguridad obtenidos con Slide y Midas GTS NX son inferiores a los definidos en la tabla H.2.4-1 del Código Colombiano de Construcciones Sismoresistentes NSR-10, la cual indica que para el diseño en condiciones estáticas y agua subterránea normal el factor de seguridad recomendado es de 1.5 y en condición seudo-estática y con agua subterránea normal es de 1.05. Sólo un valor de factor de seguridad para la condición estática y sin nivel freático modelado en Slide es mayor que 1.0, demostrando que la inestabilidad actualmente está presente en el talud.

**Tabla 34.** Resumen de factores de seguridad con Software MIDAS GTS NX y SLIDE

Condición	F.S. SLIDE	F.S. MIDAS GTS NX
Estática sin nivel freático	1.28	0.82
Pseudoestática sin nivel freático	0.94	0.23
Estática con nivel freático	0.77	0.31
Pseudoestática con nivel freático	0.64	0.19

**Fuente:** Elaboración propia.

Dado lo anterior, es necesaria la ejecución de obras de estabilización; en este caso el talud fue protegido utilizando el método de vegetación con abonos verdes protegidos con tela biodegradable (Biomanto) y siembra de arbustos (pasto Vetiver y maní forrajero). Actualmente en el talud se encuentran zanjas de coronación y disipadores de energía, pero es indispensable implementar obras hidráulicas adicionales que abatan el nivel freático al nivel mínimo posible y sumado a la revegetalización que evite los procesos erosivos de tipo laminar presentes en el talud, pues en lugares específicos se observan surcos originados por la escorrentía superficial, y de no controlarse, podría generar un fenómeno de remoción en masa que afecte la estabilidad de la vía y las consecuencias negativas que ello conlleva.



En los factores de seguridad determinados con Slide, la presencia del nivel freático tiene una mayor incidencia en el factor de seguridad que la ocurrencia de sismo, aclarando que en ambos casos hay una reducción de estos factores. Esta situación no es similar para los resultados de Midas GTS NX donde la condición de sismo tuvo una mayor influencia que la presencia de nivel freático en los factores de seguridad. Por otra parte, los factores de seguridad en Midas GTS NX son todos inferiores a los calculados con Slide para cada una de las condiciones definidas.

En las modelaciones con Midas GTS NX se observan superficies de falla sobre cada uno de los taludes formados por las terrazas en la parte frontal. Igualmente hay una superficie más pequeña en la parte baja del talud; en condiciones pseudoestáticas y con nivel freático se visualiza una superficie de falla en la parte posterior.

## 6. IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE REVEGETALIZACIÓN

A continuación se realiza una recopilación de los tipos de vegetación que se emplearon en los taludes de cada territorial, dependiendo de sus características generales y geotécnicas para las diversas territoriales descritas en los capítulos 4 y 5; así mismo, el método de implementación que se dio para cada una, donde se describe y con ayuda de evidencias fotográficas, se realiza un seguimiento de los resultados obtenidos; antes, durante y después de las mencionadas implementaciones, además se establece que estas técnicas se dieron en las territoriales de Caquetá, Huila y Risaralda, ya que en el departamento de Boyacá en el talud de estudio no fue posible realizar la técnica de revegetalización como se justificó en el capítulo anterior.

### 6.1. TERRITORIAL CAQUETÁ

**6.1.1. Técnica de Revegetalización.** Para la Revegetalización del talud de la carretera 65 ruta 6502 San José del Fragua – Florencia, en el PR 04+0000 al PR 04+0150, Se utilizaron dos métodos que fueron Trasplante de césped e hidrosiembra que están establecidos en el artículo 810 de las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS 2013.

**Figura 70.** Talud antes de Revegetalización



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

Para el trabajo con esta metodología de Revegetalización, se tomó la decisión de hacerlo en dos etapas, con el objetivo que en la segunda etapa se tuviera mayor conocimiento sobre la dosificación, la forma de instalar la mezcla, etc.

En la primera etapa se trabajó un área de 120 m<sup>2</sup> y en la segunda un área de 240 m<sup>2</sup>, usando las semillas descritos a continuación:

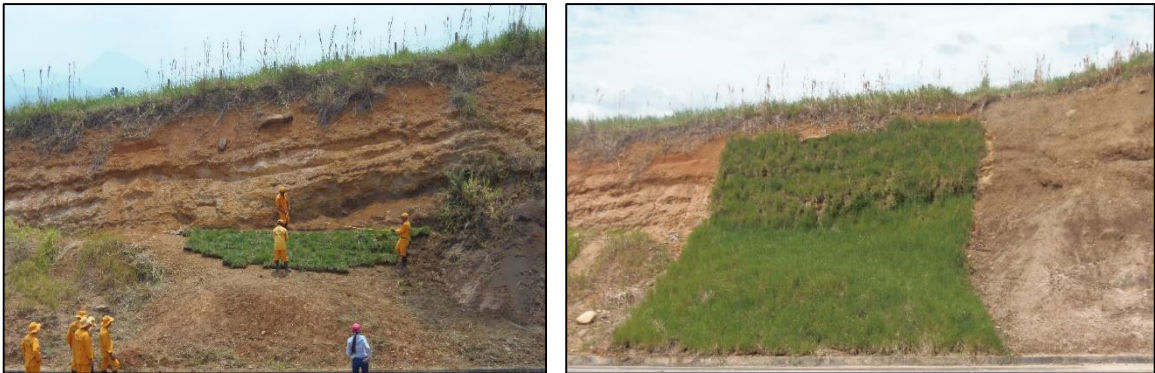
- Trasplante de pasto brachiaria humidícola
- Black Diamond: Reemplaza la materia orgánica

- Hydropam: Es un estabilizante sintético que gracias a sus propiedades hidrófilas, consigue que la superficie del suelo sea más estable facilitando la germinación de las semillas y asegurando enraizamiento eficaz de las plantas.
- Stockosorb: Retención hídrica, adhiere la mezcla al talud, además es un hidro retenedor, libre de acrilamida, de gran capacidad y seguridad en su uso, además es un agente auxiliar para la retención hídrica de los suelos que garantiza un óptimo desarrollo de las plantas y en la gestión racional de las reservas de agua y nutrientes.

En el desarrollo de la primera técnica utilizada se trasplantó césped con pasto brachiaria humidicola desde el PR 36+850 de la misma vía, hasta el talud de estudio en el PR 4+0000, instalando 150 m<sup>2</sup> de esta especie.

Adicional a la Revegetalización se realizaron trabajos para conducir las aguas superficiales fuera del área del talud evitando la saturación del suelo, como fue la construcción de una zanja de coronación y un dissipador de energía.

**Figura 71.** Proceso de trasplante de césped



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS

En la segunda técnica denominada hidrosiembra se destaca que se requiere de mayores cuidados comparados con la primera técnica ya una vez instalada la mezcla se debe cubrir por unos días, para que el sol ni el agua den directamente sobre ella ya que el agua provoca la erosión del suelo y se pierde la mezcla y el sol quema la semilla, observada en la figura 72.

**Figura 72.** Proceso de Hidrosiembra manual



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS

**6.1.2. Características de la especie vegetal desde el punto de vista geotécnico.** El pasto Humidícola<sup>35</sup> (*Brachiaria humidicola*) se ha difundido ampliamente entre los ganaderos de los Llanos Orientales de Colombia, debido a su adaptación a condiciones de suelos ácidos y de baja fertilidad, densa cobertura, alta capacidad de carga y tolerancia a exceso de humedad en el suelo.

El pasto Humidícola se destaca por las características siguientes:

Tiene buena adaptación a suelos ácidos, con alta saturación de aluminio y baja fertilidad.

Se propaga por material vegetativo (estolones y cepas) y por semilla.

Tiene crecimiento estolonífero vigoroso; presenta una cobertura densa.

Tolera bien los excesos de humedad en el suelo, pero no el encharcamiento prolongado.

Tolera la sequía; sin embargo, en suelos arenosos durante esta época disminuye su producción de forraje.

Crece bien en regiones tropicales desde el nivel del mar hasta 1800 m de altura, con precipitaciones entre 1500 mm y 4000 mm al año. Se comporta bien en diferentes tipos de suelo, desde fértiles hasta ácidos y pobres, y de francos a arcillosos, posee una altura de 30 cm y expansión de raíces de aproximadamente 4 veces su longitud, lo que para procesos de revegetalización es bastante utilizado

---

<sup>35</sup> (Schweickt, (2003)

en climas fríos, templados y cálidos, generando una estabilización y retención de la humedad mediante un proceso de evapotranspiración.

