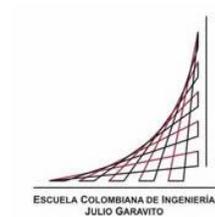


**Maestría en Ingeniería Civil**

**Modelación numérica del efecto mecánico de las raíces en la estabilidad de taludes**

**David Leonardo Carranza Linero**

**Bogotá, D.C., 02 de agosto de 2021**



**Modelación numérica del efecto mecánico de las raíces en la estabilidad de taludes**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia**

**Catalina Lozada López**

**Directora**

**Bogotá, D.C., 02 de agosto de 2021**



La tesis de maestría titulada “Modelación numérica del efecto mecánico de las raíces en la estabilidad de taludes”, presentada por David Leonardo Carranza Linero, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Directora de la tesis

Catalina Lozada López

Jurado

Lina Ximena Garzón Ávila

Jurado

José Vicente Amórtegui

Bogotá, D.C., 25 de junio de 2021

## **Dedicatoria**

Este trabajo de grado está dedicado a **mi familia**, quienes con su apoyo incondicional, confianza, consejos y palabras de aliento durante todo el proceso, me han ayudado a llegar hasta este punto y ser la persona que soy.

A la Ingeniera **Catalina Lozada López**, Directora del trabajo de grado, quien con su gran conocimiento, compañía y apoyo, me guio durante todo el desarrollo de esta tesis.

A mis amigas **Paula León** y **Yurleidy Rocha**, por su constante apoyo, compañía y palabras de aliento, a lo largo de todo el proceso.

A todos **mis amigos** más cercanos por apoyarme cuando más lo necesité.

## Resumen

Este trabajo de investigación evalúa la contribución de la vegetación en la estabilidad de taludes, con un énfasis en los efectos mecánicos que proporciona el sistema de raíces, mediante cinco tipos de modelaciones, en los cuales se analizaron tres enfoques diferentes; esto con el fin de identificar la mejor forma de modelar numéricamente el efecto de las raíces. Para el primer enfoque, se modificaron las propiedades del suelo, donde se utilizó el término de cohesión aparente, el cual es el incremento del valor de la cohesión de la masa de suelo debido a la presencia de las raíces. En el segundo enfoque se modelaron anclajes asignando propiedades de fuerza de tensión y módulo de Young, los cuales representan la presencia de las raíces en el suelo y, por último, en el tercer enfoque, se modeló la raíz de manera individual aplicando las mismas propiedades del enfoque anterior. Las propiedades mecánicas de las raíces que se utilizaron en cada uno de los enfoques mencionados son las del pasto Vetiver, el cual se escogió después de realizar comparaciones entre diferentes tipos de vegetación, y se pudo evidenciar que el pasto vetiver cuenta con varias propiedades mecánicas y morfológicas que contribuyen con la estabilidad del talud.

Para evaluar la contribución de la presencia de las raíces y realizar los análisis de estabilidad se utilizó el método de equilibrio límite, utilizando el método de Bishop, mediante la utilización del software Slide2 y el método de elementos finitos, a través del software Plaxis 2D. Después de realizar los análisis, los resultados mostraron que la presencia de las raíces genera un incremento en los Factores de Seguridad para todos los tipos de modelación, en especial cuando esta se ubica sobre toda la superficie del talud (corona, pendiente y pie), y que a medida que aumenta el ángulo de inclinación del talud, los incrementos son mayores. Adicionalmente, se pudo establecer que la mejor forma para representar las raíces es mediante la modificación de las propiedades del suelo, utilizando los métodos de equilibrio límite y elementos finitos.

## Tabla de Contenido

1. Problema.....	24
1.1 Justificación y problema.....	24
1.2 Importancia y relevancia .....	26
1.3 Árbol de problema .....	28
2. Objetivos.....	29
2.1 Objetivo general .....	29
2.2 Objetivos específicos .....	29
3. Revisión Bibliográfica .....	30
3.1 Efecto de las raíces en la estabilidad de taludes (componente mecánico) .....	30
3.1.1 Efecto de las raíces en la resistencia al corte del suelo. ....	30
3.1.2 Efecto de las raíces en la estabilidad de taludes.....	34
3.2 Resistencia a tracción de las raíces.....	36
3.3 Pasto Vetiver.....	39
3.3.1 Descripción del pasto Vetiver.....	39
3.3.2 Estabilización de taludes usando el Sistema Vetiver.....	42
3.4 Modelación numérica .....	57
4 Metodología:.....	76
4.1 Actividad 1: Determinación del tipo de vegetación que se va a utilizar para realizar las modelaciones numéricas.....	77
4.2 Actividad 2: Definir Software a utilizar para realizar las modelaciones.....	77
4.3 Actividad 3: Representación del efecto mecánico de las raíces en el modelo numérico.....	78
4.4 Actividad 4: Identificar el tipo de modelaciones a realizar y los métodos de análisis de estabilidad.....	83
4.5 Actividad 5: Definir parámetros de entrada y variables a utilizar.....	83
4.6 Actividad 6: Establecer el número de modelos numéricos y combinaciones a realizar.....	87
4.7 Actividad 7: Modelación numérica en Slide2 y Plaxis 2D.....	91
4.8 Actividad 8: Obtención de factores de seguridad y ubicación de la superficie de falla de cada modelo.....	91
4.8.1 Determinación de la profundidad de la superficie de falla.....	92
4.8.2 Determinación de los esfuerzos cortantes y de las deformaciones de cada modelo.....	92

4.9	Actividad 9: Identificar el tipo de modelación numérica que mejor represente la influencia de las raíces de pasto vetiver en la estabilidad de taludes.....	94
4.10	Actividad 10: Realizar un Análisis Paramétrico. ....	94
5	Resultados y Análisis de Resultados.....	95
5.1	Modelación 1: Modificación de las propiedades del suelo - Slide 2D.....	96
5.1.1	Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados. ....	96
5.1.2	Análisis del incremento del Factor de seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.....	99
5.1.3	Análisis de la influencia de la presencia de las raíces en la profundidad de la superficie de falla. ....	102
5.2	Modelación 2: Modelación del sistema de raíces como anclajes - Slide 2D.....	104
5.2.1	Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados. ....	105
5.2.2	Análisis del Incremento del Factor de Seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.....	110
5.2.3	Análisis de la influencia de la presencia de las raíces en la profundidad de la superficie de falla. ....	113
5.3	Modelación 3: Modificación de las propiedades del suelo – Plaxis 2D.....	115
5.3.1	Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados. ....	115
5.3.2	Análisis del incremento del Factor de seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.....	118
5.3.3	Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces. ....	120
5.4	Modelación 4: Modelación del sistema de raíces como anclajes – Plaxis 2D.....	156
5.4.1	Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados. ....	157
5.4.2	Análisis del incremento del Factor de seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.....	159
5.4.3	Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces. ....	161
5.5	Modelación 3: Modelación de la raíz individual – Plaxis 2D.....	195
5.5.1	Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados. ....	196
5.5.2	Análisis del incremento del Factor de seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.....	199

5.6	Comparación entre los resultados del Factor de Seguridad: Modelos en Slide y en Plaxis. 201	
5.6.1	Factor de Seguridad de cada una de las modelaciones. ....	201
5.6.2	Comparación de los incrementos del Factor de seguridad de cada tipo de modelación 205	
5.7	Análisis Paramétrico.....	209
5.7.1	Influencia de los parámetros de resistencia en el Factor de Seguridad y la profundidad de la superficie de falla, del suelo reforzado con raíces. ....	210
5.7.2	Influencia de los parámetros de resistencia en el mecanismo de falla del suelo reforzado con raíces.....	
6	Conclusiones.....	216
7	Bibliografía.....	219

## Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Influencia de los principales parámetros de la vegetación que afectan el Factor de seguridad del talud ....</i>	36
<i>Tabla 2. Resultados de fuerza, diámetro y resistencia a tracción de la raíz de varios tipos de hierbas. ....</i>	37
<i>Tabla 3. Resultados de resistencia a tracción de algunas plantas empleadas en la estabilización de taludes. ....</i>	38
<i>Tabla 4. Resultados de ensayos de laboratorio para dos gramíneas, Vetiver y Ruzi. ....</i>	39
<i>Tabla 5. Resultados ensayo de tracción de raíces de Vetiver de tres meses de edad. ....</i>	46
<i>Tabla 6. Variación del esfuerzo pico del ensayo de Corte directo in situ.. ....</i>	49
<i>Tabla 7. Resultados del ensayo de corte directo. ....</i>	51
<i>Tabla 8. Resultados de cohesión de la raíz (CR) y suelo (Cs), de la prueba de corte directo in situ después de 2, 3, 4, 5 y 6 meses. ....</i>	52
<i>Tabla 9. Parámetros obtenidos de los ensayos de corte directo. ....</i>	53
<i>Tabla 10. Resumen de resultados obtenidos de resistencia a tracción, de los estudios referenciados. ....</i>	54
<i>Tabla 11. Resumen de resultados obtenidos del incremento de la cohesión, de los estudios referenciados. ....</i>	55
<i>Tabla 12. Parámetros utilizados para representar el efecto mecánico de las raíces en la estabilidad del talud. ....</i>	62
<i>Tabla 13. Propiedades del suelo y de la roca. ....</i>	68
<i>Tabla 14. Propiedades de las raíces de las plantas. ....</i>	68
<i>Tabla 15. Parámetros geométricos de los sistemas de raíces.) ....</i>	71
<i>Tabla 16. Propiedades del suelo para el caso de estudio. ....</i>	71
<i>Tabla 17. Factor de Seguridad para cada morfología del Sistema radicular. ....</i>	72
<i>Tabla 18. Parámetros del suelo usados en el análisis del talud. ....</i>	73
<i>Tabla 19. Incremento del factor de seguridad debido a la vegetación. ....</i>	74
<i>Tabla 20. Incremento del factor de seguridad debido a la vegetación. ....</i>	75
<i>Tabla 21. Tipos de modelaciones a realizar. ....</i>	83
<i>Tabla 22. Valores de CR en función de la profundidad. ....</i>	84
<i>Tabla 23. Propiedades del suelo considerado para las modelaciones. ....</i>	85
<i>Tabla 24. Propiedades de las raíces consideradas para las modelaciones. ....</i>	85
<i>Tabla 25. Modelos de análisis. ....</i>	88
<i>Tabla 26. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide. ....</i>	97
<i>Tabla 27. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide. ....</i>	97
<i>Tabla 28. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide. ....</i>	100
<i>Tabla 29. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide. ....</i>	100

<i>Tabla 30. Profundidad de la superficie de falla para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 31. Profundidad de la superficie de falla para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 32. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide. ....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 33. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 34. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 35. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 36. Profundidad de la superficie de falla para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 37. Profundidad de la superficie de falla para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 38. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 39. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 40. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 41. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 42. Deformaciones máximas obtenidas para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. ....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 43. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 44. Deformaciones máximas obtenidas para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 45. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 46. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.....</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 47. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.....</i>	<i>158</i>

<i>Tabla 48. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 49. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 50. Deformaciones máximas obtenidas para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis. ....</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 51. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.....</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 52. Deformaciones máximas obtenidas para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.....</i>	<i>165</i>
<i>Tabla 53. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación 4. ....</i>	<i>167</i>
<i>Tabla 54. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de la raíz individual. ....</i>	<i>197</i>
<i>Tabla 55. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación de la raíz individual. ....</i>	<i>197</i>
<i>Tabla 56. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de la raíz individual.....</i>	<i>199</i>
<i>Tabla 57. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de la raíz individual. ....</i>	<i>200</i>
<i>Tabla 58. Resultados del Factor de Seguridad de los cinco tipos de modelación. Modelos sin Nivel Freático. ....</i>	<i>201</i>
<i>Tabla 59. Resultados del Factor de Seguridad de los cinco tipos de modelación. Modelos sin Nivel Freático. ....</i>	<i>201</i>
<i>Tabla 60. Incrementos del Factor de Seguridad de cada tipo de modelación, para cada ángulo de inclinación del talud y cada posición de la raíz analizada. (Sin nivel freático).....</i>	<i>206</i>
<i>Tabla 61. Incrementos del Factor de Seguridad de cada tipo de modelación, para cada ángulo de inclinación del talud y cada posición de la raíz analizada. (Con nivel freático).....</i>	<i>207</i>
<i>Tabla 62. Modelos de análisis para realizar el análisis paramétrico. ....</i>	<i>210</i>
<i>Tabla 63. Resultados del Factor de Seguridad y superficie de falla, de cada uno de los modelos realizados para el análisis paramétrico.....</i>	<i>210</i>
<i>Tabla 64. Deformaciones máximas obtenidos para cada área de cada uno de los modelos de análisis .....</i>	<i>213</i>
<i>Tabla 65. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada área de cada uno de los modelos de análisis . ....</i>	<i>213</i>

## Índice de Figuras

Figura 1. Árbol del problema.....	28
Figura 2. Curvas de resistencia a la tracción vs diámetro, para diferentes especies de vegetación. ....	32
Figura 3. Valores de cohesión aparente para diferentes profundidades.....	33
Figura 4. Valores de la cohesión adicional de la raíz (CR), considerando la simulación de la presencia de raíces de vegetación en varias capas del suelo para varios tipos de vegetación.....	33
Figura 5. Incremento del Factor de Seguridad, debido a la cohesión adicional de las raíces para distintos tipos de vegetación.....	34
Figura 6. Valores medios del factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud para varios tipos de suelos. ....	35
Figura 7. Valores medios del Factor de Seguridad en función de la altura (H) del talud para diferentes ángulos de inclinación.....	35
Figura 8. Sistema de raíz del Vetiver.....	40
Figura 9. Valores promedio para mediciones de raíz de vetiver. (a) relación entre la longitud de las raíces y el radio de un grupo de raíces y (b) tasa de crecimiento de las raíces.....	40
Figura 10. Resultados experimentales de resistencia a tracción para raíces de diferentes diámetros de pasto Vetiver (dos años de edad).....	44
Figura 11. Resultados obtenidos de resistencia a tracción vs diámetro de la raíz del pasto vetiver.....	45
Figura 12. Aumento de la resistencia al corte del perfil del suelo, debido a la presencia de raíces de Pasto Vetiver, de dos años de edad y relación del área de la raíz con respecto a la profundidad.. ....	48
Figura 13. Relación esfuerzo-deformación del ensayo de corte directo in situ a varias profundidades para (a) suelo sin la presencia de raíces y (b) suelo con la presencia de pasto Vetiver.....	49
Figura 14. Esfuerzo cortante del suelo con la presencia de raíces. (a) prueba de corte directo - vetiver de 4 meses de edad y (b) prueba de corte directo – vetiver 6 meses de edad.....	51
Figura 15. Relación entre el crecimiento de la raíz y la resistencia al corte de la raíz del pasto Vetiver (CR) en comparación con la resistencia al corte del suelo (Cs). ....	52
Figura 16. Distribución mundial de programas activos de pasto Vetiver.....	55
Figura 17. Proyectos donde se implementó el Sistema Vetiver para la estabilización de taludes.....	56
Figura 18. Casos de estudio con los respectivos parámetros analizados y resultados obtenidos. ....	58
Figura 19. Líneas de contorno de los esfuerzos cortantes en la superficie de falla para el talud sin vegetación y con vegetación para cada caso.....	59
Figura 20. Evolución del Factor de Seguridad y profundidad de la superficie de falla con CR, para los 3 casos.....	61

Figura 21. Esquema del talud empleado para los análisis. ....	63
Figura 22. Malla del talud para una pendiente homogénea 2: 1 con un ángulo de inclinación de 26.57°. .	64
Figura 23. Resultados de los modelos de estudio para los taludes con y sin presencia de vegetación. ....	65
Figura 24. Sistema de raíces usado en el estudio.....	67
Figura 25. Modelo tridimensional del talud con vegetación y perfil geométrico.....	67
Figura 26. Variación del factor de seguridad del talud con respecto a separación entre árboles y la ubicación de las raíces.....	69
Figura 27. Tipos de diseño de plantación. a) Diseño de plantación uniforme. b) diseño de plantación alternativa .....	69
Figura 28. Morfología y aproximaciones geométricas de cada sistema de raíces.....	70
Figura 29. Parámetros geométricos del talud y agujeros excavados (a). Condiciones de borde y mallado de bloques de raíz y pendiente (b).....	71
Figura 30. Modelo geométrico del talud. ....	73
Figura 31. Modelo geométrico para el enfoque de cohesión equivalente. ....	74
Figura 32. Modelo geométrico para el enfoque de de la raíz como aproximación de pila.....	75
Figura 33. Diagrama metodológico .....	76
Figura 34. Cohesión aparente en función de la profundidad de la zona de la raíz. ....	80
Figura 35. Esquema para la modelación del sistema de raíces como anclajes (enfoque 2).....	81
Figura 36. Esquema de la modelación de la raíz individual. ....	82
Figura 37. Perfil geométrico del talud considerado para las modelaciones.....	86
Figura 38. Posiciones del Nivel freático en las modelaciones. ....	86
Figura 39. Posiciones de la raíz en las modelaciones. ....	87
Figura 40. Determinación de la superficie de falla. ....	92
Figura 41. Áreas de análisis para la determinación de esfuerzos cortantes y deformaciones.....	93
Figura 42. Selección de valores máximos teniendo en cuenta la superficie de falla calculada con Slide...	93
Figura 43. Posición de las raíces modeladas mediante la modificación de las propiedades del suelo en el talud de análisis. a) Modelo 13 - P1 (pendiente) - 45°, b) Modelo 21 - P2 (pendiente + pie) - 45°, c) Modelo 29 - P3 (corona + pendiente + pie) - 45°.....	96
Figura 44. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide. ....	97
Figura 45. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide. ....	98
Figura 46. Relación de la superficie de falla con la posición de las raíces en el Talud y su efecto en el Factor de Seguridad. a) Modelo 14 - P1 (Pendiente) - 45°, b) Modelo 22 - P2 (Pendiente + pie) - 45°.....	99

Figura 47. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide. .....	100
Figura 48. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide. .....	101
Figura 49. Profundidad de la superficie de falla en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.....	103
Figura 50. Profundidad de la superficie de falla en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide....	103
Figura 51. Posición de las raíces modeladas como anclajes en el talud de análisis. a) Modelo 37-P1 (Pendiente)-45°, Modelo 45-P2 (Pendiente+pie)-45°, c) Modelo 53-P3 (Corona+pendiente+pie)-45°. .....	104
Figura 52. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.....	105
Figura 53. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide. ....	106
Figura 54. Modelos con presencia de raíces simuladas como anclajes usados para explicar el efecto negativo de los anclajes verticales en los Factores de Seguridad. a) Modelo 37 – P1 (pendiente) – 45° - Sin NF, b) Modelo 38 – P1 (pendiente) – 45° - Con NF, c) Modelo 53 – P3 (corona+pendiente+pie) – 45° - Sin NF, d) Modelo 54 – P3 (corona+pendiente+pie) – 45° - Con NF. ....	108
Figura 55. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del anclaje. (Sin nivel freático). ...	109
Figura 56. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del anclaje (Con nivel freático) ...	109
Figura 57. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.....	111
Figura 58. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide. ...	111
Figura 59. Profundidad de la superficie de falla en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.....	113
Figura 60. Profundidad de la superficie de falla en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.....	114
Figura 61. Posición de las raíces modeladas mediante la modificación de las propiedades del suelo en el talud de análisis. a) Modelo 69 - P1 (pendiente) - 45°, b) Modelo 77 - P2 (pendiente+pie) - 45°, c) Modelo 85 - P3 (Corona+pendiente+pie) - 45°.....	115

Figura 62. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. ....	116
Figura 63. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. ....	117
Figura 64. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. ....	118
Figura 65. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. ....	119
Figura 66. Relación entre los valores máximos de la deformación de cada área, con los valores máximos de la deformación de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55° . ....	122
Figura 67. Relación entre los valores máximos del esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos del esfuerzo cortante de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55° . ....	124
Figura 68. Relación entre los valores máximos de la deformación de cada área, con los valores máximos de la deformación de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55° . ....	126
Figura 69. Relación entre los valores máximos del esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos del esfuerzo cortante de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55° . ....	128
Figura 70. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Sin nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	129

Figura 71. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Sin Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	130
Figura 72. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 25°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	131
Figura 73. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	132
Figura 74. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Con Nivel Freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	133
Figura 75. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 25°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	134
Figura 76. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Sin nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	136
Figura 77. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Sin Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	137
Figura 78. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 35°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	138
Figura 79. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo	

con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	140
Figura 80. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	141
Figura 81. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 35°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	142
Figura 82. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Sin nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	144
Figura 83. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Sin Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	145
Figura 84. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	146
Figura 85. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	147
Figura 86. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	148
Figura 87. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	149

Figura 88. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 55°. Sin nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	151
Figura 89. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 55°. Sin Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	152
Figura 90. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 55°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	153
Figura 91. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	154
Figura 92. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	155
Figura 93. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	156
Figura 94. Posición de las raíces modeladas mediante la modelación del sistema de raíces como anclajes - Plaxis, en el talud de análisis. a) Modelo 93 - P1 (pendiente) - 45°, b) Modelo 101 - P2 (pendiente+pie)- 45°, c) Modelo 109 - P3 (corona+pendiente+pie) - 45°.....	156
Figura 95. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.....	158
Figura 96. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.....	158
Figura 97. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.	160

