

**VALIDACIÓN GEOTÉCNICA DE OBRAS BIOINGENIERILES PARA LA ESTABILIDAD  
DE SUELOS DE LADERA AFECTADOS POR PROCESOS DE EROSIÓN Y REMOCIÓN**

**MASAL**



**FERNANDO DE JESÚS SÁNCHEZ ZAPATA  
INGENIERO GEOLOGO, ESP. EN GEOTECNIA**

**FERNANDO.SANCHEZ@UCALDAS.EDU.CO**

**UNIVERSIDAD DE CALDAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**JULIO 2017.**

**VALIDACIÓN GEOTÉCNICA DE OBRAS BIOINGENIERILES PARA LA  
ESTABILIDAD DE SUELOS DE LADERA AFECTADOS POR PROCESOS DE  
EROSIÓN Y REMOCIÓN MASAL**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO  
MAGISTER EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**FERNANDO DE JESÚS SÁNCHEZ ZAPATA  
INGENIERO GEOLOGO, ESP. EN GEOTECNIA  
FERNANDO.SANCHEZ@UCALDAS.EDU.CO**

**DIRECTOR DE TESIS: JOSÉ HORACIO RIVERA POSADA  
PH.D., MSc.  
HORACIORIVERA1@GMAIL.COM**

**UNIVERSIDAD DE CALDAS  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

MANIZALES, 2017

**Copyright © 2017 por Fernando de Jesús Sánchez Zapata. Todos los derechos reservados.**





## **Agradecimientos**

A la Universidad de Caldas, por el apoyo total, para la realización de la Maestría en Ciencias de la Tierra, con énfasis en geología ambiental.

Al grupo de trabajo del proyecto CAR CUNDINAMARCA-UNIVERSIDAD DE CALDAS (Luz Elena Franco García, Alejandra Osorio, Fernando Gustavo Ramírez).

A las estudiantes, Natalia Elisa Ruiz Chica, Gloria Mercedes Vargas Aguirre y Luz Mery Martínez Muñoz, que realizaron trabajo de grado en los Municipios de la Calera (vereda el Líbano) y Mesa (vereda la Esperanza) de Cundinamarca.

A Sergio Eduardo Rivera por su trabajo en campo y laboratorio de mecánica de materiales.

A Luis Felipe Vásquez Rivera por la edición y corrección de estilo final del trabajo escrito.

Al Doctor José Horacio Rivera Posada, por sus conocimientos, recomendaciones, correcciones y enseñanza, en el análisis, interpretación y manejo del agua superficial, sub superficial y subterránea, en materiales impermeables y permeables.

A mi familia: esposa Blanca Cecilia, hijos Catalina y Santiago y hermanas Eugenia y Estela, por su apoyo, comprensión y colaboración.

## Resumen

La investigación se realizó en los municipios de La Calera y La Mesa Cundinamarca, con coordenadas N 1007061, E 1008667 y N 1011048, E 960758, altitud de 2914m y 1271m, precipitación promedio anual de 600 mm/año y 800 mm/año y temperatura de 14°C y 24°C, respectivamente, estableciendo el refuerzo mecánico biológico de los materiales con raíces de saúco y nacedero sembrados como parte de la solución bioingenieril; y determinando el manejo hidráulico desde el inicio de las obras (Biofiltros Vivos - BFV, Trinchos Vivos Escalonados en Vertedero Abierto - TVEVA y Trinchos Vivos en Ladera - TVL), con la captación, transporte y disposición del agua, controlando los movimientos en masa y la erosión en la solución de dos problemas de erosión y movimientos en masa realizados por la CAR (Cundinamarca) entre los años 2014 y 2015.

El refuerzo mecánico y el manejo hidráulico de los materiales, se determinó con ensayos de las propiedades granulométricas, gravimétricas, volumétricas, índices y mecánicas de los materiales con y sin raíces hasta 2,5m de profundidad; y con el control del agua de infiltración y escorrentía dada por las obras (incluyendo la siembra). La estabilidad se estableció calculando el valor de los factores de seguridad (Fs) en superficies de falla planar y circular, para materiales con humedad de campo (humedad variable entre los límites plástico y líquido) y humedad de saturación o saturados (humedad del límite líquido), humedad de campo y saturados más el refuerzo mecánico como micro pilote dado por cada poste de guadua de las obras (BFV, TVEVA y TVL (ASI, 2010), humedad de campo y saturados más el refuerzo mecánico de los micro pilotes y un incremento del 30% en la cohesión (Davoudi, 2011) por el parcial desarrollo del

sistema de raíces (aproximadamente a los seis meses de siembra) y con humedad de campo y saturados más el refuerzo mecánico del 80% de la cohesión (Davoudi, 2011) por el total desarrollo de las raíces (aproximadamente a 24 meses de siembra) de la sucesión natural, especies sembradas y guaguas utilizadas en la solución con bioingeniería.

Los Fs, establecieron las más altas condiciones de estabilidad para materiales con humedad de campo, tanto para las superficies de falla planar y rotacional en todos los escenarios modelados. Los valores de los Fs para las superficies de falla circular, son inferiores a los de superficies de falla planar. El control hidráulico superficial y sub superficial del agua de escorrentía e infiltración más el refuerzo mecánico al material dado por las obras y la siembra, establecen la mayor estabilidad a los dos años de construcción de la solución con bioingeniería, representada por los factores de seguridad para materiales en humedad de campo y el total desarrollo del sistema de raíces en las dos especies analizadas.

Palabras claves: refuerzo mecánico biológico, control hidráulico, factores de seguridad, humedad de campo, saturación.



## Contenido

Contenido.....	v
Lista de tablas .....	viii
Lista de figuras.....	ix
Lista de Ecuaciones.....	xvi
Lista de anexos.....	XVII
Introducción .....	1
Fase I: Determinación del control hidráulico en los suelos por efecto de obras de bioingeniería .....	5
Fase II: Estimación del refuerzo mecánico de los suelos, con raíces de sauco y nacedero .....	7
Fase III: Estimación geotécnica de la estabilidad generada en los suelos por obras de bioingeniería .....	7
Objetivos.....	11
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos .....	11
Marco Conceptual.....	12
1.1 Contribución hidráulica en el control de la escorrentía y la infiltración.....	12
<b>1.1.1 Respuesta de los materiales gruesos y permeables a los procesos denudativos .15</b>	
1.1.1.1 Comportamiento erosivo por escorrentía superficial.....	18
1.1.1.2 Comportamiento erosivo por infiltración, flujo por contacto hidráulico, emergencia en superficie y escorrentía superficial. ....	21
1.1.1.3 Obras de bioingeniería en materiales gruesos.....	25

<b>1.1.2</b>	<b>Respuesta de los materiales finos poco permeables a los procesos</b>	<b>denudativos</b>	<b>28</b>
1.1.2.1	Comportamiento a los movimientos en masa por humedecimiento y saturación desde la superficie hacia profundidad.....		32
1.1.2.2	Obras de bioingeniería en materiales finos.....		36
1.2	Contribución Mecánica.....		41
<b>1.2.1</b>	<b>Refuerzo mecánico.....</b>		<b>44</b>
1.3	Análisis de estabilidad.....		50
2	Desarrollo y resultados.....		55
<b>2.1.1</b>	<b>Estimación del control hidráulico y refuerzo mecánico de los suelos con las obras bioingenieriles.....</b>		<b>55</b>
2.1.1.1	Vereda El Líbano (Municipio La Calera).....		55
2.1.1.2	Monitoreo del sauco y de la sucesión natural.....		56
<b>2.1.2</b>	<b>Vereda Tolú Bajo (Municipio La Mesa).....</b>		<b>62</b>
2.1.2.1	Monitoreo de la cobertura vegetal antes de la construcción de las obras bioingenieriles.....		62
2.1.2.2	Monitoreo del nacedero y la sucesión natural en las obras bioingenieriles de la vereda tolú bajo.....		63
<b>2.1.3</b>	<b>Condiciones mecánicas e hidráulicas del terreno.....</b>		<b>70</b>
2.1.3.1	Vereda El Líbano (Municipio La Calera).....		70
2.1.3.2	Vereda Tolú Bajo (Municipio La Mesa).....		70
<b>2.1.4</b>	<b>Análisis estadístico de las propiedades Índice y mecánicas de los materiales.....</b>		<b>72</b>

<b>2.1.5</b>	<b>Análisis de estabilidad con Factores de seguridad (FS)</b> .....	<b>74</b>
2.1.5.1	Factores de seguridad en el proceso de la vereda Tolú Bajo (Municipio La Mesa).	74
2.1.5.2	Condiciones de estabilidad y factor de seguridad (Fs) antes del proceso.....	77
2.1.5.3	Condiciones de estabilidad y factor de seguridad (Fs) con las obras de bioingeniería .....	81
2.1.5.4	Condiciones de estabilidad y Fs con las obras más el refuerzo mecánico dado por desarrollo parcial del sistema de raíces del nacedero .....	82
2.1.5.5	Condiciones de estabilidad y Fs sin las obras, más el desarrollo total del sistema de raíces de nacedero .....	84
<b>2.1.6</b>	<b>Factores de seguridad en el proceso de la vereda El Líbano</b> .....	<b>86</b>
2.1.6.1	Condiciones de estabilidad y factores de seguridad antes del proceso .....	88
2.1.6.2	Condiciones de estabilidad y factor de seguridad (Fs) con las obras de bioingeniería .....	90
2.1.6.3	Condiciones de estabilidad y Fs con las obras más el refuerzo mecánico dado por desarrollo parcial del sistema de raíces del Sauco.....	90
2.1.6.4	Condiciones de estabilidad y Fs sin las obras más el desarrollo total del sistema de raíces de sauco.....	92
Conclusiones .....		94
Recomendaciones .....		99
Bibliografía .....		101
Anexos .....		I

## Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros mecánicos utilizados para los FS en el proceso de la vereda Tolú Bajo municipio de la Mesa. ....	74
Tabla 2. Valores de los Fs calculados en superficies planares y circulares, con los refuerzos mecánicos de las obras de bioingeniería y diferentes etapas de desarrollo del sistema de raíces, para la parte media de la vereda Tolú Bajo, municipio de La Mesa. ....	76
Tabla 3. Parámetros geológicos y mecánicos del proceso de la vereda el Líbano. ....	86
Tabla 4. Valores de los Fs calculados en superficies planares, antes del proceso y con los refuerzos mecánicos de las obras de bioingeniería y diferentes etapas de desarrollo del sistema de raíces, para vereda el Líbano, municipio de La Calera. ....	88
Tabla 5. Columna estratigráfica mecánica de la perforación 1. Ruiz, 2015. ....	I
Tabla 6. Columna estratigráfica mecánica de la perforación 2. Ruiz, 2015. ....	I

## Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización corregimiento de La Esperanza, municipio La Mesa, Cundinamarca. Fecha de las imágenes, 4/9/2013. Fuentes: Ordenanza del Departamento de Cundinamarca, 1991, Google Earth.....	6
Figura 2. Mapas de localización. Vereda El Líbano, municipio La Calera, Cundinamarca. ....	6
Figura 3. Ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE, Wischmeier y Smith, 1978; en (J. Rivera, 2008)). .....	15
Figura 4 Procesos de erosión laminar, surcos y cárcavas, en materiales arenosos, provenientes de la meteorización de rocas ígneas cristalinas, tipo granodiorita (Rivera et al., 2017). ....	16
Figura 5 Proceso simulado de erosión superficial, con sus bases hidrológicas en un Suelo tipo Alfisol franco-arenoso; en un estado seco de Humedad inicial; sin Cobertura (Desnudo); en una ladera de Pendiente del 6%; una Tormenta simulada de 60mm/h y un Periodo de Retorno (PR) de 2 años (PR=2años. Pla, 2013).....	17
Figura 6 Tiempos para la esorrentía e infiltración, en un Alfisol franco-arenoso, del ejemplo de la Figura 5 (Pla, 2013). .....	18
Figura 7 . Esquema del proceso de ampliación de una cárcava (J. Rivera, 1998).....	20
Figura 8 Infiltración total en un Alfisol franco-arenoso, del ejemplo de la figura 5 (Pla, 2013). 21	
Figura 9 . Inicio del proceso de infiltración en materiales arenosos. El agua infiltrada alcanza el contacto hidráulico entre arenas permeables y arenas menos permeables. El material empieza a saturarse desde el contacto hidráulico hacia la superficie (J. Rivera et al., 2017)22	
Figura 10. Sobre el contacto hidráulico empieza a generarse un flujo de agua, movilizado por la fuerza de la gravedad. El agua empieza a emerger en la cara libre del talud como un	

manantial y empieza a erosionar el material grueso, que se ubica sobre el contacto hidráulico. (J. Rivera et al., 2017)..... 23

Figura 11 El incremento del flujo de agua eroda los materiales gruesos por encima del contacto, genera un aumento en el tamaño del negativo. La pérdida del soporte lateral y basal, genera un deslizamiento planar a través del contacto hidráulico, si el espesor es pequeño. (J. Rivera et al., 2017) ..... 24

Figura 12. Esquema de un trincho en vertedero abierto, para controlar erosión en materiales arenosos. (J. Rivera et al., 2017)..... 26

Figura 13. Trincho vivo escalonado a través de la ladera -TVL. (J. Rivera et al., 2017). ..... 27

Figura 14. Deslizamiento diédrico – flujo de tierras en arcillolitas y lodolitas arcillosas de la formación Quebrada Grande, con erosión en cárcavas, surcos, laminar y pluvial. (J. Rivera et al., 2017). ..... 29

Figura 15. Proceso simulado de erosión en masa y sus bases hidrológicas, en un Suelo tipo Ultisol franco-arcilloso, con Humedad inicial en Capacidad de campo y Cobertura de Pastos; en un terreno con Pendiente del 50% y una Tormenta simulada de 100mm/2h y PR de 10 años (Pla, 2013)..... 30

Figura 16. Relación entre la pendiente del terreno y la relación entre la fuerza que empuja el deslizamiento en el sentido de la pendiente ( $F_p$ ) y la fuerza en sentido vertical ( $F_v$ ) o peso del material húmedo en la consistencia que se hace fluido ( $F_p/F_v$ , Pla, 2013)..... 31

Figura 17. Proceso simulado de movimiento en masa, en un Suelo tipo Ultisol franco-arcilloso, seco y húmedo antes de la tormenta, en el ejemplo de la Figura 16 (Pla, 2013). ..... 32

Figura 18. El proceso de infiltración en materiales arcillosos, establece que el agua lluvia humedece y satura el material, desde la superficie hacia abajo en profundidad. (J. Rivera et al., 2017). ..... 33

Figura 19. Modelo hidrogeológico, con material superficial saturado y terreno que empieza a deformarse y agrietarse, aumentando la infiltración y la saturación. Aumento de la profundidad del nivel de saturación en el material y de la profundidad, deformación y agrietamientos en el terreno. (Rivera et al., 2017). ..... 34

Figura 20. Modelo hidrogeológico, con materiales superficiales saturados, que por exceso de agua, el material pierde totalmente su cohesión, falla y fluye, depositándose al pie del corte. (Rivera et al., 2017). ..... 35

Figura 21 Sección de cinco metros de un Biofiltro en guadua. ((Rivera et al., 2017)). ..... 37

Figura 22 Trinchos vivos escalonados, configurando una terraza. (Rivera et al., 2017). ..... 38

Figura 23. Influencia de las raíces en la velocidad, el volumen y la dirección de los flujos de agua (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2000 y Rivera, 2006, en Rivera, 2008). ..... 39

Figura 24. Distribución de la humedad dentro del suelo, disminuyendo las presiones de poros (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2000, Rivera, 2006, en Rivera, 2008). Color gris: Partículas de suelo; color azul: Poros con agua y color café: Poros con aire. .... 40

Figura 25. Incremento de la cohesión efectiva del suelo, por el enlace de fibras de raíces con el suelo y la roca y la adhesión de las partículas del suelo a las raíces de las plantas (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2000, en Rivera, 2008). ..... 42

Figura 26. Interacción suelo – raíces y roca – raíces; incremento de la carga normal en el suelo, por el peso de los árboles (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2007, Rivera, 2006; tomado de Mataix y López; 2007, en Rivera, 2008). ..... 43

Figura 27. Ensayo de corte directo en un material con raíces de una especie vegetal (Rivera 2008). Equipo de campo para pruebas de extracción o arrancamiento in situ (J. E. Norris, 2005)). ..... 44

Figura 28 Resistencia promedio al cortante tangencial (kPa) en cinco suelos de la zona cafetera colombiana con tres usos (J. H. Rivera, 1999) ..... 46

Figura 29. A. Perfil de análisis de estabilidad de laderas con método de talud infinito para deslizamiento planar a escala regional de laderas de montaña. B. deslizamiento semicircular a escala local de taludes de colina (Genet et al., 2010)). C. Fuerzas en un talud por la vegetación (Greenwood et al., 2004). ..... 51

Figura 30. Condiciones de las raíces, con respecto a las condiciones de agua, en superficie de falla planar para talud infinito (Greenwood et al., 2004). ..... 52

Figura 31. Deslizamiento planar – flujo de tierra (20 de octubre de 2012).. Solución bioingenieril con BFV, TVEVA y TVL (14 de diciembre de 2014). Fotografías: Jhon Alexis Serrato. Luz Elena Franco García. Vereda el Libano Municipio de la Calera. .... 56

Figura 32. Corona, cuerpo, base y material removido por el proceso denudativo en la vía terciaria el día 21 de noviembre de 2012. .... 56

Figura 33. Inicio de trinchos y filtros vivos desde la corona del proceso. Panorámica, Filtro principal y Panorámica de la obra (15 de julio, 9, 13 y 26 de agosto 2013). ..... 57

Figura 34. Febrero de 2014. Trinchos vivos con sauco (*Sambucus nigra*). Sauco con altura de 70 cm. Panorámica de la revegetación natural y del prendimiento de las especies sembradas. Trinchos vivos con sauco y cedro (*Cedrela montana*). Rebrotos de pasto. Panorámica de la obra. Fotografías: Alejandra Osorio. .... 58

Figura 35. Panorámica de la obra. Sucesión natural y trinchos sin sauco en la parte alta. Agosto de 2014. Fotografías: Alejandra Osorio..... 59

Figura 36. Nueva siembra de especies de sauco. Panorámica de la obra. Saucos de 2 m de altura. Cedro de 2,1 m de altura. 17 de diciembre de 2014. Fotografías: Alejandra Osorio. .... 60

Figura 37. Prendimiento y crecimiento exuberante del sauco en la parte lateral de las obras de bioingeniería. Mayo de 2015. Fotografías: Alejandra Osorio ..... 61

Figura 38. Fragmento boscoso de la parte alta de la ladera del estudio, vereda Tolú Bajo, Municipio la Mesa, coordenadas: N 1010799, E 960952, 1376 m.s.n.m. Febrero de 2014. Fotografía: Alejandra Osorio. .... 63

Figura 39. Trinchos sin prendimiento de estacas vivas. Filtros vivos y estacas vivas de nacedero. Filtros en construcción y en funcionamiento. Abril de 2014. Fotografías: Alejandra Osorio. .... 64

Figura 40. Trincho con vegetación. Estacas de nacedero con rebrotos de hojas. Trinchos con suelo desnudo y estacas vivas sin brotes. Diciembre de 2014. Fotografías: Fernando Sánchez. .... 65

Figura 41. Filtros laterales con drenaje hacia la vía y la quebrada. Filtro cubierto con arvenses y estacas de nacedero a cada lado del mismo (*Trichanthera gigantea*). Diciembre 2014. Fotografías: Alejandra Osorio..... 66

Figura 42. Diámetro del ancho de la hoja, 82 mm, Longitud de la hoja, 105mm. Diámetro del tallo, 43mm, altura 60cm. Altura del nacedero (0,65m). Diámetros del tallo de 50mm y 28mm. Rebrote de las estacas de nacedero sobre los filtros (*Trichanthera gigantea*). Filtros con nacedero. Cobertura vegetal en las obras de bioingeniería. Marzo de 2015. Fotografía: Alejandra Osorio. .... 67

Figura 43. Crecimiento de las plantas de nacedero. Restauración de la cobertura vegetal herbácea. Prendimiento de la guadua. Mayo 2015. Fotografías: Alejandra Osorio. .... 68

Figura 44. Paralelo entre la superficie antes (color verde) y después (color negro) en la parte media del proceso denudativo, con deslizamientos planares y rotacionales. Vereda Tolú Bajo. .... 75

Figura 45. Fs para falla planar, en condiciones de humedad de campo de los materiales, parte media del proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo. .... 78

Figura 46. Fs para falla planar, en condiciones efectivas de saturación de los materiales, parte media del proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo. .... 79

Figura 47. Fs para falla circular, en condiciones de humedad de campo de los materiales, parte media del proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo ..... 80

Figura 48. Fs para falla circular, en condiciones efectivas de saturación de los materiales, parte media del proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo. .... 81

Figura 49. Superficie del terreno antes (Línea roja) y después (Línea negra) del proceso denudativo, tipo deslizamiento traslacional (planar), que afectó la vereda El Líbano. .... 87

Figura 50. Fs para falla planar, en condiciones de humedad de campo de los materiales, antes del proceso denudativo de la vereda El Líbano. .... 89

Figura 51. Fs para falla planar, en condiciones efectivas de saturación de los materiales, antes del proceso denudativo de la vereda El Líbano. .... 89

## Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Calculo del Ángulo de fricción efectiva $\phi'$ . (Terzaghi et al., 1996). .....	9
Ecuación 2. Calculo de la cohesión efectiva (Terzaghi et al., 1996). .....	9
Ecuación 3. cálculo de la cohesión de la estructura raíces y suelo (Davoudi, 2011; W. Wu et al., 2015). .....	10
Ecuación 4. Cohesión efectiva de suelo más raíces $CR1'$ (Terzaghi et al., 1996) .....	10
Ecuación 5. Cohesión de suelo más raíces parcialmente establecidas $C^{R2}$ (Wu Wei. 2015; Mohammad, H. D. 2011). .....	10
Ecuación 6. Cohesión efectiva de suelos más raíces, totalmente establecida $C^{R2'}$ (Terzaghi et al., 1996). .....	10
Ecuación 7. Ecuación del método del talud infinito de (Morgan & Rickson, 2003) .....	53
Ecuación 8. calcula el factor de seguridad con vegetación (Coppin & Richards, 1990) citados por (Morgan & Rickson, 2003). .....	53



## Lista de anexos

Anexo 1. 1. Columnas estratigráficas mecánicas del proceso de la vereda el Libano municipio de la Calera departamento de Cundinamarca. ....	I
Anexo 2. Columnas estratigráficas mecánicas del proceso de la vereda Tolú Bajo municipio de la Mesa departamento de Cundinamarca. ....	VI
Anexo 3. Resultados del análisis estadístico de selección y correlación múltiple .....	XII
Anexo 4. Factores de seguridad en la parte media del proceso denudativo vereda Tolú Bajo municipio de la Mesa departamento de Cundinamarca. ....	XVII
Anexo 5 Factores de seguridad en el proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo municipio de la Mesa de Cundinamarca. ....	XXXIII

## **Introducción**

La validación geotécnica de las obras bioingenieriles de drenaje, configuración y adecuación del terreno, utilizadas para controlar los procesos denudativos (erosión y movimientos en masa), es fundamental para dar soporte a su bajo costo, eficiencia y efectividad en la estabilización de las laderas afectadas por erosión y movimientos en masa.

La experiencia exitosa de CENICAFÉ, el CIPAV y la CAR Cundinamarca, en el control de los procesos denudativos con obras bioingenieriles demuestra ser más eficientes en el tiempo que las obras ingenieriles, lo que motiva la validación geotécnica de estas obras, que en primera instancia diferencia los materiales que conforman los taludes y las laderas de los terrenos montañosos, luego localiza las aguas presentes, y según la variación espacial en las temporadas de lluvias y secas en el territorio colombiano, se establece la captación, transporte y disposición del agua. Esta validación geotécnica de las obras bioingenieriles, mediante los métodos geotécnicos de cálculo de factores de seguridad utilizados en el país, se realizó mediante perforaciones en el terreno, para muestrear los materiales con y sin raíces, estableciendo los niveles de agua libre; conjuntamente con ensayos de laboratorio de las propiedades volumétricas, gravimétricas, índice, mecánicas e hidráulicas, antes y después de construidas las obras; para finalmente establecer la estabilidad de los materiales y el terreno sin vegetación, a los seis y veinticuatro meses (dos años) de construidas las obras.



Esta validación permitirá a las obras bioingenieriles, posicionarse como una solución geotécnica, de bajo costo, alta eficiencia y efectividad, como se demuestra con las obras construidas en los procesos denudativos analizados.

Se debe continuar visitando los terrenos, muestrear, ensayar y recalculer la estabilidad de las obras, para verificar y reafirmar lo determinado para muestreos a seis y veinticuatro meses de construidas las obras.

## **Justificación**

La gran efectividad, economía y estabilidad que ofrecen las soluciones bioingenieriles para controlar procesos denudativos (erosión y movimientos en masa), que afectan el territorio colombiano tanto en su sector urbano como en el rural, no se refleja en la utilización de estas obras por parte de las entidades gubernamentales y privadas encargadas de controlar y estabilizar los terrenos afectados por estos procesos, utilizando costosas e inefectivas obras ingenieriles.

El análisis geotécnico, establecerá la estabilidad del terreno, con soluciones bioingenieriles, involucrando el conocimiento mecánico e hidráulico de los materiales, mediante perforaciones en el terreno y ensayos de laboratorio y de campo, la distribución hidráulica del agua en los materiales antes y después de construir los Biofiltros Vivos - BFV, Trinchos Vivos Escalonados en Vertedero Abierto - TVEVA y Trinchos Vivos en Ladera – TVL; la mayor resistencia de los suelos con el desarrollo de los sistemas de raíces de las especies sembradas y la mayor estabilidad del terreno con estas obras.

Este análisis geotécnico, potenciara e incrementara este tipo de soluciones, que además de tener costo menor, son más ecológicas y ambientalmente amigables, permitiendo involucrar y capacitar la comunidad afectada, tanto en la exploración geotécnica como en la construcción de las obras, como las que se realizaron con la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca en el 2014.



El control y estabilización de las obras bioingenieriles, sustentadas geotécnicamente, permitirá cuestionar la poca efectividad de las obras civiles utilizadas para todos los materiales, ya que no atacan la causa de los procesos, si no su efecto. Además su bajo costo permitirá realizar obras de prevención y evitar la generación de estos procesos, que tanto afectan nuestros territorios y nuestras comunidades.

## **Diseño metodológico**

Mediante un inventario diagnóstico integral de los procesos denudativo, que considera las relaciones entre: Roca, Suelo, Grado, Pendiente y Longitud de la ladera, Clima, Vegetación, Animal, Infraestructura y Hombre, se determina la relación **Causa - Efecto** de los fenómenos degradativos de erosión y movimiento en masa y se establecen las obras de bioingeniería que se construyen a bajos costos (J. Rivera, 2008). Para esto, se desarrollaron tres fases para diagnosticar dos procesos estabilizados por la CAR (Cundinamarca).

### **Fase I: Determinación del control hidráulico en los suelos por efecto de obras de bioingeniería**

Para determinar el control hidráulico y el refuerzo mecánico en los materiales de los suelos, por efecto de las obras de bioingeniería (**BFV, TVEVA y TVL**) y la vegetación sembrada (sauco, nacedero y guadua), mediante perforaciones antes, durante y después de construidas las obras, conjuntamente con ensayos en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Caldas, se evaluó las propiedades granulométricas, gravimétricas, volumétricas, índices y mecánicas de los suelos obtenidos en las perforaciones.

En el corregimiento La Esperanza del municipio La Mesa (Figura 1) y el corregimiento El Líbano del municipio La Calera (Figura 2), se realizaron perforaciones, con muestreos hasta 4 metros de profundidad.

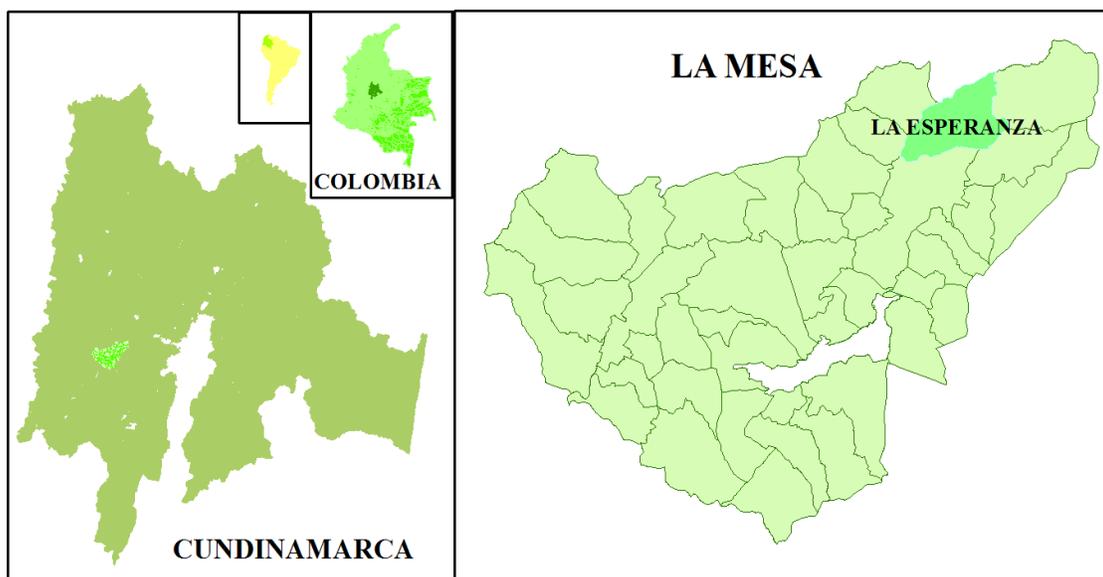


Figura 1. Mapa de localización corregimiento de La Esperanza, municipio La Mesa, Cundinamarca. Fecha de las imágenes, 4/9/2013. Fuentes: Ordenanza del Departamento de Cundinamarca, 1991, Google Earth.

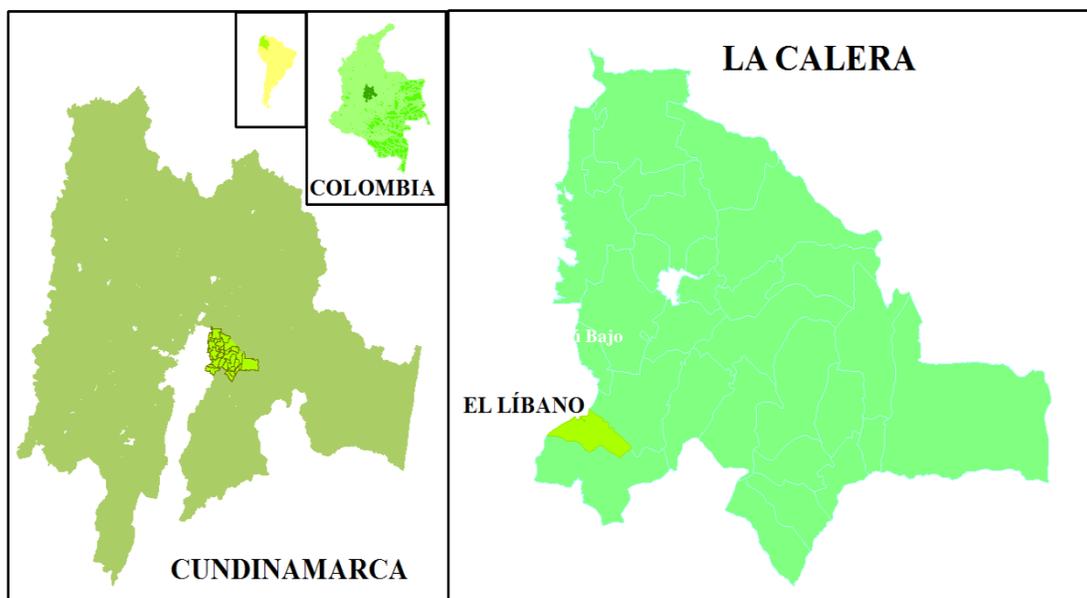


Figura 2. Mapas de localización. Vereda El Líbano, municipio La Calera, Cundinamarca.

## **Fase II: Estimación del refuerzo mecánico de los suelos, con raíces de sauco y nacedero**

Para estimar el refuerzo mecánico de los suelos, con raíces de sauco y nacedero, sembrados en las soluciones bioingenieriles, se procedió a un monitoreo del crecimiento y desarrollo de las especies, a los seis (6) y veinticuatro (24) meses de la construcción de las obras (**BFV, TVEVA y TVL**).

Durante el monitoreo, se midieron longitudes y diámetros de raíces, tallos y hojas de los arboles; se describió la arquitectura de las raíces en una calicata construida sobre un TVL y se estableció el porcentaje areal de prendimiento de la sucesión natural de vegetación y el porcentaje numérico de rebrote en las estacas sembradas en terreno adecuado..

## **Fase III: Estimación geotécnica de la estabilidad generada en los suelos por obras de bioingeniería**

Se estimó geotécnicamente la estabilidad generada en los suelos, por las obras de bioingeniería y la vegetación sembrada, calculando factores de seguridad por el método simplificado de Bishop, 1955

El análisis para la evaluación de la estabilidad, se basa en los cálculos de  $F_s$ , que considera la relación entre la resistencia del material y los esfuerzos que producen la falla a lo largo de superficies circulares y planares de falla según Fellenius, 1922 (en, Davoudi, 2011; Moore, 2000; W. Wu et al., 2015).

La modelación de la estabilidad se realizó en el programa SLIDE 6.0 y consideró dos superficies de falla: Una circular, definida automáticamente por el programa y otra planar, definida por el usuario. Este programa calcula el Fs según el método simplificado de Bishop, 1955 (en Davoudi, 2011; W. Wu et al., 2015).

En el proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo, se modelaron tres niveles estratigráficos, el superior corresponde a un depósito coluvial matriz soportado (SM) y los niveles inferiores (M1 y M2), corresponden al perfil de meteorización de rocas sedimentarias tipo lodolitas y arcillolitas (lutitas).

En el proceso denudativo de la vereda El Líbano, se modelan cuatro niveles estratigráficos, el nivel superior corresponde a suelos orgánicos (SO), el siguiente nivel a un depósito matriz soportado (MS) y los niveles inferiores (SS1 y SS2) corresponden al perfil de meteorización de areniscas cuarzosas.