La Hidrosiembra<sup>36</sup> es una técnica de revegetalización que consiste en aplicar sobre el terreno, mediante una manguera a presión, una mezcla de semillas, nutrientes químicos y orgánicos al suelo, para comprobar la eficacia de la Hidrosiembra puede resultar complejo ya que se debe elegir la especie a implementar y la técnica de aplicación, junto a las especies introducidas se añade agua y nutrientes por lo que es difícil diferenciar si el efecto de su aplicación se debe a alguno de sus componentes en particular o a su conjunto, aunque también es una ventaja ya que las semillas y abonos se distribuyen uniformemente.

Una de la ventaja de esta técnica es que se pueden alcanzar grandes alturas en taludes difícilmente asequibles, se adapta en zonas con precipitaciones muy bajas y variables con temperaturas extremas en verano, aunque no se recomienda la técnica en pendientes mayores a 45 grados y si el talud presenta afloramientos rocosos con más del 50% de la superficie.

**6.1.3. Método de implementación.** Existen casos muy simples en que la producción se realiza en franjas de semillas pregerminadas colocadas directamente sobre plásticos de 1 m de ancho colocadas en el piso y cubiertas, dependiendo de las condiciones del clima.

Sabiendo esto, se tienen los siguientes parámetros obtenidos a partir de la territorial Caquetá INVIAS<sup>37</sup> para la implementación de las técnicas descritas teniendo en cuenta que la composición de las semillas de la hidrosiembra se da, según clima, terreno y condiciones; suelen ser una mezcla de 70% gramíneas y 30% leguminosas como Agropyrum, Lolium, Dactilo, Festucas, Orizopsis al cual se muestra el siguiente proceso

- **Selección de la Semilla:** Se usaron semillas de buena calidad, certificadas, frescas, de origen conocido<sup>38</sup>, adaptadas a las condiciones locales, disponibles y de probada germinación y rendimiento.
- **Remojo e hidratación de las semillas:** Esta etapa consistió en colocar las semillas dentro de una bolsa de tela y sumergirlas completamente en agua limpia por un período no mayor a las 24 horas para lograr una completa inhibición. Este tiempo a su vez en 2 períodos de 12 horas cada uno. A las 12 horas de estar las semillas sumergidas se escurren durante 1 hora.

---

<sup>36</sup> (Martínez & Fernández, 2001, pág. 30)

<sup>37</sup> (INVIAS, Programa de revegetalización y paisajismo de taludes, (2017)

<sup>38</sup> Ibid

Seguido a esto se sumergen durante 12 horas para finalmente realizarles el último oreado, en donde se induce a la rápida germinación de la semilla a través del estímulo que se efectúa a su embrión<sup>39</sup>. El cambiar el agua cada 12 horas facilita y ayuda a una mejor oxigenación de las semillas.

Se debe recordar que la etapa de remojo o pre-germinación debe ser realizada con las semillas colocadas dentro de bolsas de fique, que se sumergen en recipientes de material solamente plástico.

Es importante utilizar suficiente cantidad de agua para cubrir completamente las semillas y a razón de un mínimo de 0,8 a 1 litro de agua por cada kilo de semilla.

- **Colocación sustrato o capa de suelo orgánico:** Sobre el piso previamente habiendo colocado un plástico negro de un ancho de 1 metros, se colocó una capa de suelo orgánico de con un espesor máximo de 1 cm donde posteriormente se aplicaron las semillas para su germinación.
- **Germinación y siembra de semillas:** Sobre la capa de suelo orgánico posteriormente se colocó la capa de semillas hidratadas con espesor no mayor a 0,5 cm; se cubrieron con un plástico negro para mantenerlas bajo condiciones de oscuridad durante 48h, recordando que las semillas deben estar en semi oscuridad en el lapso de tiempo que transcurre desde la siembra hasta su germinación o brotación. Mediante esta técnica se les proporciona a las semillas condiciones de alta humedad y una óptima temperatura para favorecer la completa germinación y crecimiento inicial.
- **Riego de las semillas germinadas:** Transcurridas las 48 horas las semillas germinadas, se instalaron con una bomba de mano, las mismas que son utilizadas para jardinería. El riego por inundación no es recomendado dado que causa generalmente excesos de agua que estimulan la asfixia radicular, ataque de hongos y pudriciones que pueden causar inclusive la pérdida total de la capa vegetal instalada. Durante los primeros cuatro (4) días, se aplicaron aproximadamente 0,5 litros de agua por metro cuadrado por día.
- **Crecimiento:** Las plántulas de pasto (Agropyrum, Lolium, Dactilo, Festucas, Orizopsis) obtenidas fueron regadas diariamente con agua durante 14 días después del lavado de las semillas, se observa en el registro fotográfico mostrado a continuación como fue su comportamiento.
- **Preparación de la superficie a estabilizar:** Se corrigieron todas las irregularidades existentes en el talud, lo mismo se encauzaron las aguas que debido a las lluvias pudieran ocasionar daños en los trabajos, adicionalmente

---

<sup>39</sup> Ibid

se limpió todo material suelto susceptible a caer sobre la zona que se va a proteger.

- **Colocación de los cespedones:** Sobre la superficie preparada se aplicó un fertilizante en una dosificación de 0,05 Kg/m<sup>2</sup>, la cual debe ser determinada por el especialista; a continuación se extendió los bloques de Césped haciendo coincidir cada uno de ellos, con el propósito de incurrir a una estética adecuada. En las uniones de los bloques se instaló tierra orgánica y una vez plantada la superficie, se regó con agua de manera abundante y en lo sucesivo diariamente sin limitaciones.


A continuación se puede observar el talud con las dos técnicas implementadas antes y después.




**Figura 73.** Antes y después de revegetalizar el talud



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.




**6.1.4. Seguimiento de los métodos implementados.** A continuación, se describe un seguimiento a los métodos implementados durante periodos de tiempo diferentes.

<p><b>ANTES.</b></p> <p>El talud de estudio no poseía cobertura vegetal, por lo que se caracteriza en tener caída de bloques y arranque de sedimentos del material del talud. Se pueden igualmente apreciar procesos erosivos con aparición de surcos por donde se puede dar el paso de agua en época de lluvias, producto de la erosión, se observa que no existen estructuras para el manejo de</p>	<p><b>Figura 74.</b> Seguimiento al 6 de marzo de 2017</p> 
---	---

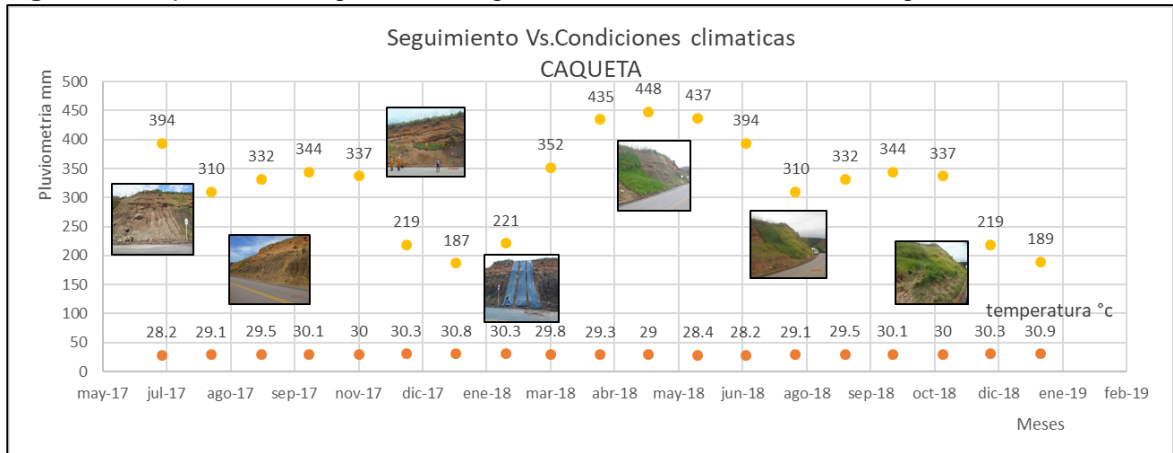
<p>agua por lo que el talud al estar expuesto su proceso erosivo puede evolucionar con mayor frecuencia.</p> <p>De no ser revegetalizado el talud este proceso erosivo podría evolucionar a cárcavas, así mismo da la posibilidad que se infiltren las aguas lluvias al talud, generando inestabilidad al mismo.</p>	<p><b>Figura 75.</b> Seguimiento al 11 de Junio de 2017</p> 
<p><b>DURANTE.</b></p> <p>Se puede ver la colocación de la primera técnica de Revegetalización mediante el trasplante de cespiones.</p>	<p><b>Figura 76.</b> Seguimiento al 21 de septiembre de 2017</p> 
<p>Montaje total de los cespiones con un área de aproximadamente 120 metros cuadrados</p>	<p><b>Figura 77.</b> Seguimiento al 9 de noviembre de 2017</p> 