Figura 98. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.	160
Figura 99. Relación entre los valores máximos de la deformación de cada área, con los valores máximos de la deformación de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.	163
Figura 100. Relación entre los valores máximos del esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos del esfuerzo cortante de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis. A) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.	165
Figura 101. Relación entre los valores máximos de la deformación de cada área, con los valores máximos de la deformación de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.	167
Figura 102. Relación entre los valores máximos del esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos del esfuerzo cortante de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.	169
Figura 103. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Sin nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).	170
Figura 104. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Sin Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).	171
Figura 105. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 25°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.	172

Figura 106. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	173
Figura 107. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Con Nivel Freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	174
Figura 108. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 25°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	175
Figura 109. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Sin nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	176
Figura 110. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Sin Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	177
Figura 111. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 35°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	178
Figura 112. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	179
Figura 113. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	180
Figura 114. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 35°, en	

función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.....	181
Figura 115. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Sin nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	183
Figura 116. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Sin Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	184
Figura 117. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.....	185
Figura 118. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	186
Figura 119. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	187
Figura 120. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.....	188
Figura 121. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 55°. Sin nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	190
Figura 122. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 55°. Sin Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	191

Figura 123. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 55°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.....	192
Figura 124. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	193
Figura 125. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).....	194
Figura 126. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos .....	195
Figura 127. Posición de las raíces modeladas mediante la modelación individual de la raíz en el talud de análisis, a) Modelo 117 - P1 (pendiente) - 45°, b) Modelo 125 - P2 (pendiente + pie) - 45°, c) Modelo 133 - P3 (corona + pendiente + pie) - 45°. d) Arquitectura de la raíz empleada en las modelaciones.....	196
Figura 128. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de la raíz individual. ....	197
Figura 129. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de la raíz individual. ....	198
Figura 130. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación de la raíz individual. ....	199
Figura 131. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación de la raíz individual. ....	200
Figura 132. Comparativo de los resultados del Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, obtenidos de las modelaciones 1, 2, 3, 4 y 5. Condición sin nivel freático.....	202
Figura 133. Comparativo de los resultados del Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, obtenidos de las modelaciones 1, 2, 3, 4 y 5. Condición con nivel freático.....	203
Figura 134. Incrementos del Factor de Seguridad de cada tipo de modelación, para cada ángulo de inclinación del talud analizado. Condición sin nivel freático. a) Talud de 25°, b) Talud de 35°, c) Talud de 45°, d) Talud de 55°.....	207

Figura 135. Incrementos del Factor de Seguridad de cada tipo de modelación, para cada ángulo de inclinación del talud analizado. Condición sin nivel freático. a) Talud de 25°, b) Talud de 35°, c) Talud de 45°, d) Talud de 55°.....	208
Figura 136. Influencia del ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi'$ ) en los resultados del Factor de Seguridad y de la profundidad de la superficie de falla, para un talud de 45° reforzado con raíces. a) análisis del Factor de Seguridad. b) Análisis de la profundidad de la superficie de falla. ....	211
Figura 137. Influencia de la cohesión en los resultados del Factor de Seguridad y de la profundidad de la superficie de falla, para un talud de 45° reforzado con raíces. a) análisis del Factor de Seguridad. b) Análisis de la profundidad de la superficie de falla. ....	211
Figura 138. Influencia de la variación del ángulo de fricción del suelo en la relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, en cada área de análisis del talud, para cada uno de los modelos analizados. a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.....	214
Figura 139. Influencia de la variación de la cohesión del suelo en la relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, en cada área de análisis del talud, para cada uno de los modelos analizados. a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes. ....	214

## 1. Problema

### 1.1 Justificación y problema.

Debido a que los deslizamientos de tierra en taludes pueden generar pérdidas humanas y pérdidas materiales, dependiendo de la magnitud de dicho deslizamiento, es importante establecer y utilizar métodos de estabilización para prevenir estos desastres y minimizar sus consecuencias. Actualmente existe un gran número de métodos para la estabilización de taludes y laderas, y uno de ellos es el uso de la vegetación.

En Colombia, el uso de la vegetación está más enfocado en el control de la erosión del suelo que en la estabilidad de taludes. En el Manual de estabilidad de taludes del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), se mencionan y describen varios métodos para el control de la erosión mediante el uso de vegetación, los cuales buscan amortiguar el golpe de las gotas de lluvia, disminuir la acción del agua de escorrentía, encauzar excesos y proteger la estructura del suelo. Adicional a esto, se mencionan algunos métodos de bioingeniería, los cuales refuerzan las capas superficiales del suelo, generan una barrera contra movimientos de tierras y previenen y controlan la erosión superficial y la pérdida de material, pero no es mucha la información que se relaciona con respecto a la estabilización de taludes. En este manual se menciona que las raíces proporcionan una resistencia adicional en la parte más superficial del talud, pero no se observan métodos estandarizados ni detallados, a diferencia de los métodos de estabilización o de las estructuras de contención convencionales.

Por otra parte, en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)- Título H, se relaciona información principalmente de la succión generada por la presencia de raíces en el suelo. Allí se mencionan algunos beneficios de la presencia de la vegetación en laderas como:

- La interceptación de la lluvia con el follaje, el cual reduce la energía de las gotas y regula la escorrentía reduciendo la erosión de la ladera.
- El sistema radicular provee refuerzo al suelo, minimizando la posibilidad de deslizamientos someros.
- La extracción del agua subterránea reduce las presiones de poros incrementando la estabilidad de la ladera.

Al igual que en el manual de estabilidad de taludes del INVÍAS, se evidencia escasez en la información del uso de la vegetación para la implementación en la estabilidad de taludes.

De acuerdo con Truong et al., (2008), el sistema Vetiver (SV), el cual se basa en la utilización del pasto vetiver, es un medio muy simple, económico, de bajo mantenimiento y muy efectivo para la estabilización y que está ganando popularidad debido al gran número de ventajas que tiene. En Colombia, a pesar de la gran variedad de pisos térmicos y de climas, no se ha intensificado su uso y aplicación como sistema de estabilización (Miranda Muñoz, 2016; Wellmann Castellanos, 2017). Hay muy pocos proyectos en los que se ha usado este sistema en Colombia y de acuerdo con Suarez, (2001b, p. 305), si se usa este sistema, la información que se tiene al respecto es más por experiencia que por formulaciones matemáticas.

La situación descrita anteriormente, demuestra que hay muy poca información de metodologías prácticas basadas en modelos numéricos, para definir el diseño o técnicas de estabilización de taludes reforzados con pasto y por esta razón, hay una tendencia excesiva al uso de métodos de estabilización o de estructuras de contención convencionales, los cuales resultan más costosos, y si se pensara en otros métodos, se podrían evitar.

Por otro lado, en las investigaciones que se han realizado para cuantificar la influencia de la vegetación en la estabilidad de taludes, algunos autores utilizaron modelos numéricos en los que

se mejoraron las propiedades del suelo que contiene las raíces, otros modelaron las raíces de las plantas asumiendo que son anclajes y otros, desarrollaron modelos numéricos en los que las raíces se modelan de manera individual. A pesar de que se han desarrollado diferentes maneras de representar las raíces en la masa de suelo, no se tiene claridad de cuál es la influencia de cada tipo de modelación en los resultados de los análisis estabilidad, no hay una certeza del tipo de modelación numérica que mejor simule o represente la influencia de las raíces en la estabilidad de taludes.

Por consiguiente, este problema genera las siguientes preguntas a las que se les dará respuesta a lo largo de la realización del presente trabajo de investigación:

¿Cuál es el efecto del tipo de modelación numérica en el estudio de la influencia de las raíces de pasto vetiver en la estabilidad de taludes?

¿Cuál es el tipo de modelación numérica que mejor representa la influencia de las raíces de pasto vetiver en la estabilidad de taludes?

¿Cuál es el efecto de la posición de la raíz del pasto vetiver en el Factor de Seguridad del talud y en el tipo de falla?

¿Cuál es el efecto de la pendiente del talud con pasto vetiver en el Factor de Seguridad del talud y en el tipo de falla?

## **1.2 Importancia y relevancia**

Dentro de la maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, el presente trabajo está enmarcado en un proyecto de convocatoria interna sobre el estudio de la presencia de las raíces en la estabilidad de taludes, el cual aportará al área de la Bioingeniería, contribuyendo en el conocimiento general del problema planteado. Particularmente, el presente trabajo brindará un mayor conocimiento a los Ingenieros Civiles para poder determinar el efecto de diferentes tipos de

modelación numérica, en el estudio de la influencia de las raíces de pasto vetiver en la estabilidad de taludes e identificar el tipo de modelación que mejor represente este efecto. Adicional a esto, aportará en el conocimiento para poder identificar las zonas donde es mejor sembrar el pasto y las inclinaciones o pendientes en las que se puede utilizar este sistema, para el tipo de suelo que se define en el presente trabajo de investigación. Con esta información, en un futuro, se podrían crear o establecer guías o metodologías para definir el diseño o técnicas de estabilización de taludes mediante la utilización de pasto.

### 1.3 Árbol de problema

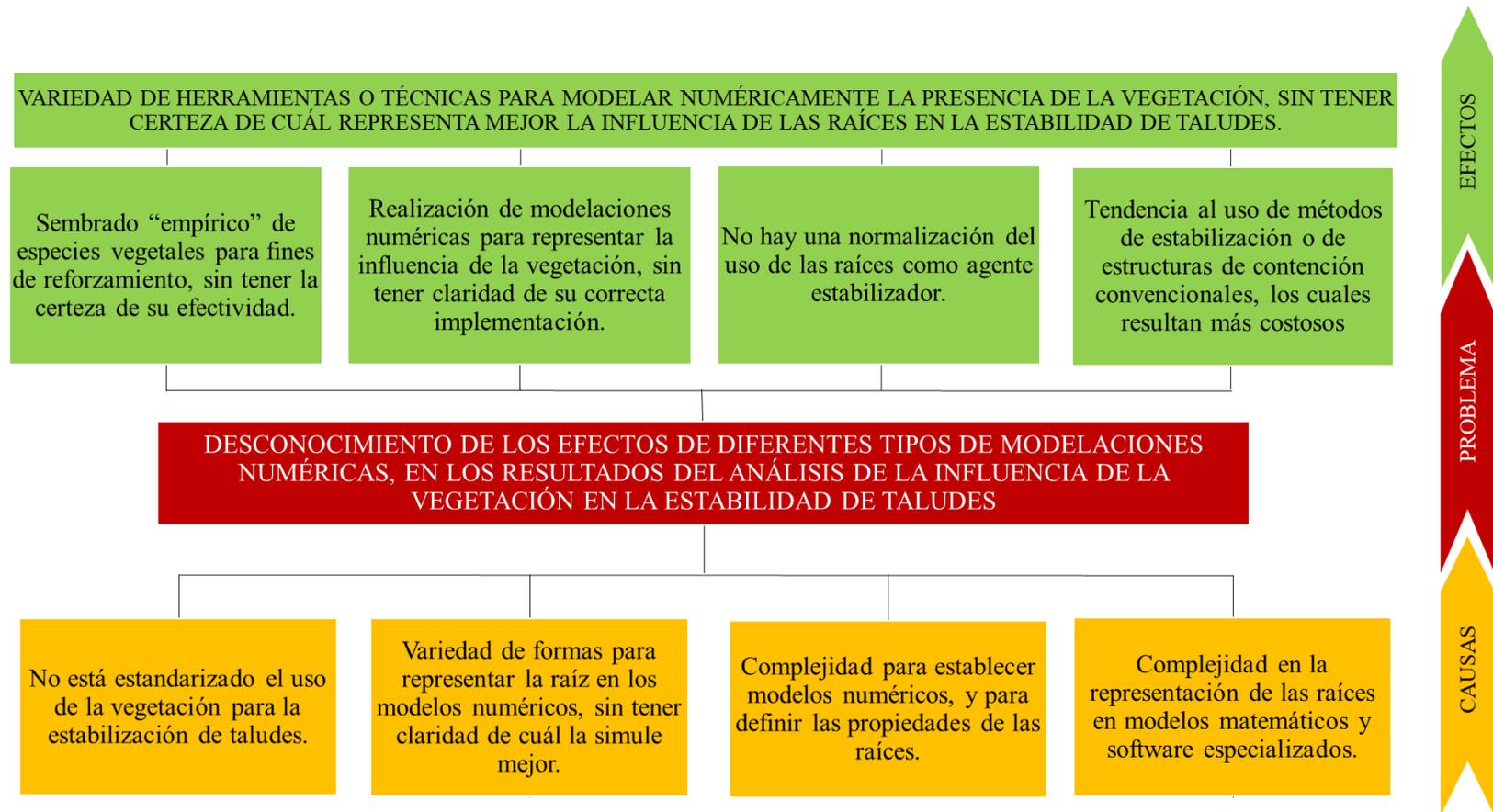


Figura 1. Árbol del problema. (Fuente propia)

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Determinar el efecto del tipo de modelación numérica usando los métodos de equilibrio límite y elementos finitos, en el estudio de la influencia de las raíces de pasto Vetiver en la estabilidad de taludes.

### 2.2 Objetivos específicos

- Identificar el efecto de la posición de la raíz del pasto vetiver en el Factor de seguridad del talud y en el tipo de falla para diferentes tipos de modelación numérica.
- Identificar el efecto de la pendiente del talud con pasto vetiver en el FS del talud y en el tipo de falla para diferentes tipos de modelación numérica.
- Identificar el tipo de modelación numérica que mejor represente la influencia de las raíces de pasto vetiver en la estabilidad de taludes
- Realizar un análisis paramétrico donde se evidencie el efecto de la variación de los parámetros del suelo (cohesión y ángulo de fricción) en la estabilidad del talud y tipo de falla para los diferentes tipos de modelación numérica.

### 3. Revisión Bibliográfica

#### 3.1 Efecto de las raíces en la estabilidad de taludes (componente mecánico)

##### 3.1.1 Efecto de las raíces en la resistencia al corte del suelo.

Diferentes investigaciones han estudiado el efecto de las raíces en la resistencia al corte de los suelos y han encontrado que la presencia de las raíces produce un aumento en la cohesión del suelo pero no genera un cambio significativo en el ángulo de fricción (Eab et al., 2015; Gentile et al., 2010).

Lo anterior se debe a que la densidad de las raíces dentro de la masa de suelo y su resistencia a la tracción contribuyen a mejorar la capacidad del suelo para resistir los esfuerzos de corte (Chok et al., 2004; De Baets et al., 2008; Gentile et al., 2010; T. H. Wu et al., 1979).

Ese efecto mecánico generado por la presencia de las raíces en el suelo, puede ser introducido en el criterio de falla de Mohr-Coulomb a través del término “cohesión aparente”, el cual se suma a la cohesión efectiva del suelo, de esta manera (Gentile et al., 2010, p. 190; T. H. Wu et al., 1979, p. 29; Tien H Wu, 2013, p. 260):

$$\tau = (c' + c_R) + \sigma' \tan \phi' = (c' + c_R) + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (1)$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante en el plano de falla,  $\sigma'$  es el esfuerzo efectivo normal, que a su vez es igual a la diferencia entre el esfuerzo total  $\sigma$  y la presión de poros  $u$ ,  $c'$  es la cohesión efectiva,  $c_R$  es la cohesión aparente generada por la presencia de las raíces y  $\phi'$  es el ángulo de fricción interna del suelo.

Adicional a esto, la cohesión aparente  $c_R$  se puede expresar como: (Bischetti et al., 2005, p. 12; De Baets et al., 2008, p. 213; T. H. Wu et al., 1979, p. 29; T. H. Wu & Watson, 1998, p. 583)

$$c_R = K * t_R \quad (2)$$

Donde  $t_R$  es la resistencia media a la tracción de la raíz por unidad de área de suelo y  $K$  es un factor que varía entre 1.0 y 1.3, debido a que se tiene en cuenta que las raíces están orientadas al azar con respecto al plano de falla. En la mayoría de estudios, este término se establece como un valor promedio de 1,2. La resistencia media a la tracción de la raíz por unidad de área de suelo  $t_R$ , se puede expresar como:

$$t_R = T_R * a_R \quad (3)$$

Donde  $T_R$  es la resistencia a la tracción de la raíz y  $a_R$  es el área de la sección transversal total de un suelo que es ocupado por las raíces “Root Area Ratio” (RAR), calculada como  $AR/A$ , donde  $AR$  es el área total de la sección transversal de todas las raíces y  $A$  es el área de suelo de la superficie total de falla.  $T_R$  se puede expresar de la siguiente manera (Cheng et al., 2003, p. 387; De Baets et al., 2008, p. 210):

$$T_R = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\pi\left(\frac{D^2}{4}\right)} \quad (4)$$

Donde  $F_{m\acute{a}x}$  es la fuerza máxima necesaria para romper la raíz y  $D$  es el diámetro medio de la raíz cerca del punto de ruptura.

Teniendo en cuenta esto, la cohesión aparente se puede expresar de la siguiente manera (T. H. Wu et al., 1979, p. 29; T. H. Wu & Watson, 1998, p. 583):

$$C_R = 1.2T_R \left(\frac{A_R}{A}\right) \quad (5)$$

Los valores de resistencia a la tracción de las raíces, generalmente dependen de varios factores como el tipo de especie de vegetación, las dimensiones, la morfología y las direcciones espaciales de las raíces. Los resultados de laboratorio muestran que la resistencia a la tracción disminuye generalmente con el diámetro de la raíz, como se muestra en la Figura 2. (Gentile et al., 2010, p. 191)

Este comportamiento se debe a los componentes biológicos de la raíz: raíces de menor diámetro tienen más celulosa que las raíces de mayor diámetro y por lo tanto se caracterizan por una mayor resistencia (Genet et al., 2005)

Lo anterior también se ha demostrado en estudios de campo en laderas boscosas realizados por O'Loughlin (1984), que indican que las raíces finas, de 1 a 20 mm de diámetro, son las que más contribuyen al refuerzo de suelos. Gramíneas, leguminosas y pequeños arbustos, pueden tener un efecto de refuerzo significativo hasta profundidades de 0,75 a 1,5 m (Faisal & Normaniza, 2008, p. 587).

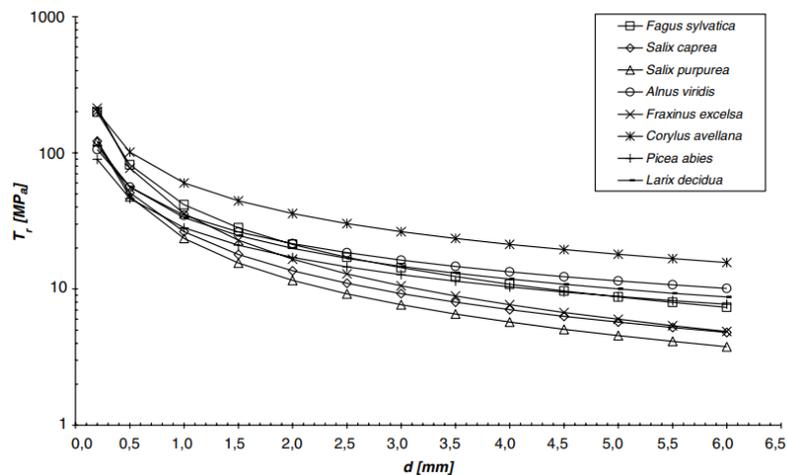


Figura 2. Curvas de resistencia a la tracción vs diámetro, para diferentes especies de vegetación. Tomado de (Bischetti et al., 2005, p.19)

En cuanto a la cohesión aparente generada por la presencia de raíces en la masa de suelo, Gentile et al., (2010) encontró que el aporte efectivo de las raíces se limita a profundidades superficiales ya que la distribución de la raíz se concentra principalmente a un metro de la superficie del suelo. La Figura 3 muestra la cohesión aparente para diferentes especies de plantas con respecto a la profundidad y se confirma un mayor aporte en las capas superiores del suelo. Los valores obtenidos de  $C_R$  en esta figura, se obtienen mediante la aplicación del modelo de T. H. Wu et al., (1979), mostrado en la ecuación (4).

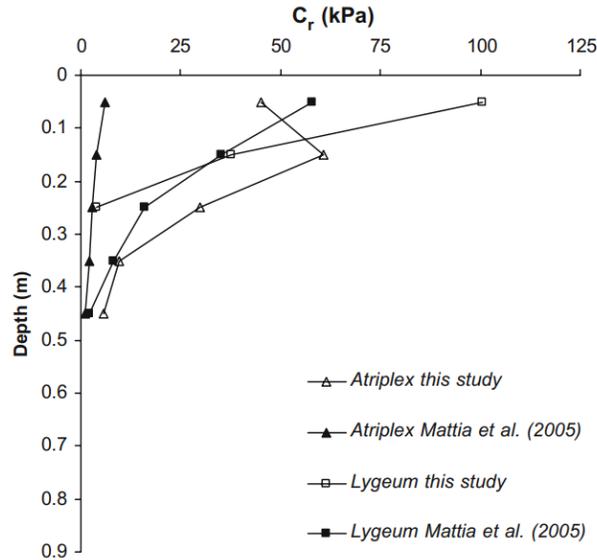


Figura 3. Valores de cohesión aparente para diferentes profundidades. Tomado de (De Baets et al., 2008, p. 223)

Este efecto de refuerzo también se confirma en un estudio realizado por Kokutse et al., (2016). La Figura 4 muestra los valores de la cohesión adicional generada por la presencia de las raíces, considerando la presencia de varios tipos de vegetación. Los valores de cohesión adicional se obtienen con el modelo propuesto por T. H. Wu et al., (1979).