El factor de seguridad (Fs), se calculó para cuatro modelos del terreno, el primero simuló las condiciones del terreno antes del proceso, el segundo después del movimiento con el inicio de las obras, el tercero a seis meses de construidas las obras y el cuarto después de dos años de construidas las obras bioingenieriles, definiendo las condiciones mecánicas e hidráulicas al momento de la falla y después de esta, con y sin las obras de estabilidad realizadas.

Se calculó el factor de seguridad para superficies de falla gravitacional planar y rotacional, en las condiciones de humedad de campo al momento del muestreo y en condición de saturación de los materiales.

Los valores de los parámetros de resistencia de los materiales (cohesión, ángulo de fricción y peso unitario) para calcular los Fs, se determinaron de los ensayos de corte directo y peso unitario establecidos en la Norma NSR 2010, realizados en las muestras recolectadas en las campañas de exploración de campo, los valores del peso unitario húmedo en  $\text{kN/m}^3$ , el Ángulo de fricción  $\phi$  en grados ( $^\circ$ ) y la Cohesión C ( $\text{kN/m}^2$ ) de cada material, corresponden al promedio de todos los obtenidos de las muestras, con los que se construyó la columna generalizada geológica y mecánica del terreno (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996). El Ángulo de fricción efectiva  $\phi'$  (Ecuación 1) y la Cohesión efectiva  $C'$  (Ecuación 2), para los materiales saturados, se obtiene de disminuir a sus 2/3 partes los valores iniciales del ángulo de fricción  $\phi$  y la cohesión C (Terzaghi et al., 1996), mediante las siguientes formulas:

$$\phi' = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3} \tan \phi\right)$$

*Ecuación 1. Calculo del Ángulo de fricción efectiva  $\phi'$ . (Terzaghi et al., 1996).*

$$C' = \frac{2}{3} C$$

*Ecuación 2. Calculo de la cohesión efectiva  $C'$ . (Terzaghi et al., 1996).*

La Cohesión del suelo más raíces con el establecimiento parcial de las raíces  $C^{R1}$  se calculó con la cohesión inicial (C) más un aumento del 30% de esta misma (Wu Wei, 2015; Mohammad, H. D. 2011) y la cohesión efectiva del suelo más raíces  $C^{R1'}$ , con una disminución de la tercera parte de la cohesión de suelo más raíces  $C^{R1}$  (Terzaghi et al., 1996) mediante las siguientes formulas (Ecuación 3 y Ecuación 4):

$$C^{R1} = 0,3C + C$$

$$C^{R1'} = (2/3) C^{R1}$$

*Ecuación 3. cálculo de la cohesión de la estructura raíces y suelo (Davoudi, 2011; W. Wu et al., 2015).*

*Ecuación 4. Cohesión efectiva de suelo más raíces  $C^{R1'}$  (Terzaghi et al., 1996)*

La Cohesión de suelo más raíces con el establecimiento total de la vegetación  $C^{R2}$ , se calcula con la cohesión inicial (C) más un aumento del 80% de esta misma (Wu Wei, 2015; Mohammad, H. D. 2011) y la cohesión efectiva de suelos más raíces totalmente establecidas  $C^{R2'}$ , con una disminución de la tercera parte de la cohesión  $C^{R2'}$  (Terzaghi et al., 1996) a partir de las siguientes fórmulas (Ecuación 5 y Ecuación 6):

$$C^{R2} = 0.8C + C$$

$$C^{R2'} = (2/3) C^{R2}$$

*Ecuación 5. Cohesión de suelo más raíces parcialmente establecidas  $C^{R2}$  (Wu Wei, 2015; Mohammad, H. D. 2011).*

*Ecuación 6. Cohesión efectiva de suelos más raíces, totalmente establecida  $C^{R2'}$  (Terzaghi et al., 1996).*

## Objetivos

### Objetivo general

Validar geotécnicamente las obras de bioingeniería para la estabilidad de taludes y laderas en terrenos montañosos, afectados o no por procesos denudativos de erosión y movimientos en masa.

### Objetivos específicos

Estimar el refuerzo mecánico de los suelos, con raíces de sauco y nacedero sembrados en las soluciones bioingenieriles.

Determinar el control hidráulico en los suelos por efecto de obras de bioingeniería (Biofiltros Vivos - **BFV**, Trinchos Vivos Escalonados en Vertedero Abierto - **TVEVA** y Trinchos Vivos en Ladera - **TVL**) y la vegetación sembrada.

Estimación geotécnica de la estabilidad generada en los suelos por obras de bioingeniería, establecidas en la solución de problemas de erosión y movimientos en masa.

## Marco Conceptual

### 1.1 Contribución hidráulica en el control de la escorrentía y la infiltración

La contribución hidráulica de las obras de bioingeniería en la estabilización de los terrenos de ladera afectados por procesos denudativos, en materiales consolidados de granulometría fina a gruesa y en rocas, con el control de los procesos erosivos y de movimientos en masa, está poco referenciada. Los métodos geotécnicos aplican los conceptos de flujos hidráulicos en medios porosos, relacionados con la ley de Darcy y las ecuaciones de Bernoulli para el movimiento del agua por diferencias de potencial y capilaridad, relacionados con la permeabilidad, porosidad y trasmisividad hidráulica en estos materiales; estableciendo diferencias significativas entre estos materiales, tanto en las propiedades índice (porosidad neta, porosidad efectiva, relación de vacíos, límites de consistencia), gravimétricas y volumétricas (pesos unitarios seco, húmedo y saturado), granulométricas (gruesas, finas y muy finas), hidráulicas (permeabilidad, trasmisividad y resistividad) y mecánicas (resistencia, cohesión y ángulo de fricción).

Para la determinación de la estabilidad de los materiales y el terreno, se aplica la simplificación de (Peck & Terzaghi, 1948) con respecto a la presión de poros, tanto para materiales finos y gruesos, que se utiliza posteriormente en la teoría de falla de (Coulomb, 1773), para establecer las fuerzas resistentes del volumen de masa de materiales a la falla cortante y las fuerzas que generan el movimiento a través de esta falla cortante y posteriormente ladera abajo.

La hidrología y la hidrogeología, plantean la localización, categorización, explotación y producción de agua, con fines agrícolas, ganaderos y humanos. Estableciendo diferente comportamiento hidrogeológico, con respecto a la permeabilidad, porosidad, trasmisividad y resistencia eléctrica, entre estratos de granulometría fina (tamaños arcillas y lodos o limos, de composición mineralógica de arcillosas o no, y estratos de granulometría gruesa (arenas finas, medias y gruesas), que pueden estar parcialmente compuestos por minerales arcillosos. La agronomía a partir de esta diferencia hidrogeológica, establece diferentes comportamientos de estos materiales con respecto a la relación lluvia, infiltración y escorrentía.

La geología a partir de estas diferencias agronómicas, plantea entre materiales gruesos y finos diferencias significativas con respecto al humedecimiento-saturación-flujos (empuje hidráulico)-retención (presión de poros). Además la geología define mineralógicamente el término arcilla, generando confusión de este término definido desde concepto granulométrico o tamaño de partícula.

Este trabajo no considera esta diferencia hidráulica en el cálculo del factor de seguridad y estabilidad de los materiales de laderas, ya que utiliza los métodos simplificados y rigurosos existentes en la geotecnia que calcula la presión de poros para todos los materiales; pero si la considera en la selección de las obras de estabilidad y control de la erosión y los movimientos en masa. Esta diferencia establece que en los materiales arcillosos mineralógicamente y finos granulométricamente, saturados y sin flujo de agua, se genera presión de poros, por lo que las obras deben drenar el agua en los materiales, controlando y anulando la presión de poros desde la superficie hasta la

profundidad de saturación. En los materiales gruesos, establece que el flujo de agua entre los espacios vacíos dados por las partículas, genera empujes hidráulicos, que deben ser controlados mediante la protección de las arenas en el fondo y lados de los drenajes temporales y permanentes a lo largo de toda la longitud del cauce.

Esta diferencia entre los materiales permeables (arenas muy finas y tamaños mayores) y los impermeables (finos, lodos y arcillas), en el comportamiento con respecto a la escorrentía, infiltración, humedecimiento, saturación y flujos de agua, no es visible a través de las curvas de infiltración de estos materiales, que solo establecen la mayor capacidad de infiltración e infiltración acumulada para las arenas.

(Pla, 2013) diferencia la infiltración y la escorrentía para los materiales granulares y establece el tipo proceso denudativo que ataca inicialmente a los materiales permeables e impermeables. Morgan (1986), citado por (J. Rivera, 2008) establece que los factores que influyen en la tasa de erosión de los materiales permeables, son la lluvia, la escorrentía, el viento, el suelo, la inclinación y longitud del terreno, la cobertura de las plantas y la presencia o ausencia de prácticas de conservación. Estos parámetros se analizan, mediante la ecuación universal de pérdida del suelo (Figura 3), USLE (Wischmeier y Smith, 1978; en (J. Rivera, 2008)).



Figura 3. Ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE, Wischmeier y Smith, 1978; en (J. Rivera, 2008)).

### 1.1.1 Respuesta de los materiales gruesos y permeables a los procesos denudativos

Los materiales gruesos (arenas finas a gruesas – gravas – bloques), son poco porosos, pero sus poros están conectados, generando materiales permeables (conductividad hidráulica) y con propiedades granulares friccionales. Esto indica que los poros, son vacíos físicos entre las partículas, que se llenan de agua, para fluir de un punto a otro entre las partículas, por los vacíos conectados entre sí debido a diferencias de potencial o altura.

Estos vacíos los hace propensos a la infiltración y escorrentía, con flujos internos y externos sobre la ladera que son direccionados por la pendiente del terreno y de contactos mecánico o hidráulico subterráneo con otros materiales, generando lixiviación, tubificación y erosión por el empuje hidráulico sobre las partículas granulares; esta erosión es más intensa en la superficie del terreno cuando no hay vegetación (Figura 4).



*Figura 4 Procesos de erosión laminar, surcos y cárcavas, en materiales arenosos, provenientes de la meteorización de rocas ígneas cristalinas, tipo granodiorita (Rivera et al., 2017).*

(Pla, 2013), establece que los procesos de erosión que afectan los materiales permeables, son más comunes en laderas de pendientes suaves a moderadas; se asocian a eventos de lluvia de gran intensidad; a la alta separabilidad de las partículas del suelo en la superficie del terreno; a la degradación de la estructura del suelo que reduce la infiltración y a la pobre cobertura la vegetación (*Figura 5*).

Una vez iniciada la erosión, los materiales gruesos son atacados por los movimientos en masa, debido a la pérdida de soporte lateral y de fondo en los cauces o drenajes.

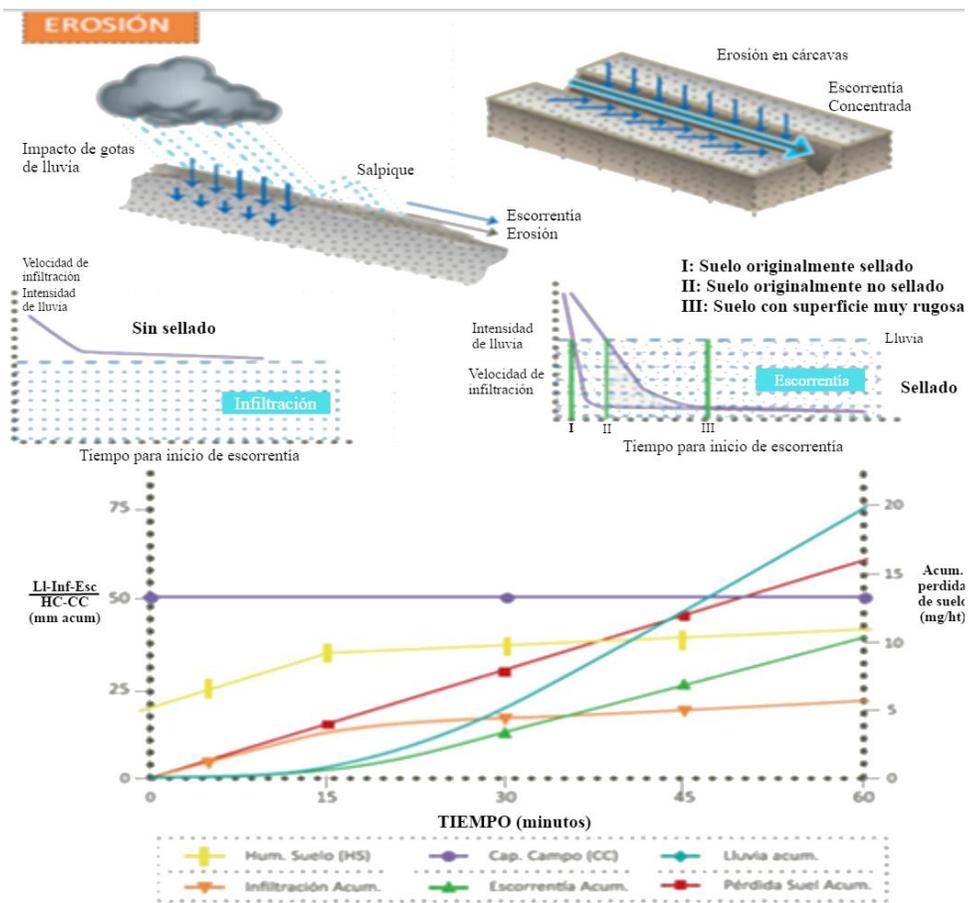


Figura 5 Proceso simulado de erosión superficial, con sus bases hidrológicas en un Suelo tipo Alfisol franco-arenoso; en un estado seco de Humedad inicial; sin Cobertura (Desnudo); en una ladera de Pendiente del 6%; una Tormenta simulada de 60mm/h y un Periodo de Retorno (PR) de 2 años (PR=2años. Pla, 2013).

### 1.1.1.1 Comportamiento erosivo por escorrentía superficial

Pla, I (2013), establece que en los materiales arenosos, durante una tormenta rápidamente se sellan los poros y se inicia la escorrentía (Figura 6); que la escorrentía en materiales arenosos sellados originalmente antes de la lluvia se establece más rápido y en menor tiempo que en materiales arenosos con los poros abiertos pero que se sellan durante la lluvia (originalmente no sellados); además establece que en laderas con superficies rugosas, la escorrentía se establece más tarde que en los suelos originalmente sellado o sellados durante la lluvia (Pla, I. 2013).

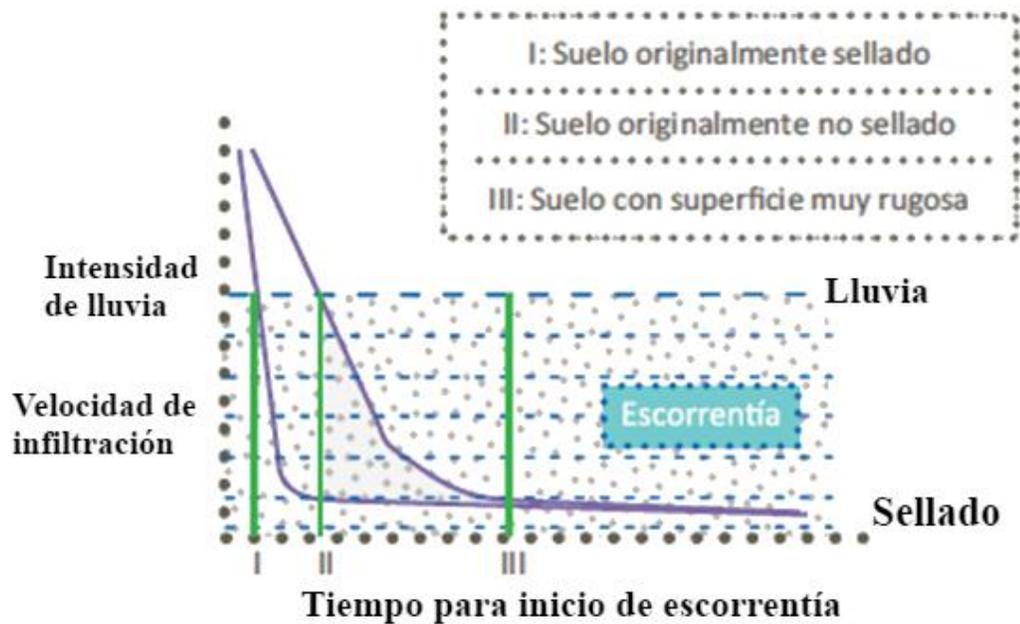


Figura 6 Tiempos para la escorrentía e infiltración, en un Alfisol franco-arenoso, del ejemplo de la Figura 5 (Pla, 2013).

Pla, 2013, plantea que la infiltración finaliza al establecerse la escorrentía y que solo hay infiltración total cuando los poros del material arenoso, no están sellados antes de la tormenta y no se sellan durante, ni después de esta.

La escorrentía que se inicia rápidamente en los materiales arenosos, encuentra condiciones propicias para erodar las partículas, que son transportadas pendiente abajo en suspensión por el agua que escurre laminarmente o como flujos concentrados en surcos y cárcavas de diferentes dimensiones sobre la superficie del terreno.

Una vez generada la cárcava, su escarpe retrocede, generando cada vez una mayor altura de caída del agua y un efecto de cascada que erosiona el suelo, ya que salpica y arremolina el agua contra el escarpe, dejando la parte alta en saliente o negativo (Figura 7, (J. Rivera, 1998)).

La constante erosión por socavación lateral y de fondo, genera cárcavas más anchas que profundas, con forma de U, que continúan aumentando su tamaño lateral y asciende ladera arriba de forma re montante (J. Rivera, 1998).

Las cárcavas indican un grado avanzado de degradación del terreno, ya que se inician con la pérdida superficial del suelo por efecto del impacto de las lluvias (erosión pluvial), que destruye los agregados naturales del suelo, que progresa a erosión laminar y surcos, antes de formarse las cárcavas, que son más comunes cuando el terreno tiene uso y manejo inadecuado de los suelos y ausencia de prácticas de conservación (J. Rivera, 1998).

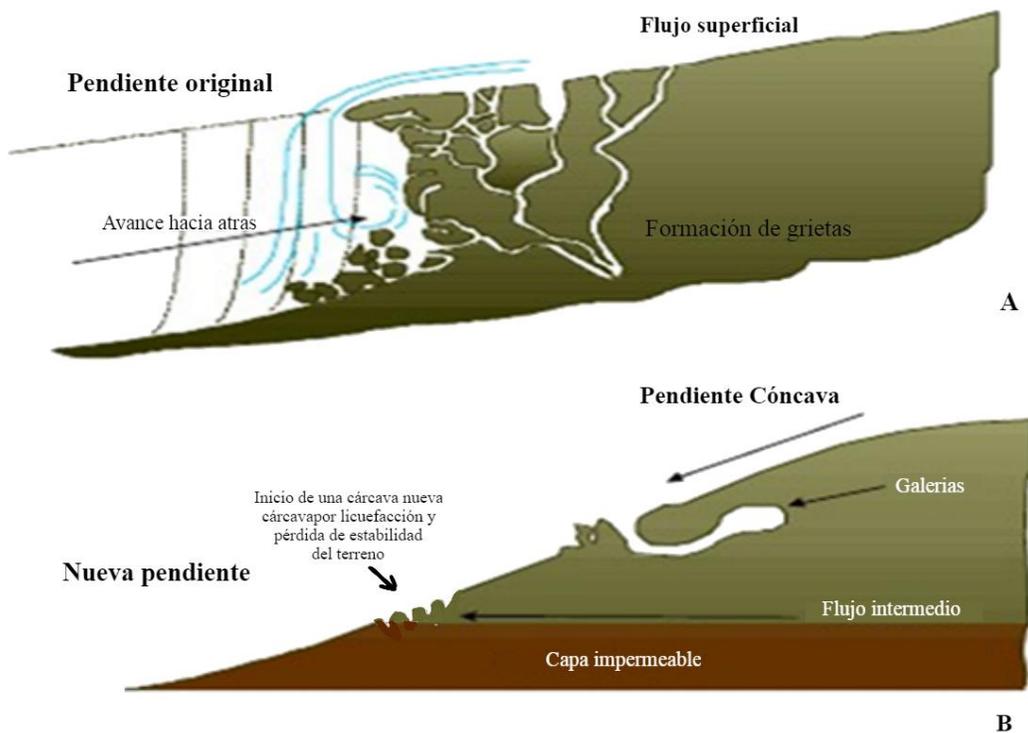


Figura 7 . Esquema del proceso de ampliación de una cárcava (J. Rivera, 1998).

Una vez establecidas las cárcavas, la erosión continúa atacando su base y sus paredes, por socavación de fondo y lateral; que deja sin soporte las mismas arenas, para generar movimientos en masa en sus orillas, lados o vertientes. A partir de los deslizamientos, las cárcavas y los deslizamientos actúan más agresivamente

En las cárcavas re montantes, intervienen aguas superficiales y sub superficiales, que ocasionan saturación del material, profundización del cauce, destrucción de taludes, agrietamientos, movimientos en masa, represamiento de aguas y flujos o avalanchas (Rivera, 1998).

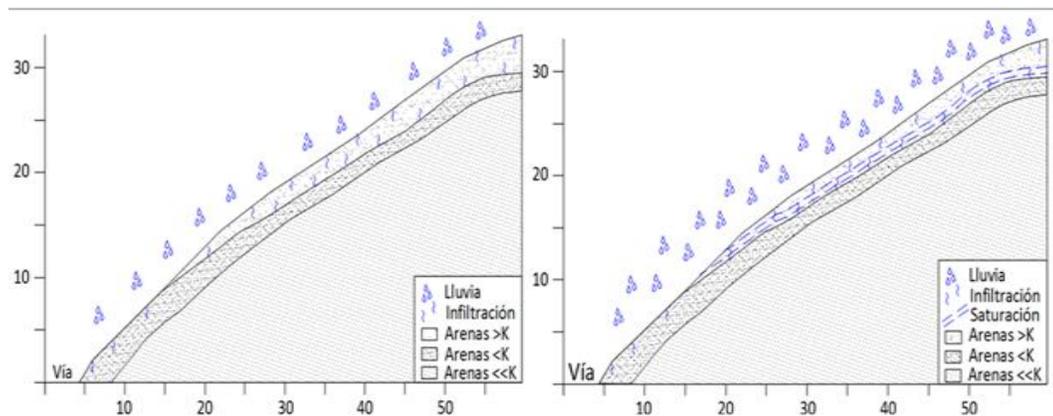
**1.1.1.2 Comportamiento erosivo por infiltración, flujo por contacto hidráulico, emergencia en superficie y escorrentía superficial.**

Pla, 2013, en materiales arenosos condiciona la infiltración total, cuando los poros no están sellados antes, ni se sellan durante y después de la tormenta (*Figura 8*). Rivera, Sánchez, Franco, & Osorio, 2017, establecen la secuencia de infiltración, percolación y flujo de agua en los materiales permeables. Esta secuencia inicia con la infiltración, sigue la percolación que la desciende a profundidad hasta alcanzar un contacto hidráulico con un material de menor permeabilidad, sobre el que se apoya el material arenoso (J. Rivera et al., 2017)



*Figura 8 Infiltración total en un Alfisol franco-arenoso, del ejemplo de la figura 5 (Pla, 2013).*

(J. Rivera et al., 2017) establecen posteriormente que si el suministro de agua continúa, el agua se acumula y llena los poros, ascendiendo en las arenas por encima del contacto hidráulico, hasta que alcanza una altura que le permite fluir a través de este contacto buscando salir a superficie (Figura 9).



*Figura 9 . Inicio del proceso de infiltración en materiales arenosos. El agua infiltrada alcanza el contacto hidráulico entre arenas permeables y arenas menos permeables. El material empieza a saturarse desde el contacto hidráulico hacia la superficie (J. Rivera et al., 2017)*

Rivera et al 2017, plantean que en donde el flujo alcanza el borde libre del talud y emerge como un nacimiento o manantial, empieza a erosionar las arenas por encima del contacto hidráulico, generando una pérdida de soporte lateral de este y formando un negativo sobre el terreno (Figura 10).

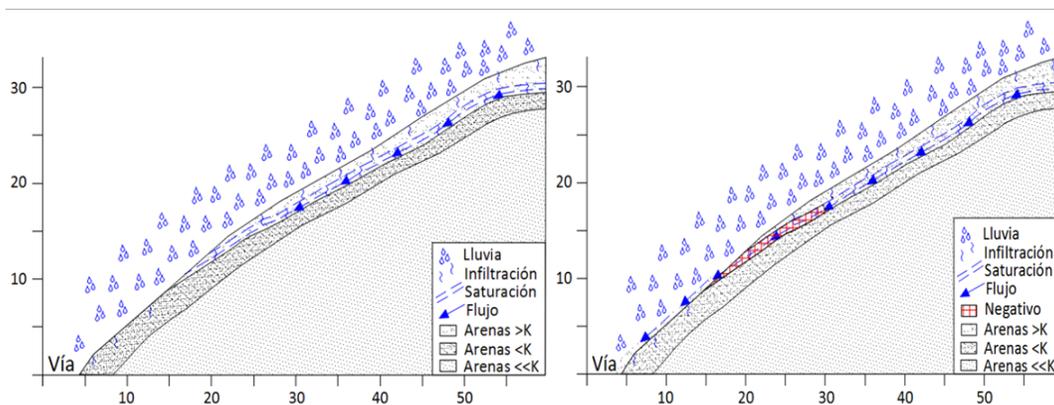
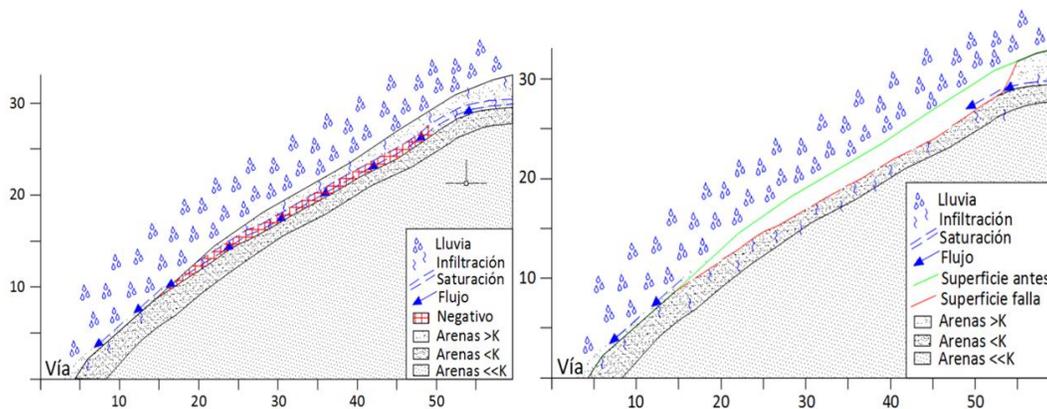


Figura 10. Sobre el contacto hidráulico empieza a generarse un flujo de agua, movilizado por la fuerza de la gravedad. El agua empieza a emerger en la cara libre del talud como un manantial y empieza a erosionar el material grueso, que se ubica sobre el contacto hidráulico. (J. Rivera et al., 2017)

Simultáneamente la escorrentía empieza a erosionar todo el material superficial suelto, generando las cárcavas, como se describió en el comportamiento erosivo por escorrentía superficial. Con el incremento de la lluvia y el caudal que fluye por este contacto, desde la superficie el negativo aumenta su tamaño hacia el interior sobre el contacto hidráulico, incrementando la pérdida de soporte lateral y generando pérdida de soporte de fondo de la capa de arena, hasta fallarla por la superficie del contacto hidráulico, como en el proceso de la vereda El Líbano del municipio de la Calera (Figura 11). Rivera et al 2017, plantean que el material arenoso involucrado en el deslizamiento, no falla alcanzando su máxima resistencia, sino por la pérdida de soporte que establece la socavación de fondo por la socavación de fondo sobre el contacto hidráulico, que la deja sin apoyo, como sucede cuando a una persona le quitan el piso que lo soporta.



*Figura 11 El incremento del flujo de agua erode los materiales gruesos por encima del contacto, genera un aumento en el tamaño del negativo. La pérdida del soporte lateral y basal, genera un deslizamiento planar a través del contacto hidráulico, si el espesor es pequeño. (J. Rivera et al., 2017)*

La bioingeniería, mediante la construcción de obras, logra captar y disminuir la velocidad de las aguas de escorrentía e infiltración, evitando los procesos erosivos y la saturación de terrenos, permitiendo la restauración ecológica con la siembra de especies forestales y la sucesión natural de la vegetación.

(Rivera, 2013), considera que “el drenaje interno” contribuye a la estabilización de las masas de suelo, ya que controla el flujo de agua subterránea, al tiempo que reduce las presiones de poros y aumenta la cohesión y la resistencia del suelo a los deslizamientos, recomendando que se deben conducir y disponer en lugares seguros, como drenajes naturales y cunetas”.

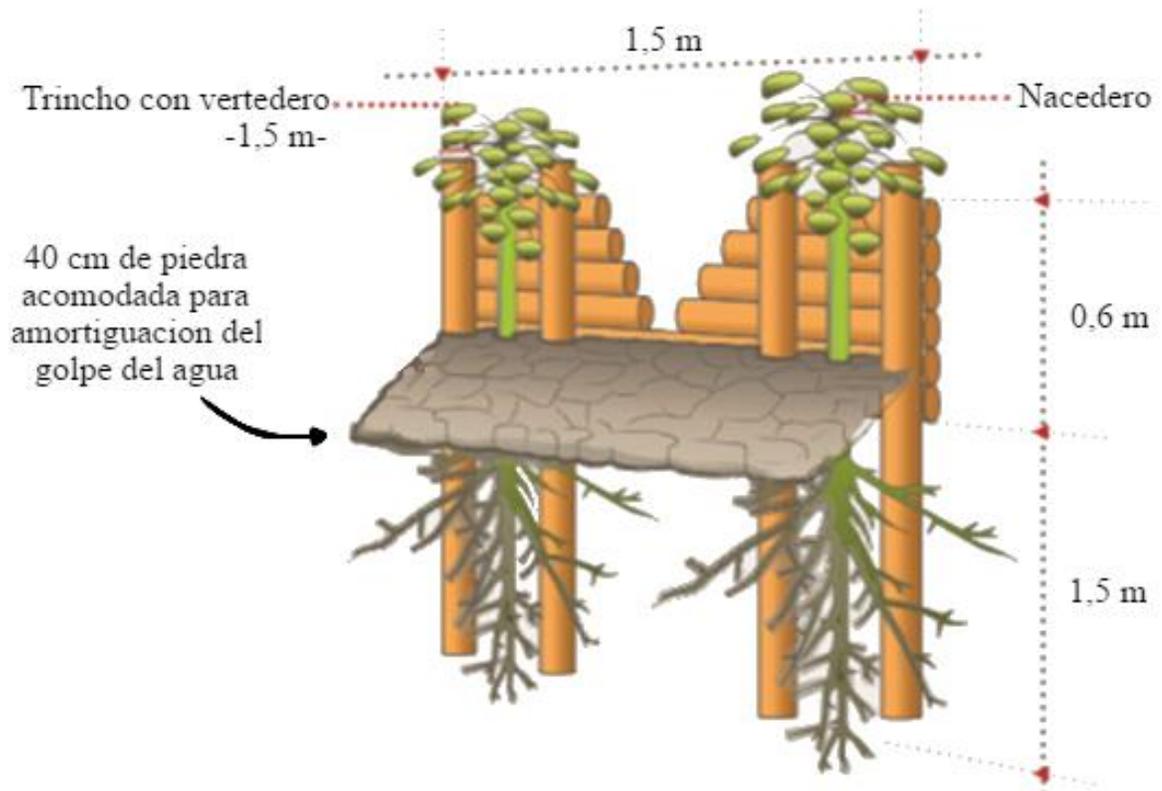
(Rivera, 2013), plantea que “por lo general, el 98% de los movimientos en masa, están relacionados con la saturación de los suelos por el agua y la deforestación de las laderas”, situación que se contrarresta al implementar soluciones bioingenieriles, como filtros vivos que favorecen de manera importante la evacuación del exceso de agua de los terrenos afectados y otras estructuras de modelación de la pendiente, como los

trinchos escalonados tipo terrazas y/o pantallas, que protegen el terreno de la erosión superficial y profunda.

(Rivera, 2013), establece que la textura y la permeabilidad de los materiales de un terreno, determina el tipo de estructura bioingenieril, que se requiere implementar con el fin de captar, conducir y disponer las aguas, para así controlar los efectos de los procesos de infiltración y escorrentía.

### ***1.1.1.3 Obras de bioingeniería en materiales gruesos***

En los materiales arenosos, (Rivera, 2013), recomienda que las aguas superficiales se deben controlar con TVEVA (Figura 12) o dique abierto, para controlar la erosión lateral y de fondo, evitando el ensanchamiento de los surcos, cárcavas y cauces; los TVEVA se deben escalonar a todo lo largo del cauce del drenaje.



*Figura 12. Esquema de un trincho en vertedero abierto, para controlar erosión en materiales arenosos.  
(J. Rivera et al., 2017)*

Esta estructura se debe complementar con trinchos vivos escalonados de ladera (TVL), cuya altura máxima no sobrepase los 0,35 metros, para controlar los efectos de la erosión por escorrentía a través de la ladera (Figura 13).

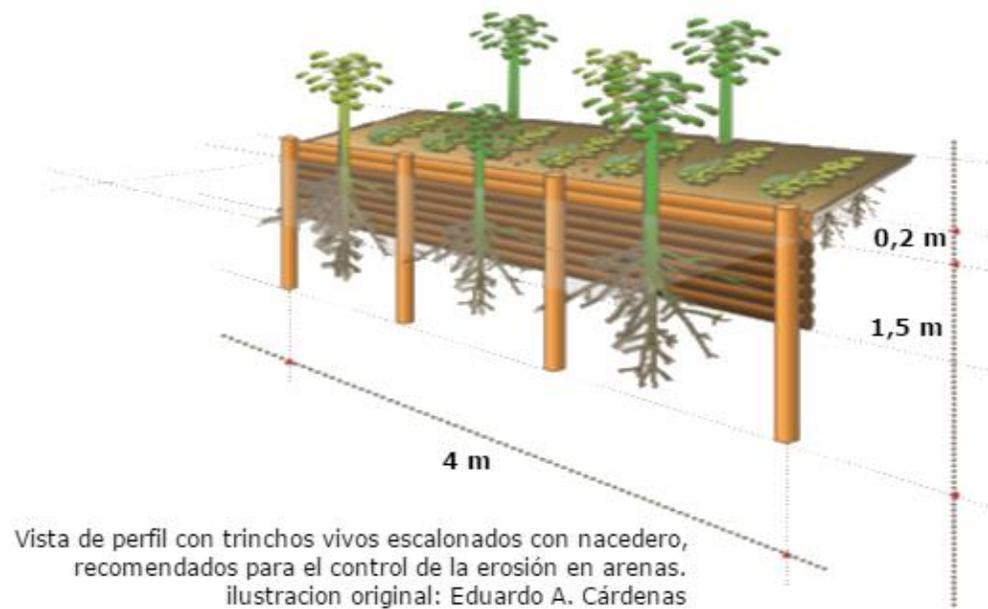


Figura 13. Trincho vivo escalonado a través de la ladera -TVL. (J. Rivera et al., 2017).