<p>Proceso de limpieza de la superficie vegetal para el posterior montaje del segundo método de Revegetalización en donde se ven a los administradores viales colocando maderos como disipadores de energía.</p>	<p><b>Figura 78.</b> Seguimiento al 30 de noviembre de 2017</p> 
<p>Proceso de mezclado con el método de hidrosiembra donde se combinan los abonos fertilizantes y semillas de pasto que se emplearan.</p>	<p><b>Figura 79.</b> Seguimiento al 30 de noviembre de 2017</p> 
<p>Se realizó la colocación de una cubierta plástica para evitar que las aguas lluvias arrastren los nuevos elementos colocados en el proceso de hidrosiembra.</p>	<p><b>Figura 80.</b> Seguimiento al 30 de noviembre de 2017</p> 
<p><b>DESPUES</b></p> <p>Se puede apreciar en la figura 81 que se ha implementado el proceso de Revegetalización mediante las dos metodologías empleadas y mencionadas anteriormente.</p>	<p><b>Figura 811.</b> Seguimiento al 15 de enero de 2018</p> 

<p>En la figura 82 se puede observar que la metodología 1 denominada trasplante de cespedones tuvo una mejor adherencia que la hidrosiembra.</p>	<p><b>Figura 822.</b> Seguimiento al 13 de junio de 2018</p> 
<p>En las figuras 83 y 84 se observa la diferencia de resultados dada desde el punto de vista visual mostrando la metodología 1 con mejoras en el color y adherencia.</p>	<p><b>Figura 83.</b> Seguimiento al 23 de octubre de 2018</p> 
<p>Para el método de trasplante de cespedones mostrado en la figura 84 se ve un mejor color, lo que representa mejoras en la adaptación del pasto implantado.</p>	<p><b>Figura 844.</b> Seguimiento al 23 de octubre de 2018</p> 

**Figura 85.** Representación gráfica del seguimiento vs condiciones climatológicas



**Fuente:** Elaboración propia.

Con la anterior representación gráfica se puede observar que las técnicas se implementaron en los periodos con menores lluvias y con más altas temperaturas, no obstante en el mes de mayo de 2018, se observa un mayor prendimiento de las especies. El trasplante de césped tuvo un prendimiento de inmediato debido al mantenimiento y riego de agua que la territorial de Caquetá realizó; en el caso de la Hidrosiembra se tuvieron los mismos cuidados no obstante esta técnica no tuvo el mismo porcentaje de prendimiento debido a que la especie implementada en el talud no era la adecuada, por lo que se recomienda hacer un estudio de ser posible por un especialista agrónomo que recomiende la mejor especie para la zona de estudio.

## 6.2. TERRITORIAL HUILA

**6.2.1. Técnica de Revegetalización.** Para la revegetalización del talud se utilizó el método de protección de taludes con productos enrollados para control de la erosión. Esta técnica está estipulada en el artículo 811 de las especificaciones generales de construcción del INVIA 2013.

Como refuerzo se utilizó un manto de tipo temporal, tejido, que proporcionó protección a los bruscos cambios de temperatura evitando pérdidas de humedad. Además, protegen contra el sol y los procesos de erosión causados principalmente por la lluvia y vientos. Estos mantos se colocaron sobre las semillas de pasto Vetiver y brachiara humidícola para protegerlas y ayudar a su germinación, manteniendo una humedad natural, propicia para el desarrollo de estas especies vegetales.

El manto se ancló por medio de estacas de madera. Los biomantos protegen contra el impacto de las gotas de lluvia absorben la humedad y retienen los nutrientes que comúnmente se colocan debajo de los biomantos junto con las semillas.

Según la Especificación las especies y demás insumos utilizados son:

- **Tierra orgánica:** Proviene de aéreas localizadas fuera del proyecto o preferiblemente del descapote del mismo. La tierra orgánica consistirá en un suelo de origen superficial, con contenido orgánico, libre de fragmentos de rocas sueltas y desperdicios no degradables y cualquier otro elemento extraño y nocivo para los fines de la protección.
- **Semillas:** Las semillas a emplear, cumplen con una germinación mínima de 80% y un 95% de pureza. De especies vegetales propias de la zona o que se adapten con facilidad a ella *brachiaria decumbens*, *brachiaria humidicola*, kudzu, vetiver o especies nativas de otro tipo.

**Figura 86.** Semilla utilizada pasto vetiver y brachiaria



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

- **Agua:** Se requiere para la preparación de la mezcla para la hidrosiembra y para el riego de la Revegetalización. No es necesario que el agua sea potable; únicamente deberá ser agua limpia, no contaminada químicamente, sin suciedad evidente, que cumpla con las recomendaciones del fabricante de acuerdo con el tipo de siembra.
- **Productos enrollados para control de erosión:** Son materiales temporales o permanentes fabricados en rollos y diseñados para reducir la erosión del suelo y ayudar en el crecimiento, asentamiento y protección de la vegetación. Teniendo en cuenta que los productos enrollados para control de erosión podrán tener el carácter de temporales o permanentes, se utilizó uno de tipo temporal.

**Figura 87.** Producto enrollado



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

**6.2.2. Características de la especie vegetal desde el punto de vista geotécnico.** El pasto vetiver es una gramínea<sup>40</sup> que ha generado mucho interés a nivel mundial como una tecnología tradicional para la conservación de los suelos y agua, es una gramínea perenne, hasta una altura de 2 m, con un sistema radical fuerte que crece verticalmente (en su mayoría) a profundidades hasta 5 metros. Naturalmente es una hidrófita, pero crece muy bien bajo condiciones xerófitas.

Una de las formas de contrarrestar el flagelo de los derrumbes y el deterioro de los suelos en la zonas de laderas, jarillones de ríos y quebradas o canales, y taludes carreteables, es el establecimiento de barreras vivas con pasto vetiver<sup>41</sup> en contra de la pendiente (surcos), distanciando plántulas entre una y otra entre 10 a 15 centímetros, y distanciando los surcos entre 1 metro a 5 metros, dependiendo la pendiente que se tenga, con el fin de formar muros de contención con las raíces, las cuales se entrelazan entre sí y amarran evitando desprendimiento de tierra, y que al contrario evitan escorrentía de aguas y mantienen siempre un nivel de humedad excelente, para que en épocas de verano no afecten la naturaleza aledaña a ellas o a los cultivos que la circundan.

**6.2.3. Método de implementación.** Se tienen en cuenta los siguientes aspectos para la implementación de la técnica de Revegetalización utilizada en la territorial del Huila.

- **Preparación de la Superficie existente,** la superficie debe estar uniforme antes del inicio de las actividades, permitiéndose únicamente las variaciones superficiales definidas en la topografía de diseño. Por tal razón, se removieron las rocas, terrones, troncos, entre otros obstáculos, sin que implicara iniciar procesos de inestabilidad del talud. Los taludes por tratar deberán tener un adecuado manejo de las aguas, debido a las lluvias que se pudieran presentar durante la instalación y que pudieran causar daños al trabajo, los cuales, en

---

<sup>40</sup> (The Vetiver Network International ( TVNI ), (2019)

<sup>41</sup> Ibid

caso de que se produzca. Si el talud no cuenta con la rugosidad adecuada para la colocación de la protección, debe conformarse mediante un procedimiento adecuado (rastrillado paralelo a la horizontal o formación de surcos), convenientemente espaciados, de acuerdo con la dureza del terreno (15 cm a 40 cm), actividad que no se requirió para el proyecto.