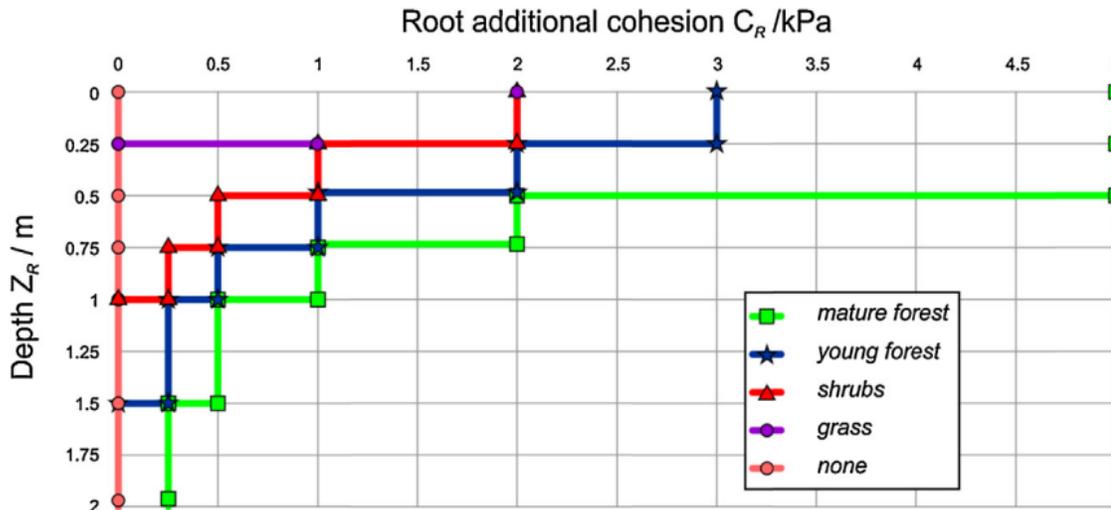


Figura 4. Valores de la cohesión adicional de la raíz (CR), considerando la simulación de la presencia de raíces de vegetación en varias capas del suelo para varios tipos de vegetación. Tomado de (Kokutse et al., 2016, p. 148)

### 3.1.2 Efecto de las raíces en la estabilidad de taludes.

Los estudios realizados por Gentile et al., (2010), muestran cómo la presencia de raíces distribuidas uniformemente a través de toda la superficie del talud, tiene un efecto positivo en su estabilidad, generando un incremento significativo de los Factores de seguridad.

Por medio de modelos numéricos, Kokutse et al., (2016) también llegan a la misma conclusión. El factor de seguridad del talud presenta un aumento significativo generado por la presencia de vegetación. En la Figura 5 se muestran los resultados del incremento del factor de seguridad utilizando varios tipos de vegetación, desde el césped hasta árboles maduros. La estabilidad de un talud no reforzado con vegetación mejora significativamente cuando la cohesión adicional de las raíces de las plantas se tiene en cuenta.

El efecto aumenta a medida que la profundidad de la raíz aumenta, llegando a las zonas donde se inicia el mecanismo de falla. En consecuencia, la presencia de las raíces genera que la superficie crítica de deslizamiento se desplace hacia abajo de la superficie del suelo. (Gentile et al., 2010; Kokutse et al., 2016).

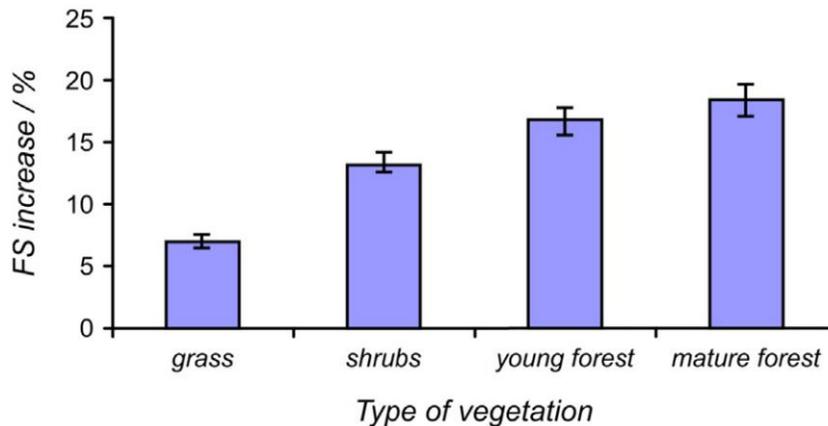


Figura 5. Incremento del Factor de Seguridad, debido a la cohesión adicional de las raíces para distintos tipos de vegetación. Tomado de (Kokutse et al., 2016, p. 149)

Adicional a esto, Kokutse et al., (2016) estudiaron los valores medios del Factor de seguridad para taludes con presencia de vegetación (FSR) en función del ángulo de inclinación del talud ( $\alpha$ ) para tres tipos de suelo: arcilla, arena y arcilla limosa, y en función de la altura del talud (H).

La Figura 6 y la Figura 7, muestran los valores del Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación y de la altura. Como se puede observar, los valores medios del Factor de Seguridad decrecen cuando se incrementa el ángulo de inclinación  $\alpha$  del talud y se presenta la misma situación cuando aumenta su altura. El incremento de la altura H, induce a la inestabilidad del talud y la disminución del ángulo de inclinación del talud genera un incremento significativo en el Factor de Seguridad.

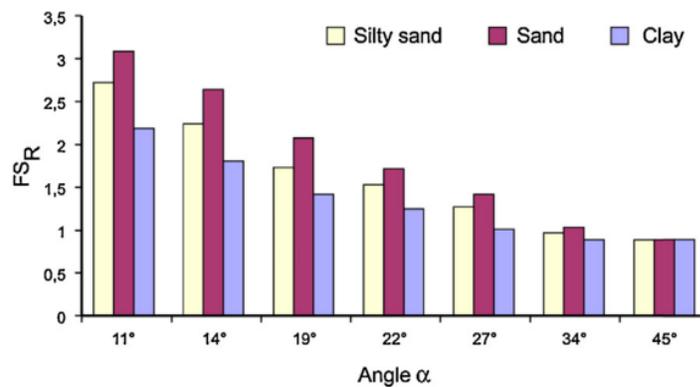


Figura 6. Valores medios del factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud para varios tipos de suelos. Tomado de (Kokutse et al., 2016, p. 150)

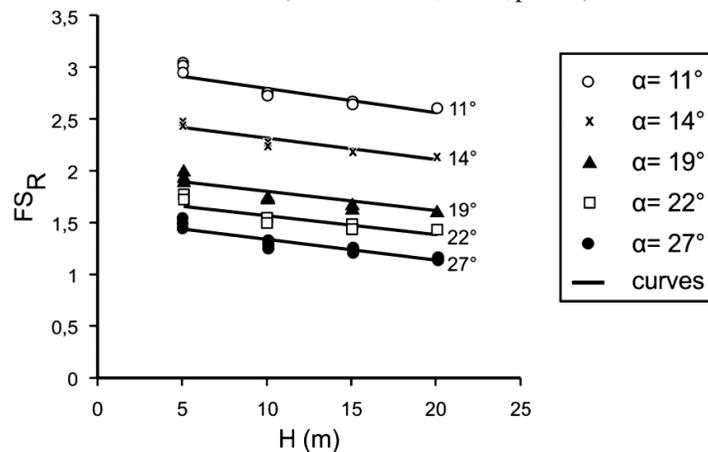


Figura 7. Valores medios del Factor de Seguridad en función de la altura (H) del talud para diferentes ángulos de inclinación. (Kokutse et al., 2016, p. 150)

En cuanto al incremento del Factor de Seguridad, generado por la cohesión adicional de las raíces, Kokutse et al., (2016), concluye que la cohesión adicional genera el mayor incremento del factor de seguridad del talud. En la Tabla 1, se pueden observar los valores del incremento del Factor de seguridad, en porcentaje, para tres tipos de suelo; arcilla, arena y arcilla limosa.

*Tabla 1. Influencia de los principales parámetros de la vegetación que afectan el Factor de seguridad del talud. Tomado y adaptado de (Kokutse et al., 2016, p. 150)*

Parámetros	Tipo de suelo		
	Arcilla (%)	Arena (%)	Arena limosa (%)
CR1	14	13	13
CR2	6	7	4
W	-1	1	-1

Donde CR1 y CR2 representan el valor de la cohesión adicional entre los 0 m y 0.25 m de profundidad y 0.25 m a 0.50 m de profundidad respectivamente. W corresponde al valor de la sobrecarga debida a la presencia de árboles (jóvenes y maduros). El valor asignado a W fue de 600 Pa, que corresponde al valor medio de la presión ejercida sobre el suelo de una plantación de 350 árboles/Ha de pino marítimo (Kokutse et al., 2016, p. 149).

Como se puede observar en la Tabla 1, entre los 0 y 25 cm de profundidad, el efecto de las raíces en el suelo genera un incremento del 13% del Factor de Seguridad, el cual va disminuyendo a medida que aumenta la profundidad. En cuanto a la sobrecarga debida a la presencia de árboles, sólo contribuye en el 1% del aumento del factor de seguridad, un dato muy bajo. Para las arenas es positivo y para los otros suelos es negativo. Esto quiere decir, que la influencia de la sobrecarga asumida por el efecto de los árboles puede tener un efecto negativo en la estabilidad de taludes, en el caso de las arcillas y las arenas limosas.

### **3.2 Resistencia a tracción de las raíces.**

Debido al gran número de ventajas y beneficios que poseen las raíces en la estabilidad de taludes, diferentes autores han estudiado los valores de resistencia a tracción de varios tipos de

vegetación para realizar comparaciones y establecer cuáles tienen mayores aportes y beneficios para el reforzamiento del suelo.

En un estudio realizado por Cheng et al., (2003), se comparan los resultados de la resistencia a tracción de seis tipos de hierbas, las cuales fueron recolectadas de diferentes sitios donde ya estaban establecidas. Las raíces de cada una de las plantas, fueron sometidas a ensayos de tracción, donde se midió la fuerza de resistencia máxima y el diámetro de cada raíz. La resistencia a tracción se calculó mediante el uso de la ecuación (4). En la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos por el método experimental empleado por Cheng et al., (2003), donde se comparan los resultados de diámetros medios y resistencias a tracción medias de seis tipos de hierbas.

*Tabla 2. Resultados de fuerza, diámetro y resistencia a tracción de la raíz de varios tipos de hierbas. Tomado y adaptado de (Cheng et al., 2003, p. 389)*

Tipos	Diámetro promedio de la raíz (mm)	Resistencia promedio (N)	Resistencia a la tracción promedio (MPa)
Late Juncelus	0,38 ± 0,43	2,66 ± 0,47	24,5 ± 4,2
Dallis grass	0,92 ± 0,28	12,98 ± 0,35	19,74 ± 3,00
White Clover	0,91 ± 0,11	12,8 ± 0,59	24,64 ± 3,36
Vetiver	0,66 ± 0,32	24,89 ± 1,08	85,10 ± 31,2
Common Cetipedegrass	0,66 ± 0,05	9,56 ± 1,33	27,30 ± 1,74
Bahio grass	0,73 ± 0,07	8,99 ± 1,99	19,23 ± 3,59
Manila grass	0,77 ± 0,67	8,84 ± 1,25	17,55 ± 2,85
Bermuda grass	0,99 ± 0,17	10,49 ± 2,65	13,45 ± 2,18

Por otro lado, Truong et al., (2008) también da a conocer una comparación de los resultados de resistencia a tracción de algunos árboles y césped, comúnmente utilizados para la estabilización de taludes. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de resistencia a tracción de algunas plantas empleadas en la estabilización de taludes. Tomado y adaptado de (Truong et al., 2008, p. 31)

Nombre botánico	Nombre común	Resistencia a tracción (MPa)
Salix spp	Sauce	9 - 36
Populus spp	Poplars	5 - 38
Alnus spp	Alisos	4 - 74
Pseudotsuga spp	Abeto de Douglas	19 - 61
Acer sacharinum	Arce plateado o Arce de Azúcar	15 - 30
Tsuga heterophylla	Hemlock occidental o Tsuga Hemlock	27
Vaccinium spp	Arándano	16
	Cebada	15 - 31
Hordeum vulgare	Pastos, hierbas	2 - 20
	Musgos	0.002-0.007
Vetiveria zizanioides	Pasto Vetiver	40 - 120

Del mismo modo, Teerawattanasuk et al., (2014) estudiaron el efecto de las raíces sobre la estabilidad de taludes. Se llevaron a cabo pruebas de tracción y corte directo, para evaluar la resistencia a tracción de la raíz de dos gramíneas diferentes: Vetiver y Ruzi. Las muestras de las raíces se extrajeron manualmente y posterior al retiro de la muestra del suelo, se realizó un lavado del sistema de raíces. Las raíces a las que se les realizó el ensayo de tracción tenían edades de 2, 4, 6, 8 y 10 meses. La longitud de las raíces estaba entre 10 a 13 cm de longitud. En la Tabla 4, se presentan los resultados obtenidos de estos ensayos.

Tabla 4. Resultados de ensayos de laboratorio para dos gramíneas, Vetiver y Ruzi. Tomado y adaptado de (Teerawattanasuk et al., 2014, p. 73).

Especie	No. de muestras	D (mm)	Tu (mN)	Ti (Mpa)	Er (Mpa)	R2
Pasto Vetiver (Vetiver Ziznoides (L) Nash)	88	0,25 - 2,9	2255,38 - 33830,7	4,31 - 57,93	43,2 - 2097,35	0,806
Pasto Ruzi (Baricharia ruzizensis)	39	0,3 - 0,7	2010,23 - 7207,41	18,73 - 29,13	236,05 - 1609,23	0,898

Nota: El rango de valores de ( $T_u$ ) corresponde a la fuerza máxima de tracción de la raíz, ( $D$ ) es el diámetro de la raíz, ( $T_i$ ) esfuerzo de tracción y ( $E_r$ ) módulo de Young.

Como se puede observar en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4, el pasto Vetiver es la planta con mejores resultados de resistencia a tracción, superando ampliamente a las demás especies de vegetación.

### 3.3 Pasto Vetiver.

#### 3.3.1 Descripción del pasto Vetiver.

De acuerdo con The Vetiver Network International, el vetiver, formalmente conocido como *Chrysopogon zizanioides*, es una planta perenne de crecimiento rápido, con un sistema radicular extenso, denso y profundo, con tallos fuertes. Es una planta no invasiva y que, en la actualidad, es usada ampliamente para abordar una gran cantidad de problemas ambientales e ingenieriles relacionados con el suelo y el agua. Esta planta puede desarrollarse en un amplio rango de condiciones climáticas, y si se siembra correctamente, puede ser usada en cualquier sitio de clima tropical, subtropical o mediterráneo.

El sistema Vetiver (SV), el cual se basa en la utilización del pasto vetiver, es un medio muy simple, práctico, económico, de bajo mantenimiento y muy efectivo para la conservación de suelos y agua, control de la sedimentación, estabilización y rehabilitación de tierras, y fitorremediación. El pasto vetiver tiene un sistema de raíces extremadamente profundo, masivo y denso, que amarra el suelo y al mismo tiempo impide que sea separado por flujos de agua de alta velocidad. Este

sistema de raíces profundo y de rápido crecimiento, hace también al vetiver muy tolerante a la sequía y muy apto para la estabilización de taludes. En la Figura 8 se puede observar el sistema de raíces que tiene el pasto vetiver y la longitud que puede alcanzar.



Figura 8. Sistema de raíz del Vetiver. Tomado del sitio Web de Vetiver Grass (<http://www.vetiver.org>).

En la Figura 9, se presentan los valores promedio para la longitud de la raíz y el diámetro de un grupo de raíces de una muestra de pasto Vetiver. Los resultados que se muestran en esta figura, se obtienen de los estudios realizados por Eab et al., (2015), los cuales se observaron y midieron continuamente durante un periodo de dos a seis meses. La relación entre la longitud de las raíces y el radio de un grupo de raíces, se muestra en la Figura 9(a). La tasa de crecimiento de las raíces, se determina a partir de la relación entre la longitud de las raíces con respecto al tiempo, como se muestra en la Figura 9(b).

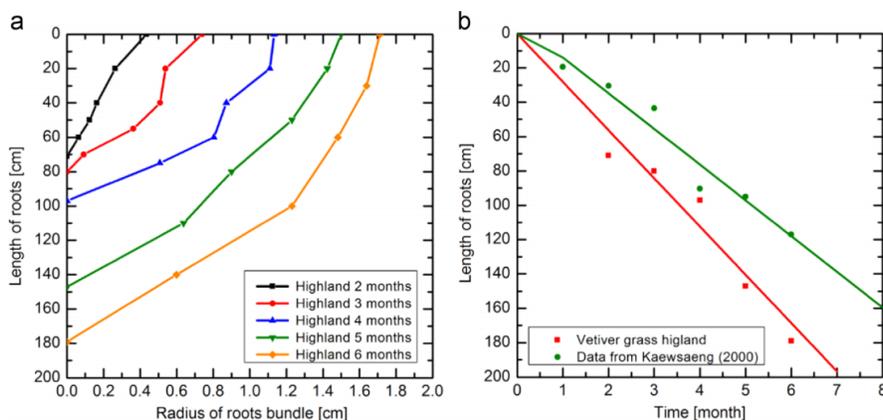


Figura 9. Valores promedio para mediciones de raíz de vetiver. (a) relación entre la longitud de las raíces y el radio de un grupo de raíces y (b) tasa de crecimiento de las raíces. Tomado de (Eab et al., 2015, p. 1273).

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 9, se puede observar que las raíces del Pasto Vetiver pueden crecer 180 cm en seis meses y adicional a esto, se puede observar que la tasa de crecimiento promedio de las raíces es de aproximadamente 30 cm por mes.

### **3.3.1.1 Características Morfológicas.**

- El pasto Vetiver tiene un sistema de raíces finas y compactas que crecen muy rápido. En algunas aplicaciones puede alcanzar entre tres y cuatro metros de profundidad en el primer año. Estas raíces crecen verticalmente y pueden alcanzar profundidades de más de cinco metros.
- El crecimiento del pasto vetiver generalmente es uniforme y no tiende a estancarse en ningún momento, crece entre 15 a 20 centímetros cada quince días, esto se puede observar y comprobar con los resultados de la
- Figura 9. El mayor crecimiento de las raíces del pasto se da cuando ha sido desarrollado en condiciones de cuidado óptimas: la estimulación del crecimiento con poda constante, un suelo altamente fértil y condiciones climáticas favorables.
- Crece en un rango amplio de suelos, con diferentes niveles de fertilidad y desde alturas que oscilan desde el nivel del mar hasta los 2.500 m.s.n.m., aunque en algunos sitios del Perú se han plantado hasta los 3.500 m.s.n.m., pero todavía se encuentran en fase de evaluación.
- Tiene tallos firmes y erguidos, que pueden soportar flujos de agua relativamente profundos
- Forma una barrera densa cuando es plantado a corta distancia, actuando como un filtro muy efectivo de los sedimentos y como un dispersor del agua de escorrentía.
- Muy resistente a plagas, enfermedades y al fuego
- Nuevos brotes se forman desde la corona subterránea haciendo al vetiver resistente al fuego, heladas, tráfico y alta presión de pastoreo.

### **3.3.1.2 Características fisiológicas.**

- Tolerancia a variaciones climáticas extremas como sequía prolongada, inundaciones, sumersión y temperaturas extremas de -15°C a +55°C.
- Habilidad para rebrotar rápidamente después de haber sido afectado por sequías, heladas, salinidad y otras condiciones adversas al mejorar las condiciones del tiempo o se añadan correctivos al suelo.
- Tolerancia a un amplio rango de pH desde 3.3 a 12.5 sin enmiendas del suelo.
- Alto nivel de tolerancia a herbicidas y plaguicidas.
- Alta tolerancia al Al, Mn y metales pesados tales como As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se y Zn en los suelos.

### **3.3.2 Estabilización de taludes usando el Sistema Vetiver.**

#### **3.3.2.1 Características del vetiver apropiadas para la estabilización de taludes.**

- Aunque técnicamente es un pasto, las plantas de vetiver usadas en la estabilización de taludes se comportan más bien como árboles o arbustos de rápido crecimiento. Las raíces del vetiver son, por unidad de área, más fuertes y profundas que las raíces de los árboles.
- El sistema de raíces del vetiver es extremadamente profundo y forma una masa finamente estructurada que se extiende hacia abajo dos a tres metros en el primer año. En pendientes de relleno, muchos experimentos muestran que este pasto puede alcanzar 3.6m en 12 meses. El sistema de raíces grueso y extenso, amarra el suelo y lo hace muy difícil de remover.
- Las raíces del vetiver, tienen una resistencia a tensión alta, comparada a la de muchas especies leñosas

- Las raíces tienen una resistencia a tensión promedio probada de alrededor de 75 MPa, que es equivalente a 1/6 del reforzamiento con acero blando y un incremento de la resistencia al corte de 39% a una profundidad de 0.5m.
- Las raíces del Vetiver pueden penetrar un perfil de suelo compactado como capas densas de suelo o capas de arcilla dura, muy comunes en suelos tropicales, proporcionando un buen anclaje para rellenos y material de suelo superficial.
- Cuando se plantan juntas y muy cercanas, las plantas de vetiver forman una barrera densa que reduce la velocidad del flujo superficial, y desvía la escorrentía, conformando un filtro muy eficiente que controla la erosión.
- El vetiver puede crecer verticalmente en pendientes con inclinaciones mayores a 56°. Su crecimiento rápido y reforzamiento sobresaliente lo hacen un mejor candidato para la estabilización de pendientes que otras plantas.