### **1.1.2 Respuesta de los materiales finos poco permeables a los procesos denudativos**

Los materiales finos (arcillosos, franco arcillosos, lodosos, franco lodosos y arcillosos lodosos), son muy porosos, pero sus poros no están conectados, generando materiales poco permeables (conductividad hidráulica) y con propiedades cohesivas. Esto indica que los poros no son espacios entre las partículas, sino en la estructura cristalográfica de los minerales del grupo de los filosilicatos también denominados arcillas, son microscópicos y el agua se adsorbe mediante un enlace o fuerza intermolecular de las moléculas  $H_2O$  con las moléculas  $O_2$  del silicato ( $SiO_2$ ), en la estructura cristalina de las arcillas, por lo que el agua no puede fluir y genera presión de poros al interior de los minerales. Rivera et al., 2017, plantean que los materiales no permeables son más propensos a los deslizamientos, debido a este humedecimiento y saturación desde la superficie hasta la profundidad de un contacto hidráulico o que las condiciones de la lluvia lo permita, que genera presión de poros hasta superar la resistencia al corte de estos materiales y fallan, para iniciar un movimiento en masa ladera abajo (Figura 14).



*Figura 14. Deslizamiento diédrico – flujo de tierras en arcillolitas y lodolitas arcillosas de la formación Quebrada Grande, con erosión en cárcavas, surcos, laminar y pluvial. (J. Rivera et al., 2017).*

(Pla, 2013), establece que los movimientos en masa tipo deslizamientos (Figura 15), generalmente afectan materiales finos (arcillosos y lodosos), con una excepcional resistencia a procesos de erosión superficial, debido a su muy estable estructura (Pla, 1996), que se saturan y pierden resistencia por la presión de poros que genera el agua en su estructura.

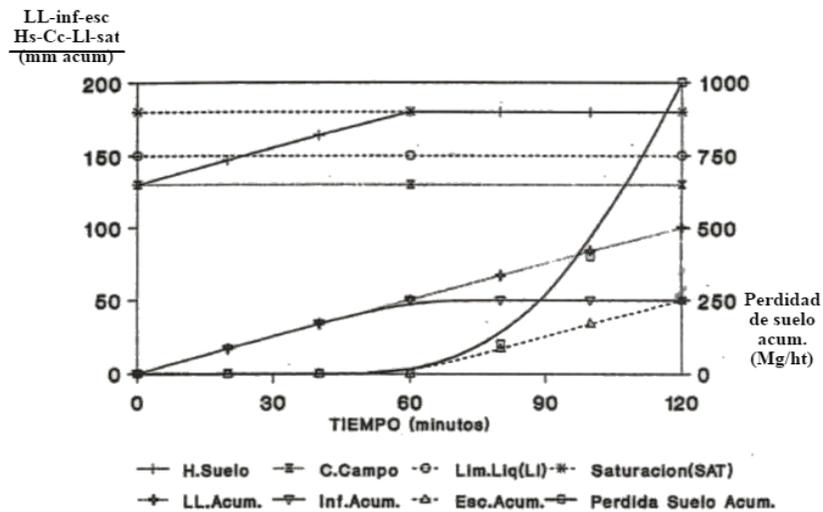
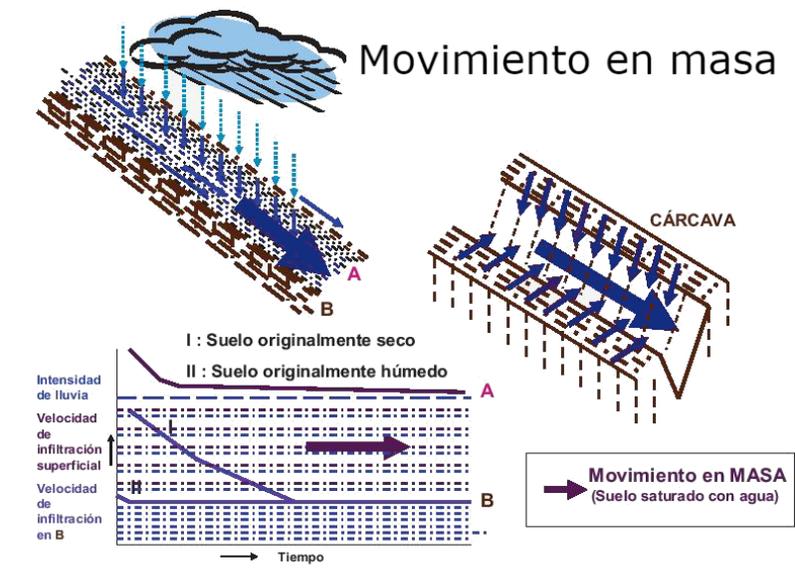


Figura 15. Proceso simulado de erosión en masa y sus bases hidrológicas, en un Suelo tipo Ultisol franco-arcilloso, con Humedad inicial en Capacidad de campo y Cobertura de Pastos; en un terreno con Pendiente del 50% y una Tormenta simulada de 100mm/2h y PR de 10 años (Pla, 2013).

Las probabilidades de deslizamientos se incrementan en medias a altas pendientes (15% a 30%), por el incremento de la relación entre la fuerza de deslizamiento en el sentido de

la pendiente del plano potencial de deslizamiento y la fuerza en sentido vertical (peso del suelo húmedo, con consistencia hacia el fluido ((Pla, 1996), Figura 16).

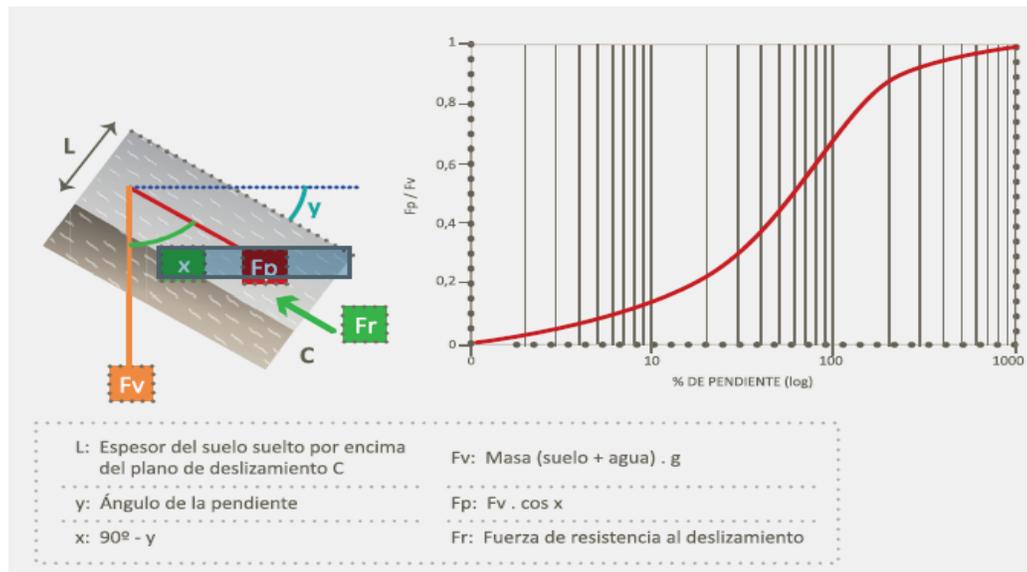


Figura 16. Relación entre la pendiente del terreno y la relación entre la fuerza que empuja el deslizamiento en el sentido de la pendiente ( $F_p$ ) y la fuerza en sentido vertical ( $F_v$ ) o peso del material húmedo en la consistencia que se hace fluido ( $F_p/F_v$ , Pla, 2013).

La relación entre la pendiente y la relación de fuerzas ( $F_p/F_v$ ), establece que a mayores valores de ( $F_p/F_v$ ), se incrementan las posibilidades de deslizamientos, siempre que  $F_p$  sea mayor que  $F_r$  ( $F_p > F_r$ ).  $F_r$ , es la fuerza de resistencia al deslizamiento, debida a la cohesión entre partículas, a la fricción entre partículas y agregados, al entramado y anclaje de las raíces y a la fricción del material deslizante sobre la superficie de deslizamiento (Pla, 2013).

**1.1.2.1 Comportamiento a los movimientos en masa por humedecimiento y saturación desde la superficie hacia profundidad.**

En materiales arcillosos, se condiciona el humedecimiento y la saturación desde la superficie hacia profundidad, a las condiciones secas o húmedas de estos materiales antes de la tormenta (Figura 17) (Pla, 2013).

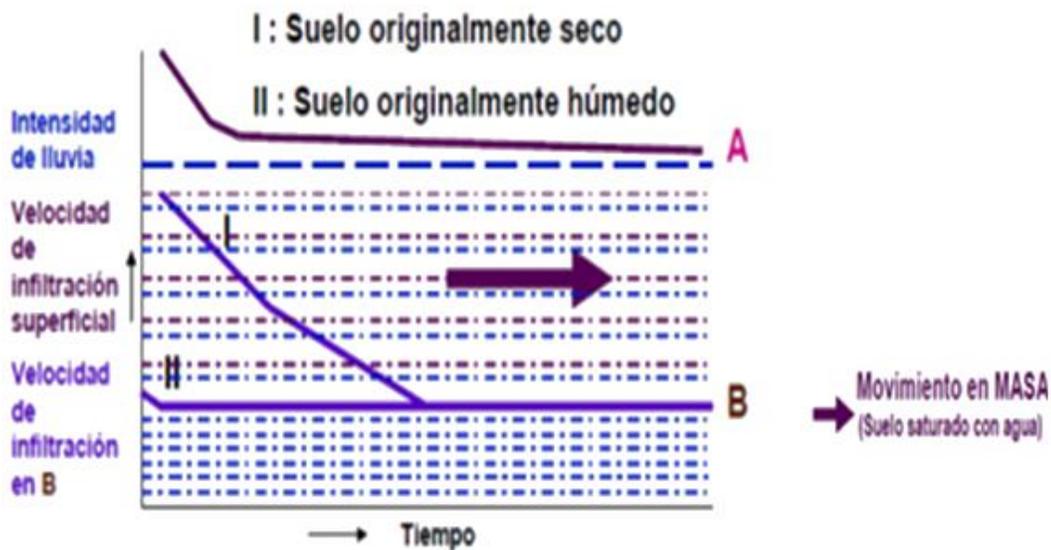
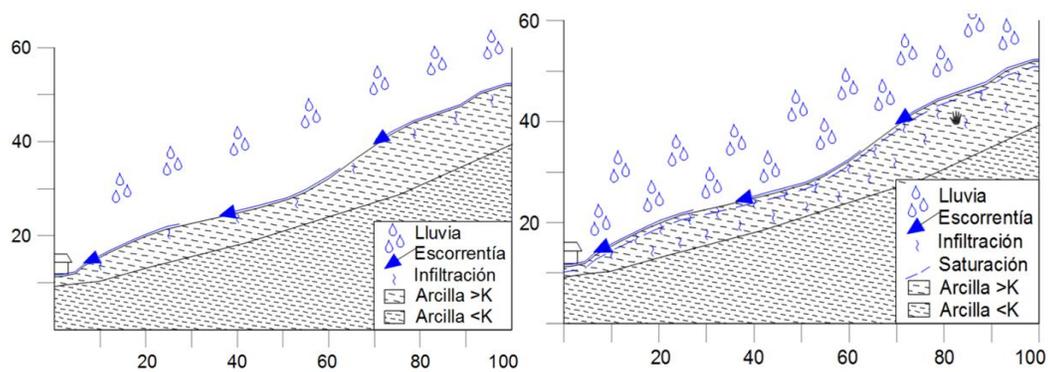


Figura 17. Proceso simulado de movimiento en masa, en un Suelo tipo Ultisol franco-arcilloso, seco y húmedo antes de la tormenta, en el ejemplo de la Figura 16 (Pla, 2013).

Rivera et al., 2017 establecen que al inicio de la temporada invernal, el agua que logra humedecer las arcillas en la superficie del terreno, se transmite de una arcilla a otra, cuando la arcilla superficial adsorbe agua y alcanza su máxima expansión de volumen o saturación (100 veces y 300 veces su volumen, para los caolines y las montmorillonitas),

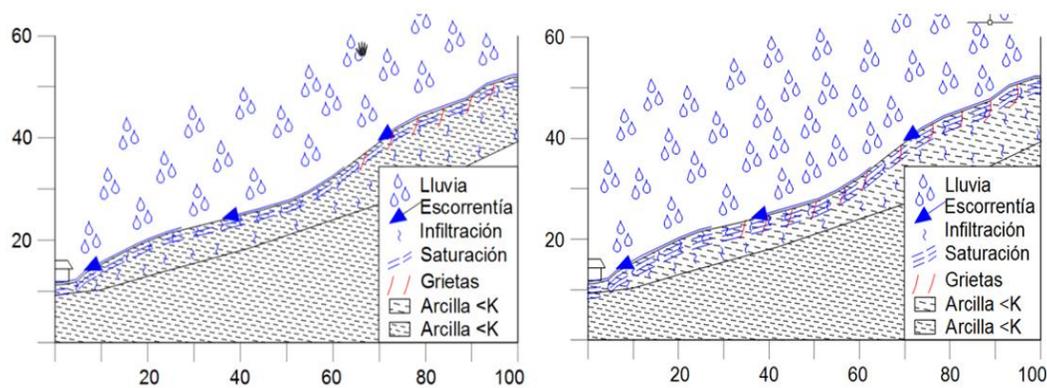
trasladando el agua adicional por la nueva gota de agua lluvia que la impacta, a las arcillas que la rodean en profundidad y lateralmente. (Figura 18).

El agua humedece poco a poco los materiales desde la superficie, hasta el contacto hidráulico, generado por arcillas de menor permeabilidad (Figura 18).



*Figura 18. El proceso de infiltración en materiales arcillosos, establece que el agua lluvia humedece y satura el material, desde la superficie hacia abajo en profundidad. (J. Rivera et al., 2017).*

Rivera et al (2017), plantean que a medida que el espesor del material saturado incrementa a profundidad, se genera una deformación de la parte superficial del terreno, con agrietamientos a lo largo de la ladera, aumentando la infiltración y el contenido de agua en el material (Figura 19).



*Figura 19. Modelo hidrogeológico, con material superficial saturado y terreno que empieza a deformarse y agrietarse, aumentando la infiltración y la saturación. Aumento de la profundidad del nivel de saturación en el material y de la profundidad, deformación y agrietamientos en el terreno. (Rivera et al., 2017).*

Por ultimo (J. Rivera et al., 2017), establecen que si continua el suministro de agua, el material pierde por completo sus propiedades resistentes (cohesión) y se produce la falla por corte a través del material completamente saturado por encima y el material húmedo por debajo de este, generando el deslizamiento (Figura 20).

En algunos casos, la causa indirecta de estos deslizamientos, son trabajos o prácticas de conservación (terrazas, camellones, entre otros), que para controlar o reducir las pérdidas de agua por escorrentía y de suelo por erosión superficial, concentran el humedecimiento y saturación en algunas partes del terreno y establecen las condiciones favorables para generar deslizamientos.

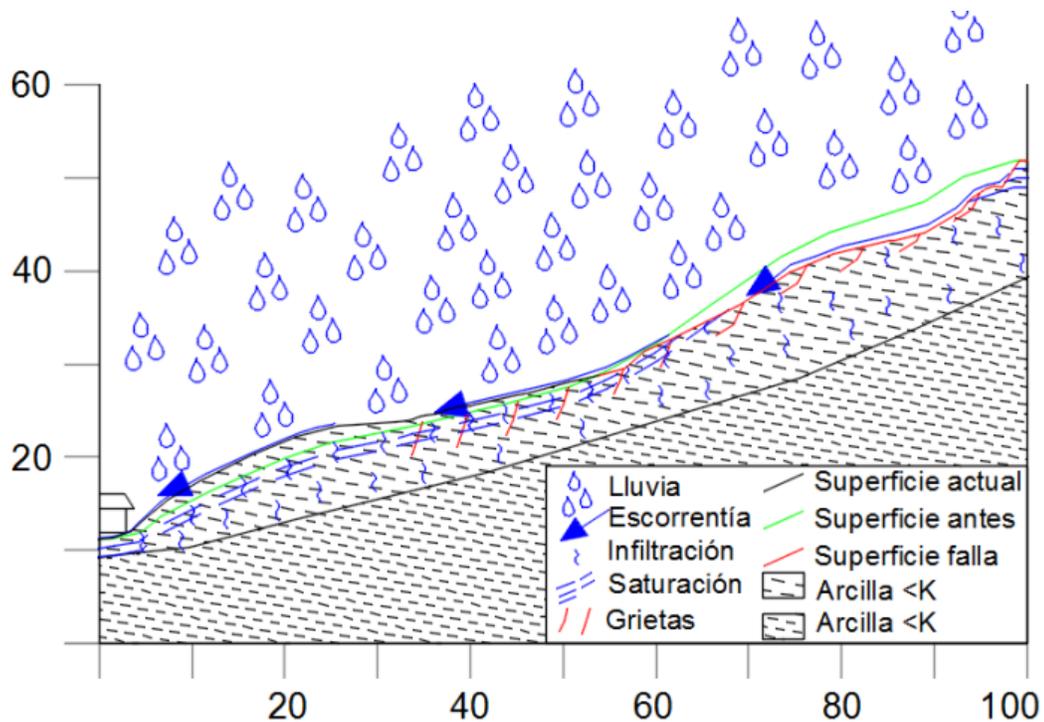


Figura 20. Modelo hidrogeológico, con materiales superficiales saturados, que por exceso de agua, el material pierde totalmente su cohesión, falla y fluye, depositándose al pie del corte. (Rivera et al., 2017).

Rivera et al (2017), plantean que cuando la capa de los materiales arcillosos tiene bastante espesor, la superficie de falla no alcanza en profundidad el contacto hidráulico, generando el típico deslizamiento circular, como fue el proceso en la vereda Tolú Bajo del municipio de Mesa.

### ***1.1.2.2 Obras de bioingeniería en materiales finos***

La bioingeniería (Rivera et al, 2017), mediante la construcción de obras, logra captar y disminuir la velocidad de las aguas de escorrentía e infiltración, evitando los procesos erosivos y la saturación de terrenos, responsables de la generación de los movimientos en masa. Permite la restauración ecológica con la siembra de especies forestales y la sucesión natural de la vegetación.

En materiales arcillosos y lodosos, se controla la saturación con biofiltros vivos (BFV) que drenan los materiales saturados y deben soportarse cada cuatro, cinco o seis metros (según la longitud disponible de la guadua), con trinchos de ladera (TVL) empotrados profunda y lateralmente, denominados en este trabajo como BFV.

Los biofiltros se construyen como una zanja que alcanza los materiales saturados en profundidad, donde se disponen 4 a 5 tendidos o camas de guaduas, el primero apoyado sobre una capa vegetal (retazos de pasto) que cubre el fondo de la zanja y luego una sobre otra, hasta completar los tendidos diseñados. Sobre el tendido superior, se coloca otra capa vegetal y posteriormente se recubre con el material excavado en la zanja, lo suficientemente compactado para no erodarse por escorrentía (Figura 21).

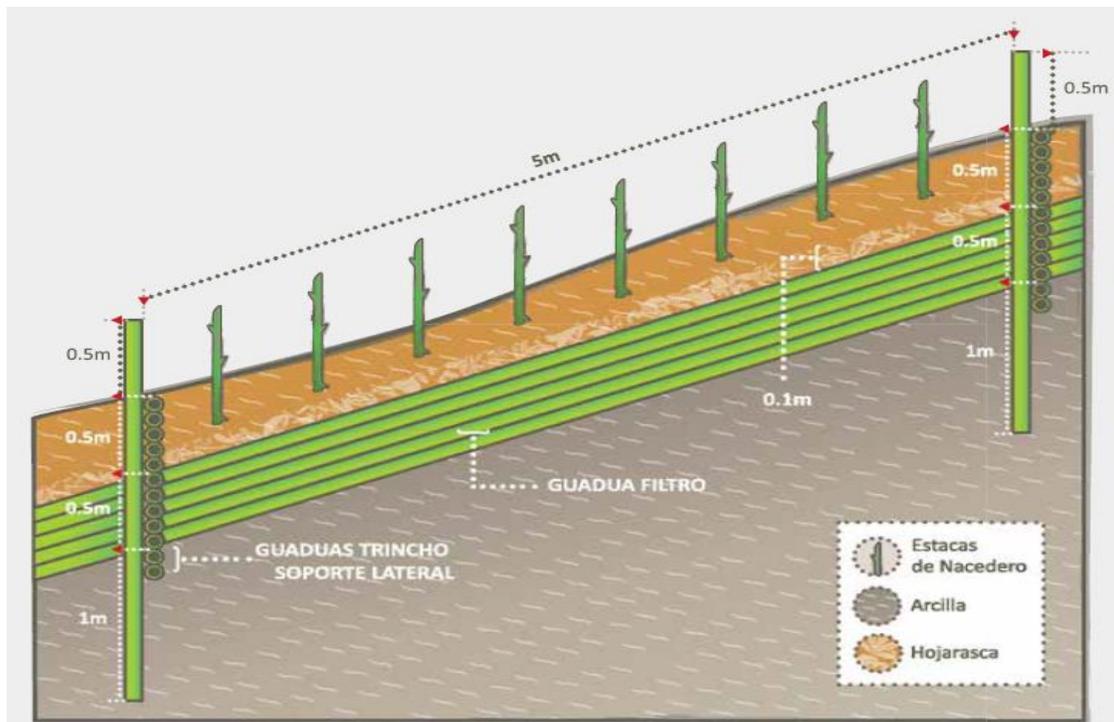
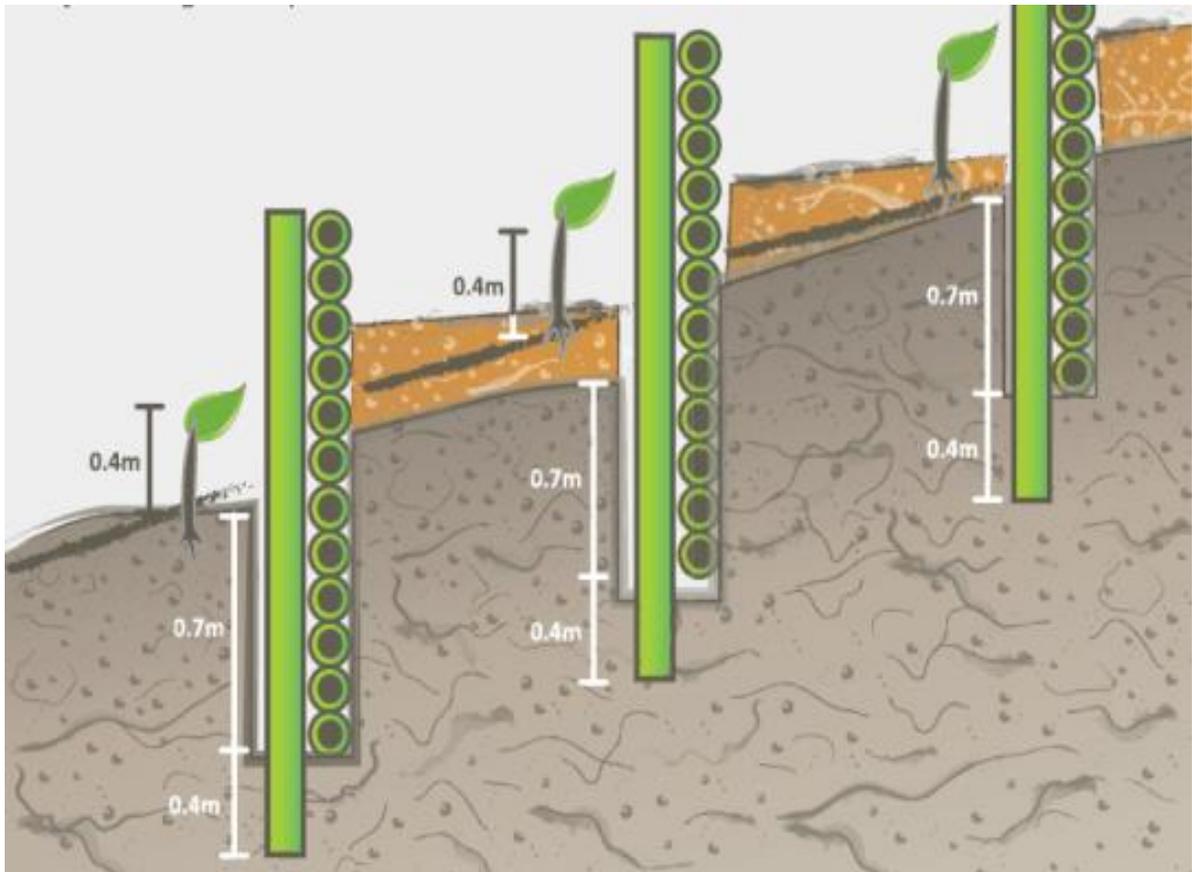


Figura 21 Sección de cinco metros de un Biofiltro en guadua. ((Rivera et al., 2017)).

Estas obras se complementan con trinchos vivos escalonados de ladera (TVL), cuya altura máxima no debe superar los 0,85 metros, para la adecuación y el control de la erosión por escorrentía en la ladera (Figura 22).

Para las obras se utiliza guadua (*Guadua angustifolia*), Quiebra Barrigo o Nacedero (*Trichanthera gigantea*), Mata Ratón (*Gliricidia sepium*) y Caña Brava (*Gynerium sagittatum*) entre otros, que se complementan con piedras y escombros de construcciones sino se dispone de suficiente guadua.



*Figura 22 Trincheras vivas escalonadas, configurando una terraza. (Rivera et al., 2017).*

Las obras se complementan con la siembra de especies para vegetar el terreno, los sistemas de raíces establecen la distribución hidráulica del agua, la disminución de la presión de poros, la velocidad, el volumen y la dirección de los flujos de agua (Figura 23; Moscoso, 2003, Mataix y López, 2000 y Rivera, 2006, en (J. Rivera, 2008)).

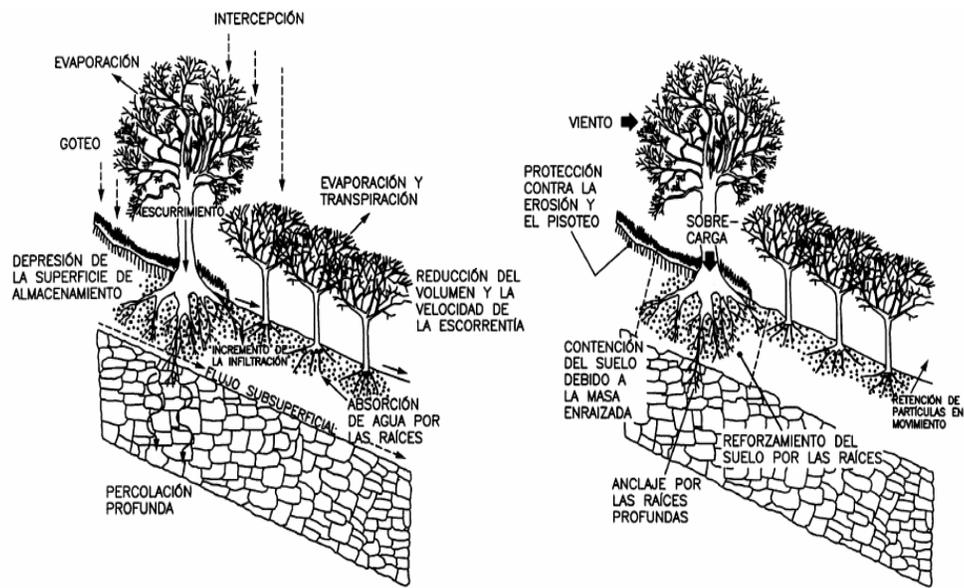
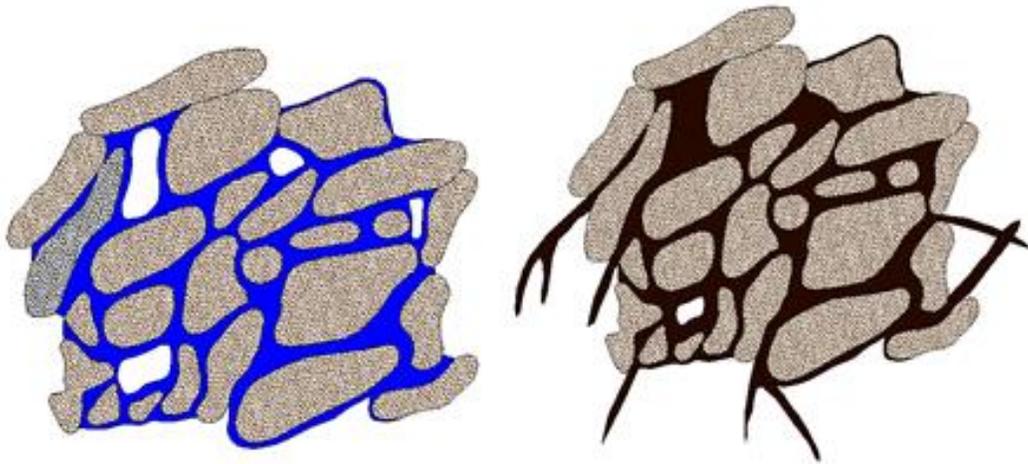


Figura 23. Influencia de las raíces en la velocidad, el volumen y la dirección de los flujos de agua (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2000 y Rivera, 2006, en Rivera, 2008).

Por lo tanto las raíces distribuyen la humedad dentro del suelo, disminuyendo las presiones de poros (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2000, Rivera, 2006, en (J. Rivera, 2008); Figura 24 ).



*Figura 24. Distribución de la humedad dentro del suelo, disminuyendo las presiones de poros (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2000, Rivera, 2006, en Rivera, 2008). Color gris: Partículas de suelo; color azul: Poros con agua y color café: Poros con aire.*

## **1.2 Contribución Mecánica**

El suelo, material fuerte en compresión pero débil en tensión (Pollen, 2007), se mezcla con las raíces, débiles en compresión pero fuertes en tensión, generando un material (suelo raíces) con una mayores cohesión, resistencia y conductividad hidráulica, que evita los procesos denudativos de erosión y movimientos en masa. Las raíces en el suelo, producen una matriz reforzada, en la que el esfuerzo se transfiere a las raíces durante la carga del suelo, de forma similar a las estructuras de concreto reforzadas con acero y fibra de vidrio (Pollen, 2007; Thorne, 1990).

Este refuerzo de las raíces en un suelo, depende de la densidad y la resistencia a la tensión de las raíces (Greenway, 1987), la separación de los plantas/árboles (densidad de árboles), la variedad de especies y la profundidad del suelo (Watson & Mardern, 2004). El mecanismo de generación del refuerzo es complejo, dependiendo de la relación areal y volumétrica, longitud, diámetro, profundidad y variedad de las raíces.

El aumento de la resistencia mecánica, se determina con el aumento de la cohesión total (humedad de campo) o efectiva (humedad del límite líquido) del suelo, por el enlace de las raíces con el suelo y la roca, la adhesión de las partículas del suelo a las raíces de las plantas y la interacción suelo - raíces o roca - raíces, con las raíces ocupando los espacios vacíos y disminuyendo la porosidad (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2000, Rivera, 2006, en (J. Rivera, 2008); Figura 25).

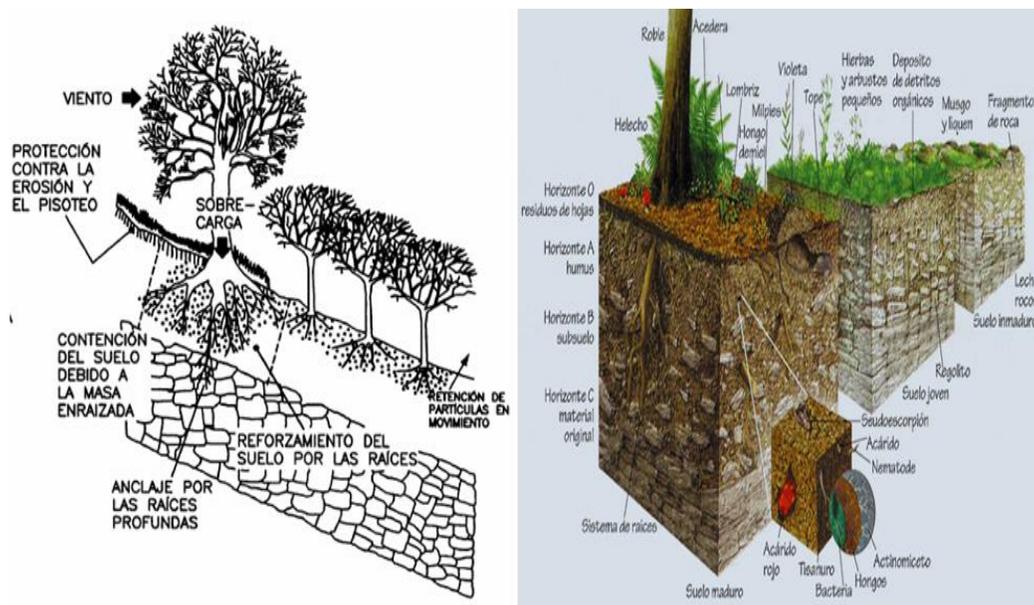
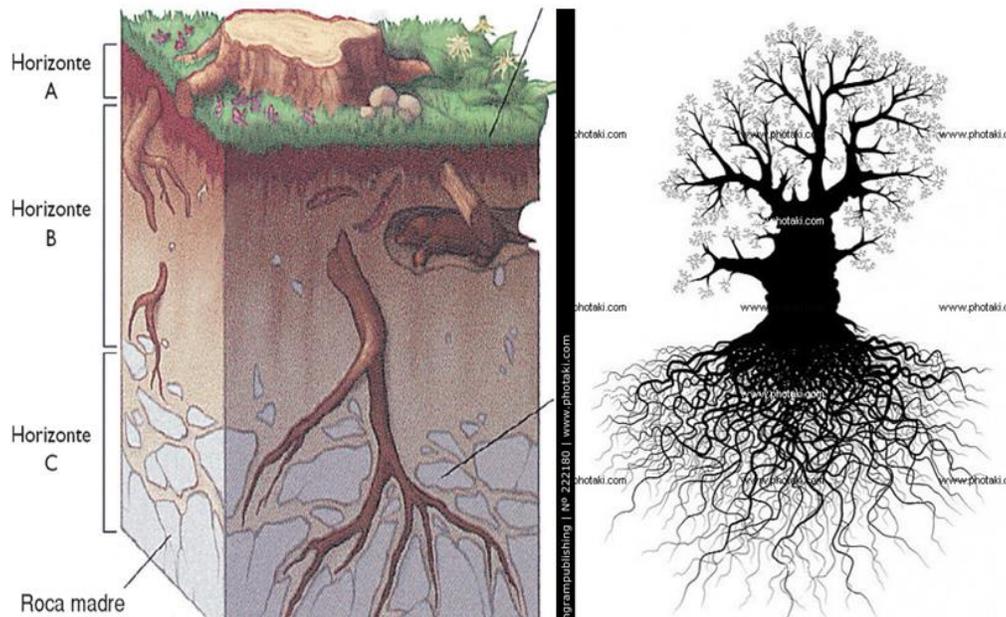


Figura 25. Incremento de la cohesión efectiva del suelo, por el enlace de fibras de raíces con el suelo y la roca y la adhesión de las partículas del suelo a las raíces de las plantas (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2000, en Rivera, 2008).