**Figura 88.** Preparación de la superficie



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

- **Preparación de la Mezcla** Se realizó una masa de suelo compuesta por tierra negra, abono triple quince, cal agrícola, las cuales sirven como fertilizante; abono, hidro-retenedor que permite mantener la humedad principalmente en terrenos áridos, micorrizas que proporciona un enraizamiento mayor y en un menor tiempo, garantizando una pronta estabilización del talud, terracota urea usada como abono y la semilla. Esta masa deberá incluir todas las enmiendas o suplementos que se consideren necesarios para garantizar la eficiencia del proceso de Revegetalización. A esta mezcla se adicionan semillas y estolones de varias especies de pastos, así como semillas de especies arbustivas y arbóreas, aprobadas previamente por la interventoría, que se instalarán sobre el terreno previamente conformado.

**Figura 89.** Preparación de la mezcla



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.


- **Revegetalización convencional y/o con Mantos Permanentes.** Luego de la fase de preparación, se esparció en forma uniforme con el propósito este suelo vegetal produzca una cobertura de veinte a cincuenta milímetros (20 a 50 mm) de espesor, sobre el talud por proteger. Para mejorar su adherencia con la superficie del talud, este se debe humedecer o perfilar superficialmente, antes de recibir el material de protección.
- **Riego.** Luego de instaladas las semillas y después de dos días se realizó el riego del talud durante un periodo de dos a tres semanas el cual sirve para mantener la humedad y evitar que el pasto tierno se queme o reseque. El riego se realizará exclusivamente por el método de aspersión u otro similar, siempre que resulte en forma de lluvia fina; se deberá cuidar de no provocar escurrimiento superficial, durante la etapa de ejecución se regaron las áreas sembradas tan frecuentemente como se requirió, para ayudar a establecer satisfactoriamente la vegetación y propiciar su crecimiento.

**Figura 90.** Antes y después de revegetalizar el talud



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

## 6.2.4. Seguimiento de los métodos implementados


<p style="text-align: center;"><b>ANTES</b></p> <p>Se observa que el talud no tiene cobertura vegetal, así mismo como se describió en el capítulo 4, este presenta problemas erosivos, el cual está generando que se transporten los finos y en consecuencia desprendan los materiales gruesos y estas caigan a la carretera.</p>	<p><b>Figura 91.</b> Seguimiento al 6 de marzo de 2017</p> 
<p style="text-align: center;"><b>DURANTE</b></p> <p>Implementación y puesta del geomanto temporal, preparación de la superficie y puesta en marcha de la siembra de la capa vegetal</p>	<p><b>Figura 92.</b> Seguimiento al 9 de agosto de 2017</p> 
<p style="text-align: center;"><b>DESPUÉS</b></p> <p>Se observa que la técnica de Revegetalización no es la mejor en el PR 65+150 debido a que existe una caída de material lo que genera daños en la cobertura vegetal vistos en las figuras 93, 94 y 95.</p>	<p><b>Figura 93.</b> Seguimiento al 16 de noviembre de 2017</p>  <p><b>Figura 944.</b> Seguimiento al 16 de noviembre de 2017</p> 




Se observa una cobertura vegetal, pero no existe una Revegetalización bien definida, a pesar de la fotografía fue tomada en el periodo de precipitación mas bajo.

Desprendimiento de la cobertura vegetal lo que deja expuestas partes del talud a erosión o infiltración por aguas lluvias, figuras 96 y 97.


**Figura 95.** Seguimiento al 10 de septiembre de 2018



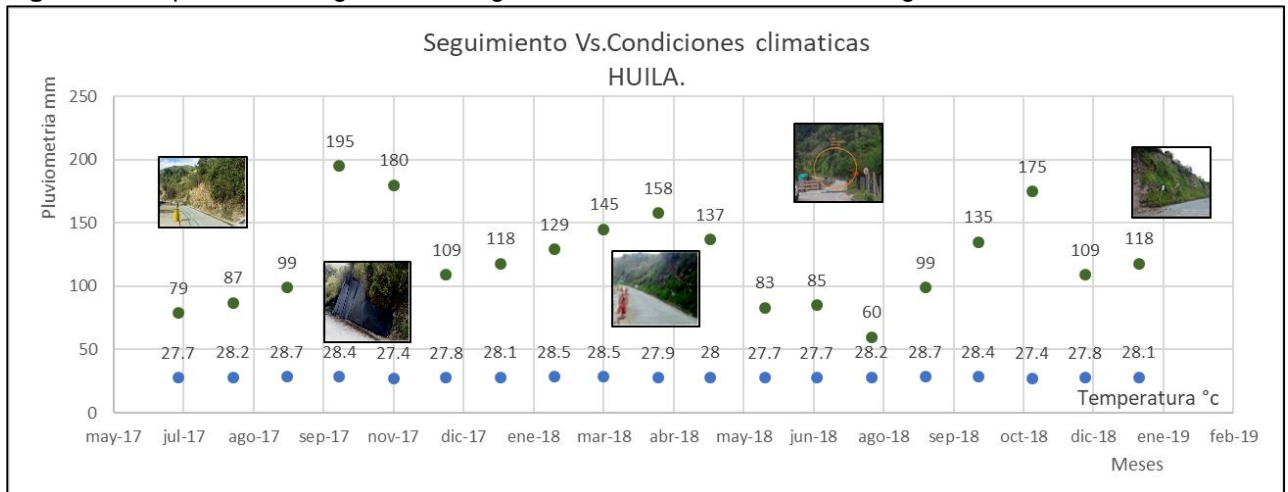
**Figura 96.** Seguimiento al 5 de febrero de 2018



**Figura 977.** Seguimiento al 5 de febrero de 2018



**Figura 98.** Representación gráfica del seguimiento vs condiciones climatológicas

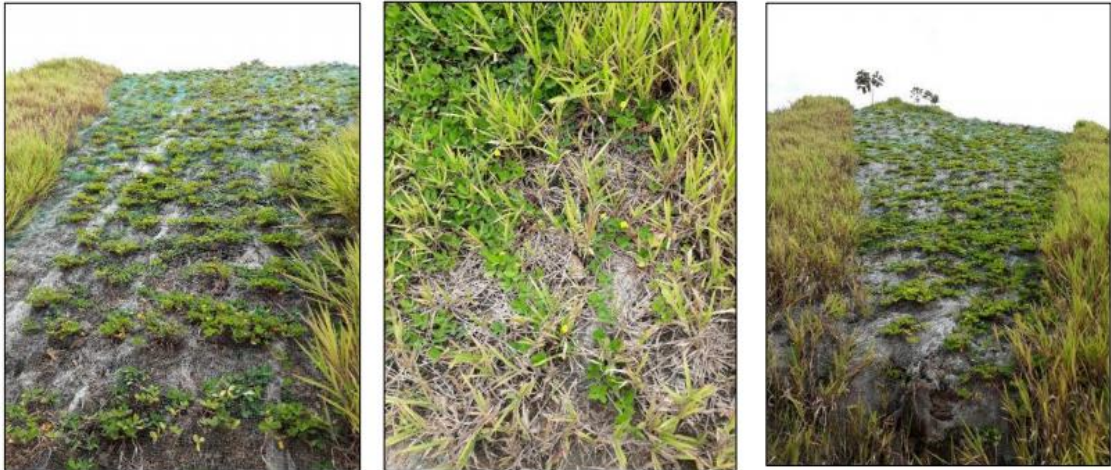


Fuente: Elaboración propia.

### 6.3. TERRITORIAL RISARALDA

**6.3.1. Técnica de Revegetalización.** Para la Revegetalización del talud se utilizó el método de vegetación con abonos verdes protegidos con tela biodegradable (Biomanto) y siembra de arbustos (pasto Vetiver y maní forrajero) para crear un efecto precolombino, que consiste en la creación de figuras de tipo triangular donde el maní forrajero crece de forma más lenta y genera un efecto de color más oscuro en comparación con el pasto vetiver.

**Figura 99.** Tipos de arbustos utilizados y efecto precolombino



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS

Según lo descrito en la especificación describe el producto enrollado para control de erosión (PECE) como un material fabricado en rollos y diseñado para reducir la erosión del suelo y ayudar en el crecimiento, el asentamiento y la protección de la vegetación. Los productos enrollados para control de erosión podrán tener el carácter de temporales o permanentes.