### ***3.3.2.2 Resistencia a tracción de las raíces del Vetiver.***

De acuerdo con Hengchaovanich & Nilaweera, (1996), la resistencia a la tracción de las raíces del vetiver, de dos años de edad cultivadas en campo, varía entre 40-180 MPa en un rango de diámetro de raíces entre 0.2 - 2.2 mm. Para la realización de los ensayos de tracción en laboratorio, se fallaron alrededor de 80 muestras de raíces de Pasto Vetiver. El valor promedio de diseño es de 75 MPa para diámetros de raíz de 0.7-0.8 mm, que es el tamaño más común de raíces de este tipo de pasto. Las raíces de vetiver son tan fuertes o más fuertes que las raíces de muchas especies leñosas que han sido probadas positivamente para el refuerzo de taludes. La Figura 10 muestra los resultados de resistencia a tracción de la raíz para raíces de varios diámetros. De esta figura se obtienen los valores promedio de resistencia y de diámetro, mencionados anteriormente.

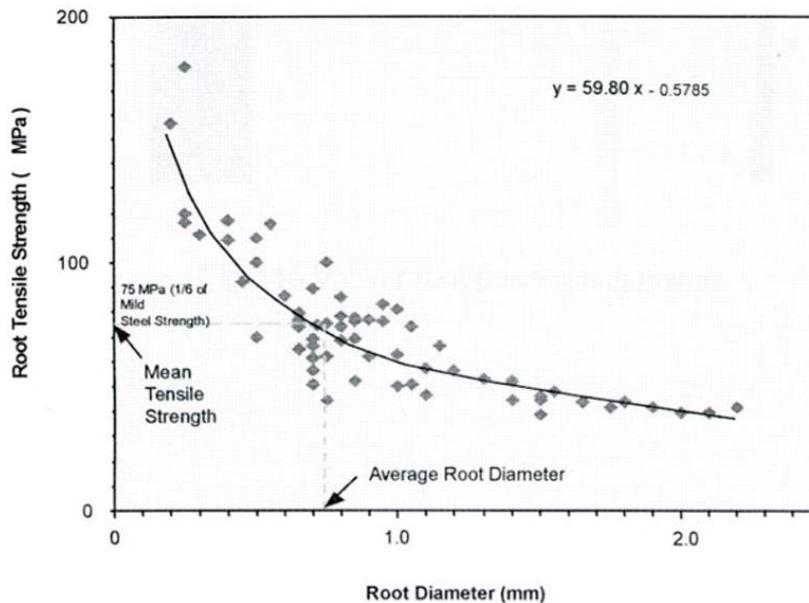


Figura 10. Resultados experimentales de resistencia a tracción para raíces de diferentes diámetros de pasto Vetiver (dos años de edad). Tomado de (Truong, 2008, p.4).

En un estudio similar realizado en Brasil, Machado et al., (2015) calcularon el valor de la resistencia a la tracción de las raíces de pasto vetiver mediante ensayos de tensión. Para la obtención de las raíces, se recogieron muestras de plantas de vetiver de dos años de edad cultivadas a las orillas del río San Francisco, insertando un cilindro en el perfil de suelo sin alterarlo, que contenía las raíces. Posterior a esto, se realizó un lavado y se escogieron 50 raíces para las pruebas de resistencia a tracción. Se utilizaron los siguientes criterios de selección de raíces: raíces no dañadas, diámetro constante, diámetro de raíz inferior a 8 mm (diámetro máximo en la raíz que se puede analizar en el laboratorio) y una longitud mínima de 0,10 m. Después de realizar los ensayos y obtener los resultados, Machado et al., (2015) indican que la resistencia media a tracción de las raíces de pasto vetiver es de 83 MPa para diámetros de raíz entre 0.4 y 2.7 mm, valor cercado al obtenido por Hengchaovanich & Nilaweera, (1996) y aún más cercano al valor obtenido por Cheng et al., (2003), mostrado en la Tabla 2.

Así mismo, Herrera, (2015a) también determinó la resistencia de las raíces de pasto vetiver mediante ensayos de tracción, a un total de 30 muestras de raíces individuales de longitudes y

diámetros diferentes, luego de que cumplieran los seis meses de vida. En la Figura 11, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo, donde se puede observar que el valor medio de la resistencia a tracción calculado en este estudio fue de 56 MPa, para un diámetro promedio de 0.81 mm.

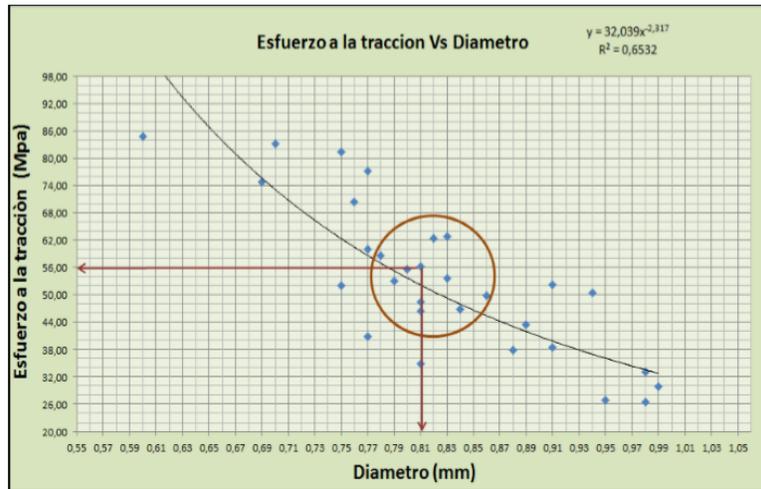


Figura 11. Resultados obtenidos de resistencia a tracción vs diámetro de la raíz del pasto vetiver. Tomado de (Herrera, 2015a, p. 124)

Por otra parte, Méndez et al., (2014), mediante ensayos de tensión, relacionan los resultados de resistencia a tracción de 20 ejemplares de raíces de Pasto Vetiver de 12 semanas de plantación, las cuales tenían longitudes entre 40 a 50 cm de longitud y entre 0.7 a 2.2 mm de diámetro. Los resultados de los ensayos se relacionan en la Tabla 5. Como se puede observar, las raíces tienen diámetros variables entre 0.7 y 2.2 mm, con elongaciones máximas que oscilan entre 2.2 y 4.9 cm, que representan deformaciones entre 9% y 23.6%. Con respecto a la resistencia a la tracción de las raíces, para un diámetro promedio de 1.4 mm, se obtienen valores de resistencia a la tracción promedio de 122 MPa, valor que supera al de los resultados obtenidos por (Hengchaovanich & Nilaweera, 1996; Herrera, 2015a; Machado et al., 2015).

Tabla 5. Resultados ensayo de tracción de raíces de Vetiver de tres meses de edad. Tomado de (Méndez et al., 2014, p. 167).

Ensayo	Diámetro	Área (cm <sup>2</sup> )	Longitud	$\Delta L$ (cm)	Carga máx. (kg)	Esfuerzo máx. (MPa)
	(cm)		Inicial (cm)			
1	0,19	0,0284	27,7	4,1	30	103,69
2	0,14	0,0154	24,8	3,1	18	114,59
3	0,17	0,0227	25,2	3,5	25	107,94
4	0,13	0,0133	27	2,6	16	118,13
5	0,1	0,0079	26,5	2,4	12	149,73
6	0,09	0,0064	22	2,3	10	154,05
7	0,2	0,0314	23,3	4,3	32	99,82
8	0,12	0,0113	24,3	2,7	16	138,64
9	0,08	0,005	19,8	2,3	9	175,47
10	0,11	0,0095	21,7	2,5	14	144,37
11	0,14	0,0133	26,7	3,2	17	125,52
12	0,18	0,0254	25,2	3,8	26	100,13
13	0,07	0,0038	17,6	2,2	8	203,72
14	0,12	0,0113	25	2,8	16	138,64
15	0,1	0,0079	21	2,3	12	149,73
16	0,12	0,0113	20	3,4	15	129,98
17	0,22	0,038	22,7	4,9	37	95,39
18	0,21	0,0346	22	4,8	35	99,03
19	0,15	0,0177	19,5	4,6	24	133,1
20	0,15	0,0177	17,5	4,1	22	122
<b>Máximo</b>	0,22	0,038	27,7	4,9	37	203,72
<b>Media</b>	0,14	0,0166	22,98	3,3	19,7	130,18
<b>Mínimo</b>	0,07	0,0038	17,5	2,2	8	95,39

La variabilidad de los resultados de la resistencia a la tracción de las raíces, se puede presentar debido a la edad de la raíz, la tasa de crecimiento y orientación del crecimiento, dirigida por las variaciones en el contenido de humedad del suelo, la textura del suelo y el estado de los nutrientes. Todos estos factores pueden ser responsables de esta variabilidad. (De Baets et al., 2008, p. 220)

### ***3.3.2.3 Incremento del esfuerzo cortante del suelo debido a la presencia de raíces de Pasto Vetiver.***

Mediante un ensayo de corte directo in situ a gran escala Hengchaovanich & Nilaweera, (1996), también encontraron que la presencia de raíces de pasto Vetiver, de dos años de edad, puede generar un aumento de la resistencia al corte del suelo de un 90% a los 25 cm de profundidad. Para los 50 cm de profundidad, se presenta un aumento del 39% y gradualmente se redujo a 12.5% a un metro de profundidad. Además, el sistema de raíces denso y masivo del vetiver ofrece un mayor incremento de la resistencia al corte por unidad de concentración de fibra (6-10 kPa/kg de raíz por metro cúbico de suelo) en comparación con 3.2-3.7 kPa/kg de raíz de árboles (Hengchaovanich & Nilaweera, 1996). En la Figura 12, se muestran los resultados del aumento de la resistencia a la tracción del perfil del suelo, debido a la presencia de raíces de Pasto Vetiver, de dos años de edad. Adicional a esto, se relaciona el área de la raíz con respecto a la profundidad.

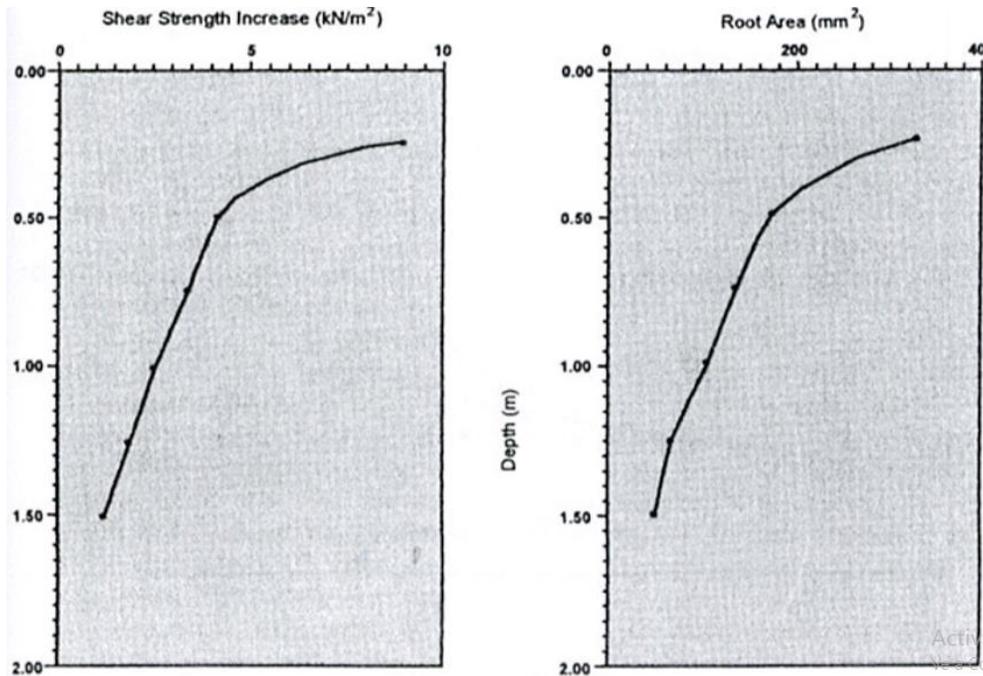


Figura 12. Aumento de la resistencia al corte del perfil del suelo, debido a la presencia de raíces de Pasto Vetiver, de dos años de edad y relación del área de la raíz con respecto a la profundidad. Tomada de (Truong, 2008, p. 3).

De manera similar, en un estudio más reciente realizado en India por D'Souza et al., (2019), también presentan el incremento del esfuerzo cortante del suelo por la presencia de las raíces de pasto Vetiver mediante los resultados obtenidos de ensayos de corte directo in situ a gran escala. Las pruebas se desarrollaron para diferentes profundidades de una muestra de suelo con raíces de Vetiver de un año de plantado a 15 cm de separación entre plantas. Para el análisis del incremento, se realizaron los ensayos para una muestra de suelo con la presencia de raíces y otra muestra sin la presencia de raíces, bajo las mismas condiciones.

Después del ensayo, se determinó la resistencia a la tracción promedio de las raíces de pasto Vetiver, la cual fue de 85 MPa, resultado similar al obtenido por Cheng et al., (2003); Hengchaovanich & Nilaweera, (1996); Machado et al., (2015). En la Figura 13, se presentan los resultados de la relación de esfuerzo-deformación del ensayo de corte directo in situ para (a) la muestra sin la presencia de raíces y (b) la muestra de suelo con la presencia de raíces de Pasto Vetiver. En la Tabla 6, se presentan los resultados del ensayo para diferentes profundidades.

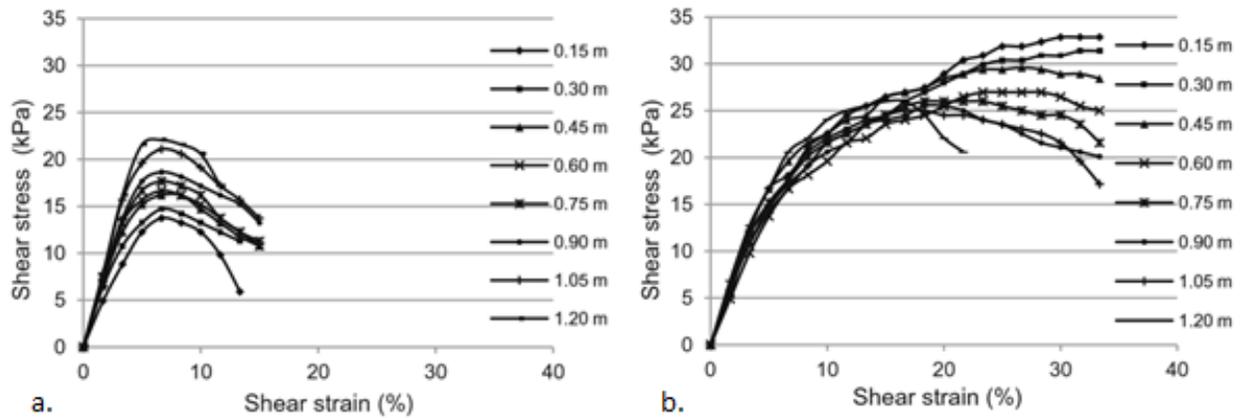


Figura 13. Relación esfuerzo-deformación del ensayo de corte directo in situ a varias profundidades para (a) suelo sin la presencia de raíces y (b) suelo con la presencia de pasto Vetiver. Tomado de (D'Souza et al., 2019, p. 140)

Tabla 6. Variación del esfuerzo pico del ensayo de Corte directo in situ. Tomado y adaptado de (D'Souza et al., 2019, p. 141).

Profundidad del plano de corte (m)	Resistencia Pico (no reforzado) (kPa)	Relación del área de la raíz (RAR)	Resistencia Pico (reforzado con Vetiver) (kPa)	Incremento porcentual de la resistencia pico
0,15	13,73	0,57	32,85	139,3
0,3	14,71	0,49	31,38	113,3
0,45	16,18	0,43	29,62	83,1
0,6	16,67	0,36	26,97	61,8
0,75	17,65	0,29	25,99	47,3
0,9	18,63	0,25	25,5	36,9
1,05	21,08	0,22	25,01	18,6
1,2	22,06	0,15	25,99	17,8

La Figura 13, muestra que la resistencia al corte del suelo con la presencia de raíces de Vetiver es mayor que la del suelo sin la presencia de raíces. En comparación con el suelo sin la presencia de raíces, el suelo con pasto Vetiver muestra una tensión muy grande antes de la falla. Una gran tensión conduce a una falla progresiva que proporcionaría una advertencia suficiente antes de que se presenten los deslizamientos de tierra (D'Souza et al., 2019, p. 141). En la Tabla 6, se puede observar un aumento de hasta el 139% de la resistencia al corte del suelo a una profundidad de 0,15 m. El aumento en la resistencia al corte es directamente proporcional a la relación del área de la raíz (RAR). El aumento de la resistencia es mayor en profundidades poco profundas debido a la

alta relación de área de raíz y disminuye, cuando la relación de área de raíz se reduce con la profundidad. Mientras se realizaban las pruebas, también se observó que, a poca profundidad, las raíces fallaban principalmente por deslizamiento; a mayores profundidades, las raíces fallaron por la rotura de la raíz. (D'Souza et al., 2019, p. 141).

Por otro lado, Eab et al., (2015); Teerawattanasuk et al., (2014), en sus estudios realizados, determinan el aumento de la cohesión del suelo por la presencia de las raíces del pasto Vetiver, mediante el ensayo de corte directo a muestras con raíces de pasto Vetiver. Este aumento de la cohesión, genera un incremento del esfuerzo cortante del suelo de acuerdo a lo planteado en la ecuación (1), del criterio de falla de Mohr Coulomb.

En la Figura 14, se muestran los resultados del ensayo de corte directo del estudio realizado por Eab et al., (2015) para (a) una muestra de suelo con raíces de vetiver de cuatro meses de edad (un solo espécimen) y una muestra de suelo sin la presencia de raíces, y (b) una muestra de suelo con raíces de vetiver de seis meses de edad (nueve especímenes), y una muestra de suelo sin la presencia de raíces. Para la muestra de las raíces de pasto vetiver de seis meses de edad, se realizó un molde más grande de corte directo. En la Tabla 7, se relacionan los resultados del ensayo de corte directo, cohesión y ángulo de fricción obtenidos, de acuerdo al criterio de falla de Mohr Coulomb, junto con el incremento de la cohesión generado por la presencia de raíces de pasto Vetiver.

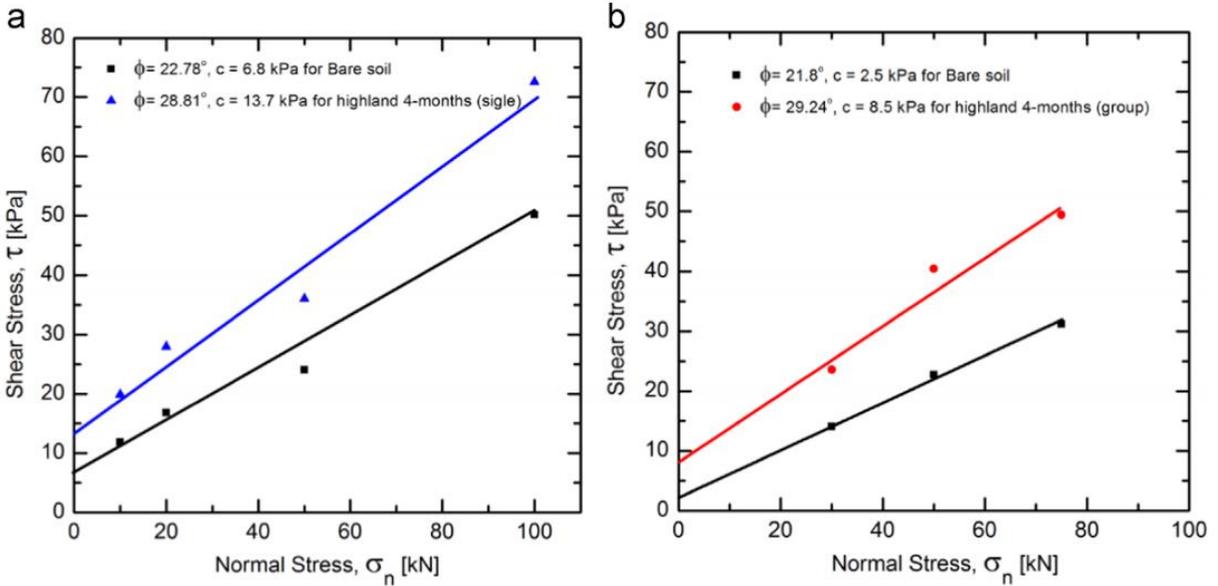


Figura 14. Esfuerzo cortante del suelo con la presencia de raíces. (a) prueba de corte directo - vetiver de 4 meses de edad y (b) prueba de corte directo – vetiver 6 meses de edad. Tomado y adaptado de (Eab et al., 2015, p. 1274).