Aunque se incrementa la carga normal en el suelo por el peso de los árboles, el efecto de la vegetación arbórea y arbustiva en la estabilización de los suelos a los movimientos en masa, establece sistemas radicales de anclaje mayor en lo profundo y hacia los lados en el perfil del suelo, aumentando su resistencia a la ruptura, fracturación y falla (Moscoso, 2003); (Mataix y López, 2007), (Rivera, 2006), en (J. Rivera, 2008); Figura 26).

Las raíces de las plantas, aumentan la resistencia a la ruptura del suelo, en forma directa por reforzamiento mecánico e indirectamente por la extracción del agua del suelo por evaporación y transpiración (Waldron, 1977, en (J. Rivera, 2008)), haciendo que el suelo permanezca en humedad de campo que permita el desarrollo normal de las plantas. El refuerzo mecánico, se manifiesta en un aumento considerable en la componente

cohesiva, debido al peso de la vegetación y a la interacción entre el suelo y las raíces (O'Loughlin y Ziemer, 1982, en (J. Rivera, 2008)).



*Figura 26. Interacción suelo – raíces y roca – raíces; incremento de la carga normal en el suelo, por el peso de los árboles (Moscoso, 2003; Mataix y López, 2007, Rivera, 2006; tomado de Mataix y López; 2007, en Rivera, 2008).*

De ahí, que la vegetación al remover cantidades considerables de agua del suelo por evapotranspiración, disminuye la presión de poros del suelo. Por lo tanto cuando se remueve la vegetación, se acelera la ocurrencia de deslizamientos, debido a que se aumentan las presiones intersticiales, que disminuyen la resistencia a la ruptura del suelo hasta en un 60% (Swanston, 1969; citado por Ziemer, 1981, en (J. Rivera, 2008)).

### 1.2.1 Refuerzo mecánico

Para verificar el refuerzo mecánico aportado por las raíces, se realizan ensayos de corte directo en campo (Figura 27) y en el laboratorio, sobre en el material con y sin raíces, determinando la cohesión, ángulo de fricción y la resistencia del material de las muestras seleccionadas.

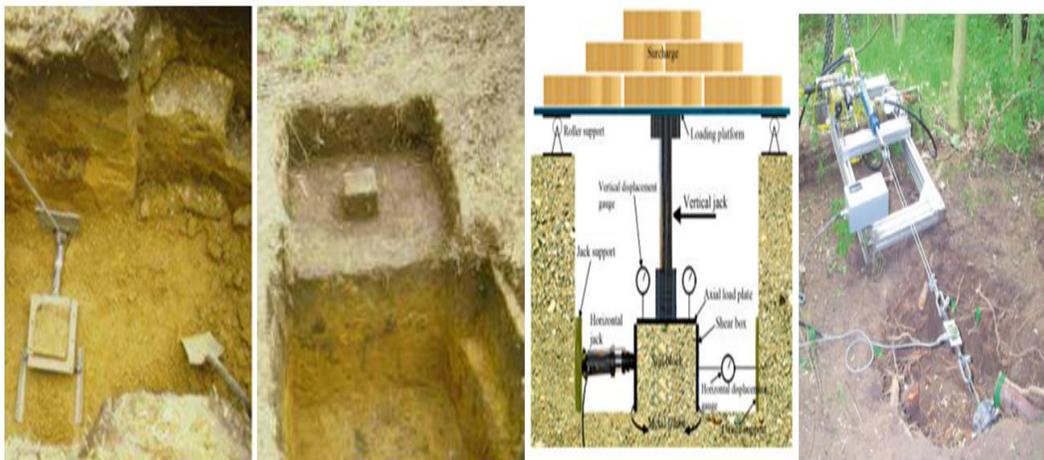


Figura 27. Ensayo de corte directo en un material con raíces de una especie vegetal (Rivera 2008).  
Equipo de campo para pruebas de extracción o arrancamiento in situ (J. E. Norris, 2005)).

La simple diferencia de los resultados da el valor del refuerzo de las raíces a la resistencia del suelo, determinando la variación de la cohesión, el ángulo de fricción y los pesos unitarios seco y húmedo.

Davoudi, (2011), reportó en deslizamientos estabilizados con terrazas de suelo natural arcilloso y con la siembra de vegetación arbórea, que las raíces establecen una leve disminución del 5% en el ángulo de fricción y un incremento entre el 30% y el 80% de la cohesión. Además, disminuye la humedad de los materiales, debido a la evapotranspiración y consumo de agua, disminuyendo la presión de poros dada por el agua en los materiales.

(Waldron, 1977), estableció que las raíces de las plantas aumentan la resistencia a la ruptura del suelo, en forma directa por reforzamiento mecánico e indirectamente por la extracción del agua del suelo por transpiración, haciendo que el suelo permanezca en condición de campo, es decir con un contenido de humedad que permita el desarrollo normal de las plantas.

(O'Loughlin & Ziemer, 1982), estableció que el refuerzo mecánico, aumento considerablemente la cohesión, por el peso de la vegetación y la interacción suelo y raíces. De ahí, que la vegetación, al remover cantidades considerables de agua del suelo por evapotranspiración, disminuye la presión de poros del suelo.

(J. Rivera, 2008), determino la resistencia promedio al cortante tangencial para suelos Melanudands, de las unidades Chinchiná, Montenegro y Fresno en 112,37 kPa, 106,94 kPa y 84,97 kPa, y para suelos Typic eutropepts de las unidades Guamal y Parnaso de 69,65 kPa y 43,83 kPa (Figura 28), de la Zona de Ladera Colombiana.

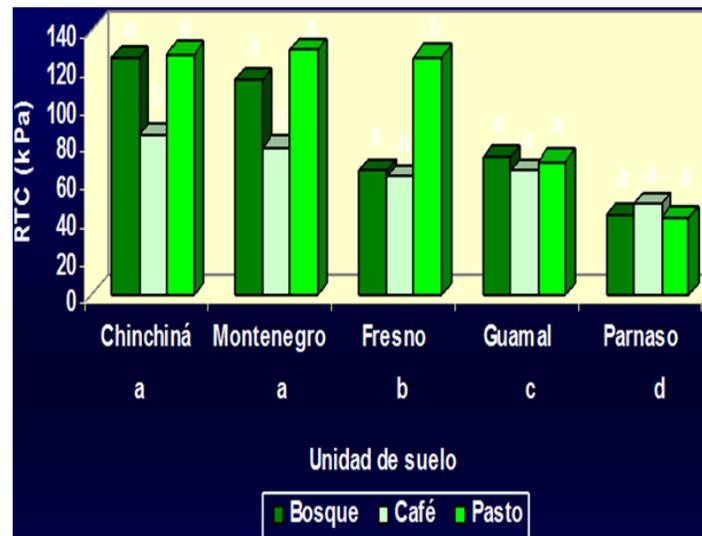


Figura 28 Resistencia promedio al cortante tangencial (kPa) en cinco suelos de la zona cafetera colombiana con tres usos (J. H. Rivera, 1999)

(J. Rivera, 2008), estableció la influencia del sistema radical de algunas especies arbóreas y arbustivas de la Zona Cafetera Colombiana, en la resistencia al cortante tangencial en pruebas de campo. Determinando la mayor longitud promedio de raíces laterales y la profundidad promedio de las mismas, para el Nogal Cafetero (*Cordia alliodora*), con 11,7 m y 2,8 m respectivamente, seguido por *Inga codonantha* con 5,5 m y 2,2 m respectivamente, y para el café (*Coffea arábica*), con 1,2 m y 0,6 m, respectivamente. Además, establece que para estabilizar un terreno, es necesario contar con una población de especies que generen doseles múltiples y estratificadas (multistrata), con sistemas radicales contrastantes, para dar así estabilidad a diferentes profundidades dentro del perfil del suelo. También establece que la vegetación arbórea y arbustiva, permite sistemas de raíces a mayor profundidad y mayor longitud de anclaje a

los lados del árbol en el perfil del suelo; aumentando su resistencia a la ruptura, facturación o falla y aumentando la estabilidad del terreno a los movimientos en masa. (Switala, Tamagnini, Sudan Acharya, & Wu, 2015), plantean que el refuerzo de la raíz, se calcula, utilizando el promedio del número y el diámetro de las raíces. El refuerzo mecánico de las raíces al material superficial, se relaciona con la fuerza de tensión que cizalla la raíz y con la resistencia a la tensión de la raíz, que se miden en pruebas de campo y de laboratorio.

(Switala et al., 2015), en taludes de arenas y arcillas, vegetados uniformemente por pastos, con dimensiones geométricas y formas arquitectónicas de los sistemas de raíces, que generan una capa uniforme hasta 50cm de profundidad, establecen que se generan los valores más altos de Factor de seguridad (Fs), al compararlos con el talud sin vegetación. En taludes arcillosos, cuando la superficie de falla es muy profunda, la presencia de raíces, tiene poco o ningún impacto sobre la estabilidad del talud, ya que la superficie de falla, no es atravesada por la zona de raíces, por lo que el refuerzo del material por las raíces, es más eficiente para superficies de deslizamiento poco profundas o superficiales, que para superficies de falla del deslizamiento profundas. (Switala et al., 2015), establecen que el incremento en los Fs es mayor para taludes compuestos de arena, cuando la zona de corte es superficial y paralela a la superficie. Afirmando que las raíces finas, movilizan plenamente su resistencia a la falla, mientras que el refuerzo proporcionado por las grandes raíces, puede estar relacionado con el valor de la resistencia de la unión al suelo no de la raíz.

(Tosi, 2007), en taludes y laderas lodosas, empinadas entre  $25^\circ$  y  $40^\circ$ , establece la relación entre la resistencia a la tensión de las raíces y la estabilidad, a través de las raíces, que se anclan en el material.

(Ennos, 1990), determina que en los escarpes de los deslizamientos, las raíces grandes, son arrancadas del suelo durante el deslizamiento, mientras que las raíces delgadas, que forman una red más cerrada de unión en el suelo, se rompen.

(Coppin & Richards, 1990; Joanne E. Norris & Greenwood, 2008), establecen que la posición de las raíces delgadas en un sistema de raíces, con respecto a la profundidad y la posición radial alrededor del sistema de raíces, depende en parte de las especies y en parte del medio ambiente local. Las raíces más gruesas de diámetro, proporcionan anclaje a la masa de suelo, donde la superficie potencial de deslizamiento es de poca profundidad, hasta unos 2m.

(Joanne E. Norris & Greenwood, 2008), determinan que la estabilidad a largo plazo de una ladera, se afecta por la posición de los árboles; si las laderas más bajas están sin vegetación, dejando una ladera superior boscosa muy cargada, el peso de la vegetación en la ladera superior, puede resultar en una disminución en el  $F_s$ , aumentando el riesgo de falla del talud. El posicionamiento de árboles en el pie del talud, aumenta los  $F_s$  en un 7%, mientras que la colocación de árboles en el medio o en la parte superior de la ladera, disminuye los  $F_s$  hasta en un 43% para un ángulo de  $35^\circ$  de pendiente del talud. En conclusión establecen que la presencia de raíces de árboles a través de un plano de corte aumenta la resistencia al corte del suelo, ya sea por un aumento en la cohesión aparente o un mecanismo de anclaje.

La cantidad de aumento según (Docker & Hubble, 2008), depende de la cantidad de material de raíz expresado como la relación de área de raíz (RAR) en el plano de corte; (Waldron, 1977); (T. H. Wu, McKinnell III, & Swanston, 1979) establebecen que el aumento es dado por el área de la raíz; (Ennos, 1989, 1990; Waldron & Dakessian, 1981) por la unión raíz suelo; y (Graf, y otros, (2015) en (W. Wu et al., 2015)), por la estabilidad de los agregados del suelo (EAS).

### 1.3 Análisis de estabilidad

(Genet, Stokes, Fourcaud, & Norris, 2010; Reubens, Poesen, Danjon, Geudens, & Muys, 2007; Van Beek, Wint, Cammeraat, & Edwards, 2007), establecen que para la estabilización de un talud contra deslizamientos, el número y tamaño de las raíces que atraviesan la superficie de deslizamiento, son extremadamente importantes.

Tosi, (2007), determina que arboles de raíces pivotantes, en taludes con pendientes menores a  $30^\circ$  y espesor de suelo de 0,6m, tienen mayor Factor de Seguridad (Fs) a mayor profundidad de las raíces pivotantes.

La influencia de la resistencia a la tensión de la raíz en la resistencia al corte del suelo, para el análisis de la estabilidad de taludes se determina mediante el factor de seguridad para diferentes espesores del suelo, diferentes pendientes topográficas, capas superficiales orgánicas y perfiles de meteorización de las rocas, mediante el método de talud infinito de (Bishop, 1955; Fellenius, 1986; Janbu, 1955; Skempton & DeLory, 1984), para superficies de deslizamiento rotacional (circular) y traslacional (planar).

El análisis de estabilidad de laderas y taludes (cortes y terraplenes en laderas), por el método de talud infinito (Skempton & DeLory, 1984), se realiza inicialmente despreciando el peso de los arbustos y el efecto del esfuerzo cortante debido al viento sobre estos árboles. En deslizamientos, los valores de Fs, son muy sensibles a cambios de la cohesión efectiva del suelo ( $C'$ ) y de la profundidad vertical al plano de falla ( $z$ ).

La Figura 29, muestra laderas de montaña a escala regional y taludes (sección de ladera) a escala local, con las fuerzas generadas por la vegetación (árboles y arbustos)

(Greenwood, Norris, & Wint, 2004).

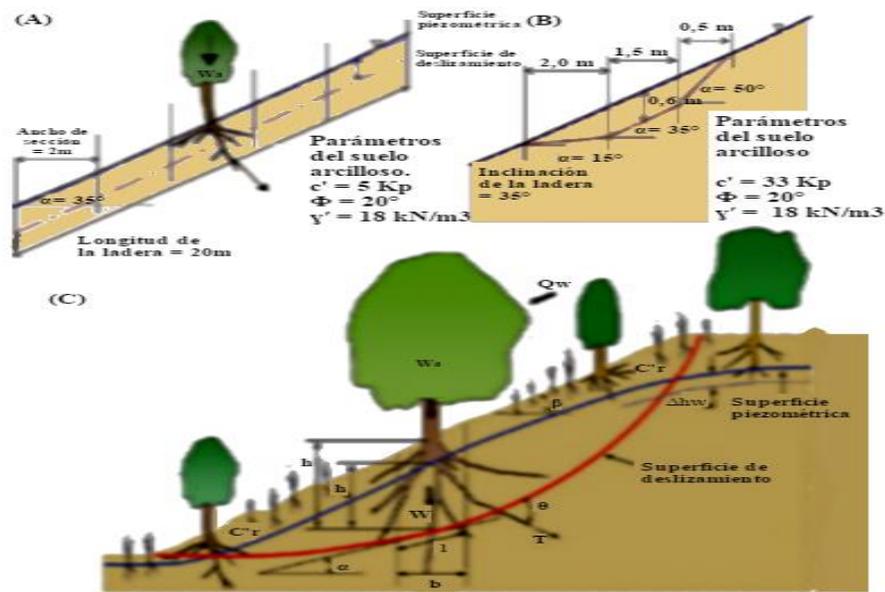


Figura 29. A. Perfil de análisis de estabilidad de laderas con método de talud infinito para deslizamiento planar a escala regional de laderas de montaña. B. deslizamiento semicircular a escala local de taludes de colina (Genet et al., 2010). C. Fuerzas en un talud por la vegetación (Greenwood et al., 2004).

(Greenwood et al., 2004), calcularon los  $F_s$  para suelo sin refuerzo y con refuerzo de raíces de diferentes especies, utilizando los incrementos en la resistencia, generados para la misma profundidad y tipo de arbusto (Figura 30); encontrando para un talud de  $35^\circ$  de inclinación los  $F_s$  para un suelo sin raíces son menores a todas las profundidades y que la carga de los árboles al pie (parte baja) del talud aumentan los  $F_s$  en un 7%, mientras en la mitad o parte superior de la ladera disminuyen los  $F_s$  hasta un 43%; planteando que los árboles individuales o en grupos, desestabilizan taludes escarpados cuando están posicionados en la parte media y superior del talud, mucho más si no hay refuerzo adicional en la parte inferior del talud.

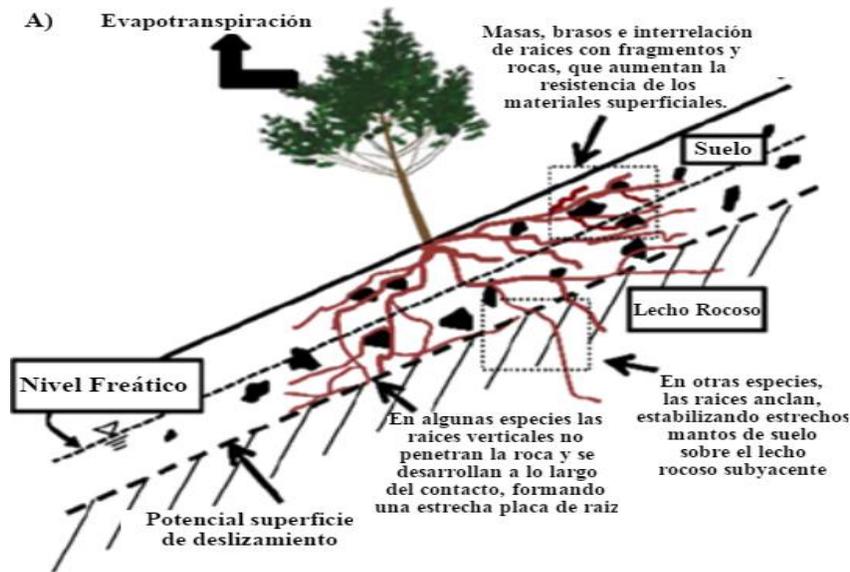


Figura 30. Condiciones de las raíces, con respecto a las condiciones de agua, en superficie de falla planar para talud infinito (Greenwood et al., 2004)

(J. Rivera, 2008), por el contrario, manifiesta que la tala indiscriminada de la vegetación arbórea, no es válida con el argumento del gran peso de los árboles que genera la inestabilidad y los deslizamientos; dado que el esfuerzo generado por el peso del árbol es muy bajo, ya su peso es soportado por el área y hasta el volumen del sistema de raíces. (J. Rivera, 2008), da un ejemplo, para un árbol de 0.25t de peso y longitud lateral total de raíces de 12m (Nogal Cafetero), que tan solo genera un esfuerzo o presión (Peso/Área) de  $0.0022t/m^2$ . Además, calculando el factor de seguridad de un terreno sin vegetación mediante el método del talud infinito de (Morgan & Rickson, 2003)(Ecuación 7) y del terreno con vegetación con la ecuación de (Coppin & Richards, 1990) citados por (Morgan & Rickson, 2003) (Ecuación 8), demuestra que los Fs son mayores con la vegetación, pero recomienda que desde la parte media hacia la alta de la ladera (sección de esta o talud), se siembren arbustos y arboles de tallos o portes medios.

$$F = \frac{C' + (\gamma z - \gamma_w h_w) \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma z \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha} = 1,91$$

*Ecuación 7. Ecuación del método del talud infinito de (Morgan & Rickson, 2003)*

Dónde:

$C'$  = Cohesión efectiva del suelo = 10kN/m<sup>3</sup>.

$\gamma$  = Peso unitario del suelo = 18kN/m<sup>3</sup>.

$z$  = Altura vertical del suelo por encima del plano de deslizamiento = 1m.

$\alpha$  = Angulo de la pendiente (grados) = 35°.

$\phi'$  = Angulo de fricción interna efectivo del material del suelo (grados) = 35°.

$\gamma_w$  = Peso unitario del agua = 9,8kN/m<sup>3</sup>.

$h_w$  = Altura vertical del agua por encima del plano de deslizamiento = 0,5m.

$$F = \frac{(C' + C'R) + \{[(\gamma_z - (\gamma_w h_w)) + W_y] \cos^2 \alpha + T \operatorname{sen} \theta\} \tan \phi' + T \cos \theta}{[(\gamma_z + W_y) \operatorname{sen} \alpha + D_w] \cos \alpha} = 2,96$$

*Ecuación 8. calcula el factor de seguridad con vegetación (Coppin & Richards, 1990) citados por (Morgan & Rickson, 2003).*

Dónde:

$C'R$  = Cohesión efectiva del suelo por el refuerzo de raíces = 5kN/m<sup>3</sup>

$W_v$  = Sobrecarga debido al peso de la vegetación = 2.5kN/m<sup>2</sup>

$D_w$  = Presión del viento paralela a la ladera = 0.1kN/m<sup>2</sup>

$h_w$  = Altura vertical del agua sub superficial por encima del plano de deslizamiento con la vegetación = 0.4m

$T =$  tensión de las raíces actuando en la base del plano de deslizamiento  $= 5\text{kN/m}^2$

$\Theta =$  Ángulo entre las raíces y el plano de deslizamiento (grados)  $= 45^\circ$ .

Morgan y Rickson, (1995), en (J. Rivera, 2008), establecen que los Fs con vegetación incrementan 55% asumiendo la fuerza de tensión de las raíces y solo el 17 %, si este efecto es ignorado, considerando tan solo el esfuerzo dado por el peso de los árboles.

## 2 Desarrollo y resultados

### 2.1.1 Estimación del control hidráulico y refuerzo mecánico de los suelos con las obras bioingenieriles

#### 2.1.1.1 Vereda El Líbano (Municipio La Calera).

Las obras bioingenieriles las desarrollo la CAR de Cundinamarca, para la recuperación de un terreno afectado por un deslizamiento traslacional (planar), con la superficie de falla a través del contacto mecánico e hidráulico entre materiales; el material movilizado obstruyó la vía que conduce a la escuela de la vereda y afectó dos viviendas, una en la parte alta y otra en la parte baja del talud. La construcción de las obras de bioingeniería, se ejecutó con la colaboración activa de la comunidad y la financiación económica del propietario de uno de los predios afectados.

La Figura 31 muestra el estado del terreno entre el momento del proceso de degradación y la evolución con la solución bioingenieril, a los dos años de realizada. La valoración descriptiva de la cobertura vegetal, al año y dos años de la construcción bioingenieril, determinó el porcentaje de prendimiento, crecimiento, desarrollo y cubrimiento de las especies vegetales; la influencia del clima del territorio, aptitud y apropiación de la comunidad y la administración municipal, el mantenimiento de las obras y la presencia y afectación por semovientes y plagas de las especies. Además, se determinó el volumen de material vegetal y suelo movilizado ( $200\text{m}^3$  y  $500\text{m}^3$  respectivamente) y el mes de noviembre de 2012, como fecha del proceso denudativo.



*Figura 31. Deslizamiento planar – flujo de tierra (20 de octubre de 2012).. Solución bioingenieril con BFV, TVEVA y TVL (14 de diciembre de 2014). Fotografías: Jhon Alexis Serrato. Luz Elena Franco García. Vereda el Libano Municipio de la Calera.*

### **2.1.1.2 Monitoreo del sauco y de la sucesión natural.**

En julio de 2013, se iniciaron las obras de la solución bioingenieril (Figura 32) y finalizaron en septiembre de 2013 con la siembra de estacas vivas de sauco, para la restauración vegetal (Figura 33).



*Figura 32. Corona, cuerpo, base y material removido por el proceso denudativo en la vía terciaria el día 21 de noviembre de 2012.*



*Figura 33. Inicio de trinchos y filtros vivos desde la corona del proceso. Panorámica, Filtro principal y Panorámica de la obra (15 de julio, 9, 13 y 26 de agosto 2013).*

En febrero de 2014 a cinco meses de la construcción, gran parte del terreno estaba descubierto de vegetación, pero el 60% de las estacas de sauco retoñaron, con buen rebrote de hojas y alturas entre 0,5m y 0,7m; la sucesión de vegetación natural de arvenses y gramíneas, cubrió los lados y parte baja de la ladera (Figura 34).



*Figura 34. Febrero de 2014. Trinchos vivos con sauco (*Sambucus nigra*). Sauco con altura de 70 cm. Panorámica de la revegetación natural y del prendimiento de las especies sembradas. Trinchos vivos con sauco y cedro (*Cedrela montana*). Rebrotos de pasto. Panorámica de la obra. Fotografías: Alejandra Osorio.*

En agosto de 2014 a 11 meses de la construcción, el 60% de las estacas de sauco que retoñaron desaparecieron y el 40% restante, fue ramoneado por semovientes; esto permite resaltar la importancia de aislar con cercas (alambre de púas) la solución bioingenieril, para evitar el pastoreo de los animales y el desarrollo de la vegetación. La vegetación natural de arvenses cubrió un 80% del terreno, con predominio de los pastos (Figura 35).



*Figura 35. Panorámica de la obra. Sucesión natural y trinchos sin sauco en la parte alta. Agosto de 2014.  
Fotografías: Alejandra Osorio.*

En diciembre de 2014, 15 meses después de la obra hay escasa presencia de sauco, que fue consumido por los animales, pero debería tener 2m de altura, con base en los encontrados en agosto; la vegetación natural de arvenses cubre el 90% del área, indicando la estabilización del terreno (J. Rivera, 2013), por la captación, transporte y control de las aguas superficiales y sub superficiales con las obras bioingenieriles (BFV, TVEVA y TVL). Aun sin cercar el terreno, 1500 estacas más de sauco se sembraron, que corresponden a la mitad de la primera siembra (Figura 36), para protección del árbol al impacto directo de la lluvia y del suelo a la dispersión y arrastre por las aguas de escorrentía.



*Figura 36. Nueva siembra de especies de sauco. Panorámica de la obra. Saucos de 2 m de altura. Cedro de 2,1 m de altura. 17 de diciembre de 2014. Fotografías: Alejandra Osorio.*

En mayo de 2015 (Figura 37), 20 meses después se observó el rebrote del 50% de la segunda siembra sauco y el cubrimiento total del terreno por la sucesión natural de arvenses, indicando aumento de la estabilidad del terreno. (Tsukamoto & Kusakabe, 1984), afirman que aunque las herbáceas no son tan efectivas como las leñosas para el restablecimiento de las laderas, dada la mayor debilidad de sus raíces y menor profundidad, su efecto protector contra el impacto directo de las gotas de lluvia, es indiscutible.



*Figura 37. Prendimiento y crecimiento exuberante del sauco en la parte lateral de las obras de bioingeniería. Mayo de 2015. Fotografías: Alejandra Osorio*

En el área intervenida en la vereda El Líbano, luego de los movimientos en masa, ocasionados por la alta presión de poros en el terreno saturado, se observó buen prendimiento del sauco en los lados, debido a la presencia de material orgánico y de humedad.

El sector central conformado por areniscas y arenas, sin materia orgánica y poca humedad (menor a la humedad de campo), no tuvo prendimiento del sauco pero sí colonización de la sucesión natural de arvenses (vegetación herbácea), como respuesta a la estabilización del terreno con las obras de bioingeniería y al menor requerimiento hídrico de esta vegetación.

## **2.1.2 Vereda Tolú Bajo (Municipio La Mesa).**

En la vereda Tolú Bajo del corregimiento de la Esperanza municipio de La Mesa, el monitoreo de la cobertura vegetal, se hizo meses antes y meses después de la construcción de las obras de bioingeniería.

### **2.1.2.1 Monitoreo de la cobertura vegetal antes de la construcción de las obras bioingenieriles.**

El proceso inicia con la corona superior de la superficie planar de deslizamiento por debajo de un fragmento boscoso (Figura 38), que se conserva de la adecuación y tala del bosque para la construcción de casa fincas en la vereda Tolú, en la parte alta o cima de la ladera. Las coberturas predominantes son árboles de porte mediano: Ocobo (*Tabebuia rosea*), Yarumo negro (*Cecropia angustifolia*), guamo macheto (*Inga densiflora*), tachuelo (*Xilosma spiculiferum*), Arrayan (*Myrcianthes leucoxylla*), Encenillo (*Weinmannia tomentosa*), Chicalá (*Tecoma stans*) y una plantación mixta de Plátano (*Musa balbisiana*) y Café (*Coffea arábica*).

En la parte media de la ladera, el proceso presentan múltiples coronas secundarias de deslizamientos planares y circulares, mayor movimiento, volumen e inestabilidad, plantaciones de mango (*Mangifera indica*), guayaba (*Psidium guajava*), mandarina (*Citrus reticulata*), naranja (*Citrus sinensis*), yuca (*Manihot esculenta*) y plátano (*Musa paradisíaca*).



*Figura 38. Fragmento boscoso de la parte alta de la ladera del estudio, vereda Tolú Bajo, Municipio la Mesa, coordenadas: N 1010799, E 960952, 1376 m.s.n.m. Febrero de 2014. Fotografía: Alejandra Osorio.*

En la parte baja de la ladera con viviendas y zonas verdes en pastos, el proceso denudativo afecta severamente con agrietamientos, hundimientos, inclinación, fractura, falla y movimiento los pisos, paredes, techos y patios; el terreno presenta aguas sub superficiales provenientes de pozos sépticos en tierra y encharcamientos superficiales.

#### ***2.1.2.2 Monitoreo del nacedero y la sucesión natural en las obras bioingenieriles de la vereda tolú bajo.***

Las obras iniciaron en abril de 2014 y finalizaron en diciembre de 2014, para su construcción (BFV, TVEVA y TVL) se usó guadua (*guadua angustifolia*); la siembra de 6000 estacas de nacedero (Figura 39) se inició al mes (mayo de 2014) y termino con las obras en diciembre de 2014.



*Figura 39. Trinchos sin prendimiento de estacas vivas. Filtros vivos y estacas vivas de nacedero. Filtros en construcción y en funcionamiento. Abril de 2014. Fotografías: Alejandra Osorio.*

En diciembre de 2014 a siete meses de iniciar la siembra de estacas, en la parte alta y media del proceso, no hubo prendimiento del nacedero ni de la sucesión natural de arvenses (Figura 40), por las pocas lluvias y el material del coluvión de lutitas (rocas lodolitas y arcillolitas).



*Figura 40. Trincho con vegetación. Estacas de nacedero con rebrotes de hojas. Trinchos con suelo desnudo y estacas vivas sin brotes. Diciembre de 2014. Fotografías: Fernando Sánchez.*

En la Parte Baja del proceso, se dio muy poco prendimiento del nacedero y la sucesión natural de arvenses solo se establece sobre y alrededor de los BFV, determinando el desarrollo de la estabilización del terreno, ya son los BFV los recolectan y secan los encharcamientos del terreno y la saturación de los materiales

Por lo que al acabar la primera siembra, se dio un 30% de rebrote o prendimiento del nacedero, por lo que se sembraron 3000 estacas adicionales, en especial donde no hubo ningún prendimiento (Figura 41)



*Figura 41. Filtros laterales con drenaje hacia la vía y la quebrada. Filtro cubierto con arvenses y estacas de nacedero a cada lado del mismo (Trichanthera gigantea). Diciembre 2014. Fotografías: Alejandra Osorio.*

En marzo de 2015, a 3 meses de la segunda siembra, los primeros rebrotes sobre y alrededor de los BFV, tenían tallos con diámetros entre 28mm y 54mm y alturas de 0,6m y 0,7m (Figura 42).



*Figura 42. Diámetro del ancho de la hoja, 82 mm, Longitud de la hoja, 105mm. Diámetro del tallo, 43mm, altura 60cm. Altura del nacedero (0,65m). Diámetros del tallo de 50mm y 28mm. Rebrote de las estacas de nacedero sobre los filtros (Trichanthera gigantea). Filtros con nacedero. Cobertura vegetal en las obras de bioingeniería. Marzo de 2015. Fotografía: Alejandra Osorio.*

En mayo de 2015, en la Parte Alta del proceso el rebrote alcanzo un 70% de la segunda siembra de nacedero, un 10% de las guaduas (postes y pilares) en las obras y un 90% el de la sucesión natural de arvenses, sucesión que cubre en su totalidad la hectárea intervenida con la solución bioingenieril..

En la parte media del proceso, se observa el nacedero de la primera siembra con alturas entre 0,5m y 1,6m (Figura 43), el progresivo restablecimiento de la capa sucesión natural de arvenses y esporádico prendimiento de las guadas de los TVEVA y TVL. El 70% de tres hectáreas intervenidas presenta cubrimiento con la sucesión natural de arvenses (herbáceas) y un 90% de prendimiento de las estacas de la segunda siembra de estacas de nacedero, con alturas entre 0,5m y 0,7m.