Para la instalación se dispone, además, de las herramientas, rastrillos, azadones, horcas, ganchos para formar surcos, cuerdas, cinturones de seguridad, cascos, estacas, palas, balanzas, envases calibrados y todos los demás elementos que sean necesarios para ejecutar correctamente los trabajos especificados.

Según la Especificación las especies y demás insumos utilizados son:

- 100 kilos de Hierro.
- 15 kilos de Semilla Brachiara
- 500 plantas de Maní Forrajero
- 2 toneladas de Materia Orgánica.
- 3 viajes de 6 m<sup>3</sup> de Tierra Capote Negra

- Tubería y aspersores para riego 800 ml.

**Figura 100.** Talud antes de ser revegetalizado



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

**Figura 101.** Preparación de la superficie e instalación del Biomanto



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

**6.3.2. Características de la especie vegetal desde el punto de vista geotécnico.** En el numeral 6.2.2. se denotan las características del pasto vetiver por consiguiente solo se hablará del Maní Forrajero Perenne.

El Maní Forrajero es una leguminosa herbácea, perenne, de crecimiento rastrero y estolonífero. Tiene una altura entre 20 y 40 cm, posee raíz pivotante que crece hasta 30 cm de profundidad. Las hojas son alternas, compuestas, con cuatro folíolos aovados, de color verde claro a oscuro. Se pueden destacar de él algunas características importantes, tales como su buena adaptación a suelos ácidos de baja fertilidad, su compactibilidad con gramíneas del género *Brachiaria*, su persistencia bajo pastoreo, su buen comportamiento como leguminosa de cobertura en cultivos perennes

**6.3.3. Método de implementación.** Se realizaron las actividades que se describen a continuación:

- **Remoción de roca, vegetación y raíces.** Para evitar el contacto del manto con la superficie del suelo, además se niveló el área de sembradío de las semillas según el alineamiento y la pendiente establecidos en los documentos del proyecto.

- **Preparación del suelo.** Donde se sembraron las semillas, escarificando entre cincuenta y setenta y cinco milímetros (50 mm a 75 mm) de profundidad en el área ya preparada.

Con el fin de evitar derrumbes desde la cima del talud y la infiltración de agua de escorrentía entre el suelo del talud y el manto para control de erosión, el extremo superior del rollo del manto se entierra en una zanja excavada únicamente con dicho propósito, asegurando el manto al extremo superior de la zanja en forma de doble faz y fijándolo al terreno con tres (3) ganchos por metro lineal, después de lo cual se cubrirá la zanja.

Para lograr este objetivo se realizaron estrategias de tratamiento con el apoyo de abonos verdes y semillas de plántulas, fijados en los taludes de corte con pendientes mayores a 100% con telas biodegradables de fique; el riego y el seguimiento del tratamiento para verificar el progreso de la vegetación y el comportamiento de las variables ambientales vinculadas con las plantas.

El tratamiento de los taludes se realizó aprovechando especies vegetales que soportan las condiciones de sequía y protegen el talud en forma permanente.

La vegetación es funcional porque contribuye a la estabilidad de los taludes. Los sistemas radicales en diferentes profundidades son fibras que aportan resistencia al suelo del talud; la presencia de sistemas radicales fibrosos, fasciculados y pivotantes, en diversas profundidades, dependiendo del porte de la especie, conforman mallas que permiten la estabilidad del suelo. El follaje abriga el suelo y permite la suficiente humedad del suelo para conservar su plasticidad y funcionalidad.

Las raíces al profundizar amarran el suelo y su dinámica de crecimiento se soporta en la mutación de varios elementos orgánicos que quedan incorporados en el suelo como materia orgánica, contribuyendo a estabilizar la porosidad y al incremento del porcentaje de la materia orgánica. Los mayores contenidos de materia orgánica mitigan los períodos de sequía del suelo más superficial del talud.

- **El Biomanto:** Es una tela biodegradable de fique que además de fijar el tratamiento permite conservar la humedad del suelo, del sustrato orgánico y de las plántulas estimulando el desarrollo de éstas. La tela es controladora de la erosión desde el momento en que se establece el tratamiento. En los taludes de terraplenes no se utiliza el Biomanto. Sobre este Biomanto se colocará Suelo fértil (tierra negra), un abono orgánico (lombricomposta más gallinaza), estolones de gramíneas como la brachiara o quicuyo más leguminosas rastrera (maní forrajero) esta fija el nitrógeno atmosférico favoreciendo las especies en la zona. Se adicionará gel hidratante para conservar la humedad.

Es necesario agregar insumos al suelo como fertilizantes, abonos orgánicos, semillas, hidro retenedor, frecuencia de riego, con el propósito que la especie vegetal tenga un mayor prendimiento.

- **La manutención:** incluyó la aplicación de los abonados, el seguimiento de las variables ambientales, principalmente la temperatura ambiental, la humedad relativa, ambas en superficie, la tensión del agua en el suelo y el comportamiento de las precipitaciones con el fin de ajustar la intensidad del riego a las necesidades del tratamiento. Además, se hace la siembra de especies que por su valor enriquecen la flora y la fauna en los taludes y el entorno.
- **Riego:** Para el riego se puede suministrar agua a través de una red de tuberías por gravedad, tanques de almacenamiento, aspersores y todos los aditamentos como válvulas, codos, tubos en forma de T, para el sostener el riego durante el tiempo necesario para que se establezca la vegetación, por un periodo máximo de tres (3) meses. El riego se hará una vez por día en verano.
- **Monitoreo y control:** se establecieron los parámetros y frecuencias que se deben seguir para el monitoreo de las actividades de Revegetalización implementadas, con el propósito de conocer, entre otros, porcentaje de prendimiento del material vegetal sembrado, estado fitosanitario, necesidades de abono orgánico, riego si es del caso.

El monitoreo se hizo a través del Administrador Vial del sector, junto con la Microempresa, apoyados con los ingenieros de la Territorial Risaralda. En este caso se propuso cada 15 días.

- **Manejo ambiental:** Referentes a los trabajos de Revegetalización y mantenimiento de taludes que se propongan se debe considerar la protección ambiental y otras disposiciones vigentes sobre el particular.

**Figura 1022.** Antes y después de revegetalizar el talud



**Fuente:** Archivo Fotográfico del Instituto Nacional de Vías INVIAS

**6.3.4. Seguimiento de los métodos implementados.**

<p style="text-align: center;"><b>ANTES</b></p> <p>Se puede observar que para la fecha mencionada el talud no poseía cobertura vegetal volviéndolo susceptible a la erosión generada por la lluvia, como se describió en el capítulo 4.</p>	<p><b>Figura 103.</b> Seguimiento al 3 de marzo de 2017</p> 
<p style="text-align: center;"><b>DURANTE</b></p> <p>Se realizó el proceso de siembra del Biomanto con las semillas, donde se realiza el proceso de abonado y fertilización del talud para su posterior siembra de especies nativas.</p>	<p><b>Figura 104.</b> Seguimiento al 9 de agosto de 2017</p> 

**DESPUÉS.**

Se pueden observar en las evidencias fotográficas que la técnica de Revegetalización se realizó de manera satisfactoria en donde con el avance del tiempo, se tiene una mejora en la cobertura vegetal.

En la primera imagen se observa la culminación y germinación de pasto

Seguido para el 3 de febrero de 2018 se observan que los triángulos, que quedan boca abajo del diseño precolombino están en un 70% de germinación.

Para el segundo semestre de 2018 en el mes de junio se tiene una exitosa aplicación de las dos técnicas de Revegetalización observadas en la figura 107.