Tabla 7. Resultados del ensayo de corte directo. Tomado de (Eab et al., 2015, p. 1275).

Ensayo	Espécimen	Parámetros de resistencia al corte	Incremento de la cohesión
Ensayo de corte directo estandar	Suelo sin raíces	$c = 6,8 \text{ kPa}$ $\varphi' = 22,8^\circ$	6,8
	Un vetiver de 4 meses de edad	$c = 13,6 \text{ kPa}$ $\varphi' = 29,7^\circ$	
Ensayo de corte directo gran escala	Suelo sin raíces	$c = 2,5 \text{ kPa}$ $\varphi' = 21,8^\circ$	6
	Grupo vetiver de 6 meses de edad	$c = 8,5 \text{ kPa}$ $\varphi' = 29,2^\circ$	

En la Figura 15, se muestran los valores de cohesión obtenidos en el estudio de Teerawattanasuk et al., (2014), para periodos de crecimiento de la raíz de pasto vetiver de 2, 3, 4, 5 y 6 meses, después de realizar los ensayos de corte directo in situ, en la muestra de suelo con y sin la presencia de raíces. En la Tabla 8, se relacionan los resultados del ensayo de corte directo para cada una de las muestras.

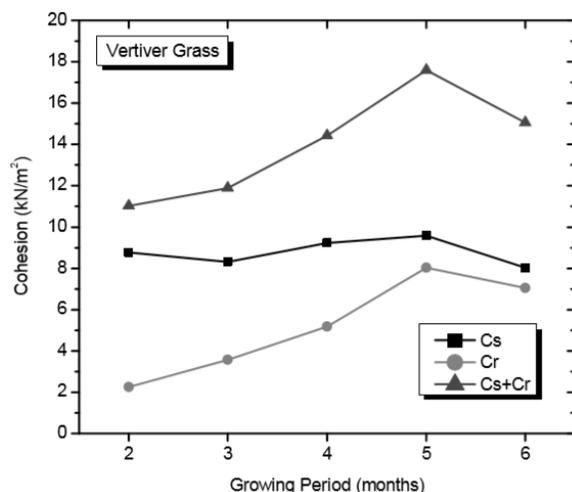


Figura 15. Relación entre el crecimiento de la raíz y la resistencia al corte de la raíz del pasto Vetiver (CR) en comparación con la resistencia al corte del suelo (Cs). Tomado de (Teerawattanasuk et al., 2014, p. 77)

Tabla 8. Resultados de cohesión de la raíz (CR) y suelo (Cs), de la prueba de corte directo in situ después de 2, 3, 4, 5 y 6 meses. Tomado de (Teerawattanasuk et al., 2014).

Growing Periods (months)	Soil	Vetiver grass	
	Cs	CR	Cs + CR
2	8,77	2,25	11,02
3	8,31	3,58	11,89
4	9,23	5,19	14,42
5	9,58	8,02	17,6
6	8,02	7,04	15,06

De manera similar, Herrera, (2015a) también determina el incremento de la cohesión de la masa de suelo generada por la presencia de raíces de pasto vetiver, mediante ensayos de corte directo con modalidad consolidado-drenado. Los ensayos de corte se realizaron a dos tipos de muestras de suelo, que corresponden a arena limosa (SM) y a arena arcillo limosa (SM-SC), las cuales se tomaron de la zona de estudio donde se realizó el sembrado del pasto vetiver. Las muestras se evaluaron sin y con la presencia de raíces de vetiver, de más de seis meses de edad. En la Tabla 9,

se relacionan los resultados obtenidos del ensayo de corte directo, de los dos tipos de muestras de suelo con y sin la presencia de raíces de pasto vetiver.

*Tabla 9. Parámetros obtenidos de los ensayos de corte directo. Tomado y adaptado de (Herrera, 2015b, p. 6)*

Material	Condición	c (kPa)	Phi (°)
SM	Sin Vetiver	5	32
SM	Con Vetiver	65	37
SM-SC	Sin Vetiver	44	25
SM-SC	Con Vetiver	67	34

Como se puede observar, en los estudios realizados por Eab et al., (2015); Herrera, (2015a); Teerawattanasuk et al., (2014), la presencia de las raíces del pasto Vetiver dentro de la masa de suelo, genera un aumento significativo en la cohesión del suelo, contribuyendo así con el aumento de la resistencia al corte del suelo. Los resultados obtenidos por Eab et al., (2015) y por Teerawattanasuk et al., (2014), tienen magnitudes del mismo orden, mientras que los resultados obtenidos por Herrera, (2015a), muestran valores de cohesión mucho más altos. Esto se puede deber al tipo de muestra de suelo y las condiciones en las que se realizaron los ensayos analizados en cada investigación.

A continuación, se relaciona el resumen de los resultados de las resistencias a tracción del pasto vetiver, junto con la edad, diámetro promedio y país donde se realizó el estudio de cada una de las investigaciones mencionadas anteriormente, los cuales se pueden observar en la Tabla 10 ; en la Tabla 11, se relaciona el resumen de los resultados del incremento de la cohesión de la masa del suelo por la presencia de las raíces del pasto vetiver, de cada una de las investigaciones antes mencionadas.

Tabla 10. Resumen de resultados obtenidos de resistencia a tracción, de los estudios referenciados. (Fuente propia)

Referencia	Resistencia promedio a tracción (MPa)	Edad	Diámetro Promedio (mm)	Siembra		País
				Exterior	Laboratorio	
(Hengchaovanich & Nilaweera, 1996)	75	2 años	0,7 - 0,8	x		Tailandia
(Cheng et al., 2003)	85 ± 31,2	-	0,66 ± 0,32	x		China
(Teerawattanasuk et al., 2014)	4,31 - 57,93	2, 4, 6, 8, 10 (meses)	0,25 - 2,9	x		Tailandia
(Méndez et al., 2014)	122	3 meses	1,4		x	Venezuela
(Machado et al., 2015)	83	2 años	0,4 - 2,7	x		Brasil
(Herrera, 2015a)	56	6 meses	0.81	x		Colombia
(D'Souza et al., 2019)	85	1 año	-	x		India

Tabla 11. Resumen de resultados obtenidos del incremento de la cohesión, de los estudios referenciados. (Fuente propia)

Referencia	Ensayo	Muestra	Cohesión del suelo sin Vetiver (kN/m <sup>2</sup> )	Cohesión del Suelo con Vetiver (kN/m <sup>2</sup> )	Incremento de la cohesión del suelo (kN/m <sup>2</sup> )	Edad	País
(Teerawattanasuk et al., 2014)	Corte directo in situ	CL	8,77	11,02	2,25	2 meses	Tailandia
			8,31	11,89	3,58	3 meses	
			9,23	14,42	5,19	4 meses	
			9,58	17,6	8,02	5 meses	
			8,02	15,06	7,04	6 meses	
(Eab et al., 2015)	Corte directo estándar	-	6,8	13,6	6,8	4 meses	Tailandia
	Corte directo gran escala	-	2,5	8,5	6	6 meses	
(Herrera, 2015a)	Corte directo	SM	5	65	60	6 meses	Colombia
	Corte directo	SM - SC	44	67	23	6 meses	

Debido al gran número de características, ventajas y datos técnicos que tiene el Sistema Vetiver en la estabilización de taludes, comparado con otras especies de vegetación, se ha implementado en muchos países del mundo mostrando resultados positivos. En la Figura 16, se pueden observar los países y las regiones donde se ha implementado esta técnica.



Figura 16. Distribución mundial de programas activos de pasto Vetiver. Tomado del sitio Web de Vetiver Grass (<http://www.vetiver.org>).

En la Figura 17, se muestran algunos casos y proyectos en los que se utilizó el Sistema Vetiver para mejorar la estabilidad de taludes.



Figura 17. Proyectos donde se implementó el Sistema Vetiver para la estabilización de taludes. Imágenes tomadas del sitio Web de Vetiver Grass (<http://www.vetiver.org>).

### 3.4 Modelación numérica

Para representar el efecto mecánico que ejercen las raíces sobre el suelo, algunos autores han realizado modelaciones numéricas, con diferentes parámetros, y han encontrado la manera de simular este efecto en la estabilización de taludes.

Gentile et al., (2010), cuantifican el efecto mecánico de las raíces, sobre el factor de seguridad del talud, utilizando el método de elementos finitos en el Software Plaxis 2D. Para realizar las modelaciones numéricas, manejaron dos variables: cohesión relativa ( $C_R$ ) y profundidad de la raíz ( $H_R$ ), las cuales se iban variando durante las simulaciones. La presencia de vegetación se simuló mediante la atribución a los elementos de la malla que representa la capa con presencia de raíces con un valor de cohesión eficaz mayor que el suelo circundante. Se analizaron tres casos para hacer el análisis. En la Figura 18 se pueden observar las características, parámetros considerados, geometrías y resultados obtenidos en cuanto al Factor de Seguridad del talud y la ubicación de la superficie de falla, para cada caso de estudio. En la Figura 19 se muestran las líneas de contorno de los esfuerzos cortantes en la falla, después de correr los modelos, para los taludes sin vegetación y con vegetación, en cada uno de los casos.

CASO A		CASO B		CASO C	
Suelo homogéneo		Suelo homogéneo		Suelo homogéneo	
Sin presencia de agua		Sin presencia de agua		Nivel freático en la superficie del talud	
C' (kPa)	0	C' (kPa)	5	C' (kPa)	0
$\varphi$ (°)	25	$\varphi$ (°)	25	$\varphi$ (°)	30
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20
$\beta$ (°)	26,5	$\beta$ (°)	26,5	$\beta$ (°)	14
CR (kPa)	5	CR (kPa)	10	CR (kPa)	5
HR (m)	1	HR (m)	1	HR (m)	1
Geometría del talud y malla de elementos finitos:		Geometría del talud y malla de elementos finitos:		Geometría del talud y malla de elementos finitos:	
<p><b>Resultados sin la presencia de vegetación.</b>  Mecanismo de falla: plana y poco profunda  Profundidad superficie de falla: 1,4 m  Factor de Seguridad cercano a 1</p> <p><b>Resultados con la presencia de vegetación:</b>  Si la vegetación se extiende sobre toda la superficie de suelo, incluyendo la zona del pie del talud, el valor del Factor de seguridad es igual a 1.08 (aumento del 11.5%) generando un desplazamiento hacia abajo de la superficie de falla hasta una profundidad de 2,6 m.</p>		<p><b>Resultados sin la presencia de vegetación.</b>  Mecanismo de falla: circular y profunda  Profundidad superficie de falla: hasta 3,6m  Factor de Seguridad = 1,34</p> <p><b>Resultados con la presencia de vegetación:</b>  Si la vegetación cubre toda la superficie del suelo, el Factor de Seguridad del talud aumenta a 1.39, sin embargo, la profundidad de la superficie de falla no cambia significativamente</p>		<p><b>Resultados sin la presencia de vegetación.</b>  Mecanismo de falla: Paralelo a la superficie del talud  Profundidad superficie de falla: 1,3 m  Factor de Seguridad = 1,10</p> <p><b>Resultados con la presencia de vegetación:</b>  Si la vegetación se extiende sobre toda la superficie de suelo, incluyendo la zona del pie del talud, el valor del Factor de seguridad es igual a 1.18 (aumento del 7,5%) produciendo un desplazamiento hacia abajo de la superficie de falla hasta una profundidad de 2,5 m.</p>	

Figura 18. Casos de estudio con los respectivos parámetros analizados y resultados obtenidos. Datos e imágenes tomados de (Gentile et al., 2010)

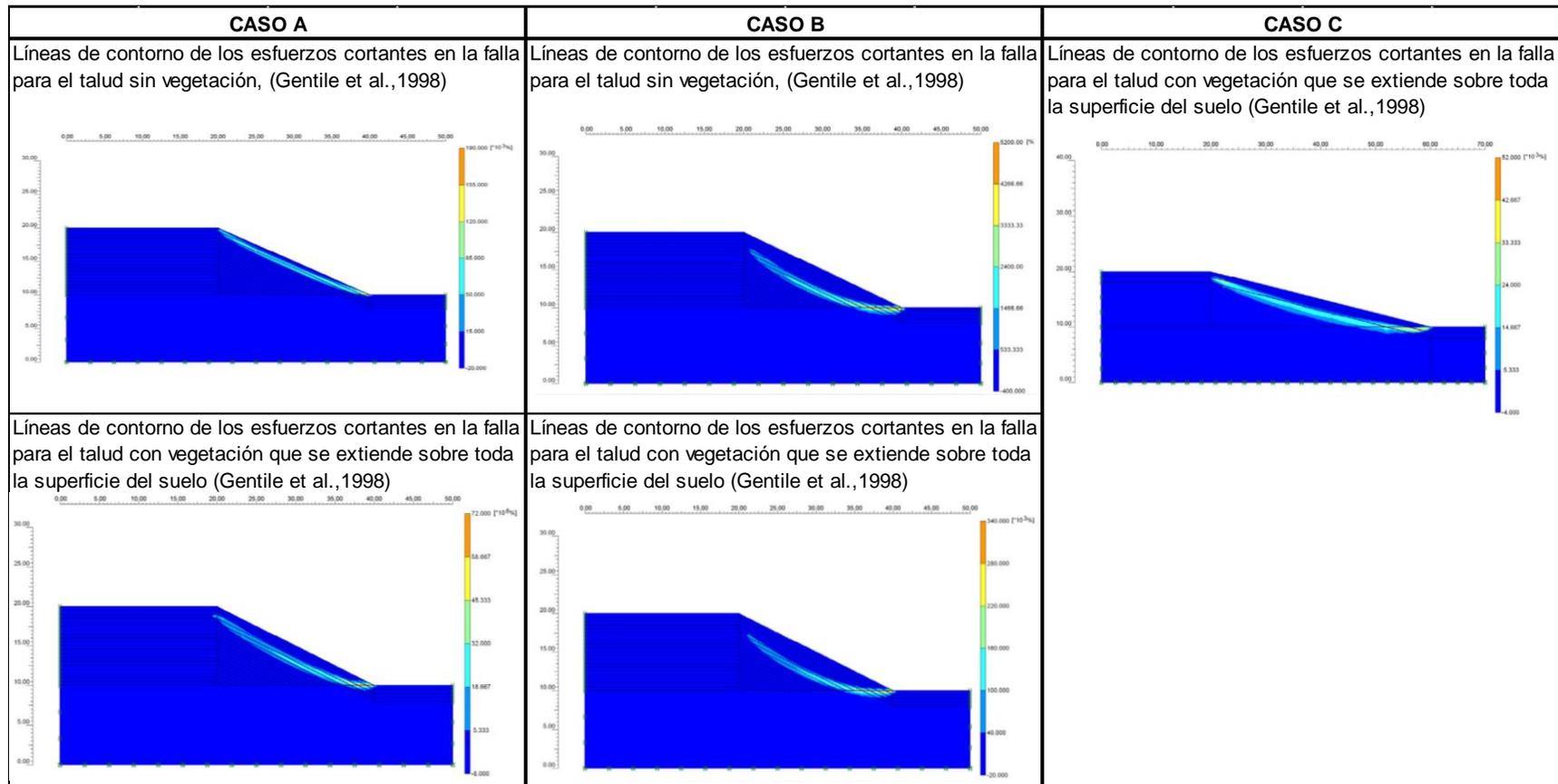


Figura 19. Líneas de contorno de los esfuerzos cortantes en la superficie de falla para el talud sin vegetación y con vegetación para cada caso. Imágenes tomadas de (Gentile et al., 2010).

Para realizar el análisis, primero evaluaron la estabilidad del talud sin vegetación, (asumiendo  $c=0$  kPa) y este resultado se toma como referencia para la evaluación de los efectos mecánicos debido a la presencia de vegetación en el talud. Posteriormente, se atribuye un valor de cohesión aparente a una capa de elementos del suelo dispuesto a lo largo de la superficie del talud, para una profundidad de la raíz ( $H_R$ ) = 1m y se hace la comparación.

En la Figura 20, se pueden observar los resultados de los factores de Seguridad y profundidad de la superficie de falla, obtenidos para tres casos: el primero, la vegetación se limita únicamente a la superficie del talud; el segundo, la vegetación se extiende por la superficie del talud y el pie del talud y tercero, la vegetación se extiende sobre toda la superficie del suelo.

A partir de los resultados obtenidos por Gentile et al., (2010), los cuales se pueden observar en la Figura 18, Figura 19 y Figura 20, se puede concluir que los incrementos del Factor de seguridad del talud, generados por la presencia de vegetación, son más significativos cuando la vegetación se extiende sobre toda la superficie del suelo. Por el contrario, si la vegetación sólo se extiende a lo largo de la superficie de la pendiente del talud, sin tener en cuenta el pie del talud, los incrementos del Factor de seguridad son muy pequeños. El efecto aumenta cuando la raíz es más profunda, llegando a las zonas donde inicia el mecanismo de falla. Por esta razón, la superficie de falla se desplaza a mayores profundidades. Por otra parte, los análisis indican que los efectos mecánicos de la vegetación son menos significativos en los taludes con altos valores de cohesión eficaz, donde es probable que se presenten superficies de falla a mayores profundidades, debido a que el refuerzo generado por la raíz, está limitado a las primeras capas del suelo debajo de la superficie.

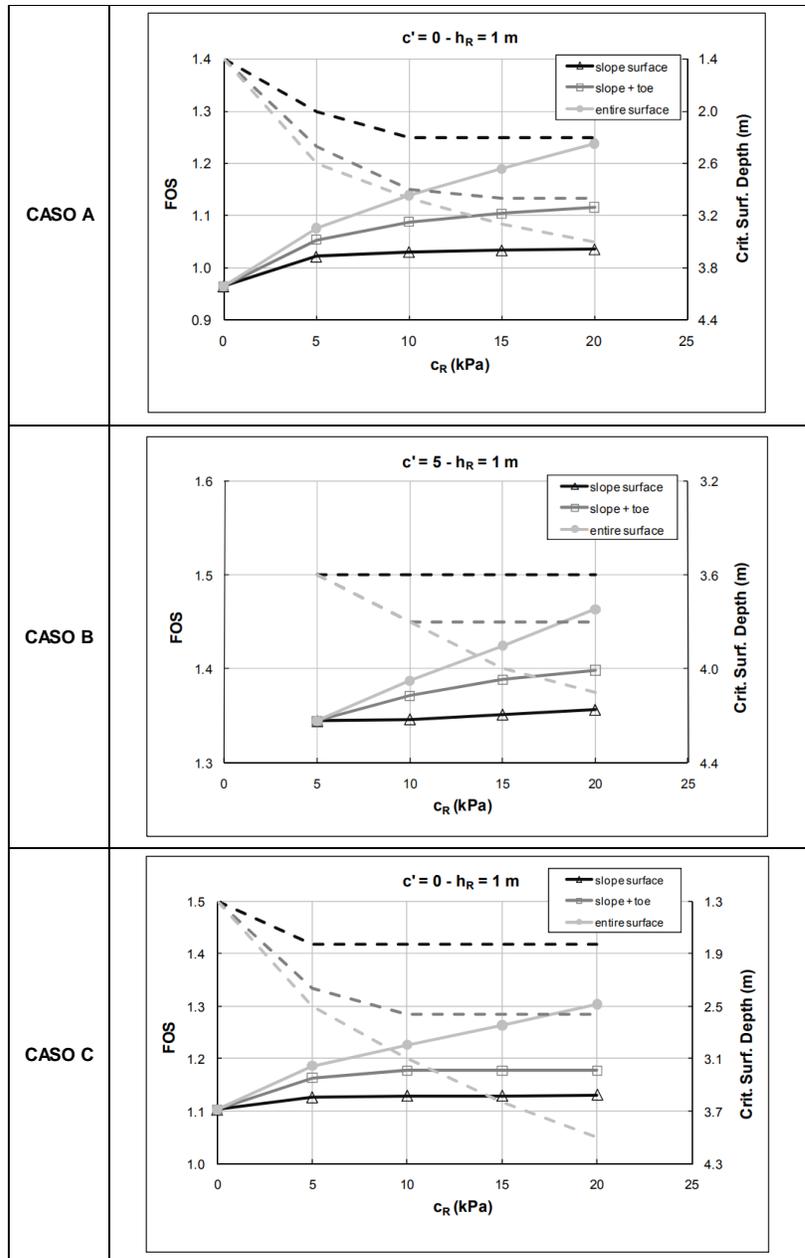


Figura 20. Evolución del Factor de Seguridad y profundidad de la superficie de falla con  $c_R$ , para los 3 casos. Imágenes tomadas de (Gentile et al., 2010)

Por otro lado, Kokutse et al., (2016), también representan el efecto mecánico de las raíces en la estabilidad de taludes, utilizando el método de elementos finitos en el Software Plaxis 2D, pero no sólo variaron las propiedades del suelo, también realizaron el estudio del efecto de varios tipos de cobertura vegetal, diversas geometrías del talud y diferentes tipos de suelos. Las raíces de los diferentes tipos de vegetación se modelaron a través de la cohesión adicional. El peso de los árboles

también se tuvo en cuenta y se aplicó como una sobrecarga uniforme en la superficie del talud. En la Tabla 12, se relacionan los parámetros utilizados por Kokutse et al., (2016), para realizar las modelaciones numéricas.