*Figura 43. Crecimiento de las plantas de nacedero. Restauración de la cobertura vegetal herbácea. Prendimiento de la guada. Mayo 2015. Fotografías: Alejandra Osorio.*

En la Parte Baja del proceso, se dio un 68% de rebrote de la segunda siembra y el restablecimiento de la sucesión natural de arvenses (herbáceas). Sumando el rebrote de la primera siembra, se establece un 90% de rebrote de 6000 estacas sembradas. Los nacederos del primer rebrote, desarrollaron alturas entre 0,65m y 1,95m.

En septiembre de 2015, a 9 meses de la primera y seis meses de la segunda siembra, el nacedero tiene altura promedio de 1,4m, raíces fasciculadas de 0,7m de longitud y una densidad promedio de 260,9raíces/m<sup>2</sup> (45raíces en una área de 0,25m de ancho por 0,7m de longitud, acorde con lo establecido para el rebrote y desarrollo a partir de estacas de esta especie, para garantizar el refuerzo mecánico al material. El control hidráulico por evaporación y transpiración desde el rebrote, disminuye la humedad y la presión de poros en los materiales del terreno, aumentando su resistencia al cortante tangencial. (J. Rivera, 2008), establece que esta capacidad de evaporación y transpiración, fue lo que genero el nombre vulgar de nacedero para esta especie y la creencia errónea de que el nacedero produce agua, cuando es todo lo contrario, que requiere de mucha agua para su desarrollo natural, estableciéndose fácil y rápidamente en terrenos donde hay agua circulante con buena relación aire – agua, como en las orillas de ríos, quebradas, drenajes temporales, cárcavas y surcos. (J. Rivera, 2008), plantea que esta capacidad de evaporación y transpiración la presenta la guadua, por lo que utilizada estas especies en casi todas las obras que realiza.

(Barrera, Rivera, & Cadena, 2015), reportan que el nacedero por su rebrote a partir de estacas, no presenta raíz principal, sino un gran conjunto de raíces laterales que se desprenden de la base del tallo, con diámetros entre 0,025m y 0,080m, de las que se desprende un gran número de raíces secundarias, que se extienden lateralmente entre 4m y 5m, penetrando 1,6 m en profundidad; pero que son las raíces laterales las que mayor resistencia aportan a la estabilidad del terreno.

### **2.1.3 Condiciones mecánicas e hidráulicas del terreno**

#### **2.1.3.1 Vereda El Líbano (Municipio La Calera)**

Ruiz, 2015, en su trabajo de grado realiza cuatro perforaciones hasta los 2,1m de profundidad (Anexo 1), solo en una perforación (P1) determina que la cohesión y la resistencia de los materiales disminuyen a los 1,8m con la desaparición de las raíces, para las otras perforaciones plantea que a todas las profundidades, el bajo contenido de raíces no permite establecer correlaciones con los cambios (disminución y aumento) de la cohesión y la resistencia con la profundidad.

#### **2.1.3.2 Vereda Tolú Bajo (Municipio La Mesa).**

Martínez, (2014), en su trabajo de grado construye las columnas estratigráficas mecánicas generalizadas para las parte alta, media y baja del proceso denudativo hasta 2,1m de profundidad, estableciendo una variación aleatoria de la cohesión y la resistencia, sin correlación con los contenidos de raíces del suelo. La variación aleatoria de la cohesión y la resistencia, se asocia a un gran y espeso coluvión conformado por numerosos y pequeños coluviones.

En noviembre de 2014, Vargas, (Vargas, 2015) realizó una re perforación en la parte media del proceso denudativo (Anexo 2), que no permitió la comparación de las propiedades índice y mecánicas con los materiales de la primera perforación, ni de la cohesión y la resistencia con la variación del contenido de raíces en profundidad.

En septiembre 22 del año 2015, se realizó dos re perforaciones en la parte alta del proceso denudativo, que tampoco permitieron la comparación de las propiedades índice y mecánicas con los materiales de la primera perforación, ni la correlación de la cohesión y la resistencia con la variación del contenido de raíces en profundidad.



Determinándose que en esta perforación la humedad natural o campo se homogenizó alrededor de los BFV, comprobando el control hidráulico establecido por las obras de drenaje y por la vegetación a través de su capacidad de evaporación transpiración.

#### 2.1.4 Análisis estadístico de las propiedades Índice y mecánicas de los materiales

Para establecer la influencia de las propiedades índice, gravimétricas, volumétricas, hidráulicas y mecánicas (Anexo 1 y 2), en la resistencia de los materiales de los dos procesos denudativos, se realizó un análisis estadístico (Anexo 3) a través de una regresión múltiple, por el método de selección de variables; estableciendo como variable dependiente, la resistencia al corte tangencial del material ( $S$ ) y como variables independientes la Profundidad ( $Z$ , m), la Humedad Natural ( $W$ , %), los Límites de consistencia (Líquido,  $LL$ , %; Plástico,  $LP$ , %), el Índice Plástico ( $IP$ , %), la Cohesión ( $C$ , kPa o  $t/m^2$ ), el Ángulo de Fricción ( $\phi$ , Grados, °) y Peso Específico Húmedo ( $\gamma_h$ ,  $t/m^3$ ).

La primera selección estableció que la variable cohesión del material ( $C$ ), tiene el valor más alto de  $t$  y el valor más pequeño de  $p$ . Obteniendo un coeficiente de correlación al cuadrado ( $R^2$ ) de 0,32, que establece que la  $C$  responde en un 32% por la variación de  $S$ ; lo que es lógico, ya que  $S$ , se calcula a partir de  $C$ . El valor estadístico de Mallows ( $C(p)$ ), es alto por lo que se ingresan las otras variables al modelo (Anexo 3).

La segunda selección determinó que el límite plástico ( $LP$ ) del material, como la variable que aumenta el coeficiente de correlación al cuadrado ( $R^2$ ) a 0,38 y disminuyó el valor estadístico de Mallows  $C(p)$ , que es bueno pero aún insuficiente (Anexo 3).

Por último a tercera selección encontró al peso unitario húmedo ( $\gamma_h$ ), como la variable que aumentó a 0,42 al coeficiente de correlación al cuadrado ( $R^2$ ) y determinó el menor valor estadístico de Mallows  $C(p)$  (Anexo 3).

El valor de  $C(p)$  ideal, es igual al número de variables ingresadas al modelo + 1, en este caso el valor de  $(C(p))$ , se acercó a 4 y es bueno. Considerando todas las variables y los parámetros estimados, el mejor modelo para la resistencia está determinado por:

$$S = 3,02898 - 0,16955LP + 0,08367C + 2,14706Yh$$

Con un  $R^2$  de 0,42 y una  $Pr > F <$  de 0,0001, que es altamente significativo desde el análisis estadístico (Anexo 3).

Todas las variables izquierdas en el modelo son significativas al nivel 0.1500. Ninguna otra variable reunió el nivel de significancia de 0.1500, para entrar en el modelo.

La variable del sistema unificado de clasificación de materiales (suelos; SUCS), no se pudo correlacionar, por ser cualitativa y tampoco se le realizó análisis de frecuencias en el SAS (Anexo 3).

## 2.1.5 Análisis de estabilidad con Factores de seguridad (FS)

### 2.1.5.1 Factores de seguridad en el proceso de la vereda Tolú Bajo (Municipio La Mesa).

Los parámetros geológicos y mecánicos de los materiales de la parte media del proceso de la vereda Tolú Bajo Martínez, (2014), fueron utilizados para calcular los Fs, y se relacionan en la Tabla 1.

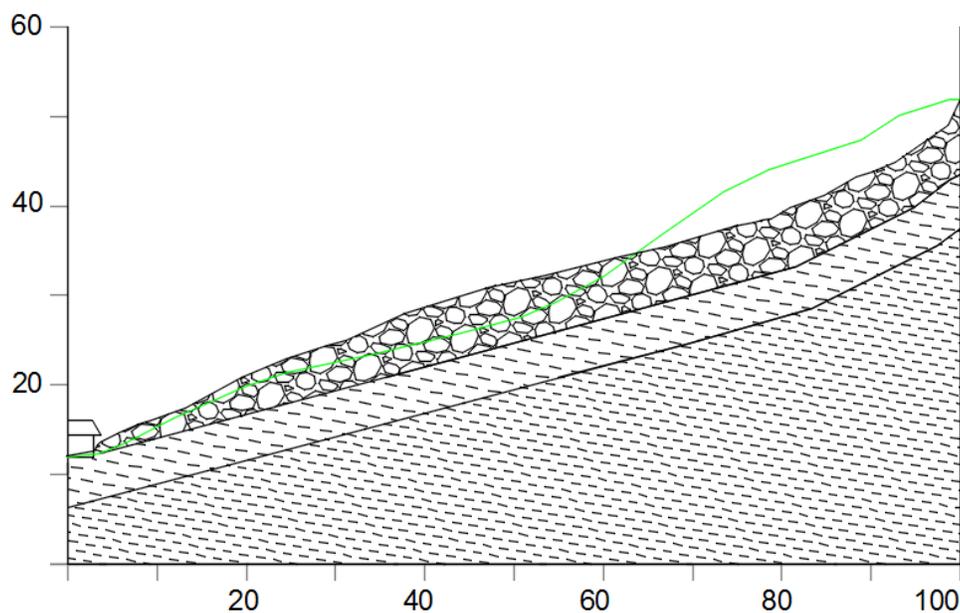
Tabla 1. Parámetros mecánicos utilizados para los FS en el proceso de la vereda Tolú Bajo municipio de la Mesa.

MOHR – COLOUMB							
Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	C' (kPa)	C <sup>R1</sup> (kPa)	C <sup>R1'</sup> (kPa)	C <sup>R2</sup> (kPa)	C <sup>R2'</sup> (kPa)
SM	20,1	58,8	39,28	76,4	50,9	105,8	70,5
HOEK Y BROWN							
Material	USC (Kn/M <sup>2</sup> )		M	S		A	
M1	25000		0,2	7,9 e 005		0,56	
M2	50000		0,7	0,0003		0,53	

SM: arena lodosa; M1: lodolita 1; M2: lodolita 2; USC: Clasificación unificada de suelos; m, s y a: parámetros de roca de Hoek y Brown. Peso unitario ( $\gamma$ ); cohesión (C); cohesión efectiva (C'), cohesión con refuerzo mecánico, de un incremento del 30%, por el desarrollo parcial del sistema de raíces (C<sup>R1</sup>); cohesión efectiva, con refuerzo mecánico, de un incremento del 30%, por el desarrollo parcial del sistema de raíces (C<sup>R1'</sup>); cohesión con refuerzo mecánico con incremento del 80%, por el desarrollo total del sistema de raíces, de la vegetación (C<sup>R2</sup>); cohesión efectiva con refuerzo mecánico de un incremento del 80%, por el desarrollo total del sistema de raíces, de la vegetación (C<sup>R2'</sup>).

Teniendo en cuenta que el proceso en la parte media, es complejo y presenta componentes rotacionales y traslacionales, los cálculos de los Fs modelan superficies

planares y circulares. En la (Figura 44), se presenta la superficie del terreno antes y después del proceso denudativo.



*Figura 44. Paralelo entre la superficie antes (color verde) y después (color negro) en la parte media del proceso denudativo, con deslizamientos planares y rotacionales. Vereda Tolú Bajo.*

En la Tabla 2, se establecen los valores del factor de seguridad ( $F_s$ ), para condiciones del terreno antes del proceso, después del movimiento al inicio de las obras, a los seis meses y a los dos años de construidas las obras bioingenieriles, definiendo las condiciones mecánicas e hidráulicas al momento de la falla y después de esta, con y sin las obras de estabilidad realizadas. Estos cálculos se realizaron para superficies de falla gravitacional planar y rotacional, en las condiciones de humedad de campo al momento del muestreo (humedad ente los límites plástico y líquido) y en condición de saturación (humedad del límite líquido) de los materiales.

Determinando que el  $F_s$  alcanzó su máximo valor a los dos años de construidas las obras de bioingeniería y establecerse totalmente el sistema de raíces del nacedero, generando control hidráulico de los materiales y un refuerzo mecánico aumentando hasta el 80% la cohesión del material con raíces como lo propone (Davoudi, M. H. 2011).

*Tabla 2. Valores de los  $F_s$  calculados en superficies planares y circulares, con los refuerzos mecánicos de las obras de bioingeniería y diferentes etapas de desarrollo del sistema de raíces, para la parte media de la vereda Tolú Bajo, municipio de La Mesa.*

CONDICIÓN	$F_s$ ANTES	$F_s$ OBRA	$F_s$ OBRA+C <sup>R1</sup>	$F_s$ C <sup>R2</sup>
<b>2,3,1,1 SUPERFICIE DE FALLA PLANAR</b>				
<b>NORMAL</b>	3	6,2	7,6	9,4
<b>EFFECTIVA</b>	1,7	3,9	4,8	5,7
<b>SUPERFICIE DE FALLA CIRCULAR</b>				
<b>NORMAL</b>	2,3	4	4,6	5,8
<b>EFFECTIVA</b>	1,1	2,1	2,6	3,4

CR1: Cohesión del material más 30% aportado por el sistema parcial de raíces a los 6 meses; CR2: Cohesión del material más 80% aportado por el sistema total de las raíces a los 2 años.

El control hidráulico de la presión de poros se refleja en la homogenización de la humedad natural de campo para los materiales alrededor de las obras, ya que los TVEVA encauzan el agua de escorrentía sobre los BFV que liberan la presión de poros drenando en profundidad los materiales saturados (minerales arcillosos). Condiciones de humedad, que se conservan espacial y temporalmente alrededor de los BFV, para considerar que la estabilidad del terreno se considera con los  $F_s$  determinados b con los

Fs determinados bajo condiciones de humedad de campo (no saturados) aun en períodos invernales cuando se presentan la reactivación o generación del 98 % de los movimientos en masa.

El control de los empujes hidráulicos de los flujos de agua, lo establecen los TVEVA-trinchos vivos en vertedero abierto, escalonados a lo largo del cauce pendiente arriba y abajo, que protege los materiales del fondo y lados de los cauces de la erosión lateral y de fondo de los cauces de surcos, cárcavas y drenajes. Esta protección evita la pérdida de soporte lateral y de fondo, neutralizando los deslizamientos en las orillas de los cauces y su ampliación lateral hacia arriba de la ladera. Además, el manejo de las aguas sub superficiales, mediante sistemas de drenaje y raíces que por la evapotranspiración y refuerzo mecánico, incrementan la cohesión, los Fs y la estabilidad del terreno.

#### ***2.1.5.2 Condiciones de estabilidad y factor de seguridad (Fs) antes del proceso***

En el terreno antes de generarse la superficie de falla planar a través de uno de los contactos entre los cuerpos de coluviones menores que conforman el gran coluvi6n, que involucra ladera abajo a la vereda Tolú Bajo del corregimiento La Esperanza en el municipio de La Mesa (Cundinamarca), los Fs (Anexo 4) para condiciones de humedad de campo de los materiales (no saturados) bajo esfuerzos normales totales, establece valores cercanos a 3 (Figura 45) y condiciones de estabilidad muy altas para el terreno .

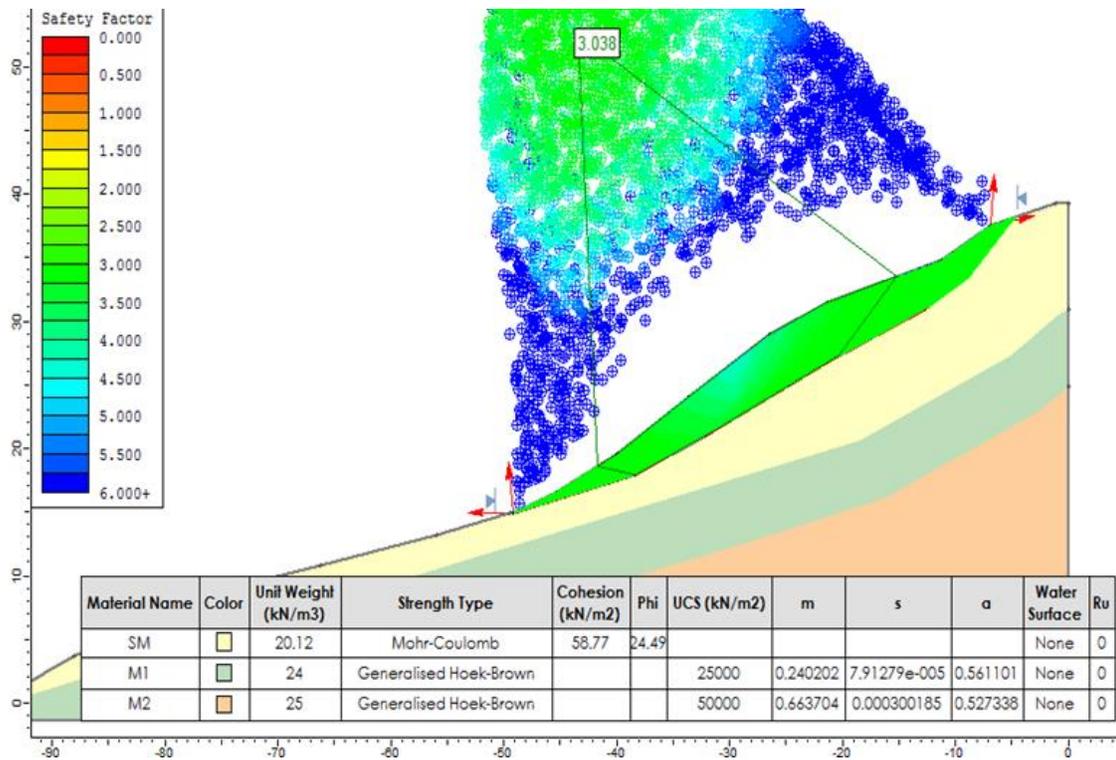


Figura 45. Fs para falla planar, en condiciones de humedad de campo de los materiales, parte media del proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo.

Los Fs (Anexo 4) para la condición de saturación de los materiales, bajo esfuerzos normales efectivo descienden a 1,7 (Figura 46), demostrando el efecto negativo de la saturación de los materiales en la estabilidad del terreno.

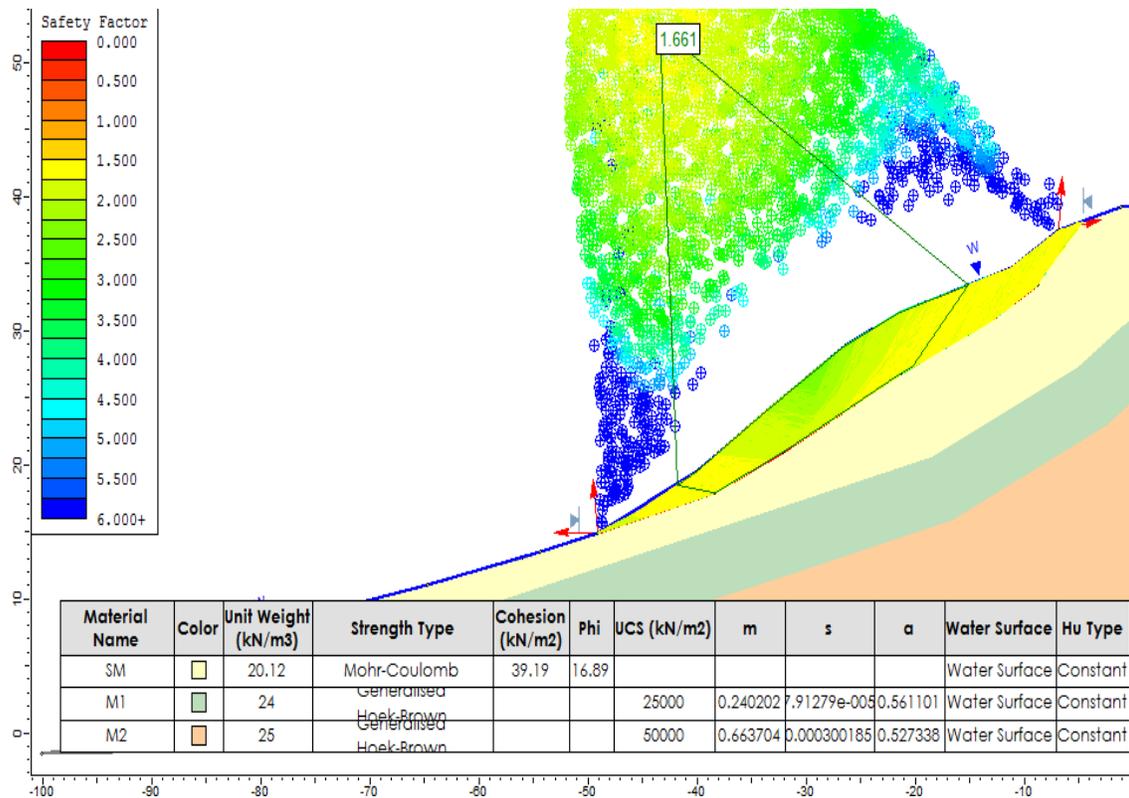


Figura 46.  $F_s$  para falla planar, en condiciones efectivas de saturación de los materiales, parte media del proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo.

Estos resultados confirman que la causa planteada como detonante del proceso denudativo, con precipitaciones normales para el sector (Abril del 2013), fue el agua que se adiciono a esta cuenca por la construcción de galpones en la parte superior de la ladera, que dispuso los desagües de los techos de la construcción en el nacimientos de un drenaje sobre el que se generaron los deslizamientos planares y circulares. Agua que llevo los materiales desde la condición de humedad de campo hasta la de humedad de saturación y sobresaturación (disolución de materiales arcillosos).

Para superficies de falla circular, el Fs (Anexo 4) en condiciones de humedad de campo (no saturados), bajo esfuerzos totales de los materiales, establecen valores hasta de 2,3 (Figura 47) que representa una alta estabilidad del terreno.

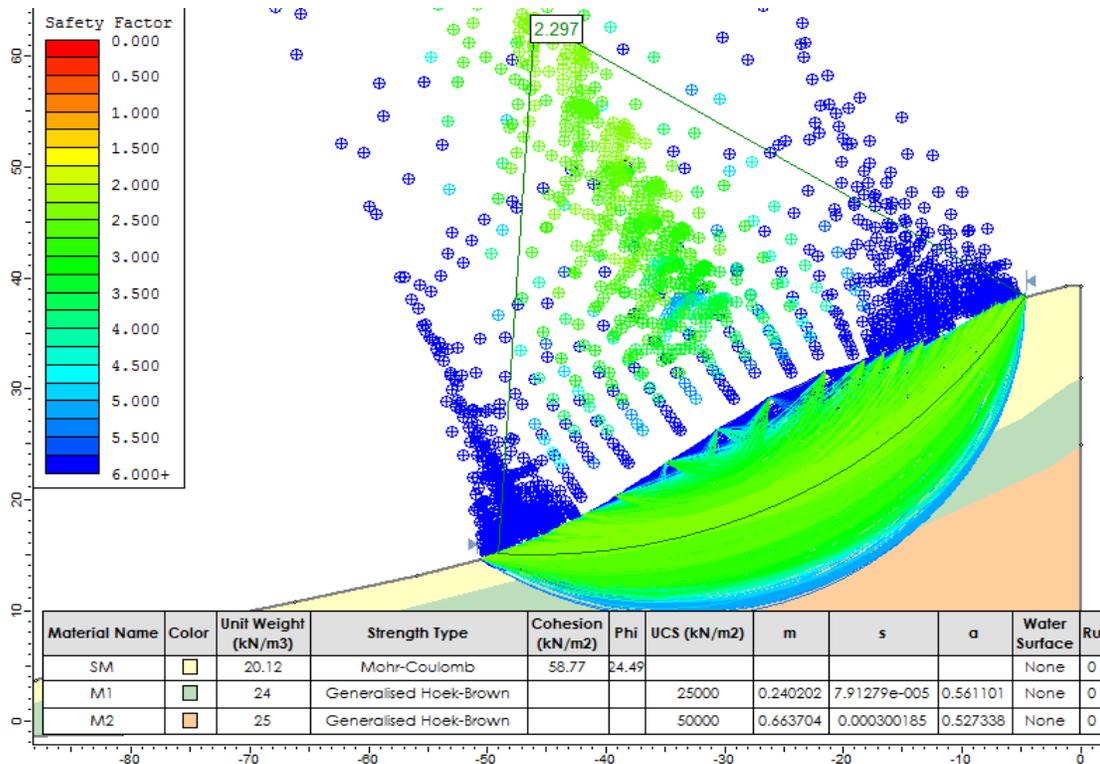


Figura 47. Fs para falla circular, en condiciones de humedad de campo de los materiales, parte media del proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo

El valor del Fs (Anexo 4) desciende a 1,1 en condiciones de saturación (humedad del límite líquido) de los materiales y bajo esfuerzos normales efectivos (Figura 48), dando lugar como en el caso anterior a los deslizamientos del terreno.

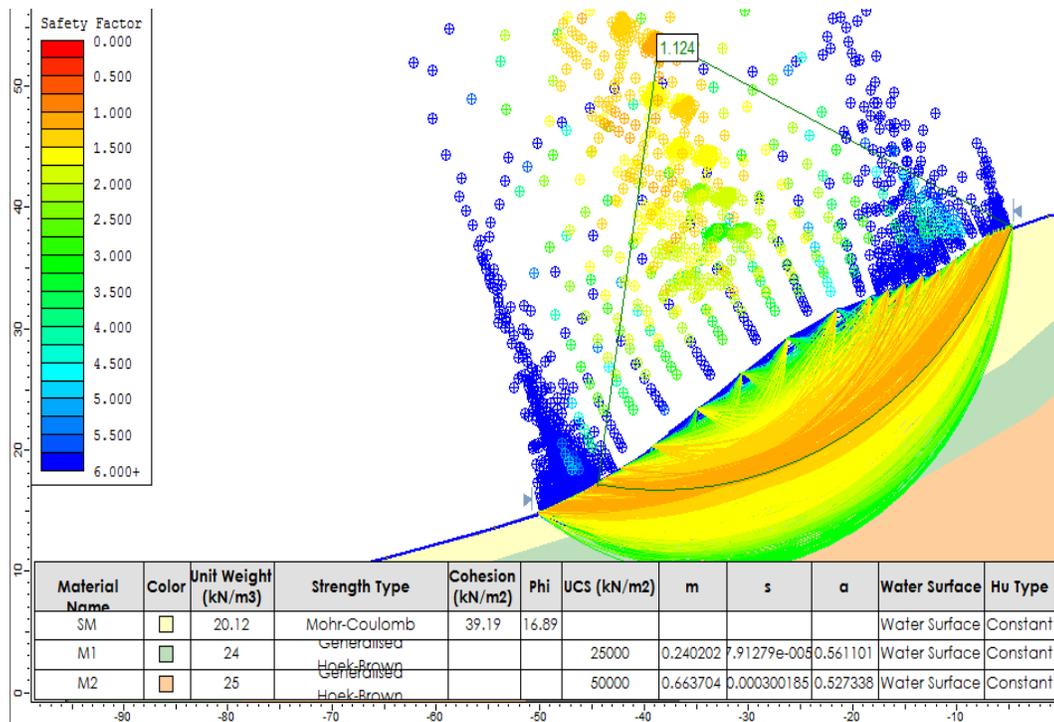


Figura 48. *F<sub>s</sub>* para falla circular, en condiciones efectivas de saturación de los materiales, parte media del proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo.

### 2.1.5.3 Condiciones de estabilidad y factor de seguridad (*F<sub>s</sub>*) con las obras de bioingeniería

Para calcular los *F<sub>s</sub>*, se realizó el levantamiento topográfico del terreno y se localizó el escarpe principal y superior del deslizamiento, los escarpes secundarios (transversales y laterales), los cuerpos de materiales movilizados y las obras de bioingeniería construidas. Estos cálculos utilizan las obras de bioingeniería como refuerzo mecánico generado por cada poste de guadua de soporte de los BFV, TVEVA y TVL, que como micro pilotes de refuerzo aporta una resistencia adicional de 16,6kN/m<sup>2</sup> (Norma Sismo Resistencia de Colombia (ASI, 2010))

Los Fs (Anexo 4) de superficies de falla planar, para condiciones de humedad de campo de los materiales no saturados, bajo esfuerzos normales total establecen valores hasta de 6,2 y condiciones de muy alta estabilidad para el terreno.

Considerando que se pierda este control hidráulico, se calcularon los Fs (Anexo 4) para condiciones de saturación de los materiales con esfuerzos normales efectivos, que descienden a valores de 3,9 demostrando de nuevo el efecto negativo de la saturación de los materiales en la estabilidad del terreno.

Los Fs (Anexo 4), para superficies de falla circular, en condiciones de humedad de campo de los materiales no saturados, bajo esfuerzos normales totales establecen valores hasta de 3,9 y condiciones de estabilidad para el terreno.

Los Fs (Anexo 4) para condiciones de saturación de los materiales y bajo esfuerzos normales efectivos, descienden a valores de 2,1, demostrando de nuevo el efecto negativo de la saturación de los materiales, en la estabilidad del terreno.

Los postes de guadua considerados como micro pilotes de refuerzo mecánico en la estabilidad del terreno y los materiales, aumenta los Fs para las superficies de falla planar y circular, con respecto a los calculados antes del proceso denudativo.

#### ***2.1.5.4 Condiciones de estabilidad y Fs con las obras más el refuerzo mecánico dado por desarrollo parcial del sistema de raíces del nacedero***

Este cálculo consideró el refuerzo mecánico (micro pilotes) de los postes de guadua en todas las obras, más el refuerzo mecánico del desarrollo parcial del sistema de raíces de los nacederos que rebrotaron de las estacas sembradas. Este refuerzo de las

raíces, se considera a partir de los seis meses de desarrollo del sistema de raíces, como con un incremento del 30% (Davoudi, 2011) de la cohesión inicial del material.

Los Fs (Anexo 4) para superficies de falla planar en condiciones de humedad de campo de los materiales no saturados, bajo esfuerzos normales totales, establecen valores hasta de 7,6 y condiciones de muy alta estabilidad para el terreno.

Los Fs (Anexo 4) para condiciones de saturación de los materiales con esfuerzos normales efectivos, descienden a valores de 4,8, demostrando de nuevo el efecto negativo de la saturación de los materiales en la estabilidad del terreno

Los Fs (Anexo 4) para superficies de falla circular, en condiciones de humedad de campo de los materiales no saturados, con esfuerzos normales totales, establece valores hasta de 4,6 y condiciones de estabilidad muy alta para el terreno.

Los Fs (Anexo 4) para condiciones de saturación de los materiales (esfuerzos normales efectivos), descienden a valores de 2,6, demostrando de nuevo el efecto negativo de la saturación de los materiales, en la estabilidad del terreno.

El refuerzo mecánico (micro pilotes) de los postes de guadua, más el refuerzo mecánico del sistema parcial de raíces, determina en las superficies de falla planar y circular los mayores valores de Fs con respecto a los valores de Fs calculados con el refuerzo mecánico (micro pilotes) de los postes de guadua en las obras.

En las superficies de falla planar y circular, los BFV al controlar la presión de poros del agua en los materiales impermeables (minerales arcillosos), establecen condiciones de humedad de campo no saturados de los materiales, con esfuerzos normales totales, que

se conservan, espacial y temporalmente alrededor de los BFV, para mantener el terreno con altos Fs y condiciones de estabilidad del terreno.

#### ***2.1.5.5 Condiciones de estabilidad y Fs sin las obras, más el desarrollo total del sistema de raíces de nacedero***

A los dos años (abril de 2016) de construidas las obras de bioingeniería, los postes de guadua en los trinchos se pudren, generando la anulación del refuerzo mecánico de los micro pilotes. Pero el 3% a 10% de rebrote de las guadas utilizadas como postes de las obras y el 90% de rebrote del nacedero, desarrollan todo su sistema de raíces estableciendo un incremento del 80% en la cohesión inicial del material (Davoudi, 2011).

Los Fs (Anexo 4) para superficies de falla planar, en condiciones de humedad de campo de los materiales y con esfuerzos normales totales, establecen valores hasta de 9,4 (ver Tabla 2) y condiciones de estabilidad muy alta para el terreno.

Los Fs (Anexo 4) para condiciones de saturación de los materiales y con esfuerzos normales efectivos, descienden a valores de 5,7, demostrando el efecto negativo de la saturación de los materiales en la estabilidad del terreno.

Los Fs (Anexo 4) para superficies de falla circular en condiciones de humedad de campo de los materiales y con esfuerzos normales totales; establece valores hasta de 5,8 y condiciones muy estables del terreno.

Los Fs (Anexo 4) para condiciones de saturación de los materiales y esfuerzos normales efectivos, descienden a valores de 3,4, demostrando de nuevo, el efecto negativo de la saturación de los materiales, en la estabilidad del terreno.



Para las superficies de falla planar y circular, se establece el incremento de los Fs a medida que se desarrollan los sistemas de raíces de la vegetación y se pudren los materiales utilizados en las obras.

### 2.1.6 Factores de seguridad en el proceso de la vereda El Líbano

Los parámetros geológicos y mecánicos de los cuatro materiales del proceso denudativo de la vereda El Líbano, con los que se calcularon los Fs se presentan en la (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros geológicos y mecánicos del proceso de la vereda el Líbano.

MOHR – COLOUMB							
Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	C' (kPa)	C <sup>R1</sup> (kPa)	C <sup>R1'</sup> (kPa)	C <sup>R2</sup> (kPa)	C <sup>R2'</sup> (kPa)
SO	21	12,8	8,5	16,6	11,1	23	15,3
MS	48,6	30,2	20,1	39,2	26,1	54,3	36,2
HOEK Y BROWN							
Material	USC (kN/M <sup>2</sup> )		M	S		A	
SS1	35000		0,82	0,00042		0,5223	
SS2	100000		3,05	0,00248		0,5076	

SO: arenas orgánicas, MS: lodos arenosos; SS1: areniscas 1; SS2: areniscas 2; USC: Clasificación unificada de suelos; m, s y a: parámetros de roca de Hoek y Brown. Peso unitario ( $\gamma$ ); cohesión (C); cohesión efectiva (C'), cohesión con refuerzo mecánico, de un incremento del 30%, por el desarrollo parcial de raíces (C<sup>R1</sup>); cohesión efectiva con refuerzo mecánico de un incremento del 30%, por el parcial del sistema de raíces (C<sup>R1'</sup>); cohesión con refuerzo mecánico con incremento del 80%, por el desarrollo total del sistema de raíces, de la vegetación (C<sup>R2</sup>); cohesión efectiva con refuerzo mecánico de un incremento del 80%, por el desarrollo total del sistema de raíces.