**Figura 105.** Seguimiento al 7 de septiembre de 2017.



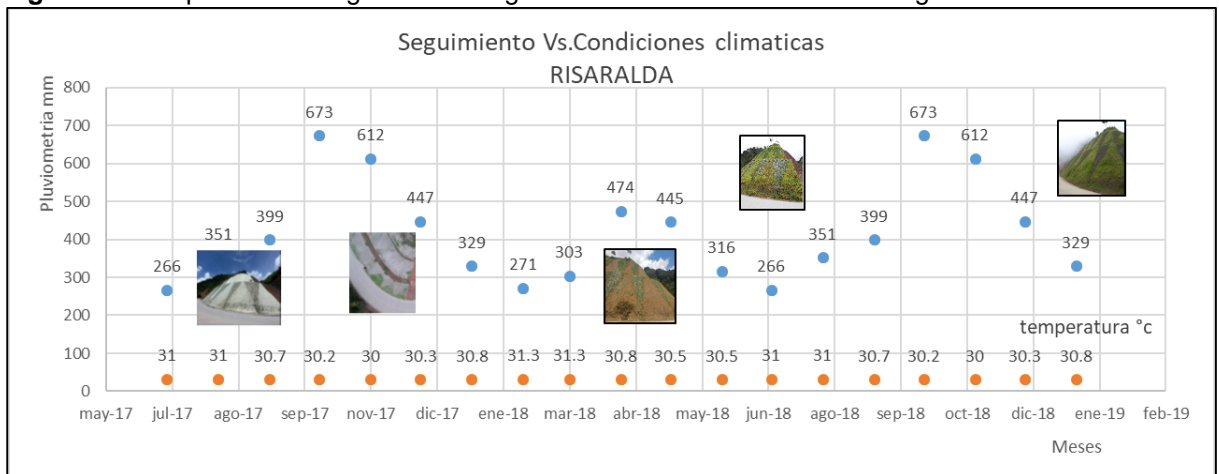
**Figura 106.** Seguimiento al 3 de febrero de 2018



**Figura 1077.** Seguimiento al 06 junio de 2018



**Figura 108.** Representación gráfica del seguimiento vs condiciones climatológicas



Fuente: Elaboración propia.

## 7. ANÁLISIS COSTOS

En este capítulo se realizará un análisis de costos a partir del prendimiento y eficacia de las diferentes técnicas que se implementaron en los taludes de la siguiente manera.

### 7.1 TERRITORIAL CAQUETÁ

En este caso en particular, la revegetalización con trasplante de césped es más costoso que la hidrosiembra no obstante este resulta ser más efectivo en términos de prendimiento y los resultados son visibles inmediatamente se hace la instalación de los cespedones.

**Tabla 35.** Análisis de costos para la territorial de Caquetá

CARACTERÍSTICAS GENERALES	CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA	TÉCNICA Y PRENDIMIENTO	COSTO - BENEFICIO
Temperatura	Geología	Trasplante de Césped - Área 150 m <sup>2</sup>	Trasplante de Césped
21 °C	El talud se desarrolla en la región del Piedemonte Amazónico, está dominada por la presencia de rocas blandas de origen sedimentario, las cuales contemplan desde depósitos no consolidados hasta materiales litificados.		Precio unitario
Precipitación			<b>\$18,574</b>
4016 mm - anuales			Área m <sup>2</sup>
Menor - enero - 187 mm			150
Mayor - mayo - 448 mm			Costo Trasplante de Césped
			<b>\$2,786,100</b>
Aspectos topográficos	Descripción Geotécnica	Hidrosiembra manual - Área 360 m <sup>2</sup>	Hidrosiembra manual
Pendiente 0.5h:1v	Se caracteriza por la presencia de suelos limosos en todo el cuerpo del talud.		Precio unitario
Longitud: 102 m			<b>\$7,866</b>
Altura promedio: 5 m			Área m <sup>2</sup>
Área: 510 m <sup>2</sup>			360
			Costo Hidrosiembra
		<b>\$2,831,778</b>	
			Costo Total
			<b>\$5,617,878</b>

La hidrosiembra manual requiere de mayores cuidados, una vez instalada la mezcla se debe cubrir por unos días, para que el sol ni el agua den directamente, el agua provoca la erosión del suelo y se pierde la mezcla y el sol quema la semilla.



**Tabla 36.** Precio Unitario para la técnica de hidrosiembra

I. EQUIPO					
DESCRIPCIÓN	TIPO		TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO
Máquina hidro sembradora			\$ 19,555.73	350.000	\$ 55.87
Camioneta D-300			\$ 52,063.00	350.000	\$ 148.75
HERRAMIENTA MENOR (%)				5%	\$ 4.30
SUBTOTAL \$					\$ 208.93
II. MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO
Costal de fibra o fique		m2	1.000	\$ 1,042.04	\$ 1,042.04
Mulch Orgánico		Kg	0.400	\$ 2,313.03	\$ 925.21
Agua		Lt	5.000	\$ 57.72	\$ 288.60
Semillas para empradizar		kg	0.050	\$ 70,000.00	\$ 3,500.00
SUBTOTAL \$					\$ 5,755.85
III. TRANSPORTES					
MATERIAL	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
SUBTOTAL \$					
IV. MANO DE OBRA					
TRABAJADOR	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JORNAL TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO
Obrero (3)	\$ 78,124.23	185	\$ 144,529.83	2,800.00	\$ 51.62
Oficial	\$ 52,082.82	185	\$ 96,353.22	2,800.00	\$ 34.41
SUBTOTAL \$					\$ 86.03
<b>TOTAL, COSTO DIRECTO \$</b>					<b>\$ 6,050.81</b>
V. COSTOS INDIRECTOS					
Descripción				Porcentaje	Valor Total
ADMINISTRACION				20%	\$ 1,210.16
IMPREVISTOS				5%	\$ 302.54
UTILIDAD				5%	\$ 302.54
SUBTOTAL \$					\$ 1,815.24
<b>Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$</b>					<b>\$ 7,866.05</b>

Fuente: Elaboración propia tomado a partir de precios unitarios de INVIAS.

**Tabla 37.** Precios unitarios para el método de trasplante de césped

I. EQUIPO					
DESCRIPCIÓN	TIPO		TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO
HERRAMIENTA MENOR (%)				0.1	\$ 241
SUBTOTAL \$					\$ 241
II. MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO
Tierra abonada		m3	0.05	80000	\$ 4,000
Agua		lt	5	57.72069745	\$ 289
Cespedones		m2	1	7349.418986	\$ 7,349
SUBTOTAL \$					\$ 11,638
III. TRANSPORTES					
MATERIAL	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)		Vr. UNITARIO
SUBTOTAL \$					
IV. MANO DE OBRA					



TRABAJADOR	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JORNAL TOTAL		Vr. UNITARIO
Oficial	52082.8202	185	96353.21737	100	\$ 964
Obrero (3)	78124.2303	185	144529.8261	100	\$ 1,445
SUBTOTAL \$					\$ 2,409
<b>TOTAL, COSTO DIRECTO \$</b>					<b>\$ 14,288</b>
V. COSTOS INDIRECTOS					
Descripción				Porcentaje	Valor Total
ADMINISTRACION				0.2	2857.54719
IMPREVISTOS				0.05	714.3867976
UTILIDAD				0.05	714.3867976
SUBTOTAL \$					\$ 4,286
<b>Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$</b>					<b>\$ 18,574</b>

Fuente: Elaboración propia tomado a partir de precios unitarios de INVIAS.

## 7.2 TERRITORIAL RISARALDA

Se observa que la implementación de esta técnica de revegetalización es la que tiene el valor más elevado comparado con otras implementadas.