Tabla 12. Parámetros utilizados para representar el efecto mecánico de las raíces en la estabilidad del talud. (Fuente propia)

<b>Parámetros geométricos del talud</b>	Altura (H)	5 m, 10 m, 15 m, 20 m		
	Ángulo de Inclinación ( $\alpha$ )	11°, 14°, 19°, 22°, 27°, 34°, 45°		
<b>Parámetros mecánicos de la vegetación</b>	Cobertura Vegetal	Ninguna, Césped, Arbustos, Bosque joven y Bosque maduro		
	Cohesión adicional (CR)	Valores dados de la Figura 3		
	Profundidad zona de las raíces (ZR)	0 - 0.25m; 0.25 - 0.5m; 0.5 - 0.75m; 0.75 - 1.0m; 1.0 - 1.50m; 1.5 - 2.0m; 2.0 - Roca		
<b>Propiedades mecánicas de los suelos</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Arcilla</b>	<b>Arena</b>	<b>Arena - limosa</b>
	Densidad seca $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	16	17	17
	Módulo de Young E (kPa)	10000	13000	11500
	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,35	0,3	0,25
	Módulo de corte G (kPa)	3704	5000	4600
	Ángulo fricción interna $\phi'$ (°)	20	30	25
	Cohesión (kPa)	2	0,001	2

En el estudio, se analizaron modelaciones realizando variaciones de cada uno de los parámetros mostrados en la Tabla 12. En cuanto a la cohesión adicional generada por las raíces, se consideró como una variable en función de la profundidad del suelo, medida desde la superficie. Por lo tanto, la cohesión es un parámetro dependiente de la profundidad de la raíz (Z<sub>R</sub>). Debido a esto, se obtuvieron diferentes valores de cohesión adicional en función de Z<sub>R</sub>, para cada cobertura vegetal. Estos valores de cohesión adicional, se pueden observar en la Figura 4.

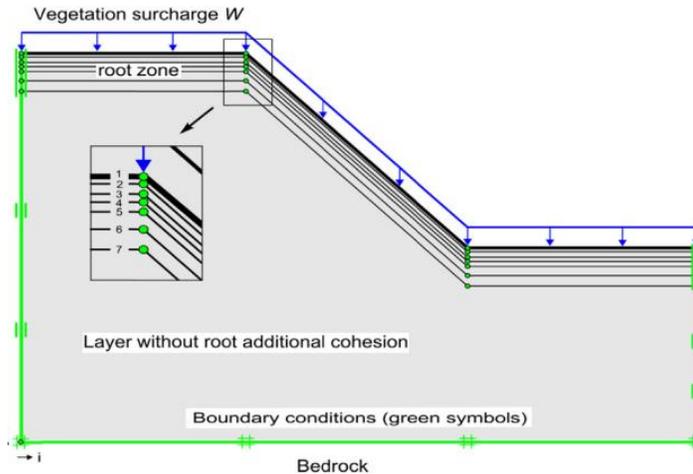


Figura 21. Esquema del talud empleado para los análisis. Tomado de (Kokutse et al., 2016, p.148)

La Figura 21, muestra el esquema del talud empleado para realizar las modelaciones. Se puede observar que las raíces se distribuyen sobre toda la superficie del talud y como se mencionó anteriormente, la profundidad de la zona de las raíces se divide en siete partes las cuales se muestran en la Tabla 12. Se aplicó una carga constante de gravedad con el fin de generar el esfuerzo geostático. Aparte de la carga de gravedad, también se modeló una sobrecarga  $W$  debido a la presencia de árboles, utilizando una carga uniformemente distribuida que se aplicó en la superficie del talud.

A través de los estudios y la modelación numérica descrita empleada por Kokutse et al., (2016), se concluye que para asegurar una mejora en la estabilidad del talud mediante el uso de vegetación, no sólo debe ser usada o tenida en cuenta la cohesión adicional generada por el efecto de las raíces, sino también se debe tener en cuenta que el sistema de raíces debe extenderse más allá de la superficie de falla. Adicional a esto, concluyen que el ángulo de inclinación del talud es el parámetro que mayor relevancia tiene, debido a que, si se tienen valores altos en la pendiente del talud, el efecto positivo generado por la presencia de raíces puede desaparecer y puede inducir a volver inestable el talud.

Otro estudio donde se analizaron los efectos de la vegetación en la estabilidad de taludes mediante modelaciones numéricas, fue el de Chok et al., (2004), mediante la utilización del método de elementos finitos y el uso de la cohesión aparente de la raíz ( $C_R$ ) y la profundidad de la zona de la raíz ( $h_R$ ), los cuales son dependientes de la vegetación. Los efectos de la vegetación se tienen en cuenta en el análisis de estabilidad, modificando las propiedades del suelo que se ve afectado por la vegetación. Por ejemplo, los elementos del suelo en la capa superior del talud pueden tener un valor de cohesión más alto debido a la cohesión aparente generada por el refuerzo de la raíz, de acuerdo a la ecuación (1). En la Figura 22, se muestra el modelo del talud de estudio. Para el análisis, utilizaron una pendiente homogénea 2:1 ( $26.57^\circ$ ) con una altura de 10 metros. Las propiedades del suelo son:  $\phi' = 25^\circ$ ,  $C' = 0$  y  $\gamma = 20$  kN/m.

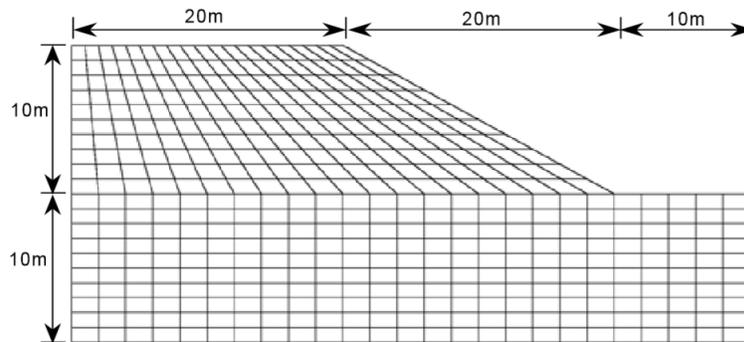


Figura 22. Malla del talud para una pendiente homogénea 2: 1 con un ángulo de inclinación de  $26.57^\circ$ . Tomado de (Chok et al., 2004, p. 393)

Para los análisis, se consideraron dos casos de estudio. En el primero, la vegetación se limita a la superficie de la pendiente del talud y el segundo, la vegetación se extiende sobre toda la superficie del suelo. Para realizar la comparación, se presentan los resultados del mismo talud sin la presencia de vegetación. En la Figura 23, se pueden observar que el refuerzo de la raíz puede contribuir en mejorar la estabilidad del talud. Al incorporar la cohesión aparente de la raíz en la zona de la raíz del talud, se incrementa el FS. La contribución del refuerzo de la raíz a la estabilidad del talud es significativa. Para este caso puntual, este talud sería inestable si no se tiene en cuenta el efecto de la vegetación.

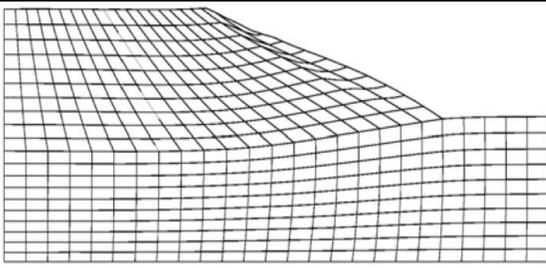
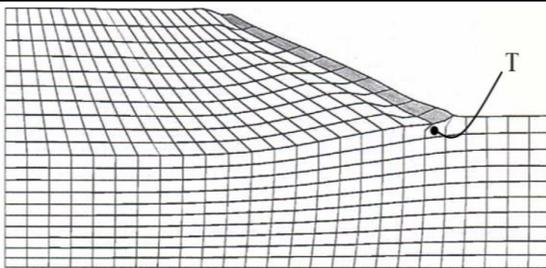
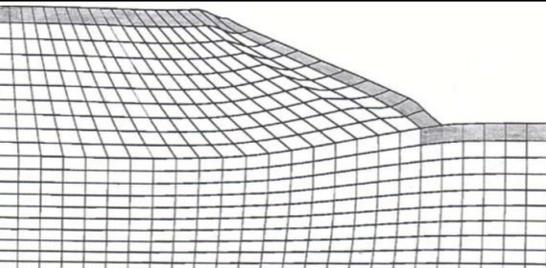
Talud sin presencia de vegetación	Talud con presencia de vegetación	
	Caso 1	Caso 2
	Vegetación limitada a la pendiente del talud	Vegetación sobre toda la superficie del talud
$C' = 0 \text{ kPa}$	$C' = 0 \text{ kPa}$	$C' = 0 \text{ kPa}$
$C_R = 5 \text{ kPa}$	$C_R = 5 \text{ kPa}$	$C_R = 5 \text{ kPa}$
$FS = 0,95$	$FS = 0,97$	$FS = 1,03$
		
Se puede observar que el mecanismo de falla es una falla plana superficial. La falla ocurre dentro de las dos primeras capas de los elementos, extendiéndose hasta 2 metros debajo de la superficie del talud	Para este caso, la falla se inició desde el pie del talud (elemento T). Luego se desarrolló una superficie de deslizamiento de falla a lo largo de la capa de suelo debajo de la zona de la raíz. Aunque el incremento del FS es pequeño, se puede observar que la superficie crítica de deslizamiento se ha desplazado más profundamente debajo de la superficie del suelo, ubicándose entre las capas segunda y tercera de los elementos finitos	Un escenario más común en los taludes naturales es el caso donde la vegetación crece en todas partes en la superficie del suelo. Se observa un aumento significativo debido a la presencia de la zona radicular ubicada en todas partes en la superficie del suelo. La pendiente que inicialmente no era segura (Talud sin presencia de vegetación) ahora es marginalmente segura ( $FS > 1$ ) debido a los efectos de refuerzo de la raíz.

Figura 23. Resultados de los modelos de estudio para los taludes con y sin presencia de vegetación. Imágenes tomadas de (Chok et al., 2004)

Las investigaciones mencionadas anteriormente, modelan la presencia de las raíces aplicando un incremento en la cohesión a la masa de suelo que contiene las raíces, sin embargo, algunos autores han optado por modelar la presencia de las raíces no sólo asignando un valor de cohesión adicional a la capa de suelo, sino que modelan las raíces de manera independiente o asignan bloques que representan la presencia de la vegetación.

Fan & Lai, (2014) investigaron el efecto del diseño espacial de la siembra en la estabilidad de taludes mediante un modelo numérico tridimensional utilizando el método de elementos finitos usando el software Paxis 3D. Para la representación y modelación, seleccionaron una arquitectura de raíz simple con una raíz de derivación y cuatro raíces laterales, formando así una estructura de la raíz 3D, la cual se integra con el suelo mediante el análisis de elementos finitos en 3D. Usaron elementos estructurales delgados para simular las raíces de las plantas.

Para la modelación de las raíces, eligieron el sistema de raíces de “grifo”, el cual penetra en el suelo firme y se ve comúnmente en los taludes. Por lo tanto, en la investigación seleccionaron un sistema de raíces con una raíz de derivación larga y cuatro raíces laterales. En la Figura 24, se puede observar la modelación del sistema de raíces. El diámetro de la raíz que asumieron fue de 0.1 m para simular la vegetación de un área boscosa. La longitud de la raíz de derivación larga es de 2.12 m y la longitud de la raíz lateral es de dos metros. Para mantener la consistencia geométrica del sistema de raíces, las raíces laterales se orientaron a 30° de la superficie horizontal.

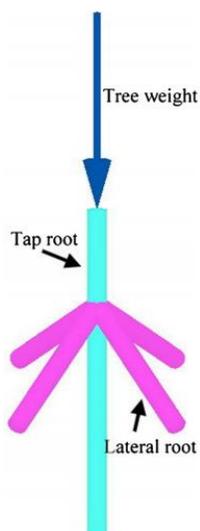


Figura 24. Sistema de raíces usado en el estudio. Tomado de (Fan & Lai, 2014, p. 85)

El talud utilizado para las modelaciones cuenta con una capa superior de suelo residual y debajo una capa de roca (suelo firme). El espesor de la capa de suelo superior es de 2.21m; la pendiente es de  $45^\circ$ ; la longitud y el ancho de la pendiente son 14 m y 21 m respectivamente. Las superficies superior e inferior del talud son horizontales y tienen 10 m de largo. En la Figura 25 se muestra el modelo tridimensional del talud y el perfil geométrico.

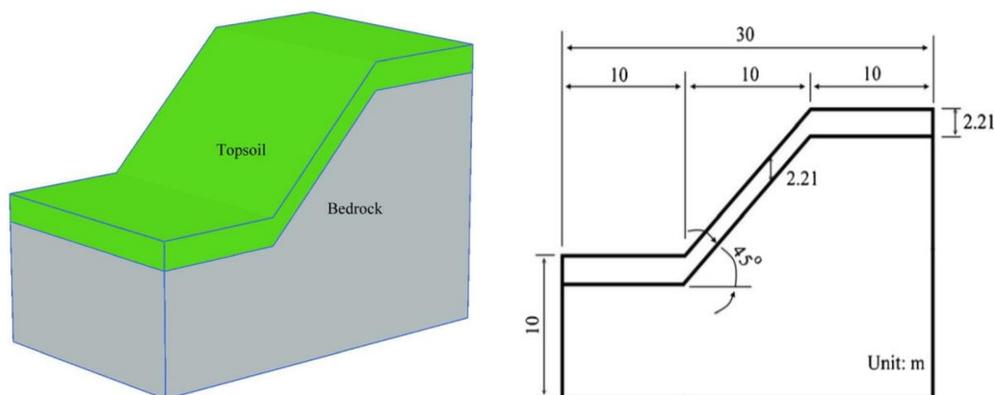


Figura 25. Modelo tridimensional del talud con vegetación y perfil geométrico. Tomado de (Fan & Lai, 2014, p. 85)

Para los análisis, colocaron la vegetación en tres filas (elevaciones) en el talud, es decir, tres cuartos (10.6 m), la mitad (7 m) y un cuarto (3.5 m) de la longitud desde la punta del talud. En cuanto a la separación de la vegetación, utilizaron espacios entre árboles de 2 m, 4 m, 6 m, y 8 m.

La relación esfuerzo-deformación del suelo y la roca se modelan utilizando el criterio de falla de Mohr Coulomb. Los parámetros de entrada requeridos para el suelo y la roca se relacionan en la Tabla 13. Los parámetros de entrada requeridos para la raíz son el módulo elástico, el peso unitario y la resistencia de la unión suelo-raíz. Adicional a esto, también se tuvo en cuenta el peso de los árboles, dándole un valor de 15 kN. La Tabla 14 ilustra los parámetros y propiedades de la raíz en la modelación numérica.

Tabla 13. Propiedades del suelo y de la roca. Tomado y adaptado de (Fan & Lai, 2014, p. 86)

	Propiedades del suelo	Propiedades del suelo (durante la lluvia)	Propiedades de la roca (suelo firme)
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	16	20	24
E (MPa)	6	6	2000
$\nu$	0,3	0,3	0,2
c (kN/m <sup>2</sup> )	10	8	500
$\phi$ (°)	28	28	55

Tabla 14. Propiedades de las raíces de las plantas. Tomado y adaptado de (Fan & Lai, 2014, p. 87)

Diámetro de la raíz (m)	Módulo de Young (MPa)	Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Fuerza de unión suelo-raíz (kN/m <sup>2</sup> )
0,1	200	1,47	20

Entre los resultados obtenidos, el Factor de seguridad para la geometría del talud de estudio y con las propiedades mostradas en la Tabla 13 fue de 1.47 para el caso sin vegetación, basado en el análisis de elementos finitos 3D. La variación del factor de seguridad con el espaciamiento entre árboles para el talud con vegetación en la parte superior, media e inferior se muestra en la *Figura 26*. Como se puede observar, el Factor de seguridad del talud con vegetación decrece cuando aumenta el espaciamiento entre los árboles. Adicional a esto, los resultados muestran que, si la vegetación se ubica en la zona superior o media del talud, proporciona un mejor refuerzo al talud con respecto a la vegetación ubicada en la zona inferior, sin embargo, los resultados son mejores cuando la vegetación es plantada a lo largo de toda la pendiente del talud.

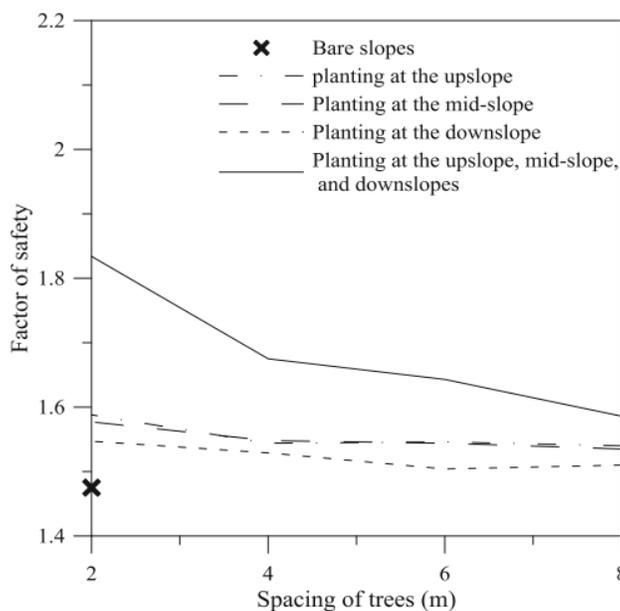


Figura 26. Variación del factor de seguridad del talud con respecto a separación entre árboles y la ubicación de las raíces. Tomado de (Fan & Lai, 2014, p. 87)

En esta misma investigación, se evaluó la influencia del diseño de plantación en el factor de seguridad. Se evaluaron dos tipos de diseño de plantación en el talud, uno alternativo y el otro uniforme, los cuales se muestran en la Figura 27.

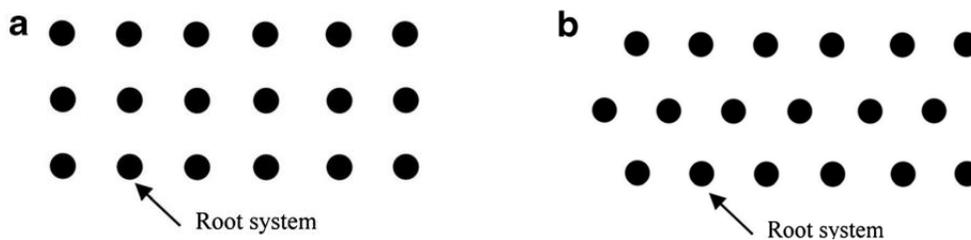


Figura 27. Tipos de diseño de plantación. a) Diseño de plantación uniforme. b) diseño de plantación alternativa. Tomado de (Fan & Lai, 2014, p. 88)

Al realizar los análisis, obtuvieron que los factores de seguridad del talud con el diseño de plantación alternativa eran mayores que los del diseño de plantación uniforme. Se obtienen mejores resultados cuando se modela la vegetación con el diseño de plantación alternativa.

Por otro lado, Kokutse et al., (2006) modelan la presencia de los sistemas de raíces a través de patrones geométricos de acuerdo a la morfología de los sistemas radiculares, los cuales se incluyen en el suelo circundante. En esta investigación se tienen en cuenta las diferentes morfologías de las raíces para poder modelarlas de manera adecuada.

Se consideraron tres tipos principales de morfología de las raíces los cuales son: corazón, placa y grifo. Los patrones geométricos elegidos fueron una semiesfera, un cono y un cilindro, como se puede observar en la Figura 28.

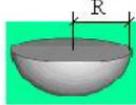
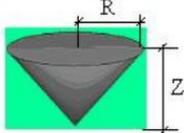
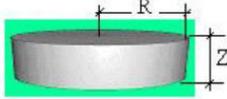
Class of root system	Real morphology	Geometrical approximation
Heart root system		
Tap root system		
Plate root system		

Figura 28. Morfología y aproximaciones geométricas de cada sistema de raíces. Tomado de (Kokutse et al., 2006, p. 562)

El talud de estudio cuenta con una pendiente 1:1, el cual es reforzado con la distribución de bloques de raíces con la geometría asignada a cada sistema radicular, el cual se muestra en la Figura 29. Los parámetros geométricos del talud son el ángulo de inclinación  $\alpha=45^\circ$ , la longitud de la pendiente  $L=8.8\text{m}$ , una altura  $H=5\text{ m}$ , el ancho del talud = 10m, la distancia  $d = 5\text{m}$  entre bloques, distancia  $d'$  entre el centro de bloque y la parte más baja de la pendiente del talud y la distancia  $D=5\text{m}$  entre la pendiente del talud y los límites superior e inferior.