En la Figura 49, se presenta la superficie del terreno antes y después del proceso denudativo, tipo deslizamiento planar de un depósito de arenas orgánicas y lodos arenosos a través del contacto con dos estratos de areniscas.

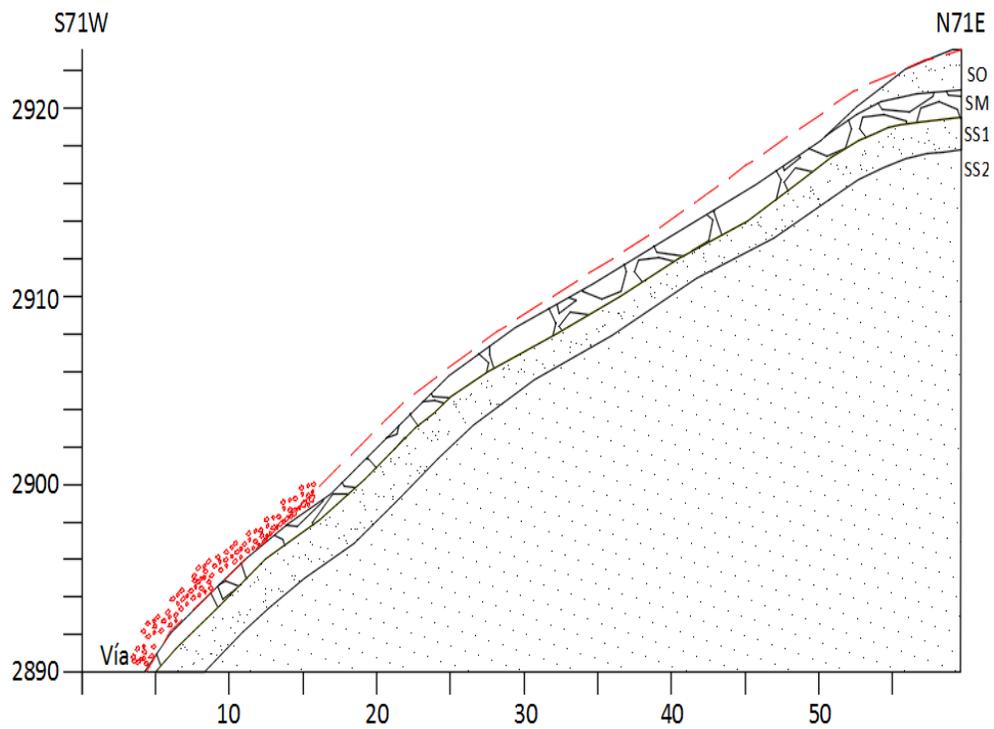


Figura 49. Superficie del terreno antes (Línea roja) y después (Línea negra) del proceso denudativo, tipo deslizamiento traslacional (planar), que afectó la vereda El Líbano.

En la (Tabla 4) se observa el aumento sustancial del  $F_s$ , alcanzando su máximo valor una vez las obras de bioingeniería y las raíces de la vegetación se establecen totalmente, ya que se considera un aumento del 80% de la cohesión inicial del material.

El proceso denudativo, que afectó la vereda El Líbano, es un deslizamiento tipo planar o traslacional, por los que los  $F_s$  solo se calcularon para superficies de falla planar.

*Tabla 4. Valores de los Fs calculados en superficies planares, antes del proceso y con los refuerzos mecánicos de las obras de bioingeniería y diferentes etapas de desarrollo del sistema de raíces, para vereda el Líbano, municipio de La Calera.*

CONDICIÓN	FS ANTES	FS OBRA	FS OBRA+C <sup>R1</sup>	FS C <sup>R2</sup>
<b>SUPERFICIE DE FALLA PLANAR</b>				
<b>NORMAL</b>	3,1	3,6	4,1	4
<b>EFFECTIVA</b>	1,6	2,1	2,4	3,2

#### **2.1.6.1 Condiciones de estabilidad y factores de seguridad antes del proceso**

En la vereda El Líbano del municipio de La Calera (Cundinamarca), el proceso de deslizamiento se dio a través de una superficie de falla planar, por el contacto del material orgánico con un depósito de ladera, o de cualquiera de estos dos materiales con las areniscas, lodolitas y arcillolitas de las rocas sedimentarias del grupo Guadalupe. Los Fs (Figura 50) para superficies de falla planar, calculados con los materiales en condiciones de humedad de campo y con esfuerzos normales totales, establecen valores hasta de 3,1 y condiciones de alta estabilidad para el terreno.

Los Fs para condiciones de saturación de los materiales y con esfuerzos normales efectivos, descienden a 1, (Figura 51) demostrando el efecto negativo de la saturación de los materiales, en la estabilidad del terreno.

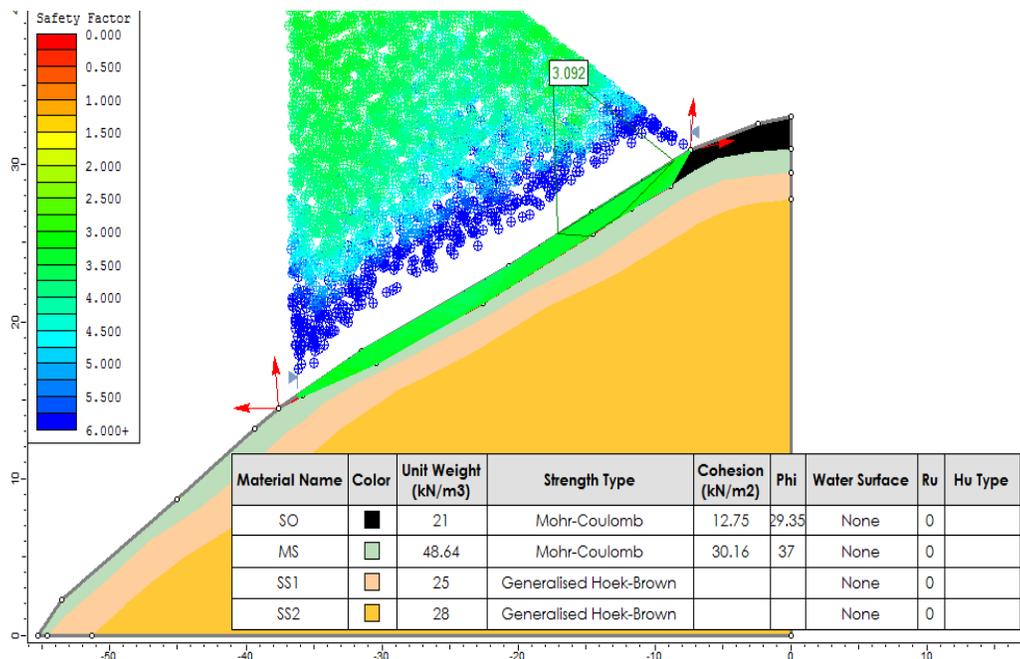


Figura 50.  $F_s$  para falla planar, en condiciones de humedad de campo de los materiales, antes del proceso denudativo de la vereda El Libano.

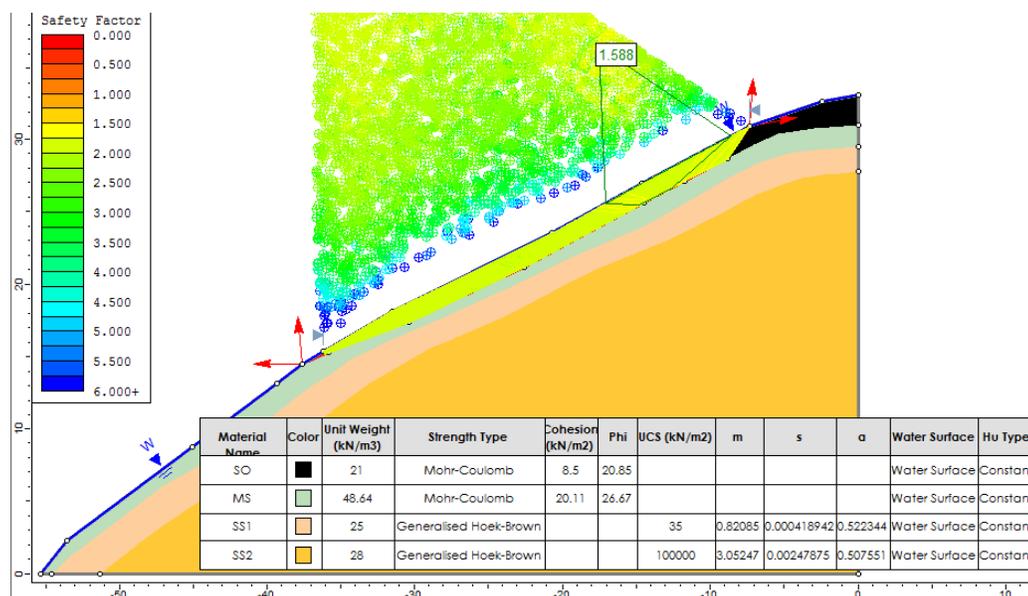


Figura 51.  $F_s$  para falla planar, en condiciones efectivas de saturación de los materiales, antes del proceso denudativo de la vereda El Libano.

### ***2.1.6.2 Condiciones de estabilidad y factor de seguridad (Fs) con las obras de bioingeniería***

Para calcular los Fs se estableció que todos los postes de los trinchos construidos en los BFV, TVEVA y TVL, como micro pilotes de refuerzo con una resistencia adicional de  $16,6\text{kN/m}^2$  (Norma Sismo Resistencia de Colombia) (ASI, 2010).

Los Fs (Anexo 5) para superficies de falla planar y condiciones de humedad de campo de los materiales con esfuerzos normales, establecen valores hasta de 3,6 y condiciones de estabilidad para el terreno.

Los Fs (Anexo 5) para condiciones de saturación de los materiales y esfuerzos normales efectivos, descienden a valores de 2,1 demostrando de nuevo, el efecto negativo de la saturación de los materiales en la estabilidad del terreno talud.

### ***2.1.6.3 Condiciones de estabilidad y Fs con las obras más el refuerzo mecánico dado por desarrollo parcial del sistema de raíces del Sauco***

Este cálculo consideró el refuerzo mecánico (micro pilotes) dado por los postes de guadua en todas las obras más el refuerzo mecánico del desarrollo parcial del sistema de raíces del 90% del sauco que retoño de la siembra. Refuerzo de las raíces que se considera a partir de seis meses de desarrollo de los árboles y se establece con el incremento del 30% (Davoudi, 2011) de la cohesión inicial del material.

Los Fs (Anexo 5) para superficies de falla planar en condiciones de humedad de campo de los materiales y esfuerzos normales totales, establecen valores hasta de 4,2 y condiciones de estabilidad para el terreno.

Los Fs (Anexo 5) para condiciones de saturación de los materiales y esfuerzos normales efectivos, descienden a valores de 2,4, marcando el efecto negativo de la saturación de los materiales en la estabilidad del terreno.

Resultados similares fueron reportados por (Londoño, 2013), en la ciudad de Manizales para ocho (8) laderas con cinco (5) suelos derivados de cenizas volcánicas y tres suelos (3) derivados de rocas metamórficas.

Londoño, 2013, encontró para los suelos derivados de ceniza volcánica, un efecto benéfico del horizonte orgánico y la vegetación, sobre la resistencia al cortante tangencial que incrementó de 153,8kPa a 163,8kPa. Establece que en zonas de ladera no se debe prescindir de la vegetación y la materia orgánica, si se quiere mantener la estabilidad natural del terreno.

El refuerzo mecánico (micro pilotes) de los postes de guadua, más el refuerzo mecánico del desarrollo parcial del sistema de raíces, determina en las superficies de falla planar, valores mayores de los Fs con respecto a los valores de Fs calculados solo con el refuerzo mecánico (micro pilotes) de los postes de guadua en los trinchos

Se corrobora que en las superficies de falla planar, los BFV al controlar la presión de poros del agua en los materiales saturados, establecen condiciones de humedad de campo de los materiales y esfuerzos normales totales, que se conservan, espacial y

temporalmente alrededor de los biofiltros vivos, para mantener los altos Fs y condiciones de estabilidad del terreno aun en las temporadas invernales.

Se reafirma, la importancia del manejo de las aguas sub superficiales mediante sistemas de drenaje y raíces que por la evapotranspiración y refuerzo mecánico, incrementan la cohesión, los Fs y la estabilidad del terreno en los periodos invernales.

Se confirma el control del empuje hidráulico que establecen los TVEVA en los materiales permeables, evitando la erosión lateral y de fondo en cauces de surcos, cárcavas y drenajes. Controlando los deslizamientos de material permeable, en las orillas de los cauces y su ampliación lateral ascendente en la ladera.

#### ***2.1.6.4 Condiciones de estabilidad y Fs sin las obras más el desarrollo total del sistema de raíces de sauco***

A los dos años de construidas las obras de bioingeniería, los postes de guadua en las obras que no retoñan (90% a 97%), se pudren anulando el refuerzo mecánico de los micro pilotes.

Pero el retoño del 10% de las guaduas y del 78% del sauco, logran desarrollar totalmente sus sistemas de raices generando un incremento del 80%, en la cohesión del material inicial (Davoudi, 2011). El tiempo de dos años para que se pudran las guaduas, es exageradamente corto, ya que la guadua verde y menor de dos años en la mayoría de los casos, presenta buenas condiciones durante 10 años y más sin la intervención del hombre (Rivera, 2008).

Los Fs (Anexo 5) para superficies de falla planar en condiciones de humedad de campo de los materiales y esfuerzos normales totales, establecen valores hasta de 4 y condiciones de estabilidad alta para el terreno.

Los Fs (Anexo 5) para condiciones de saturación de los materiales y esfuerzos normales efectivos, descienden a valores de 3,2 estableciéndose el efecto negativo de la saturación de los materiales, en la estabilidad alta del terreno.

Para las superficies de falla planar se establece el incremento de los Fs a medida que se desarrollan los sistemas de raíces de la vegetación y se pudren los materiales utilizados en las obras.

## Conclusiones

La validación geotécnica de las obras bioingenieriles para el manejo y regulación de agua en materiales consolidados, se estableció por el aumento de los valores del factor seguridad( $F_s$ ), calculados para escenarios antes, durante y después, del proceso denudativo, la construcción de las obras y el desarrollo parcial y total del sistema de raíces del sauco y el nacedero, en materiales inorgánicos y orgánicos tamaño arena, lodo y arcilla en laderas y taludes de los municipios de La Calera y La Mesa (Cundinamarca), donde la CAR Cundinamarca realizó obras bioingenieriles entre los años 2013 y el 2015.

Geotécnicamente, los postes de guadua desde su instalación para la construcción de las obras bioingenieriles, se consideraron como micro pilotes de refuerzo, adicionando una resistencia por poste de  $16,6\text{kN/m}^2$ , como lo establece y permite la norma colombiana de construcciones sismo resistente (NSR 2010) para el cálculo geotécnico de la estabilidad de materiales en laderas y taludes., Trinchos Vivos Escalonados en Vertedero Abierto - TVEVA y Trinchos Vivos en Ladera – TVL.

El desarrollo parcial (seis meses de su siembra) y total (dos años de siembra) del sistema de raíces del sauco y el nacedero, aumentó la cohesión del material para la validación geotécnica un 30% y 80% respectivamente.

El desarrollo total de los sistemas de raíces del sauco y el nacedero, considero la anulación del refuerzo como micro pilotes de los postes de guadua, para la validación geotécnica.

Para las laderas y taludes del proceso en La Mesa Cundinamarca, se calcularon factores de seguridad de mayor valor en las superficies de falla planar que en las superficies circulares, ya que se determinaron los dos tipos de superficies.

Para las superficies de falla planar y circular, se calcularon factores de seguridad con mayores valores en materiales en condiciones de humedad de campo que en condiciones de saturación.

La construcción de los Biofiltros Vivos (BFV), desde la excavación de la zanja donde se colocaran las camas de guaduas hasta su construcción e implementación dreña los materiales saturados con presión de poros en los deslizamientos, estableciendo en los materiales a su alrededor condiciones de humedad de campo, como lo establece los valores constantes de la humedad natural encontrada en los materiales muestreados a los seis meses y dos años de implementadas las obras.

Igualmente la construcción de Trinchos Vivos Escalonados en Vertedero Abierto (TVEVA), desde la instalación de los postes de guadua para los soportes controla la acción hidráulica y erosiva del agua sobre los materiales granulares del fondo y lados de los surcos, cárcavas y corrientes, controlando la socavación de fondo y lateral y la ampliación de los cauces por pérdida de soporte de fondo y lateral, generando deslizamientos y más erosión de los materiales y hasta obras ingenieriles construidas con anterioridad.

Los Trinchos Vivos en Ladera (TVL) reconfiguran el terreno con laderas continuas rectas, convexas y cóncavas, con o sin terraceo, controlando hidráulicamente el agua, evitando la erosión superficial de los materiales del trincho y alrededores de él.

Todos los postes de guadua utilizados en la construcción y sostenimiento de los Biofiltros Vivos (BFV), Trinchos Vivos Escalonados en Vertedero Abierto (TVEVA) y Trinchos Vivos en Ladera (TVL), se consideran micro pilotes de refuerzo en la validación geotécnica.

Las secciones de ladera reconfiguradas con Trinchos Vivos en Ladera (TVL), permiten sembrar especies vegetales (reforestar), cultivos productivos y obras civiles, afectadas por el proceso denudativo; uso que debe estar manifiesto en los diseños de las obras bioingenieriles, que deben estar avaladas por la comunidad y en acuerdo con la comunidad.

La reforestación con Nacedero en tres hectáreas de la parte alta y media del proceso de la Mesa Cundinamarca, desde el inicio de las obras hasta su culminación y funcionamiento, permitió observar a los tres meses, el rebrote de 900 estacas (30% de la siembra) y la restauración natural de arvenses tan solo cubre los filtros, como una alfombra de hierba. Esta situación recomendó la siembra de otras 3000 estacas de Nacedero en el terreno.

La descripción y muestreo de los rebrotes y sus raíces, a los 6 y 12 meses de la siembra inicial, determina las longitudes, espesores y cantidades establecidos por los ingenieros Agrónomos, tanto para las hojas, tallos y raíces. determinando los valores particulares en el terreno.

A los seis meses de la siembra inicial, se establece un rebrote del 90% de la segunda siembra, con unos 4500 nacederos que cubren con la sucesión de arvenses naturales, un 80% a 90% de las tres hectáreas sembradas.

El muestreo y los ensayos mecánicos e hidráulicos de los materiales hasta 3m de profundidad, para el análisis y diseños bioingenieriles, estableció valores de las propiedades de cohesión, ángulo de fricción, pesos unitarios, humedad de campo, humedades de limite líquido y plástico, granulometría y mineralogía, exigidos por la norma colombiana de construcciones sismo resistente (NSR 2010), en los análisis de estabilidad y diseños geotécnicos.

Un segundo muestreo y ensayo de los materiales en la parte media del proceso, se realizó al concluir las obras en noviembre del 2014, solo en la parte media, que determino materiales totalmente diferentes a los iniciales, en todas las propiedades mencionadas anteriormente por la norma colombiana NSR (2010).

Un segundo muestreo y ensayo de los materiales en la parte alta del proceso, se realizó a los nueve meses de funcionamiento de las obras (septiembre 22 del 2015), determinando materiales granulométricos similares (arenas pobre y bien gradadas y arenas lodosas y arcillosas), pero totalmente diferentes a las iniciales, en las demás propiedades mencionadas por la norma colombiana NSR (2010).

En septiembre del 2015, el no haber incluido a la comunidad en la realización de las obras, llevo al dueño de la parte media del proceso a cortar un 40% de los nacederos sembrados, para establecer cultivos de pan coger (Yuca y Plátano).

La reforestación con Sauco en el procesos de La Calera Cundinamarca, a los seis meses (marzo del 2014) de concluidas las obras, se estableció el 60% de rebrote de las 3000 estacas sembradas. La sucesión natural de arvenses se estableció en los sectores laterales, donde son altos los contenidos de humedad y material orgánico.

A los 11 y 15 meses de entregada la obra, el 60% y 90% del sauco fue dañado y consumido por caballos de uno de los dueños de los predios. En este momento se inició la colocación de unas 1500 estacas de sauco adicionales.

A los 20 meses (mayo de 2015), se estableció el 50% de rebrote de la segunda siembra de estacas y la recuperación de los saucos de la primera siembra, así como el total establecimiento de la sucesión natural de arvenses. Los resultados de los ensayos de laboratorio en los materiales, permitió proponer una correlación de los mayores valores de la cohesión con los altos contenidos de raíces. Un segundo muestreo y ensayo de los materiales en el proceso, se realizó a los 24 meses de funcionamiento de las obras (septiembre 22 del 2015), determinando materiales granulométricos similares (lodos arenosos, arenas lodosas y lodos arcillosos), pero totalmente diferentes a las iniciales, en las demás propiedades mencionadas por la norma colombiana NSR (2010). El análisis estadístico por regresión múltiple, determino que la resistencia de los materiales granulares, está en un 32% determinada por la cohesión, un 6% por limite plástico y un 4% por el peso unitario húmedo del material.

## **Recomendaciones**

En las obras sembrar varias especies, por los riesgos de destrucción generalizada por plagas y enfermedades, capacidad limitada para adaptarse a cambios ambientales, posibilidad de aumentar la proliferación de especies invasoras que pueden reducir la colonización de otras especies nativas y la sucesión natural de arvenses.

Las especies de complemento biológico en las obras de bioingeniería, incluyen doseles de varias alturas, para el control de la erosión pluvial y de escorrentía.

El cerramiento de las obras y la inclusión (capacitación y construcción) de la comunidad, es indispensable para la permanencia de las especies sembradas y el cuidado de las obras.

En temporada seca, es necesario planear el riego de la obra, ya que la falta de agua afecta el rebrote de las estacas, el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Para mejorar la cantidad y variedad de los nutrientes del suelo es importante el uso de abonos orgánicos que garanticen unas mejores condiciones para el establecimiento de las especies.

Estudiar el uso de especies endémicas en las obras, que permitan la restauración ecológica de la cobertura vegetal multistrata y el restablecimiento del ecosistema, que los suelos pierden por degradación.

Continuar investigando las especies sauco y nacedero, en las obras de bioingeniería debido a su rápido rebrote y crecimiento, además de su rango amplio de adaptación; así como la respuesta de los materiales consolidados al agua lluvia.



En zonas de ladera, no se debe prescindir de la vegetación y la materia orgánica, si se quiere mantener la estabilidad natural de las mismas.

## Bibliografía

- ASI, A. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. *NSR-10*.  
*Bogotá*.
- Barrera, J. ., Rivera, J. H., & Cadena, M. . (2015). Influencia del sistema radical de cuatro especies vegetales en la estabilidad de laderas a movimientos masales.
- Bishop, A. . (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Coppin, N. J., & Richards, I. G. (1990). *Use of vegetation in civil engineering*. Construction Industry Research and Information Association London.
- Coulomb, C. A. (1773). Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mem. Div. Sav. Acad.*, 7.
- Davoudi, M. H. (2011). Influence of willow root density on shear resistance parameters in fine grain soils using in situ direct shear tests. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5(2), 157.
- Docker, B. B., & Hubble, T. C. T. (2008). Quantifying the enhanced soil shear strength beneath four riparian tree species. *Geomorphology*, 100, 400-418.
- Ennos, A. R. (1989). The mechanics of anchorage in seedlings of sunflower, *Helianthus annuus* L. *New Phytologist*, 113(2), 185-192.
- Ennos, A. R. (1990). The anchorage of leek seedlings: the effect of root length and soil strength. *Annals of Botany*, 65(4), 409-416.

- Fellenius, W. (1986). Calculation of stability of earth dams. En *Second Congress on Large Darns* (pp. 445-462).
- Genet, M., Stokes, A., Fourcaud, T., & Norris, J. E. (2010). The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest. *Ecological engineering*, 36(3), 265-275.
- Greenway, D. R. (1987). Vegetation and slope stability. *Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology/edited by MG Anderson and KS Richards*.
- Greenwood, J. R., Norris, J. E., & Wint, J. (2004). Assessing the contribution of vegetation to slope stability. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, 157(4), 199-207.
- Janbu, N. (1955). Application of Composite Slip Surfaces for Stability Analysis. En *European Conference on Stability of Earth Slopes* (Vol. 3, pp. 43-49).
- Londoño, G. F. (2013). *Sostenibilidad Ambiental y Resistencia al Cortante Tangencial en Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas y Rocas Metamórficas de Zonas de Ladera de la Ciudad de Manizales*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Moore, J. R. (2000). Differences in maximum resistive bending moments of Pinus radiata trees grown on a range of soil types. *Forest Ecology and Management*, 135(1), 63-71.
- Morgan, R. P., & Rickson, R. J. (2003). *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. Taylor & Francis.

- Norris, J. E. (2005). *Root mechanics applied to slope stability*. Nottingham Trent University.
- Norris, Joanne E., & Greenwood, J. R. (2008). An introduction to types of vegetated slopes. *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*, 9-15.
- O'Loughlin, C., & Ziemer, R. R. (1982). The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests.
- Peck, R. B., & Terzaghi, K. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*.
- Pla, I. (1996). *Degradación de suelos en zonas de ladera en América Latina. En El uso sostenible del suelo en zonas de ladera*.
- Pla, I. (2013). Diagnóstico y remediación de problemas de erosión superficial y en masa.
- Pollen, N. (2007). Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*, 69(3), 197-205.
- 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*, 21(4), 385-402.
- Rivera, J. (1998). Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. *Avances técnicos cenicafé*, 256, 1-8.
- Rivera, J. (2008). *Curso de bioingeniería para la prevención y control de erosión y deslizamientos en zonas de ladera andina, universidad de caldas. Manizales: Universidad de Caldas*.
- Rivera, J. (2013). *Sistemas de drenaje con filtros vivos para la estabilización y restauración de movimientos masales en zonas de ladera*.

- Rivera, J. H. (1999). Susceptibilidad y Predicción de la Erosión en los Suelos de la Ladera de la Zona Cafetera Central Colombiana. *Trabajo Dirigido de Grado, Doctor en Ingeniería área de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Posgrado de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*
- Rivera, J., Sánchez, F., Franco, L., & Osorio, A. (2017). *Manual de procedimientos para el manejo de procesos denudativos con obras de bioingeniería.* Cundinamarca.
- Ruiz, C. (2015). *Caracterización geotécnica del proceso denudativo de la vereda El Líbano, municipio de La Calera, estabilizado con obras de bioingeniería.* Universidad de Caldas, Manizales.
- Skempton, A. W., & DeLory, F. A. (1984). Stability of natural slopes in London clay. En *Selected Papers on Soil Mechanics* (pp. 70-73). Thomas Telford Publishing.
- Switala, B. M., Tamagnini, R., Sudan Acharya, M., & Wu, W. (2015). Impact of vegetation on stability of slopes subjected to rainfall-numerical aspect. En *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 17).
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice.* John Wiley & Sons.
- Thorne, C. (1990). Effects of vegetation on river bank erosion and stability.
- Tosi, M. (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 87(4), 268-283.

- Tsukamoto, Y., & Kusakabe, O. (1984). Vegetative influences on debris slide occurrences on steep slopes in Japan. En *Proc. Symp. Effects Forest Land Use on Erosion and Slope Stability. Environment and Policy Institute, Honolulu.*
- Van Beek, L. P. H., Wint, J., Cammeraat, L. H., & Edwards, J. P. (2007). Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. En *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability* (pp. 91-109). Springer.
- Vargas, M. (2015). *Caracterización Geotécnica del proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo, municipio de La Mesa Cundinamarca, estabilizado con obras de bioingeniería.* Universidad de Caldas, Manizales.
- Waldron, L. J. (1977). The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41(5), 843-849.
- Waldron, L. J., & Dakessian, S. (1981). Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties. *Soil science*, 132(6), 427-435.
- Watson, A. J., & Mardern, M. (2004). Live root-wood tensile strengths of some common New Zealand indigenous and plantation tree species. *New Zealand journal of forestry science*, 34(3), 344.
- Wu, T. H., McKinnell III, W. P., & Swanston, D. N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), 19-33.



Wu, W., Switala, B. M., Acharya, M. S., Tamagnini, R., Auer, M., Graf, F., ...

Xiang, W. (2015). Effect of vegetation on stability of soil slopes:  
numerical aspect. En *Recent Advances in Modeling Landslides and  
Debris Flows* (pp. 163-177). Springer.

## Anexos

Anexo 1. Columnas estratigráficas mecánicas del proceso de la vereda el Libano municipio de la Calera departamento de Cundinamarca.

Columna estratigráfica mecánica de la perforación 1. Ruiz, 2015.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUSC	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh (t/m <sup>3</sup> )	S (t/m <sup>2</sup> )
0,6-0,9	MS	11,1	29,6	16	13,6	8,7	45,3	2,4	3,1
0,9-1,2	MS	6,9	21,2	15,4	5,8	NO	NO	NO	NO
1,2-1,5	SM	21,8	25,1	21,6	3,5	14,4	23,8	2,1	2,8
1,5-1,8	SM	20	22,8	20,5	2,3	33,4	35	3,4	7,5
1,8-2,1	SM	16,3	26,5	25	1,5	14,1	33,2	2,1	4,2

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Limite Liquido, LP%: Limite Plástico, IP%: Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Columna estratigráfica mecánica de la perforación 2. Ruiz, 2015.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUSC	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh (t/m <sup>3</sup> )	S (t/m <sup>2</sup> )
0,0-0,3	SM	20,4	48,8	37,1	11,7	10,3	21,1	2,1	1,3
0,3-0,6	MS	16,9	43,5	27,7	15,8	13,8	40,9	1,9	2,4
0,6-0,9	SM	16,7	38,4	32,3	6,1	26,2	17,8	2	3,3

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Columna estratigráfica mecánica de la perforación 3 del proceso denudativo. Ruiz, 2015

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUSC	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh (t/m <sup>3</sup> )	S (t/m <sup>2</sup> )
0,0-0,25	SM	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
0,25-0,5	MS	18,4	36,9	22,6	14,4	14,7	26,9	1,6	1,9
0,5-0,75	MS	21,5	42,7	34,8	8	2,5	40,1	2	1,5
0,75-1,0	SM	30,1	51,9	48,1	3,9	25,3	37	2,1	4,1
1,0-1,25	MS	22,5	36,8	27,5	9,3	31	27,2	2,8	5

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Columna estratigráfica mecánica de la perforación 4 del proceso denudativo. Ruiz, 2015.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUSC	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción grados (°)	Vh (t/m <sup>3</sup> )	S (t/m <sup>2</sup> )
0,0-0,25	MS	20,1	38,3	28,2	10,1	38,9	45,7	3,3	4,8
0,25-0,5	MS	23,9	46,4	35,2	11,2	7	38,6	2,1	1,5
0,5-0,75	SM	24,2	37,5	34,7	2,8	7,7	24	1,8	1,6
0,75-1,0	SM	11	38,4	32,8	5,6	112,6	9,7	3,3	12,2
1,0-1,25	MS	21,6	62,4	36,5	25,8	7,2	39,6	2,6	4,6

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Columna estratigráfica mecánica de la re perforación (perforación 5) del proceso denudativo. Ruiz, 2015.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUSC	W%	LL%	LP%	LP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh(t/m <sup>3</sup> )	S (t/m <sup>2</sup> )
0,0-0,25	MC	28,9	40,4	14,2	26,2	31,9	6,6	3,7	3,4
0,25-0,5	MC	39,9	43,5	29,7	13,9	28,4	29,8	2	3,5
0,5-0,75	MS	30,9	42,4	23,3	19,1	4,9	17,2	1,7	0,9
0,75-1,0	SM	22	31,8	21,9	9,9	9,6	24,5	2	1,9
1,0-1,25	SM	25,3	32,2	21,6	10,6	12,8	25,7	2	2,5

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Anexo 2. Columnas estratigráficas mecánicas del proceso de la vereda Tolú Bajo municipio de la Mesa departamento de Cundinamarca.