Tabla 38. Análisis de costos para la territorial de Risaralda

CARACTERÍSTICAS GENERALES	CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA	TÉCNICA Y PRENDIMIENTO	COSTO
Temperatura	Geología	Vegetación con abonos verdes protegidos con tela biodegradable (Biomanto)	Instalación de manto temporal incluye Pasto Vetiver
25 °C	Formación Penderisco está conformado por intercalaciones de arcillolitas de 5 a 20 cm, limolitas, areniscas (5 a 30cm) y conglomerados		Precio unitario
Precipitación			\$37,369
4886 mm - anuales			Área m <sup>2</sup>
Menor - julio - 266 mm			2009
Mayor - octubre - 673 mm			Costo Transplante de Césped
			<b>\$64,177,505</b>
Aspectos topográficos	Descripción Geotécnica	Siembra de arbustos (pasto Vetiver)	Costo Total
Pendiente talud 1 - 1.3h:1v	El talud 1 se caracteriza por ser un suelo limo arenoso y el talud 2 una arena arcillosa.		<b>\$64,177,505</b>
talud 2 - 1h:1v y talud 3 - 1h:1v			
Longitud promedio: 74.4 m			
Altura promedio: 27 m			
Area: 2.009 m <sup>2</sup>			

**Tabla 39.** Precio unitario para la instalación de manto temporal

<b>I. EQUIPO</b>					
DESCRIPCIÓN		TARIFA/HORA		RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO
Camioneta D-300		\$ 52,063.00		8000.000	\$ 7
HERRAMIENTA MENOR (%)				1%	\$ 24
SUBTOTAL \$					\$ 31
<b>II. MATERIALES</b>					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD		PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO
Manto Permanente (Protección de Taludes)	m2	1.05		\$ 7,789.53	\$ 8,179
Mezcla Fértil	m2	1.00		\$ 16,288.17	\$ 16,288
Anclaje para fijación del manto	u	2.00		\$ 919.45	\$ 1,839
SUBTOTAL \$					\$ 26,306.07
<b>IV. MANO DE OBRA</b>					
TRABAJADOR	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JORNAL TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO
Obrero (3)	\$ 78,124.23	185	\$ 144,529.83	100.00	\$ 1,445
Oficial	\$ 52,082.82	185	\$ 96,353.22	100.00	\$ 964
SUBTOTAL \$					\$ 2,409
COSTO DIRECTO					\$ 28,746
<b>V. COSTOS INDIRECTOS</b>					
Descripción				Porcentaje	Valor Total
ADMINISTRACION				20%	\$ 5,749
IMPREVISTOS				5%	\$ 1,437
UTILIDAD				5%	\$ 1,437
SUBTOTAL \$					\$ 8,624
<b>Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$</b>					<b>\$ 37,369</b>

**Fuente:** Elaboración propia tomado a partir de precios unitarios de INVIAS.

### 7.3 TERRITORIAL HUILA

Se puede observar que el prendimiento tuvo un porcentaje final del 64%, por lo que no es la técnica más efectiva en comparación a las otras mostradas en este proyecto.

**Tabla 40.** Análisis de costos para la territorial de Huila.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA	TÉCNICA Y PRENDIMIENTO	COSTO - BENEFICIO
Temperatura	Geología	Protección de taludes con productos enrollados.	Instalación de Biomanto.
22 °C	Es un depósito coluvión de origen cuaternario, el origen y características geomorfológicas de la zona lo componen suelos de origen fluvial y fluviovolcánico que conforman terrazas. La presencia activa de la "falla de La Plata" que atraviesa el sector.		Precio unitario
Precipitación			Área m <sup>2</sup>
1499 mm - anuales			915
Menor - agosto - 60 mm			Costo Transplante de Césped
Mayor - octubre - 196 mm			<b>\$34,192,635</b>
Aspectos topográficos	Descripción Geotécnica		Costo Total
Pendiente 1h:1v	Los materiales observados son generalmente finos, producto de la meteorización de detritos rocosos diabáticos, basálticos, andesíticos y de esquistos.		<b>\$34,192,635</b>
Longitud: 105 m			
Altura promedio: 8.7 m			
Area: 915 m <sup>2</sup>			

**Tabla 41.** Precios unitarios para la instalación de Biomanto

I. EQUIPO					
DESCRIPCIÓN	TIPO		TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO
Camioneta D-300			\$ 52,063.00	8000.000	\$ 6.51
HERRAMIENTA MENOR (%)				1%	\$ 24.09
SUBTOTAL \$					\$ 30.60
II. MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	Vr. UNITARIO
Manto Temporal (Protección de Taludes)		m2	1.05	\$ 3,815.86	\$ 4,007
Mezcla Fértil		m2	1.00	\$ 16,288.17	\$ 16,288
Anclaje para fijación del manto		u	2.00	\$ 919.45	\$ 1,839

SUBTOTAL \$					\$ 22,134
<b>III. TRANSPORTES</b>					
<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD (1)</b>	<b>DISTANCIA (2)</b>	<b>(1) * (2)</b>		<b>Vr. UNITARIO</b>
SUBTOTAL \$					
<b>IV. MANO DE OBRA</b>					
<b>TRABAJADOR</b>	<b>JORNAL</b>	<b>PRESTACIONES (%)</b>	<b>JORNAL TOTAL</b>	<b>RENDIMIENTO</b>	<b>Vr. UNITARIO</b>
Obrero (3)	\$ 78,124.23	185	\$ 144,529.83	100.00	\$ 1,445
Oficial	\$ 52,082.82	185	\$ 96,353.22	100.00	\$ 964
SUBTOTAL \$					\$ 2,409
TOTAL, COSTO DIRECTO \$					\$ 24,573
<b>V. COSTOS INDIRECTOS</b>					
<b>Descripción</b>				<b>Porcentaje</b>	<b>Valor Total</b>
ADMINISTRACION				20%	\$ 4,915
IMPREVISTOS				5%	\$ 1,229
UTILIDAD				5%	\$ 1,229
SUBTOTAL \$					\$ 7,372
<b>Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$</b>					<b>\$ 31,945</b>

**Fuente:** Elaboración propia tomado a partir de precios unitarios de INVIAS.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es fundamental conocer los aspectos generales de la zona donde están localizados los taludes tales como temperatura, precipitación, localización, geología para escoger la especie que más aporte a la estabilidad del talud antes de revegetalizarlo, toda vez que se debe realizar un estudio sobre las especies nativas que se puedan implementar.

La geología regional del talud que se realiza a partir de información secundaria es una herramienta útil, económica y rápida para identificar características de los taludes, sin necesidad de realizar exploraciones de campo ya que con esta información se puede identificar si es procedente o no la revegetalización del talud, esto con base al talud de la territorial de Boyacá en donde se formuló desde el inicio que por ser un macizo rocoso con nula cobertura de suelo no era posible el prendimiento de ninguna especie vegetal.

El efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes contra los diferentes procesos erosivos ha sido muy debatido en los últimos años ya que la revisión de literatura deja muchas dudas e inquietudes y la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo no ha tenido una explicación universalmente aceptada. Sin embargo, la experiencia vista a nivel general para cada una de las territoriales en estudio ha demostrado el efecto positivo de la vegetación para mitigar problemas de erosión, reptación, fallas subsuperficiales y visualmente es de mayor confort para los usuarios de las vías.

Las condiciones climáticas y de precipitación en especial en zonas tropicales favorece el crecimiento de las especies vegetales que fueron implementadas en el presente estudio, a diferencia de las épocas de más baja precipitación con mayores temperaturas como se pudo evidenciar en la territorial de Risaralda.

Se puede observar que todas las técnicas implementadas tuvieron un prendimiento considerable, no obstante, en la territorial de Huila en donde la precipitación anual es de 1499 mm, el prendimiento final tuvo un porcentaje del 64% a diferencia de Risaralda donde su precipitación anual es de 4886 mm y Caquetá de 4016 mm, quienes tuvieron un prendimiento del 100%, en lo que se concluye que a menor precipitación en la zona menor efectividad de la técnica implementada.

Las técnicas de Revegetalización son una alternativa para la estabilidad de taludes más económica que otras, debido a que los procesos de aplicación son muy sencillos.

Se puede indicar que el pasto *Brachiaria humidicola* tiene una fácil adaptabilidad a terrenos conformados por suelos limosos generados a partir de los depósitos volcano sedimentarios, como se evidenció en la territorial de Caquetá.

Para cada territorial mencionada en este trabajo de grado, se usaron diferentes métodos y técnicas de Revegetalización de acuerdo con las condiciones climáticas y geológicas.

Como resultado del proyecto se puede decir que hay una relación directa en el proceso de compactación y manejo de aguas lluvias sobre la estabilidad de las terrazas, donde mayor compactación y desarrollo de obras de canalización de aguas superficiales disminuye el efecto del proceso erosivo.

Se sugiere la implementación de especies nativas en cada territorial para que sus ecosistemas no alteren y/o modifiquen la funcionalidad y estructura de los mismos, en marco de la revegetalización para estabilidad de taludes.

Se pudo observar en las modelaciones realizadas en la territorial de Risaralda que el incremento de los niveles freáticos afecta directamente la estabilidad del talud y que influye aún más con la ocurrencia de un sismo; por este motivo es fundamental realizar todo tipo de obras de drenaje que permitan abatir los niveles freáticos y mitigar procesos erosivos.