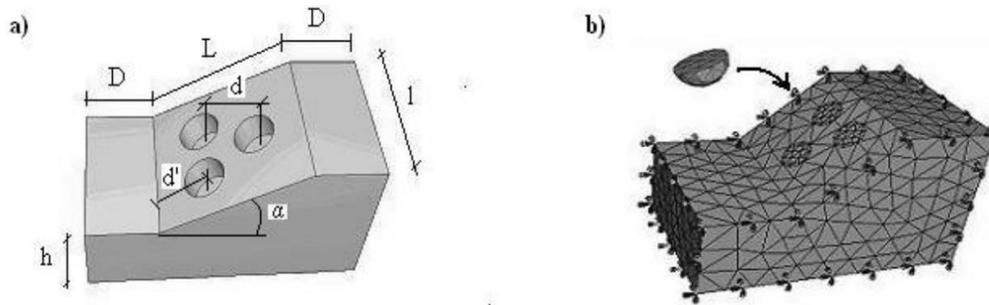


Figura 29. Parámetros geométricos del talud y agujeros excavados (a). Condiciones de borde y mallado de bloques de raíz y pendiente (b). Tomado de (Kokutse et al., 2006, p. 562)

Para el análisis, suponen que todo el talud está compuesto por dos tipos de suelo: el suelo circundante cuyas propiedades no se ven alteradas por las raíces, y el suelo reforzado que está asociado a los bloques enraizados. El comportamiento mecánico del suelo se eligió como un material elastoplástico asociado al criterio de falla de Mohr-Coulomb. El suelo reforzado se modeló agregando la cohesión adicional a la cohesión efectiva del suelo.

El software utilizado para realizar el análisis mecánico fue ABAQUS, mediante el método de elementos finitos. Los parámetros geométricos de los sistemas de raíces se muestran en la Tabla 15. Las propiedades del suelo que se tomaron de referencia, se muestran en la Tabla 16.

Tabla 15. Parámetros geométricos de los sistemas de raíces. Tomado y adaptado de (Kokutse et al., 2006, p. 564)

Morfología de la raíz	Radio (m)	Profundidad (m)
Corazón	0,78	No definida
Placa	0,68	0,68
Grifo	0,86	0,86

Tabla 16. Propiedades del suelo para el caso de estudio. Valores tomados de (Kokutse et al., 2006, p. 564)

Propiedad	Valor
Peso específico ( $\gamma_s$ )	16 kN/m <sup>3</sup>
Módulo de Young (E)	10 MPa
Ángulo de fricción ( $\phi$ )	30°
Cohesión efectiva (c')	1 kPa

En el estudio se analizó un talud reforzado con tres bloques de raíces para evaluar la estabilidad para cada morfología seleccionada (Figura 29). En primer lugar, se consideró y analizó el talud sin

cohesión adicional ( $C_r=0$  kPa) y luego se realizó el análisis de estabilidad del mismo talud con cohesión adicional ( $C_r=10$  kPa). El factor de seguridad del talud sin vegetación fue de 1.21. En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos del factor de seguridad para cada sistema radicular.

Tabla 17. Factor de Seguridad para cada morfología del Sistema radicular. Tomado y adaptado de (Kokutse et al., 2006, p. 565)

Morfología de la raíz	FS	Diferencia (%)
Corazón	1,45	19,8
Placa	1,57	29,7
Grifo	1,46	20,7

Como se puede observar, dentro de los resultados obtenidos, la morfología del sistema radicular tipo grifo obtuvo el mayor incremento del factor de seguridad comparado con las otras dos morfologías. Esto se debe a que este sistema de raíces alcanza mayores profundidades, generando un mayor aporte en la estabilidad del talud.

Por último, Sambasivarao, (2015) cuantifica el efecto de las raíces de vetiver en la estabilidad de taludes mediante el software Plaxis 3D, utilizando dos enfoques:

#### 1. Enfoque de cohesión equivalente

Según este criterio, toda la zona de la raíz se considera como un solo bloque y a este bloque se le asignan los parámetros que generan el incremento de la resistencia al corte. Se aplica un aumento en la cohesión del suelo en la zona de la raíz.

#### 2. Raíz como aproximación de pila.

En este enfoque, toda la zona de la raíz se considera como una sola pila y para esta pila se asignan las propiedades de la raíz como el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción de las raíces.

Para el estudio, consideraron un talud homogéneo de 8m de alto, 8 m de ancho y 10 m de longitud. En la Figura 30 se muestra el modelo considerado del talud en Plaxis 3D. La Tabla 18 muestra los parámetros del suelo usados para el análisis del talud.

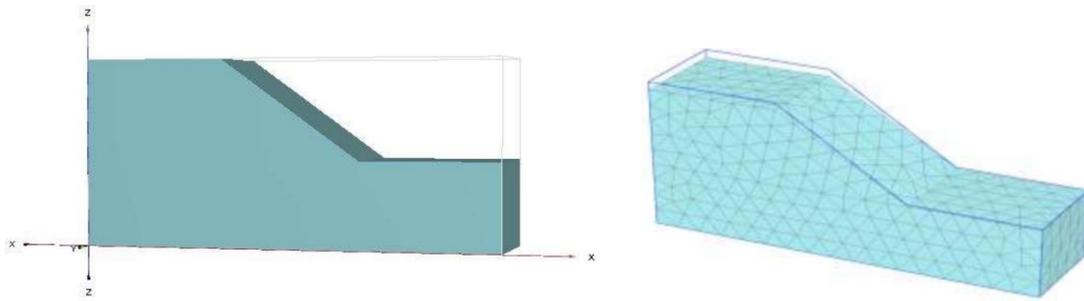


Figura 30. Modelo geométrico del talud. Tomado de (Sambasivarao, 2015, p. 28)

Tabla 18. Parámetros del suelo usados en el análisis del talud. Tomado de (Sambasivarao, 2015, p. 27)

	Descripción	Unidad	Valor
	Peso unitario	kN/m <sup>3</sup>	16
Suelo (Modelo Mohr Coulomb)	Módulo de elasticidad	kPa	7500
	Relación de Poisson	-	0,35
	Cohesión efectiva	kPa	5
	Ángulo de fricción interna efectivo	(°)	30

En primera instancia, realizan el análisis de estabilidad del talud sin la presencia de vegetación. A través de este análisis, obtienen un Factor de Seguridad de 1.36.

En los análisis del talud con vegetación, en cuanto al enfoque de cohesión equivalente, consideraron un incremento de la cohesión de 15 kPa, el cual se asigna a la zona de la raíz. La Figura 31 muestra la modelación de la pendiente con pasto vetiver usando el enfoque de cohesión equivalente

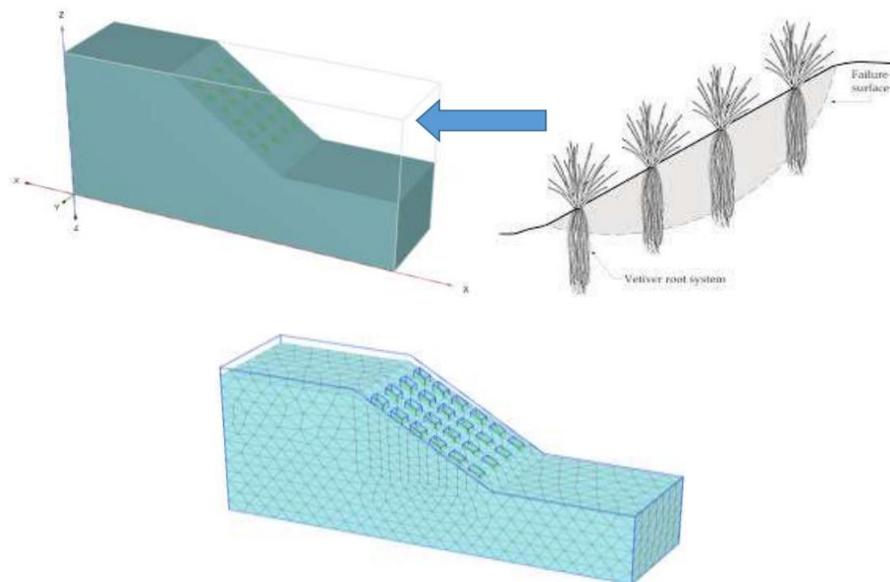


Figura 31. Modelo geométrico para el enfoque de cohesión equivalente. Tomado de (Sambasivarao, 2015, p. 36).

Para el análisis, se consideraron tres tamaños de los bloques: 0.6 m x 0.6 m, 0.8 m x 0.8 m y 1.0 m x 1.0 m. La Tabla 19 muestra los porcentajes del incremento de factor de seguridad debido a la presencia de vegetación para cada tamaño de bloque considerado.

Tabla 19. Incremento del factor de seguridad debido a la vegetación. Tomado de (Sambasivarao, 2015, p. 38)

Tamaño del bloque (m x m)	Separación (m)	FS	% incremento
0,6 x 0,6	0,6	1,396	2,6470588
	0,4	1,43	5,1470588
0,8 x 0,8	0,6	1,46	7,3529412
	0,8	1,43	5,2941176
1 x 1	0,6	1,523	11,985294
	0,8	1,482	8,9705882
	1	1,46	7,3529412

Como se puede observar en la Tabla 19, los mayores incrementos del factor de seguridad se dan cuando el tamaño del bloque es mayor y cuando hay un menor espaciamiento entre los bloques.

Por otra parte, para el análisis del talud con vegetación en el enfoque de la raíz como aproximación de pila, consideraron un módulo de elasticidad de 2.5 GPa del pasto vetiver, y una resistencia a tracción entre 45 – 145 MPa (media 75MPa). La Figura 32 muestra la modelación de la pendiente con pasto vetiver usando el enfoque de la raíz como pila.

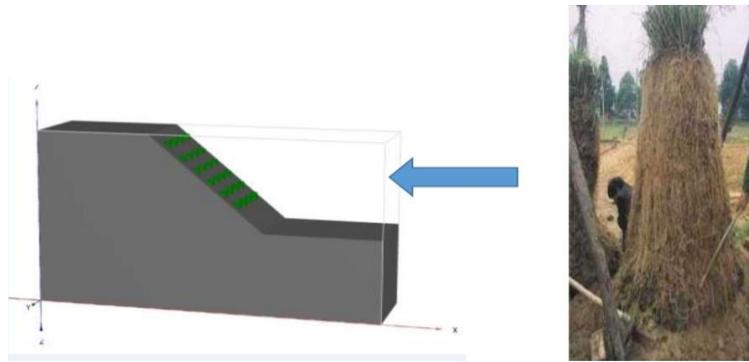


Figura 32. Modelo geométrico para el enfoque de de la raíz como aproximación de pila. Tomado de (Sambasivarao, 2015, p. 44)

Para el análisis, se consideraron tres diámetros diferentes: 0.6 m, 0.8 m y 1 m. La Tabla 20 muestra los porcentajes del incremento de factor de seguridad debido a la presencia de vegetación para cada uno de los diámetros asumidos.

Tabla 20. Incremento del factor de seguridad debido a la vegetación. Tomado de (Sambasivarao, 2015, p. 45)

Diámetro de la pila (m)	Separación (m)	FS	% incremento	
0,6	0,6	Sin vegetación	1,5	10,294118
		Con vegetación	1,41	3,6764706
0,8	0,8	Sin vegetación	1,5	10,294118
		Con vegetación	1,412	3,721054
1	1	Sin vegetación	1,54	13,235294
		Con vegetación	1,478	8,6764706

Del mismo modo que el enfoque mencionado anteriormente, los mayores incrementos del factor de seguridad se dan cuando el tamaño del diámetro de la pila es mayor. Finalmente, se puede observar el enfoque de la raíz como aproximación de pila genera incrementos mayores en el factor de seguridad en comparación con el enfoque de cohesión equivalente.

## 4 Metodología:

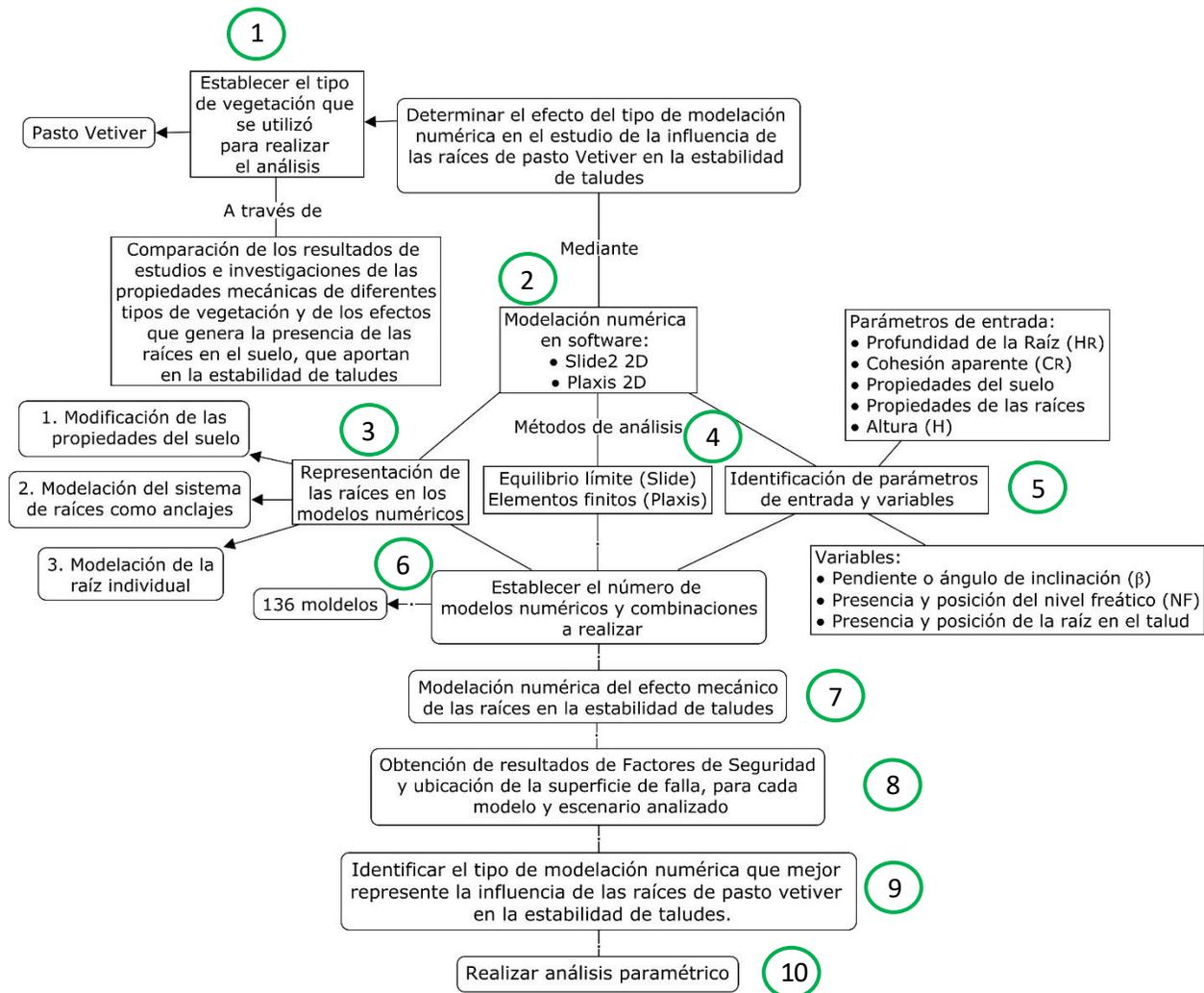


Figura 33. Diagrama metodológico (Fuente propia)

En la Figura 33 se da a conocer el diagrama de la metodología que se implementó durante el desarrollo del presente proyecto. La descripción y alcance de cada actividad o proceso, se relaciona a continuación. Las actividades 7, 8, 9 y 10, son las actividades que responden a los objetivos específicos.

#### **4.1 Actividad 1: Determinación del tipo de vegetación que se utilizó para realizar las modelaciones numéricas.**

Para determinar el tipo de vegetación que se empleó para realizar las modelaciones numéricas, se realizó una comparación y análisis de los resultados de diferentes estudios e investigaciones sobre las propiedades mecánicas de varios tipos de vegetación y de los efectos que genera la presencia de las raíces en el suelo, que aportan en la estabilidad de taludes.

Después de realizar las comparaciones y basados en los resultados de cada investigación, se estableció que el pasto Vetiver es la planta que se utilizó para realizar los análisis de estabilidad. El pasto Vetiver cuenta con valores altos de resistencia a tracción y otras propiedades mecánicas; genera un incremento significativo de la cohesión del suelo, y adicional a esto, cuenta con un gran número de características físicas y morfológicas, las cuales se mencionaron anteriormente, que favorecen la estabilización del talud. Por estas razones, se utilizó este tipo de vegetación para realizar la modelación numérica del efecto mecánico de las raíces.

#### **4.2 Actividad 2: Definir Software para realizar las modelaciones.**

Para realizar las modelaciones numéricas, y poder representar y cuantificar el efecto mecánico que genera la presencia de la vegetación en la estabilidad de taludes, se utilizaron dos softwares: Slide2 y Plaxis.

**Slide2** es un software creado por Rocscience, que es la compañía líder a nivel mundial en el desarrollo de programas para análisis en 3D y 2D para ingenieros civiles, mineros y geotecnistas. Slide2 (anteriormente " Slide ") es un programa de estabilidad de taludes 2D, creado para evaluar el factor de seguridad o la probabilidad de falla, de superficies de falla circulares y no circulares en el suelo o laderas rocosas. Slide2 es fácil de usar y, sin embargo, se pueden crear y analizar modelos complejos de forma rápida y sencilla. La carga externa, el agua subterránea y el soporte se pueden modelar de varias maneras. Este programa analiza la estabilidad de las superficies de deslizamiento

utilizando métodos de equilibrio de límite de corte vertical o no vertical como Bishop, Janbu, Spencer y Sarma, entre otros. (Rocscience, 2020)

Por otro lado, **Plaxis 2D** es un programa de elementos finitos para aplicaciones geotécnicas en el que se utilizan modelos para simular el comportamiento del suelo, desarrollado para el análisis de deformación, estabilidad y flujo de agua subterránea en ingeniería geotécnica. Plaxis está equipado con características para tratar diversos aspectos de estructuras geotécnicas complejas. Permite analizar deformaciones elastoplásticas, modelos de suelo avanzados, análisis de estabilidad, consolidación, entre otros. (Bentley, 2020)

#### **4.3 Actividad 3: Representación del efecto mecánico de las raíces en el modelo numérico.**

Para representar la presencia de las raíces del pasto vetiver, se analizaron tres enfoques diferentes:

1. Enfoque 1: Modificación de las propiedades del suelo.

En este enfoque, se utilizó el término “cohesión aparente” ( $C_R$ ), el cual es el incremento del valor de la cohesión de la masa de suelo debido a la presencia de las raíces. Este término se suma a la cohesión efectiva del suelo, de acuerdo a la ecuación (1). El incremento de la cohesión aparente, se aplicó al suelo que representa la capa con presencia de raíces.

Los valores de  $C_R$  que se tomaron de referencia para realizar las modelaciones, son los obtenidos de las investigaciones donde se realizaron ensayos de corte directo a las muestras, sin tener en cuenta los que se obtienen a través de cálculos en función de la resistencia a tracción, debido a que el ensayo de corte directo representa una visión más real de lo que sucede en la masa de suelo con la presencia de raíces, cuando se genera el desplazamiento o corte del suelo, mientras que en los ensayos de tensión se pueden obtener valores muy altos de  $C_R$ , debido a que las raíces son escogidas y se asume que la falla ocurre cuando la raíz se rompe.

A partir de la información relacionada en la Tabla 11, donde se dan a conocer los resultados obtenidos de diferentes investigaciones sobre el incremento de la cohesión de la masa del suelo generado por la presencia de las raíces del pasto vetiver, y debido a que los valores típicos de cohesión aparente están entre 1 kPa y 17,5 kPa (Chok et al., 2004; Kokutse et al., 2006), se estableció que el valor de  $C_R$  que se tomó de referencia para realizar las modelaciones numéricas fue de 8 kPa, resultado similar a los obtenidos por Eab et al., (2015); Teerawattanasuk et al., (2014) y que se encuentran dentro del rango de valores típicos de cohesión aparente.

Por otra parte, de acuerdo a los resultados obtenidos por D'Souza et al., (2019); Hengchaovanich & Nilaweera, (1996); Kokutse et al., (2016), los cuales se presentan en la Tabla 6, la Figura 12 y la Figura 4 respectivamente, se puede observar que el valor de  $C_R$  o el incremento que genera la presencia de las raíces en la resistencia al corte del suelo, disminuye a medida que aumenta la profundidad. Por esta razón, se consideró que  $C_R$  está en función de la profundidad del suelo medida desde la superficie.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, para este trabajo de investigación, la profundidad de la zona de la raíz se denotó como  $H_R$ . Por lo tanto, se tuvieron diferentes valores de  $C_R$  en función de  $H_R$ , simulando así apropiadamente la presencia de raíces en el suelo.

Para incorporar el valor de  $C_R$  y su variación con la profundidad en los modelos, se consideró una capa de 1.5 m ubicada en la superficie del suelo, la cual se dividió en seis subcapas. A cada capa se le asignó un porcentaje del valor de la cohesión aparente, los cuales se pueden observar en la Figura 34. Estos porcentajes se toman en base a los resultados mostrados en los estudios realizados por D'Souza et al., (2019); Hengchaovanich & Nilaweera, (1996); Kokutse et al., (2016).