Columna estratigráfica mecánica de las perforaciones de la parte alta del proceso denudativo. Martínez, 2014.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUCS	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh(t/m <sup>3</sup> )	S (t/m <sup>2</sup> )
0,0-0,25	SM	21,1	28	16,8	11,2	29,9	19,7	1,5	2
0,25-0,5	SM	17,6	28,9	28,7	0,2	86,3	11,9	1,7	3,1
0,5-0,75	SP	6,8	21	19,8	1,2	33,8	21,7	1,9	5,2
0,75-1,3	SW	11,6	24	17,8	6,2	45,6	21,9	1,9	9,1
1,3-1,5	SP	10	26	12	14	7,2	22,9	1,5	9,1
1,5-1,7	SM	8,2	17	14,6	2,4	126,5	19,2	2,3	13,2
1,7-1,9	SC	8	22	20,7	1,3	130,9	20,1	2,2	15,3
1,9-2,1	SM	6,8	21	19,8	1,2	110,7	21	2,4	17,2

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Columna estratigráfica mecánica de las perforaciones de la parte media del proceso denudativo. Martínez, 2014.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUCS	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh(t/m <sup>3</sup> )	S (Ton/m <sup>2</sup> )
0,0-0,3	SC	23,2	51,3	40	11,3	45,67	35,6	1,9	6,6
0,3-0,6	SM	24	59,6	18,3	41,3	65,34	40,6	2,2	14,3
0,6-0,9	SP	7,7	48,7	23,2	25,5	51,5	17,8	3	7,3
0,9-1,1	SW	15,2	26	22,3	3,7	85,8	24,8	2,9	14,5
1,1-1,4	SP	9,8	11,9	10,7	1,2	70,4	23,3	2,1	14,4
1,4-1,7	SM	25,3	31,8	22,1	9,7	60,9	20,8	2,3	14
1,7-2,0	SC	24,7	14	6,4	7,6	65,8	11,8	1,9	8,4
2,0-2,3	SM	18,8	35	8,1	26,9	58,29	25,4	3	19,4
2,3-2,5	SD	16,9	19,2	17,9	1,3	25,51	20,3	2,1	16,7

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Columna estratigráfica mecánica de las perforaciones de la parte baja del proceso denudativo. Martínez, 2014.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUCS	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh(t/m <sup>3</sup> )	S (t/m <sup>2</sup> )
0,0-0,3	SW	17,6	25,1	9,2	15,9	59,5	23,9	2	5
0,3-0,6	SP	23,3	28,8	24,3	4,5	80,7	25	2,2	8,7
0,6.-0,9	SP	18,8	27	17,8	9,2	56,6	17,3	2,5	7
0,9-1,1	SM	16,9	34	12,9	21,1	61,8	11	2,1	5,2
1,1-1,4	SM	17,4	67	21,9	45,1	39,9	16,9	2,2	8,8
1,4-1,7	SM	75,6	35,6	16,5	5,4	19,5	29,1	2,6	19,2
1,7-2,0	SP	10,9	37,8	26,4	9,4	80,7	28	3	26,2
2,0-2,3	SM	19,4	14	30,4	16,4	39,9	16,9	2,7	16,2
2,3-2,5	SM	9,1	39	9,6	29,5	25,5	20,3	2	20,6

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Columna estratigráfica mecánica de la re perforación (P1) parte alta del proceso denudativo. Vargas, 2015.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUCS	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh(t/m <sup>3</sup> )	S (t/m <sup>2</sup> )
0,0-0,25	GM	6,8	28,8	23,4	5,5	70,9	26,6	1,9	8,3
0,25-0,5	GM	14,1	32,1	26,9	5,2	49,2	28,1	2,1	6,4
0,5-0,75	GM	6,5	36,3	21,8	14,5	49,2	30,1	2	6,3
0,75-1,0	GM	4,6	26,9	26,7	0,2	12,9	34,7	2,1	3,1
1,0-1,25	SP	7,4	37,2	25,2	12	64,4	5	2,2	6,8
1,25-1,5	GM	6	33,1	19,15	14	19,2	34,6	2,3	4,2

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Columna estratigráfica mecánica de la re perforación uno (P1), en la parte media del proceso denudativo.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUCS	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh(t/m <sup>3</sup> )	S(t/m <sup>2</sup> )
0,0-0,3	SP	9,3	41	37,5	3,5	28,7	24,2	2,5	3,2
0,3-0,6	SP	15,7	27	25	2	56,4	25,1	3,4	6,3
0,6-0,9	SC	18,1	37,5	22,5	15	12,8	33,9	2,4	2,7
0,9-1,2	SM	11,6	62	41,7	20,3	47,1	23	2,8	6,7
1,2-1,5	SM	13,4	42	41,7	0,3	25,7	27,5	2,9	4,8
1,5-1,8	SM	15	38,5	22,5	16	42,9	24,4	3,7	7,3

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

Columna estratigráfica mecánica de la re perforación dos (P2), en la parte media del proceso denudativo.

Profundidad (m)	Propiedades Índice								
	SUCS	W%	LL%	LP%	IP%	C(kPa)	Fricción Grados (°)	Vh(t/m <sup>3</sup> )	S(t/m <sup>2</sup> )Vh
0,9-1,2	SP	5,1	42	15,5	26,5	155,6	5,7	1,4	15,7
1,2-1,5	SP	8,7	40	10,8	29,2	37,9	29,5	1,8	5,3

SUSC: Sistema unificado de clasificación de suelos, W%: Humedad Natural, LL%: Límite Líquido, LP%: Límite Plástico, IP%:

Índice Plástico, C (kPa): Cohesión, Vh (t/m<sup>3</sup>): Peso Unitario Húmedo, S (t/m<sup>2</sup>): Resistencia al Cortante Tangencial.

*Anexo 3. Resultados del análisis estadístico de selección y correlación múltiple*

*Selección de la primera variable.*

<b>SELECCIÓN STEPWISE : PASO 1</b>					
<b>VARIABLE DE ENTRADA LA COHESIÓN (C): R-CUADRADO = 0.3294 y C(p) = 9.7663</b>					
<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>					
<b>FUENTE</b>	<b>DF</b>	<b>SUMA DE CUADRADOS</b>	<b>MEDIA CUADRADA</b>	<b>VALOR F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>MODELO</b>	1	667.21558	667.21558	28.98	<0.0001
<b>ERROR</b>	59	1358.27524	23.02161		
<b>CORRELACIÓN TOTAL</b>	60	2025.49082			
<b>VARIABLE</b>	<b>PARAMETRO ESTIMADO</b>	<b>ERROR ESTÁNDAR</b>	<b>TYPE II SS</b>	<b>VALOR F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>INTERCEPTO</b>	3.33847	1.01214	250.46565	10.88	0.0017
<b>C</b>	0.09811	0.01822	667.21558	28.98	<0.0001
<b>LÍMITES EN LA CONDICIÓN NUMÉRICA: 1, 1</b>					

*Selección de la segunda variable.*

<b>SELECCIÓN STEPWISE : PASO 2</b>					
<b>VARIABLE DE ENTRADA EL LIMITE PLÁSTICO (LP): R-CUADRADO = 0.3809 y C(p) = 6.6364</b>					
<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>					
<b>FUENTE</b>	<b>DF</b>	<b>SUMA DE CUADRADOS</b>	<b>MEDIA CUADRADA</b>	<b>VALOR F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>MODELO</b>	2	771.57766	385.78883	17.84	<0.0001
<b>ERROR</b>	58	1253.91316	21.61919		
<b>CORRELACIÓN TOTAL</b>	60	2025.49082			
<b>VARIABLE</b>	<b>PARAMETRO ESTIMADO</b>	<b>ERROR ESTÁNDAR</b>	<b>TYPE II SS</b>	<b>VALOR F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>INTERCEPT O</b>	7.31376	2.05808	273.02131	12.63	0.0008
<b>LP</b>	-0.15002	0.06828	104.36208	4.83	0.0320
<b>C</b>	0.08827	0.01822	507.49923	23.47	<0.0001
<b>LÍMITES EN LA CONDICIÓN NUMERICA: 1.0643 - 4.2571</b>					

*Selección de la tercera variable*

<b>SELECCIÓN STEPWISE : PASO 3</b>					
<b>VARIABLE DE ENTRADA EL PESO UNITARIO HUMEDO(<math>Y_h</math>): R-CUADRADO = 0.4193 y C(p) = 4.8161</b>					
<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>					
<b>FUENTE</b>	<b>DF</b>	<b>SUMA DE CUADRADOS</b>	<b>MEDIA CUADRADA</b>	<b>VALOR F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>MODELO</b>	3	849.29649	283.09883	13.72	<0.0001
<b>ERROR</b>	57	1176.19433	20.63499		
<b>CORRELACIÓN TOTAL</b>	60	2025.49082			
<b>VARIABLE</b>	<b>PARAMETRO ESTIMADO</b>	<b>ERROR ESTÁNDAR</b>	<b>TYPE II SS</b>	<b>VALOR F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>INTERCEPTO</b>	3.02898	2.98621	21.23031	1.03	0.3147
<b>LP</b>	-0.16955	0.06746	130.33902	6.32	0.0148
<b>C</b>	0.08367	0.01796	448.05526	21.71	<0.0001
<b><math>Y_h</math></b>	2.14706	1.10633	77.71883	3.77	0.0572
<b>LÍMITES EN LA CONDICIÓN NUMERICA: 1.0885 - 9.6127</b>					

*Resumen de la selección de variable.*

PASO	VARIABLE ENTRADA	ETIQUETA	NUMERO VARIABLE	R2 PARCIAL	R2 MODELO	C(p)	VALOR F	Pr > F
1	C	C	1	0.3294	0.3294	9.7663	28.98	<0.0001
2	LP	LP	2	0.0515	0.3809	6.6364	4.83	0.0320
3	Yh	Yh	3	0.0384	0.4193	4.8161	3.77	0.0572

*Coficiente de correlación de Pearson (r) (C.C.r) – Probabilidad > |r| BAJO H0: Rho=0 (P) Número de observaciones (No.O).*

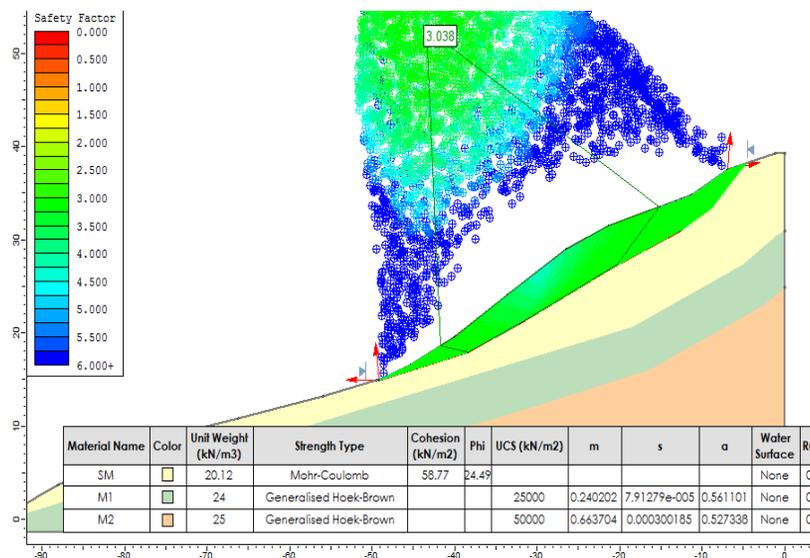
		Z	W	LL	LP	IP	C	Φ	Yh	S
<b>C.C.r</b>	Z	1.00000	-0.08673	-0.32181	-0.33382	-0.00325	0.16196	-0.16788	0.15671	0.65157
<b>P</b>	Z		0.5027	0.0108	0.0080	0.9800	0.2123	0.1959	0.2278	<0.0001
<b>No.O</b>		63	62	62	62	62	61	61	61	61
<b>C.C.r</b>	W	-0.08673	1.00000	0.18972	0.10295	0.02075	-0.33365	0.14026	0.05452	-0.04368
<b>P</b>	W	0.5027		0.1397	0.4295	0.8728	0.0086	0.2810	0.6764	0.7382
<b>No.O</b>		62	62	62	62	62	61	61	61	61
<b>C.C.r</b>	LL	-32181	0.18972	1.00000	0.51827	0.62406	-0.24693	0.23432	0.07846	-0.22213
<b>P</b>	LL	0.0108	0.1397		<0.0001	<0.0001	0.0550	0.0691	0.5478	0.0853
<b>No.O</b>		62	62	62	62	62	61	61	61	61
<b>C.C.r</b>	LP	-33382	0.10295	0.51827	1.00000	-0.23494	-0.24576	0.29037	0.11995	-0.36108
<b>P</b>	LP	0.0080	0.4259	<0.0001		0.0661	0.0562	0.0232	0.3572	0.0043
<b>No.O</b>		62	62	62	62	62	61	61	61	61

Numero de observaciones coeficientes de correlación de Pearson (C.C.r) – Probabilidad > IrI Bajo H0: Rho=0 (P).

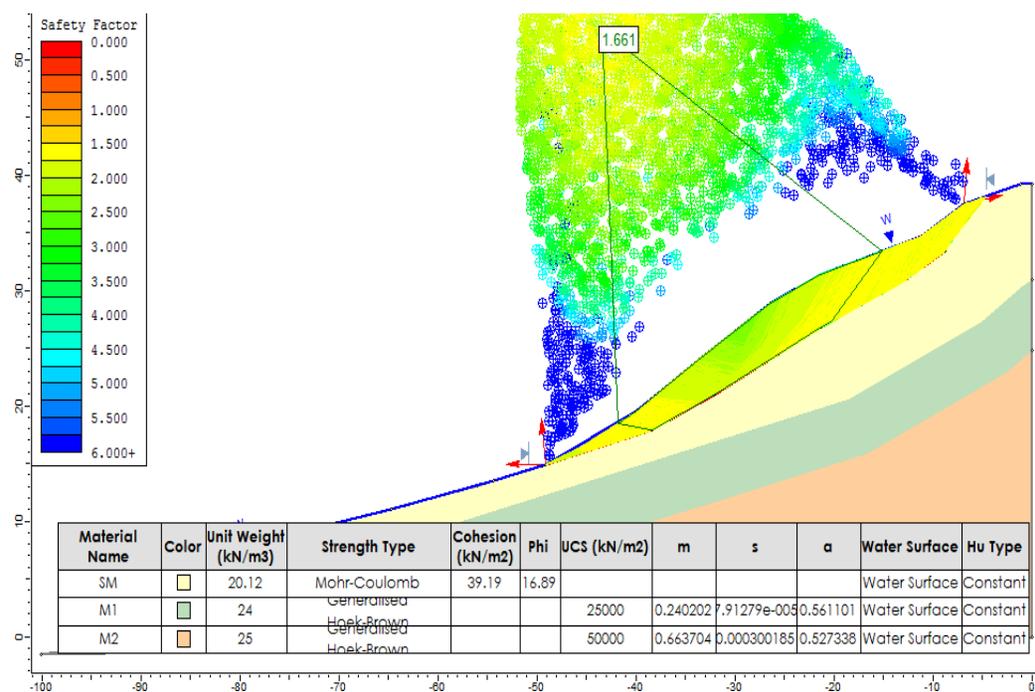
C.C.r	C	0.16198	-0.33365	-0.24693	-0.24576	-0.06338	1.00000	-0.47397	0.09752	0.57394
P	C	0.2123	0.0086	0.0550	0.0562	0.6275		0.0001	0.4547	<0.0001
No.O		61	61	61	61	61	61	61	61	61
C.C.r	Φ	-0.16788	0.14026	0.23432	0.29037	-0.04471	-0.47397	1.00000	0.05006	-0.22186
P	Φ	0.1959	0.2810	0.0691	0.0232	0.7323	0.0001		0.7016	0.0857
No.O		61	61	61	61	61	61	61	61	61
C.C.r	Yh	0.15671	0.05452	0.07846	0.11995	0.00650	0.09752	0.05006	1.00000	0.21504
P	Yh	0.2278	0.6764	0.5478	0.3572	0.9604	0.4547	0.7016		0.0961
No.O		61	61	61	61	61	61	61	61	61
C.C.r	S	0.65157	-0.04368	-0.22213	-0.36108	0.08911	0.57394	-0.22186	0.21504	1.00000
P	S	<0.0001	0.7382	0.0853	0.0043	0.4947	<0.0001	0.0857	0.0961	
No.O		61	61	61	61	61	61	61	61	61

Anexo 4. Factores de seguridad en la parte media del proceso denudativo vereda Tolú Bajo municipio de la Mesa departamento de Cundinamarca.

### Modelación del terreno antes del movimiento en masa para falla planar

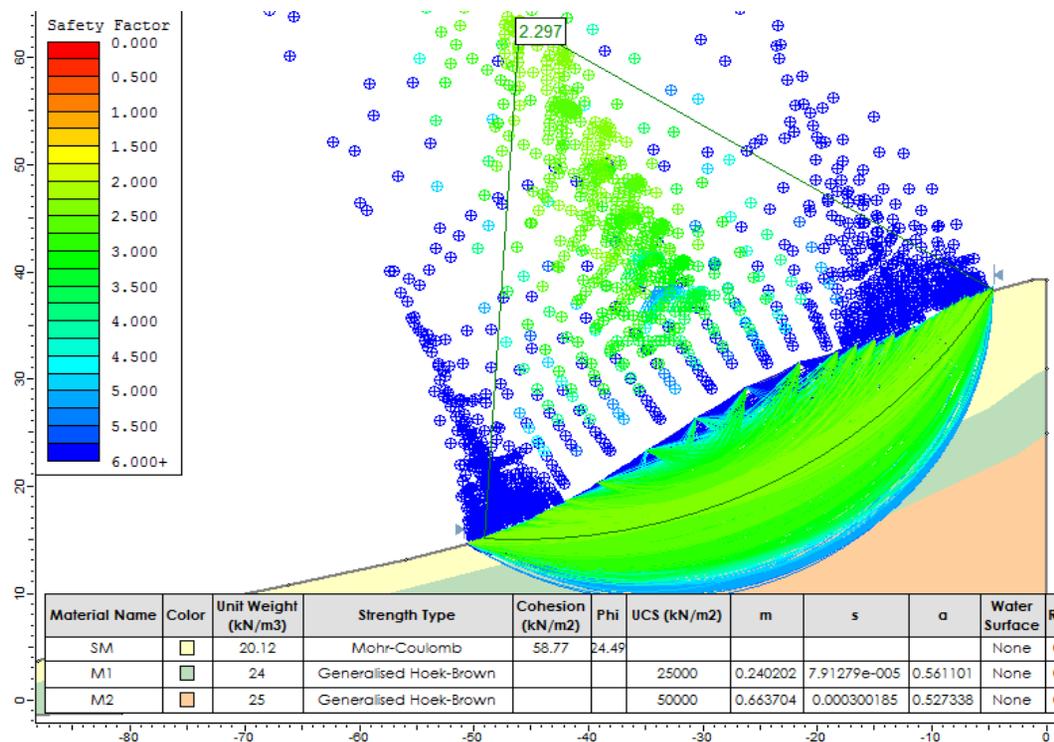


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales

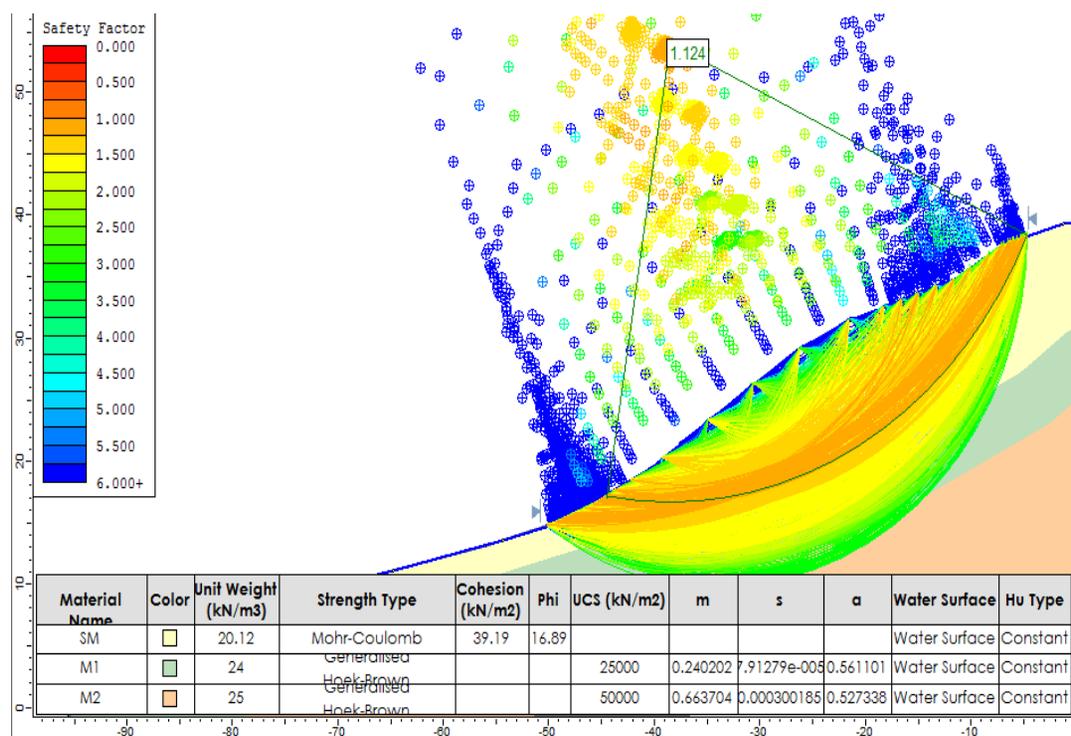


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos

### Modelación del terreno antes del movimiento en masa para falla circular

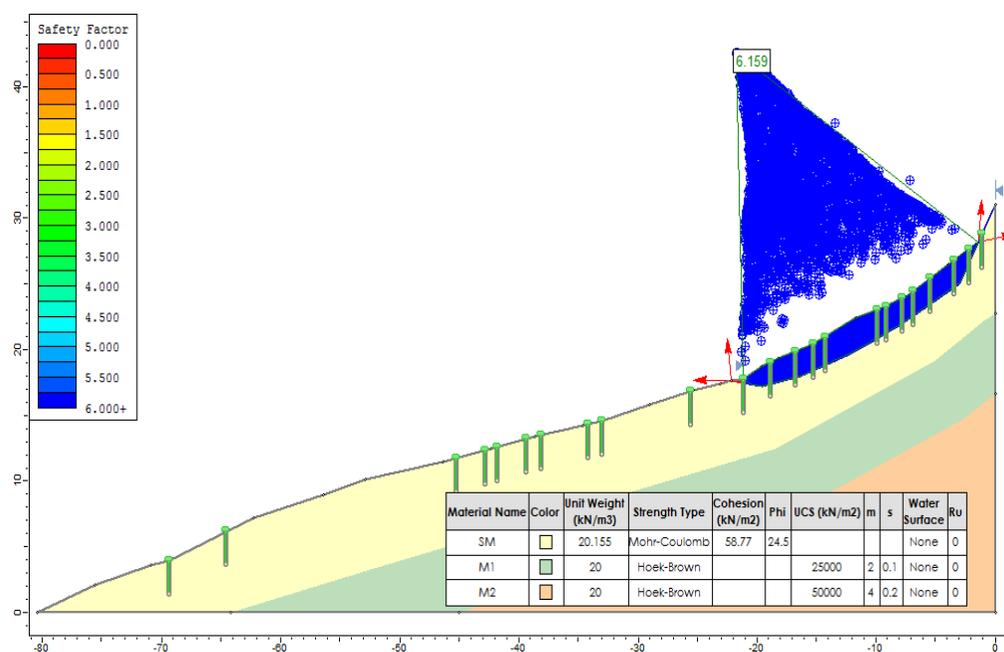


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.

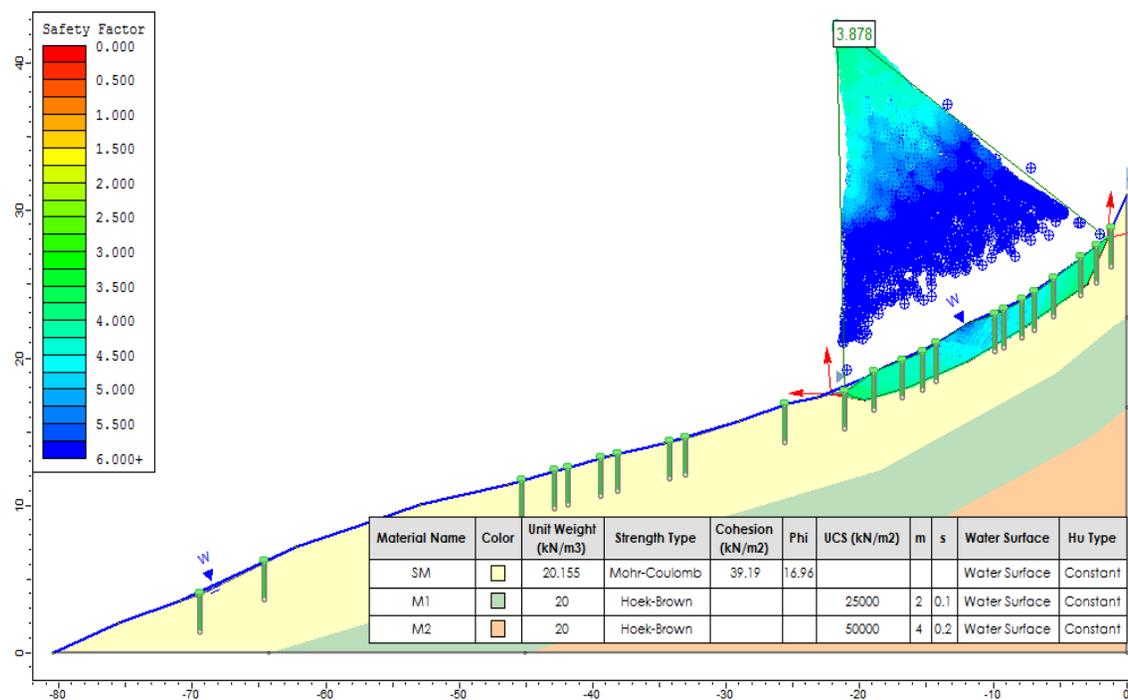


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

**Modelación del terreno con las obras bioingenieriles que adicionan  $16,6\text{kN/m}^2$  por poste de guadua a la resistencia del material  
(NSR, 2010) para falla planar.**

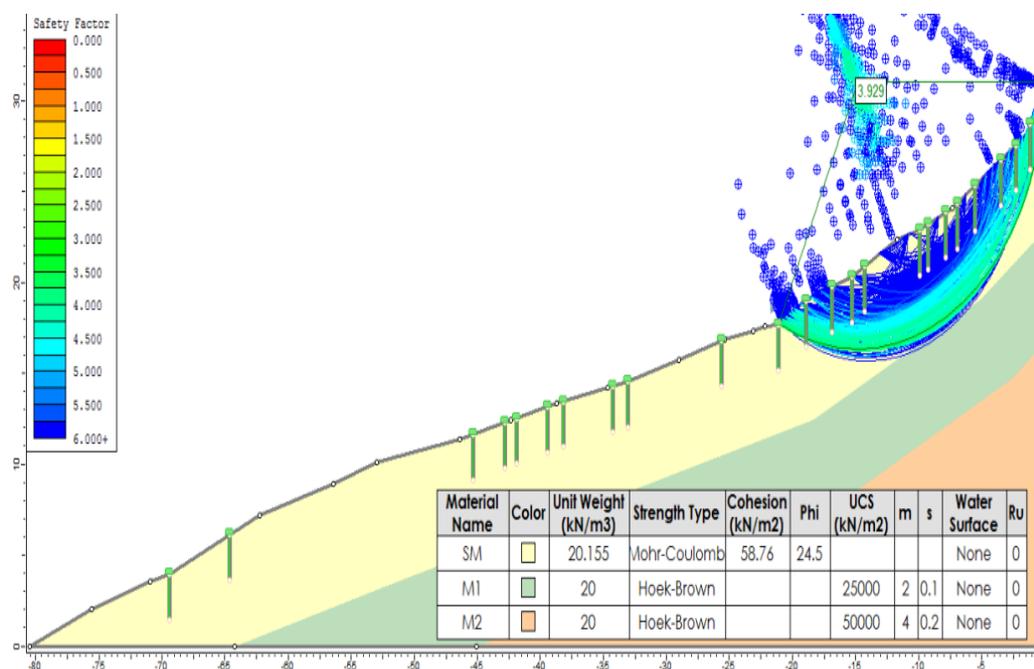


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.

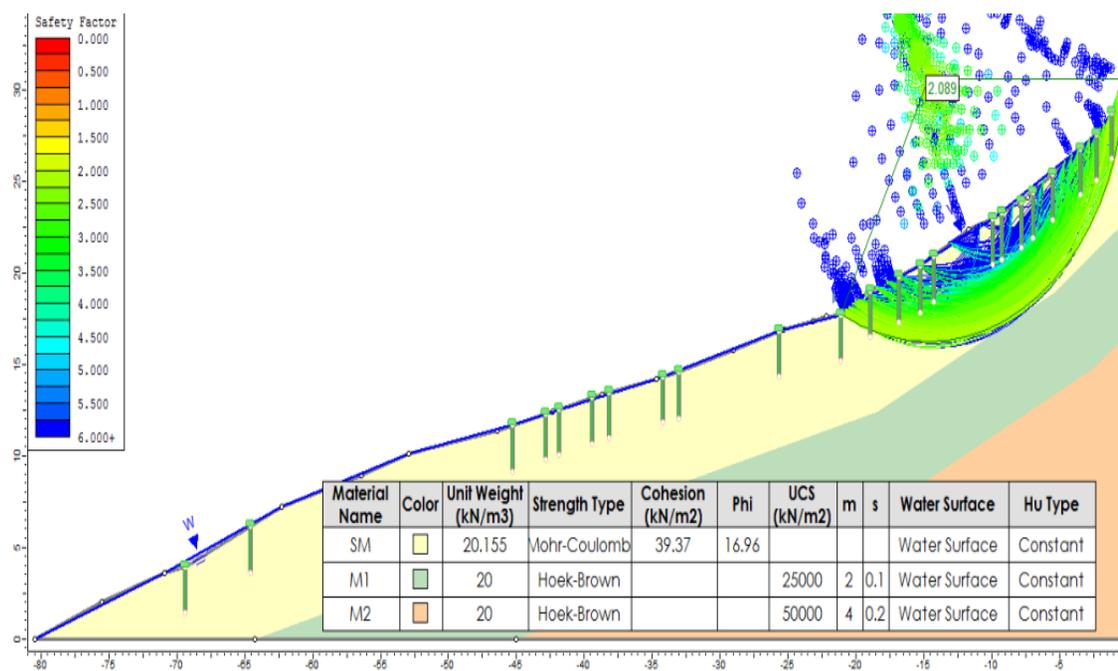


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

**Modelación del terreno con las obras bioingenieriles que adicionan  $16,6\text{kN/m}^2$  por poste de guadua a la resistencia del material (NSR, 2010) para falla circular.**

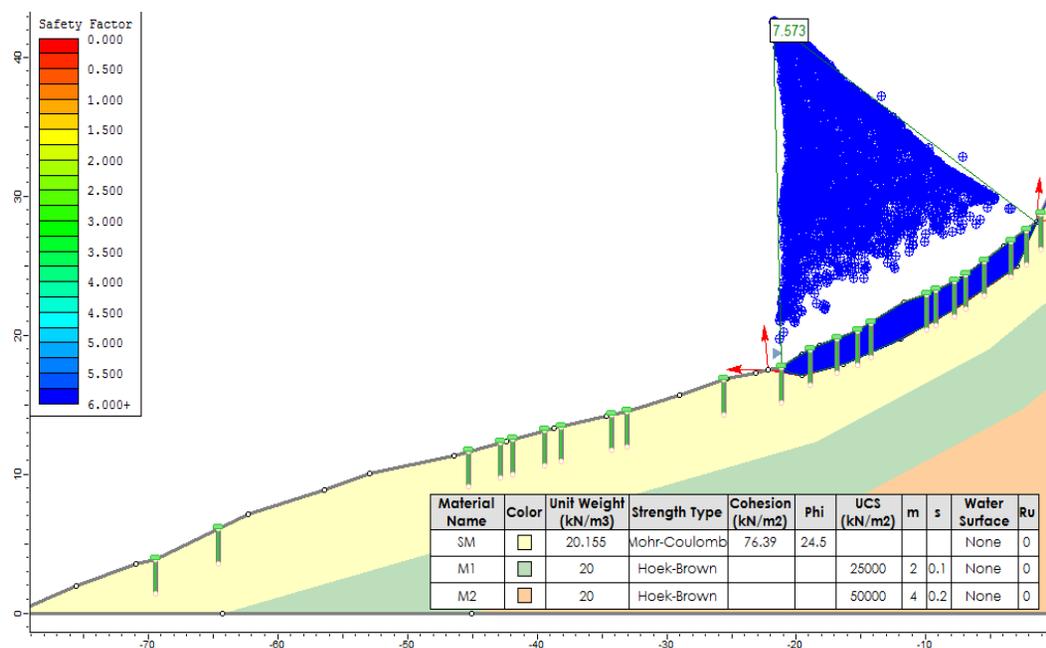


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.

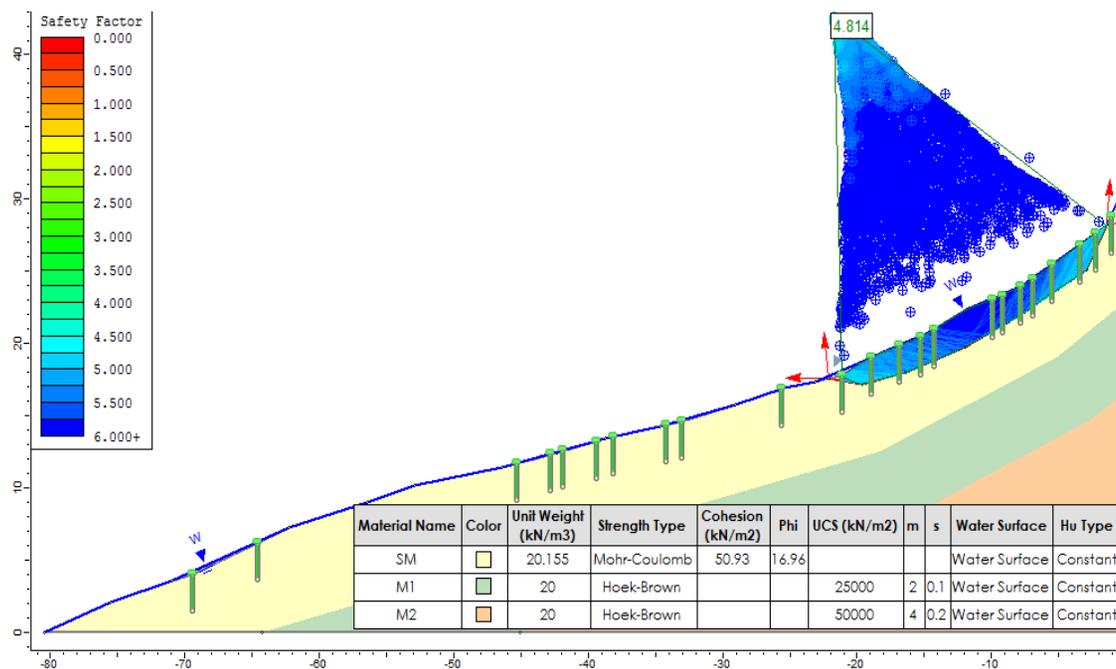


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

**Modelación del terreno con las obras bioingenieriles que adicionan  $16,6\text{kN/m}^2$  por poste de guadua a la resistencia del material (NSR, 2010) y por el sistema parcial de raíces (30% más de cohesión al material) para falla planar.**

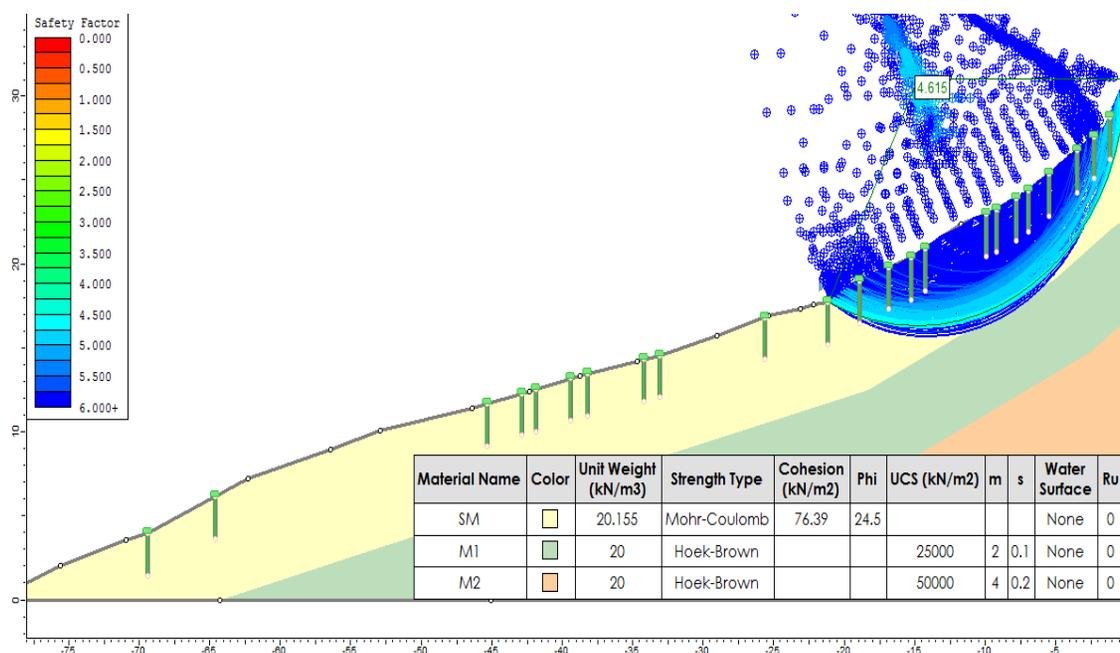


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.