Los factores de seguridad determinados por SLIDE y MIDAS GTS NX no se encuentran dentro del mismo rango, toda vez que los métodos de análisis son diferentes, ya que uno se determina por equilibrio limite y el otro corresponde a métodos numéricos con la técnica de elementos finitos. La recomendación es el uso de programas de elementos finitos teniendo en cuenta que los resultados se aproximan más a la realidad y actualmente son herramientas accesibles.

La estabilidad de los taludes exige un permanente manejo de aguas superficiales en la parte superior que evite la erosión hidráulica y retener el arrastre de suelo desde esta zona.

La Revegetalización de taludes debería ser una constante en la construcción de vías para prevenir la erosión eólica e hidráulica, pues reduce la pérdida de finos que sirven de soporte a materiales como guijarros y sobre tamaños que podrían terminar expuestos y representar un peligro para los usuarios de la vía.

En taludes con una pendiente superior al 60% es necesario contar con mecanismos de soporte de la cobertura vegetal tipo geomembranas en celdas que garanticen la permanencia del sustrato, así como el enraizamiento y sustento de la capa vegetal.

El monitoreo y seguimiento de los procesos de Revegetalización necesitan de periodos más amplios que permitan conocer el comportamiento del proceso durante los diferentes ciclos de lluvias y estiaje anualizados en cada región del país.

El proceso de Revegetalización exige el mantenimiento rutinario para garantizar el suministro de agua en verano y el corte cuando supere los 30 cm en zona de vía.

Es importante dejar claro que la revegetalización no impermeabiliza el talud, su función principal es evitar la pérdida de suelo por efecto de agentes erosivos como el viento y el agua, minimizando las escorrentías y la velocidad del flujo, filtrando y regulando el paso del agua, evitando la formación de surcos y pérdida de material del talud.

Como recomendación a próximas investigaciones se propone determinar los parámetros de diseño del talud de Risaralda en la actualidad con el propósito de observar la incidencia de los efectos de la revegetalización implementada y analizando el incremento del factor de seguridad.

Adicionalmente se pueden realizar investigaciones como esta, en taludes revegetalizados con diferentes características generales como clima, geología, topografía, con asesoría de profesionales en las áreas de agronomía e ingeniería forestal, con el propósito de determinar la incidencia del factor de seguridad en taludes.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Arenas, S. (12 de Febrero de 2019). *Concepto de litificación*. Obtenido de Enciclonet 3.0: <http://www.enciclonet.com/articulo/litificacion/>
- Avellaneda, V. ((2013). *Lineamientos para el desarrollo de estructuras con técnicas de bioingeniería como alternativa para la mitigación de riesgos*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Bernal, L., & Suescún, E. ((2016). *Manual de obras de bioingeniería en zonas de laderas*. Bogotá: Universidad Nacional.
- Chávez, J. (12 de septiembre de (2006). *Concepto de antropogénico*. Obtenido de Ecured: <https://www.ecured.cu/Antropog%C3%A9nico>
- Cifuentes, C. (30 de noviembre de 2015). *Concepto de hidrosiembra*. Obtenido de Projar: <https://www.projar.es/productos/restauracion-ambiental/material-hidrosiembra/productos-para-hidrosiembra/hidrosiembra/>
- Correa, O., García, F., & Escobar, D. ((2013). Representación de estados y trayectorias volumétricas y gravimétricas del suelo. *Avances Investigación en Ingeniería*, 20-26.
- Costa, A. ((2004). *Inestabilidades por degradación superficial*. Santander: Universidad de Cantabria.
- DAS, B. ((2011). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Cengage Learning.
- De Matteis, A., Angelone, S., & Garibay, M. (2003). *Geología y geotecnia, estabilidad de taludes*. Buenos Aires: Universidad Nacional del Rosario.
- Decorplantas. (11 de Marzo de 2015). *Concepto de revegetalización*. Obtenido de Decorplantas Forestal: <https://www.decorplantasforestal.com/revegetalizacion>

- Escobar, C., & Duque, G. ((2016). *Geotecnia para el trópico Andino*. Manizales: Universidad Nacional.
- Fuller, M., & Booth, D. ((2005). *Construction for a Sustainable Environment*. London: CRC Press.
- Giraldo, Á. (2017). *Sistemas tecnológicos alternativos para la protección vegetal en taludes*. Medellín: Universidad Nacional.
- González, F. ((2013). *Descriptores geotécnicos: plasticidad, límites de Atterberg y consistencia*. Lima: GeoSuport.
- INVIAS. ((2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS. ((2017). *Programa de revegetalización y paisajismo de taludes*. Caquetá: Instituto Nacional de Vías.
- Lauforie, J. (23 de Enero de 2019). *Concepto de brachiaria humidícola*. Obtenido de Contexto ganadero: <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/humidicola-pasto-perfecto-para-reses-que-viven-en-suelos-acidos>
- Li, Y., Dick, W., & Tuovinen, H. ((2006). Fluorescence microscopy for visualization of soil. *Biology and fertility of soils*, 301-311.
- Martínez, C., & Fernández, B. (2001). Papel de la hidrosiembra en la revegetación de escombreras. *Informes de la construcción*, 27-37.
- Merkel, A. (05 de Febrero de 2019). *Clima San José del Fragua*. Obtenido de Climate-data.org: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/caqueta/san-jose-del-fragua-48159/>
- Mitsch, W. (12 de Agosto de (2012). *Ecological engineering*. Obtenido de Research web: [https://www.researchgate.net/publication/257368979\\_What\\_is\\_ecological\\_engineering](https://www.researchgate.net/publication/257368979_What_is_ecological_engineering)

- Olorunnaiye, E., & Ayuba, K. ((2014). Adaptability of the morgan, morgan and finney erosion prediction model in evaluating the performance of the selected erosion control geotextiles. *Jorind*, 327-336.
- Padilla, L. ((2014). *Calibración del método de parámetros de resistencia con SPT*. Bogotá: Universidad Nacional.
- Paredes, A. ((2019). *Confiabilidad en estabilidad de taludes*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana de México.
- Pérez, J., & Merino, M. (19 de Febrero de 2019). *Concepto de ladera*. Obtenido de Definiciones web: <https://definicion.de/ladera/>
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., & Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, 385-402.
- Rico, A. ((2009). *Artículos sobre tópicos de geotecnia y vías terrestres*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodríguez, R. (20 de Enero de 2012). *Concepto de litoestratigrafía*. Obtenido de Geología Venezolana: <http://geologiavenezolana.blogspot.com/2012/01/litoestratigrafia.html>
- Rojas, S., García, J., & Alarcón, M. ((2004). *Propagación asexual de las plantas : conceptos básicos y experiencias con especies amazónicas*. Manizales: Repositorio Universidad Nacional.
- Schweickt, R. (12 de Agosto de (2003). *Pasto Humidícola*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano. (12 de Agosto de 2017). *Mapa Geológico de Colombia 2017*. Obtenido de Geoportál SGC: [http://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Mapa\\_Geologico\\_Colombia/](http://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Mapa_Geologico_Colombia/)

Stokes, A., Atger, C., Bengough, A., Fourcaud, T., & SIDLE, R. (2009). Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Journal plant soil*, 1-30.

Suárez, J. ((1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Universidad de Santander.

The Vetiver Network International ( TVNI ). (2 de Mayo de (2019). *Pasto Vetiver*. Obtenido de Servicios y consultorias VetieverCOL: <http://www.vetivercolsas.com/pasto-vetiver>

Trejos, F. (12 de Julio de 2013). *Concepto de biomanto*. Obtenido de Compañía de empaques fibra de líderes: [http://www.epq.com.co/w3/internet/epq\\_1/documents/867.html](http://www.epq.com.co/w3/internet/epq_1/documents/867.html)

Vasco, G. (12 de Octubre de 2007). *Concepto de geomorfología*. Obtenido de Euskadi.eus: <https://www.hiru.eus/es/geologia/que-es-la-geomorfologia>

Zorrilla, M. (30 de septiembre de 2006). *Concepto de empradización*. Obtenido de Wordreference: <https://forum.wordreference.com/threads/empradizaci%C3%B3n-industria-petrolera.250128/>

## **ANEXOS**

**ANEXO A. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN TALUD RISARALDA**

**ANEXO B. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN TALUD BOYACÁ**

**ANEXO A.**

**ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN TALUD RISARALDA**

**ANEXO B.**

**ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN TALUD BOYACÁ**