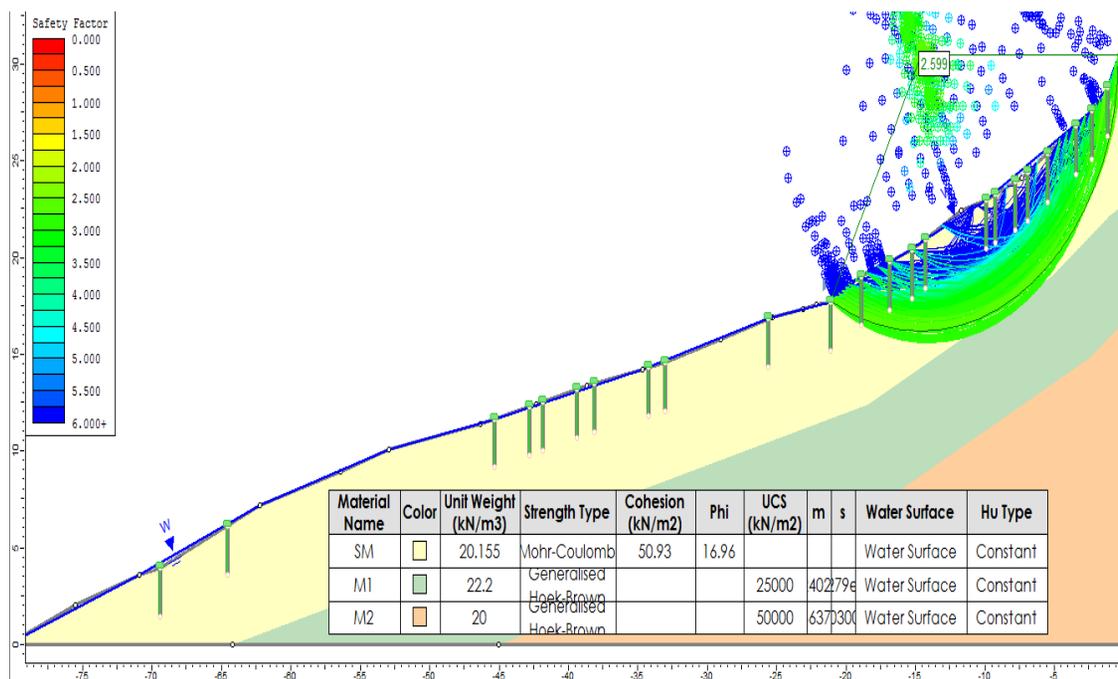


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

**Modelación del terreno con las obras bioingenieriles que adicionan  $16,6\text{kN/m}^2$  por poste de guadua a la resistencia del material (NSR, 2010) y por el sistema parcial de raíces (30% más de cohesión al material) para falla circular.**

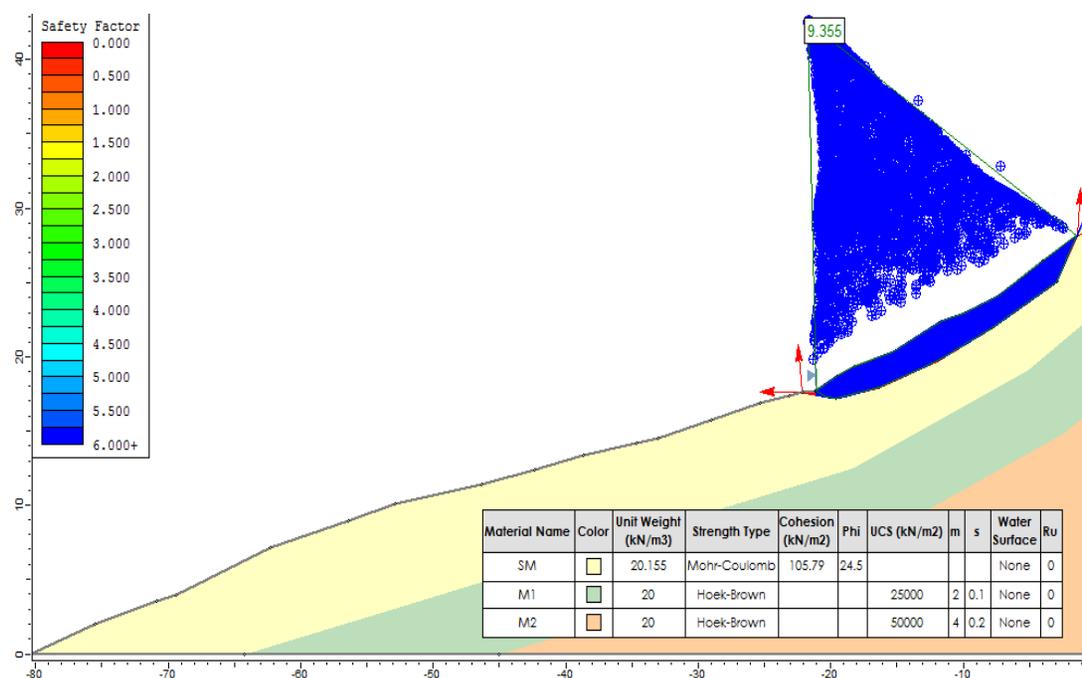


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.

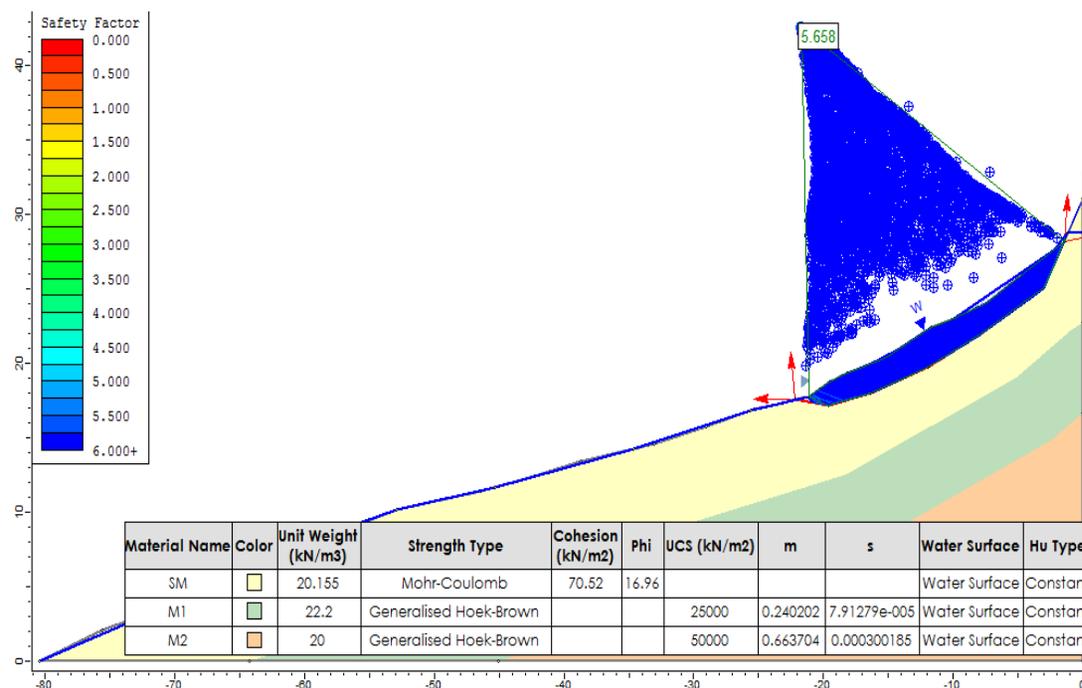


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

**Modelación del terreno con el sistema total de raíces (80% más de cohesión al material) para falla planar.**

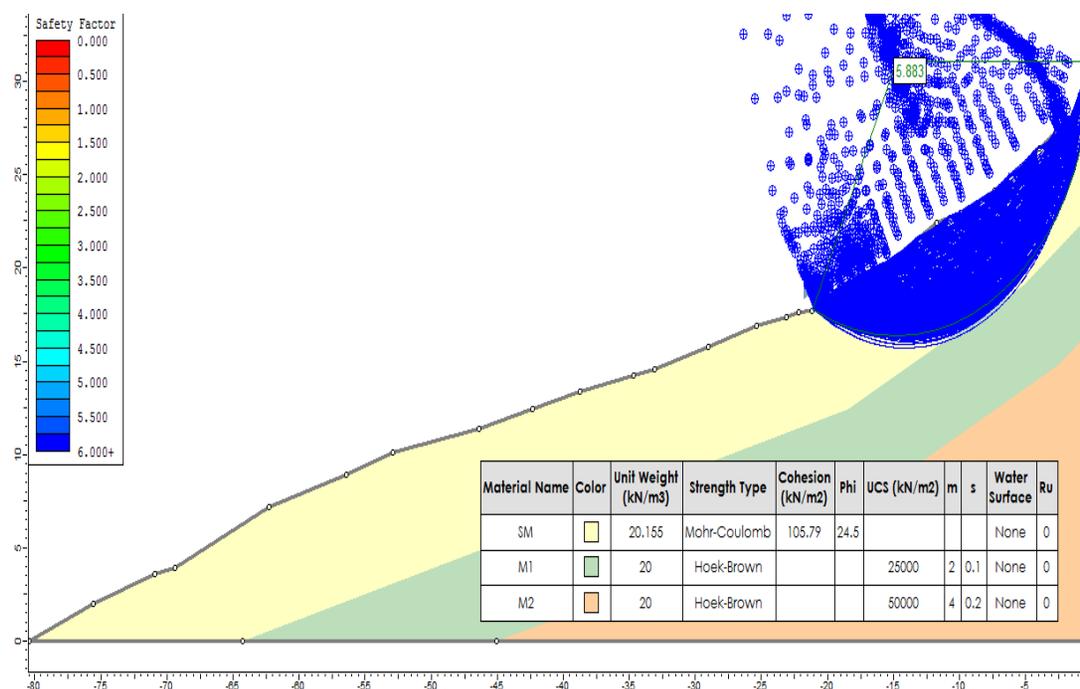


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.

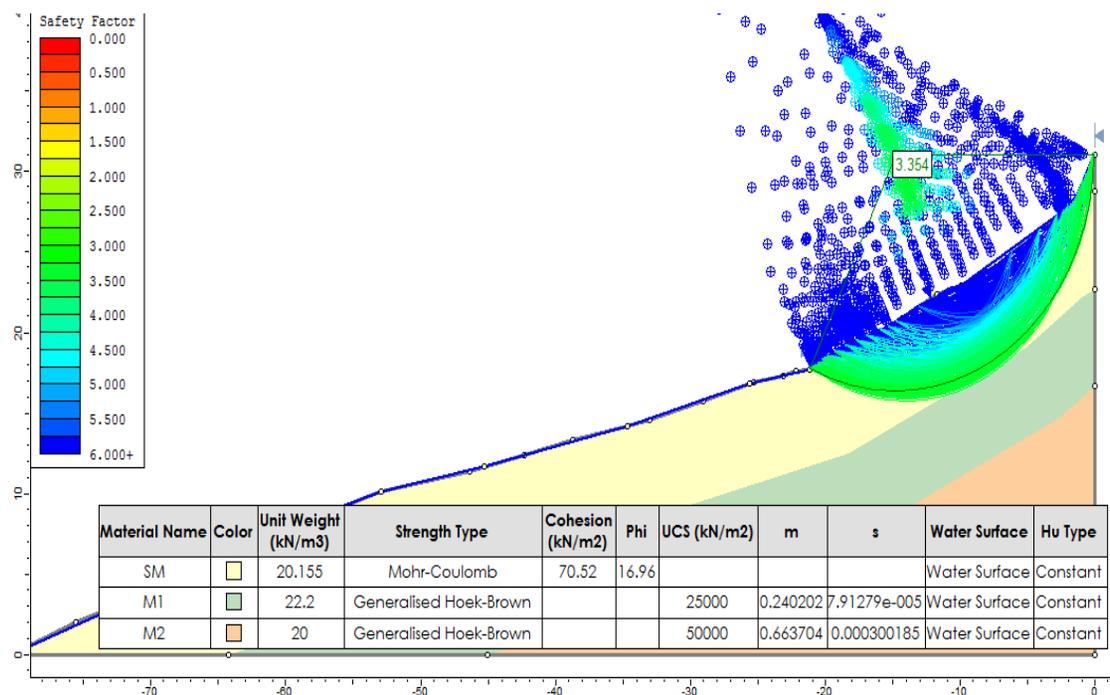


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

**Modelación del terreno con el sistema total de raíces (80% más de cohesión al material) para falla circular.**



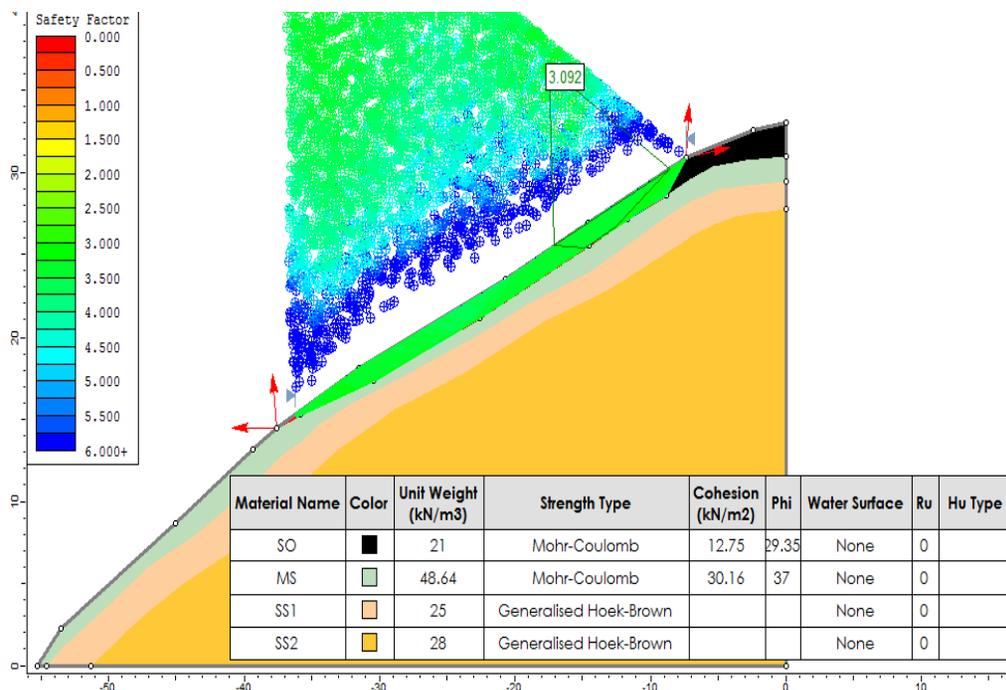
Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.



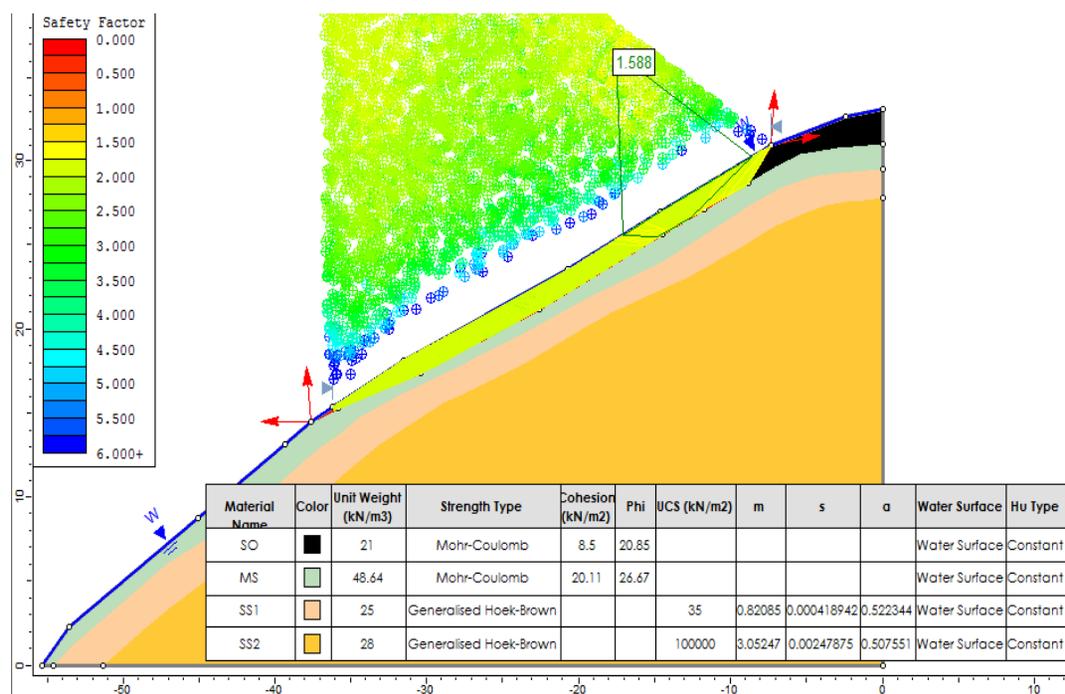
Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

Anexo 5 Factores de seguridad en el proceso denudativo de la vereda Tolú Bajo municipio de la Mesa de Cundinamarca.

Modelación del terreno antes del movimiento en masa para falla planar

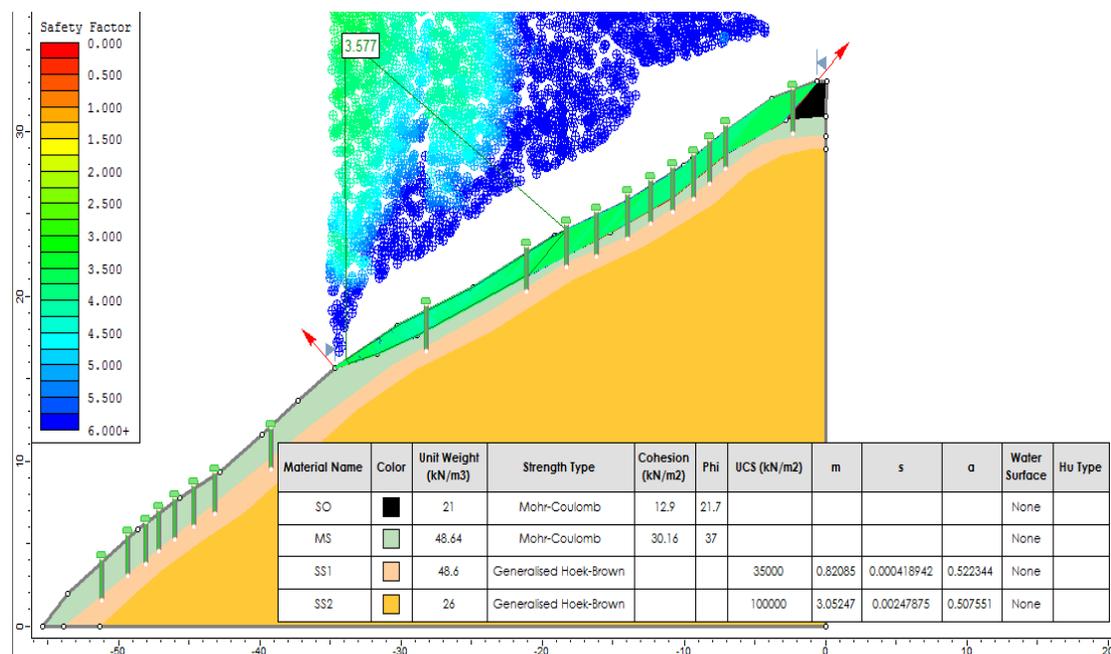


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.

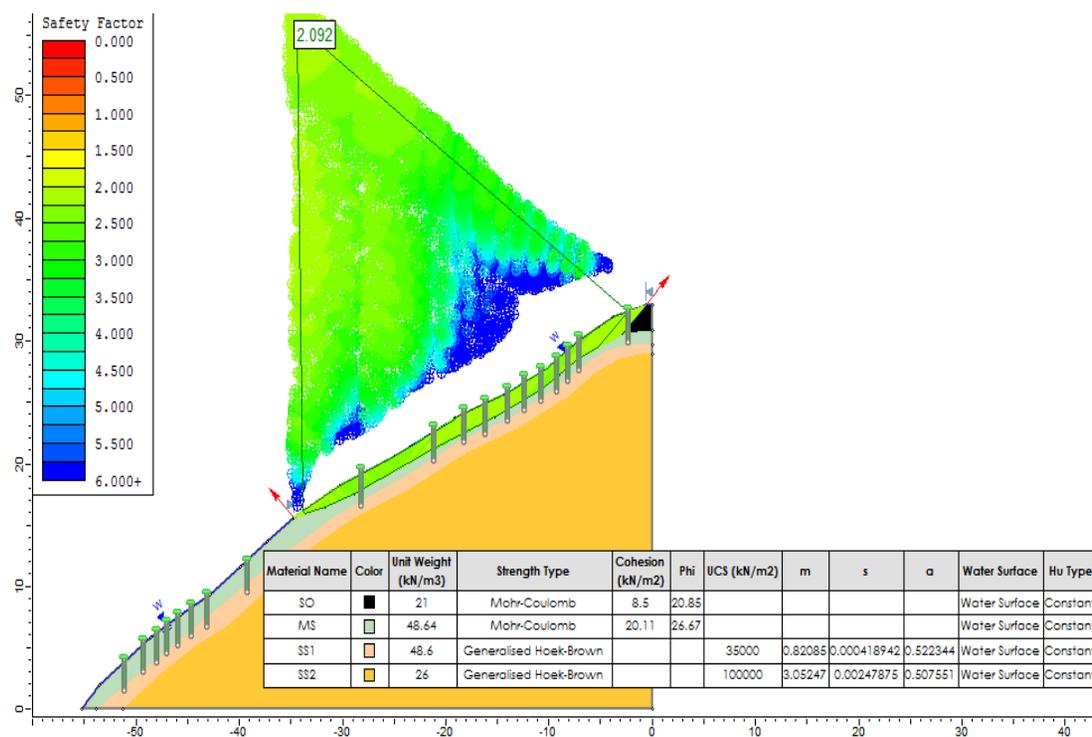


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

**Modelación del terreno con las obras bioingenieriles que adicionan  $16,6\text{kN/m}^2$  por poste de guadua a la resistencia del material**  
**(NSR, 2010) para falla planar.**

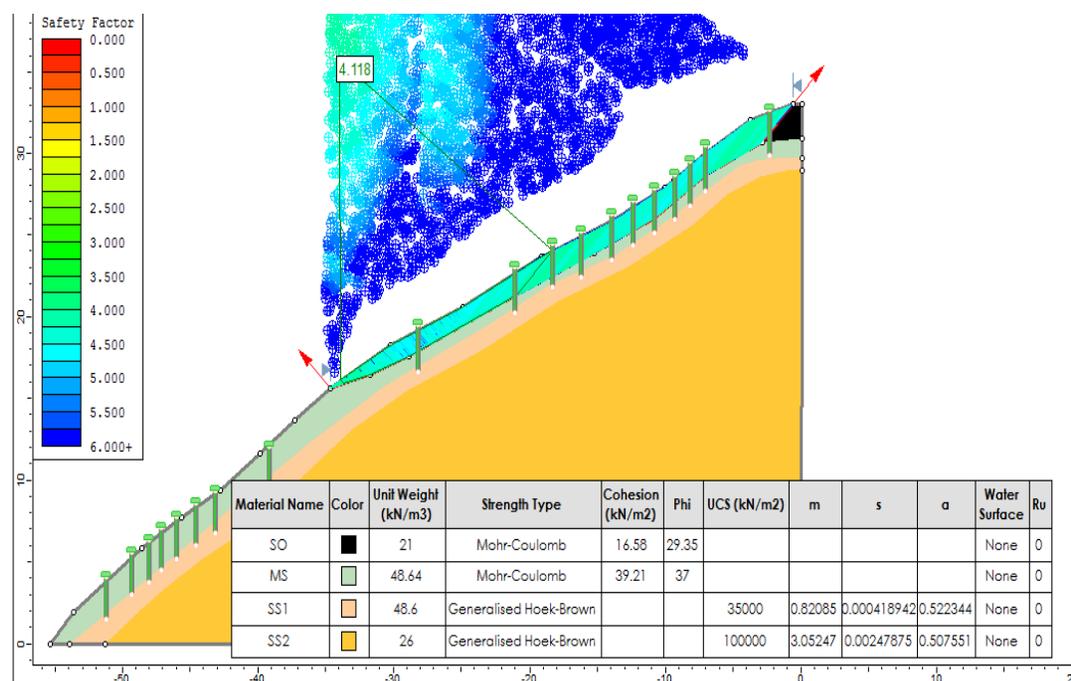


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.

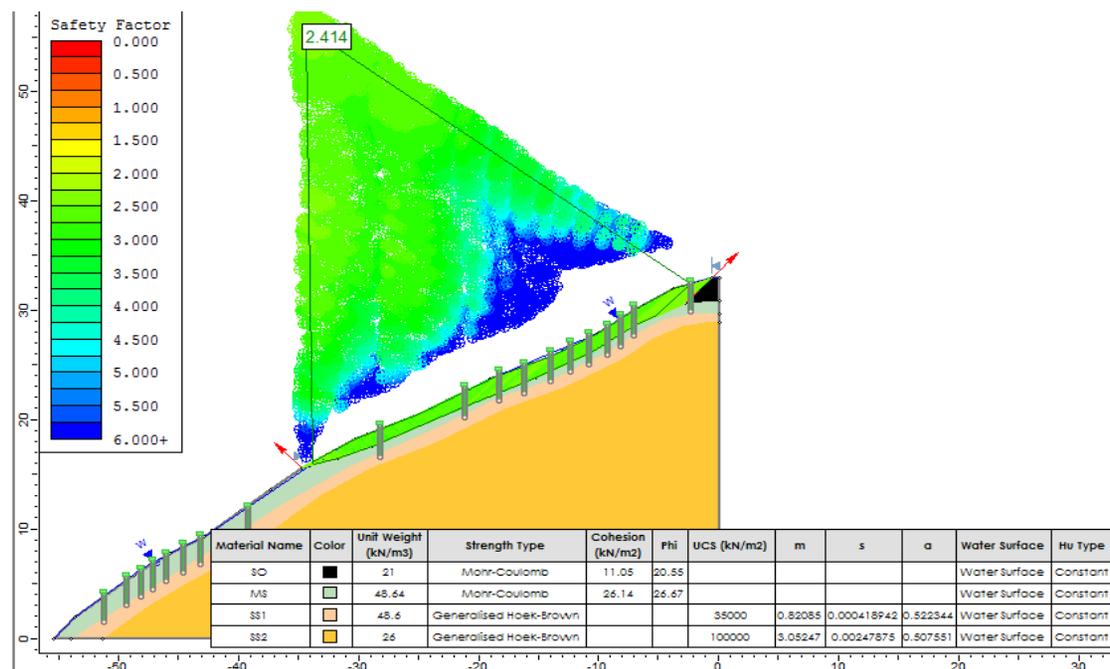


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

**Modelación del terreno con las obras bioingenieriles que adicionan  $16,6\text{kN/m}^2$  por poste de guadua a la resistencia del material (NSR, 2010) y por el sistema parcial de raíces (30% más de cohesión al material) para falla planar.**

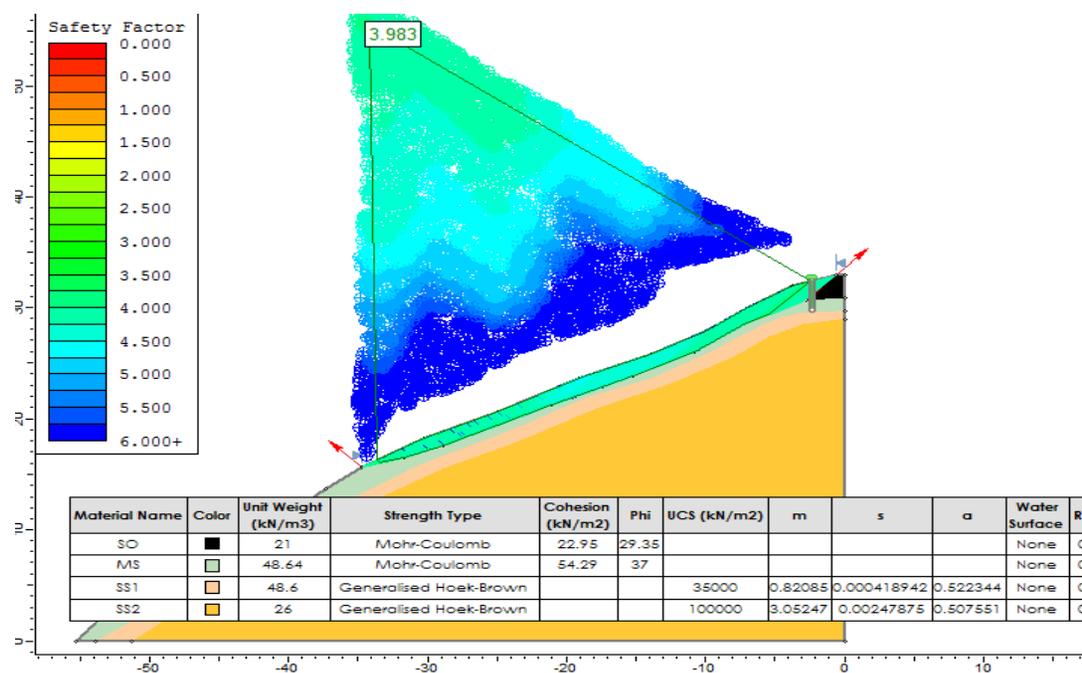


Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.

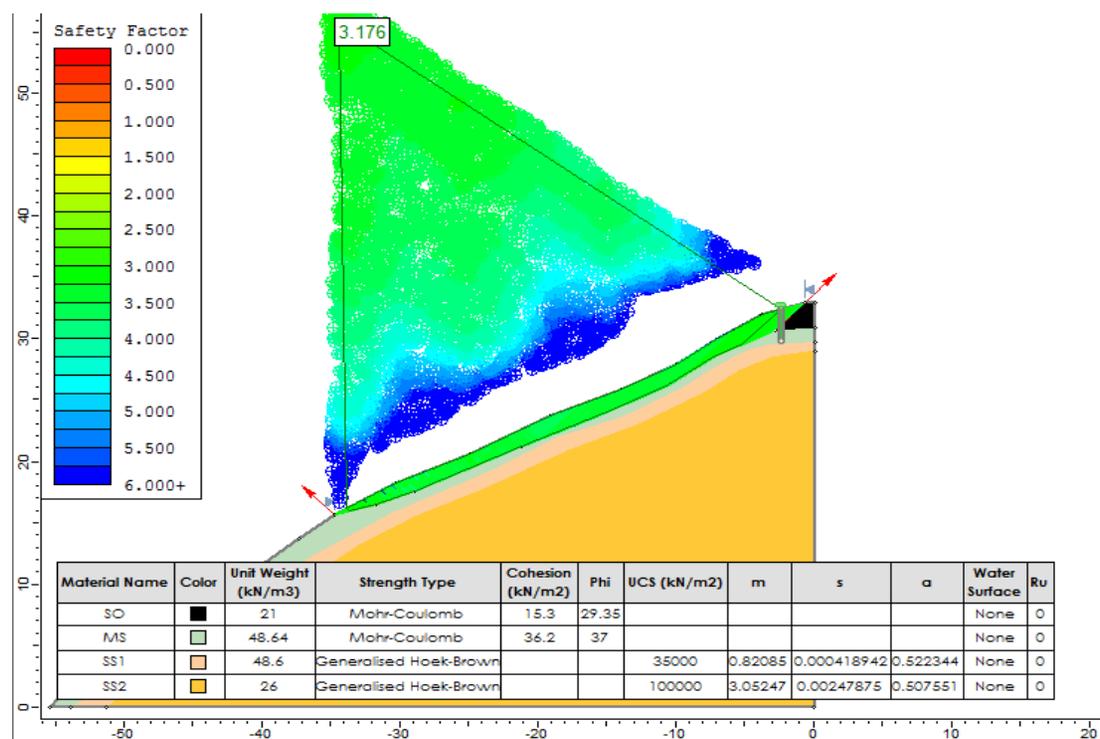


Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.

## Modelación del terreno con el sistema total de raíces (80% más de cohesión al material) para falla planar



Factor de seguridad en materiales con humedad de campo (rango de humedad entre los límites plástico y líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos totales.



Factor de seguridad en materiales con humedad de saturación (humedad del límite líquido) y condiciones mecánicas de esfuerzos efectivos.