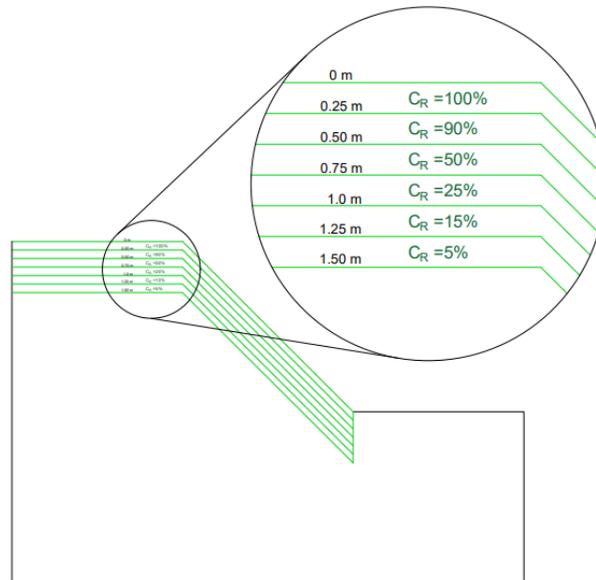


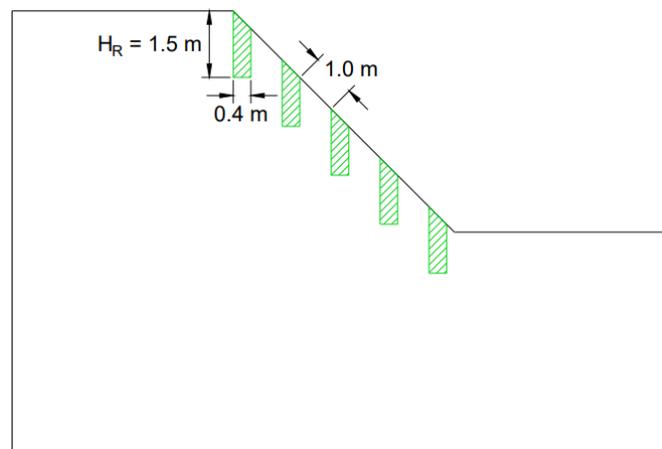
Figura 34. Cohesión aparente en función de la profundidad de la zona de la raíz. (Fuente propia)

## 2. Enfoque 2: Modelación del sistema de raíces como anclajes.

En este enfoque, se asumió que las raíces funcionan como anclajes de tierra. Para representar la presencia de la vegetación en los modelos numéricos, se construyeron “cilindros” o anclajes verticales de longitud igual a la profundidad de la zona de la raíz ( $H_R$ ) planteada en el numeral anterior, es decir de 1.5 m, con un diámetro de 0.4 m. El diámetro se toma de referencia de la investigación realizada por Herrera, (2015a, p. 124), en la cual realizó mediciones a un conjunto de raíces de pasto vetiver luego de cumplir los seis meses de edad, obteniendo este valor. Por otro lado, de acuerdo con Truong et al., (2008), mencionan que el pasto vetiver debe ser plantado contrario al sentido de la pendiente del talud en intervalos de uno a dos metros. Por esta razón, la distancia asumida para las modelaciones entre las raíces de vetiver de una planta y otra fue de un metro.

Los anclajes se modelaron asignando las propiedades de fuerza de tensión y el módulo de Young (E). De acuerdo a la información relacionada en la Tabla 10, donde se relaciona el resumen de los resultados obtenidos de resistencia a tracción y diámetro promedio de la raíz, se establece que los

valores que se tomaron de referencia para la resistencia a tracción y el diámetro de la raíz son 75 MPa y 0.8 mm respectivamente, debido a que son valores medios de los resultados obtenidos en las investigaciones citadas en el presente trabajo y adicional a esto, Hengchaovanich (autor del artículo citado que obtiene este valor de resistencia a tracción y diámetro de raíz), es considerado uno de los pioneros en el uso del pasto Vetiver a gran escala. Por lo tanto, el valor de la fuerza de tensión que se tomó de referencia fue de 38 N. En cuanto al módulo de Young, se tomó un valor de referencia de 2 GPa, tomado en base a las investigaciones de (Sambasivarao, 2015; Teerawattanasuk et al., 2014). En la Figura 35 se muestra el esquema que se utilizó para la modelación del sistema de raíces como anclajes.



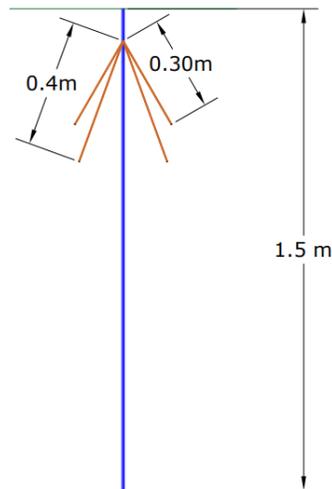
*Figura 35.* Esquema para la modelación del sistema de raíces como anclajes (enfoque 2). (Fuente propia)

### 3. Enfoque 3: Modelación de la raíz individual.

Para este enfoque, se modeló individualmente cada raíz del sistema de raíces del pasto Vetiver usando elementos de estructuras de vigas embebidas. Para modelar las raíces, se tomaron de referencia las investigaciones realizadas por Fan & Lai, (2014); Lin et al., (2010), donde se modela de manera individual la raíz. Para la modelación, se tomó un diámetro promedio de la raíz de 0.8 mm, como se mencionó anteriormente. Adicional a esto, se tomaron los mismos valores de profundidad, diámetro del sistema de raíces y la distancia entre una planta y otra, mencionados en

el enfoque de la modelación del sistema de raíces como anclaje (enfoque 2). Los parámetros de entrada con los que se modelaron las raíces son el Módulo de Young y la fuerza de tensión (definidos en el numeral anterior). Como se ha mencionado a lo largo del trabajo de investigación, el vetiver cuenta con un sistema de raíces extensivo, en el cual las raíces alcanzan profundidades grandes. Al sistema de raíces del Vetiver se le conoce como raíz pivotante, y consiste en una raíz vertical profunda centrada con ramificaciones pequeñas (Suarez, 2001a). En la Figura 8 se puede observar el sistema radicular extenso del pasto Vetiver.

Para la modelación, se seleccionó una arquitectura de raíz con una raíz vertical profunda y cuatro raíces laterales. El esquema de la modelación de las raíces se muestra en la Figura 36.



*Figura 36.* Esquema de la modelación de la raíz individual. (Fuente propia)

La longitud de la raíz vertical es de 1.5 m y la de las raíces inclinadas es de 0.30 m, 0.40 m (la longitud aumenta con la profundidad). La raíz se modela de esta manera debido a que las raíces del pasto vetiver crecen longitudinalmente, tal como se puede observar en la Figura 8. Sin embargo, se modelan las cuatro raíces que están cerca de la superficie debido a que en esa zona se pueden encontrar algunas raíces con alguna inclinación.

#### 4.4 Actividad 4: Identificación del tipo de modelaciones realizadas y los métodos de análisis de estabilidad.

Para realizar los análisis de estabilidad, se utilizaron dos métodos: el primero es el método de equilibrio límite utilizando el método de Bishop, el cual se determinó mediante la utilización del software Slide2 y el segundo es el método de elementos finitos, a través del software Plaxis 2D.

Una vez establecidos los enfoques que se analizaron, los cuales se mencionaron anteriormente, y los métodos de análisis de estabilidad, en la Tabla 21 se muestran los tipos de modelaciones que se realizaron en el presente trabajo de investigación.

La relación esfuerzo-deformación del suelo se modeló utilizando el criterio de falla de Mohr Coulomb.

Tabla 21. Tipos de modelaciones a realizar. (Fuente propia)

No.	Tipo de modelación	Método de análisis	Software
1	Modificación de las propiedades del suelo	Equilibrio límite - Bishop	Slide 2D
2	Modelación del sistema de raíces como anclajes	Equilibrio límite - Bishop	Slide 2D
3	Modificación de las propiedades del suelo	Elementos finitos	Plaxis 2D
4	Modelación del sistema de raíces como anclajes	Elementos finitos	Plaxis 2D
5	Modelación de la raíz individual	Elementos finitos	Plaxis 2D

Por efectos prácticos, los tipos de modelación se nombrarán a lo largo del presente trabajo de investigación de la siguiente manera:

- ✓ No. 1: Incremento de la cohesión – Slide.
- ✓ No. 2: Raíces como anclajes – Slide.
- ✓ No. 3: Incremento de la cohesión – Plaxis.
- ✓ No. 4: Raíces como anclajes – Plaxis.
- ✓ No. 5: Raíz individual – Plaxis.

#### 4.5 Actividad 5: Definición de parámetros de entrada y variables utilizadas.

Los **parámetros de entrada** que se utilizaron para realizar las modelaciones son:

- Profundidad de la zona de la raíz ( $H_R$ ):

Para el caso de las modelaciones donde se modificaron las propiedades del suelo (enfoque 1), la profundidad de la zona de la raíz fue de 1.5 m, ya que, de acuerdo a las investigaciones citadas en el presente trabajo de investigación, es la zona en la cual las raíces generan un aporte en el aumento de la resistencia al corte del suelo. Adicional a esto, y de acuerdo a la Figura 34, esta capa de 1.5 m se dividió en seis subcapas de la siguiente manera:

- ✓ Capa 1: 0 m a 0.25 m.
- ✓ Capa 2: 0.25 m a 0.50 m.
- ✓ Capa 3: 0.50 m a 0.75 m.
- ✓ Capa 4: 0.75 m a 1.0 m.
- ✓ Capa 5: 1.0 m a 1.25 m.
- ✓ Capa 6: 1.25 m a 1.50 m.

En cuanto a la modelación del sistema de raíces como anclajes y la modelación de la raíz individual (enfoque 2 y enfoque 3), se tomó esta misma longitud.

- Cohesión aparente ( $C_R$ ):

Los valores de cohesión aparente que se tomaron para realizar las modelaciones donde se modificaron las propiedades del suelo (enfoque 1), para cada una de las capas de suelo dadas a conocer en la Figura 34, se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Valores de  $C_R$  en función de la profundidad. (Fuente propia)

Profundidad	Porcentaje $C_R$	Valor de $C_R$ (kPa)
0 m - 0,25 m	100%	8
0,25 m - 0,50 m	90%	7,2
0,50 m - 0,75 m	50%	4
0,75 m - 1,0 m	25%	2
1,0 m - 1,25 m	15%	1,2
1,25 m - 1,50 m	5%	0,4

- Propiedades del suelo:

Los parámetros de entrada del suelo se relacionan en la Tabla 23. Para la determinación de estos parámetros, se modeló un talud sin vegetación y se le asignaron propiedades de tal forma que el Factor de seguridad fuera cercano a uno para que el aporte generado por la vegetación sea más notorio. Estas propiedades fueron aplicadas a todos los tipos de modelación relacionados en la Tabla 21.

Tabla 23. Propiedades del suelo considerado para las modelaciones. (Fuente propia)

Propiedad	Valor
Peso específico saturado $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	21
Peso específico seco $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19
Módulo de Young E (kPa)	7500
Coefficiente de Poisson	0,3
Cohesión (kPa)	5
Ángulo de fricción $\phi$ (°)	30

- Propiedades de las raíces:

Los parámetros de entrada y propiedades de las raíces utilizados para realizar las modelaciones, se relacionan en la Tabla 24. La determinación de cada uno de los parámetros relacionados a continuación, se describe detalladamente en el numeral 4.3.

Tabla 24. Propiedades de las raíces consideradas para las modelaciones. (Fuente propia)

Propiedad	Valor
Resistencia a tracción (MPa)	75
Fuerza máxima de tensión (N)	38
Módulo de Young E (GPa)	2
Diámetro de la raíz (mm)	0.8
Longitud del sistema de raíces o raíz individual (m)	1,5
Diámetro del sistema de raíces (m)	0,4

- Altura del talud (H) = 5m.

En la Figura 37 se muestra el perfil geométrico del talud que se empleó para realizar la modelación numérica.

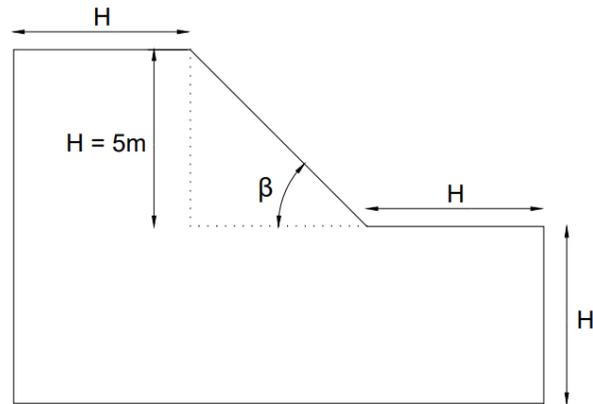


Figura 37. Perfil geométrico del talud considerado para las modelaciones. (Fuente propia)

Las **variables** que se manejaron para realizar las modelaciones son:

- Pendiente o ángulo de inclinación del talud ( $\beta$ )

Los valores que tomó  $\beta$  fueron  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $55^\circ$ .

- Nivel freático (NF)

El nivel freático que se asumió está en condiciones hidrostáticas, sin la presencia de flujo.

En las modelaciones se asumieron dos condiciones, las cuales se relacionan en la Figura 38.

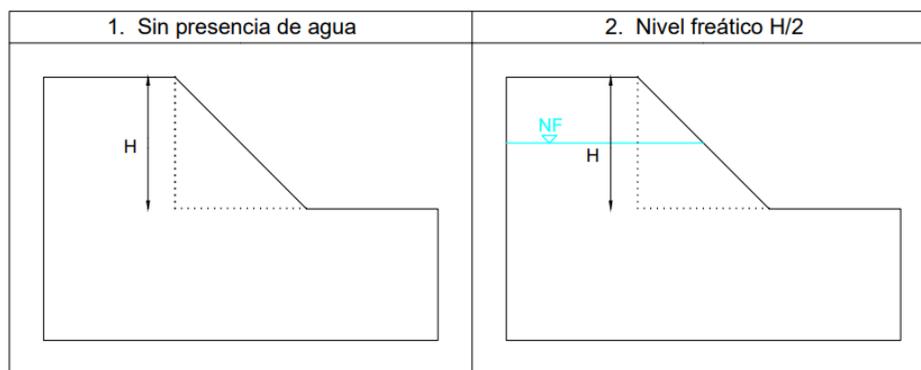


Figura 38. Posiciones del Nivel freático en las modelaciones. (Fuente propia)

- Posición de la raíz.

En la Figura 39, se dan a conocer las posiciones que ocuparon las raíces para realizar los análisis.

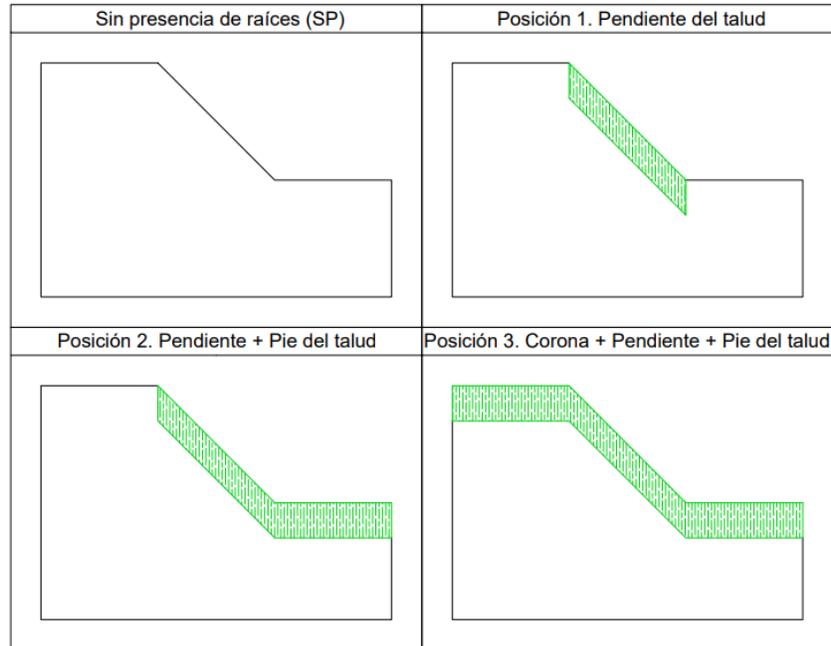


Figura 39. Posiciones de la raíz en las modelaciones. (Fuente propia)

#### 4.6 Actividad 6: Establecer el número de modelos numéricos y combinaciones realizadas.

Una vez definido el número de variables, los parámetros de entrada y el tipo de modelaciones que se realizaron, el siguiente paso fue identificar el número de modelos y el número de combinaciones que se iban a ejecutar, teniendo en cuenta que el propósito del estudio es identificar el efecto de los tipos de modelación numérica mostrados en la Tabla 21, en el estudio de la influencia de las raíces de pasto Vetiver para diferentes escenarios. En la Tabla 25, se muestra el número de modelos, junto con los tipos de modelación y las variables de cada escenario que se analizó.

Tabla 25. Modelos de análisis. (Fuente propia)

Modelo	Tipo de modelación					Posición de la raíz				Pendiente				Nivel freático	
	1	2	3	4	5	SP	1	2	3	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	1	2
1	x					x				x				x	
2	x					x				x					x
3	x					x					x			x	
4	x					x					x				x
5	x					x						x		x	
6	x					x						x			x
7	x					x							x	x	
8	x					x							x		x
9	x						x			x				x	
10	x						x			x					x
11	x						x				x			x	
12	x						x				x				x
13	x						x					x		x	
14	x						x					x			x
15	x						x						x	x	
16	x						x						x		x
17	x							x		x				x	
18	x							x		x					x
19	x							x			x			x	
20	x							x			x				x
21	x							x				x		x	
22	x							x				x			x
23	x							x					x	x	
24	x							x					x		x
25	x								x	x				x	
26	x								x	x					x
27	x								x		x			x	
28	x								x		x				x
29	x								x			x		x	
30	x								x			x			x
31	x								x				x	x	
32	x								x				x		x
33		x					x			x				x	
34		x					x			x					x
35		x					x				x			x	
36		x					x				x				x
37		x					x					x		x	
38		x					x					x			x
39		x					x						x	x	
40		x					x						x		x
41		x						x		x				x	
51		x						x		x					x
43		x						x			x			x	
44		x						x			x				x
45		x						x				x		x	
46		x						x				x			x

Modelo	Tipo de modelación					Posición de la raíz				Pendiente				Nivel freático	
	1	2	3	4	5	SP	1	2	3	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	1	2
47		x						x					x	x	
48		x						x					x		x
49		x							x	x				x	
50		x							x	x					x
51		x							x		x			x	
52		x							x		x				x
53		x							x			x		x	
54		x							x			x			x
55		x							x				x	x	
56		x							x				x		x
57			x			x				x				x	
58			x			x				x					x
59			x			x					x			x	
60			x			x					x				x
61			x			x						x		x	
62			x			x						x			x
63			x			x							x	x	
64			x			x							x		x
65			x				x			x				x	
66			x				x			x					x
67			x				x				x			x	
68			x				x				x				x
69			x				x					x		x	
70			x				x					x			x
71			x				x						x	x	
72			x				x						x		x
73			x					x		x				x	
74			x					x		x					x
75			x					x			x			x	
76			x					x			x				x
77			x					x				x		x	
78			x					x				x			x
79			x					x					x	x	
80			x					x					x		x
81			x						x	x				x	
82			x						x	x					x
83			x						x		x			x	
84			x						x		x				x
85			x						x			x		x	
86			x						x			x			x
87			x						x				x	x	
88			x						x				x		x
89				x			x			x				x	
90				x			x			x					x
91				x			x				x			x	
92				x			x				x				x
93				x			x					x		x	
94				x			x					x			x

Modelo	Tipo de modelación					Posición de la raíz				Pendiente				Nivel freático	
	1	2	3	4	5	SP	1	2	3	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$	1	2
95				x			x						x	x	
96				x			x						x		x
97				x				x		x				x	
98				x				x		x					x
99				x				x			x			x	
100				x				x			x				x
101				x				x				x		x	
102				x				x				x			x
103				x				x					x	x	
104				x				x					x		x
105				x					x	x				x	
106				x					x	x					x
107				x					x		x			x	
108				x					x		x				x
109				x					x			x		x	
110				x					x			x			x
111				x					x				x	x	
112				x					x				x		x
113					x		x			x				x	
114					x		x			x					x
115					x		x				x			x	
116					x		x				x				x
117					x		x					x		x	
118					x		x					x			x
119					x		x						x	x	
120					x		x						x		x
121					x			x		x				x	
122					x			x		x					x
123					x			x			x			x	
124					x			x			x				x
125					x			x				x		x	
126					x			x				x			x
127					x			x					x	x	
128					x			x					x		x
129					x				x	x				x	
130					x				x	x					x
131					x				x		x			x	
132					x				x		x				x
133					x				x			x		x	
134					x				x			x			x
135					x				x				x	x	
136					x				x				x		x

#### 4.7 Actividad 7: Modelación numérica en Slide2 y Plaxis 2D.

En total, se realizaron y analizaron 136 modelos (56 en Slide y 80 en Plaxis), en los cuales se representó el efecto mecánico de las raíces en la estabilidad de taludes, de acuerdo a los escenarios planteados en la Tabla 25.

#### 4.8 Actividad 8: Obtención de factores de seguridad y ubicación de la superficie de falla de cada modelo

Después de realizar los 136 modelos, se obtuvieron los resultados de los Factores de seguridad y la ubicación de la superficie de falla, para cada modelo y escenario analizado, para poder evaluar la contribución de la vegetación en la estabilidad del talud.

El Factor de Seguridad se calculó mediante el método de equilibrio límite, por el método de Bishop (Slide), y mediante el método de elementos finitos (Plaxis 2D), usando el método de reducción de los parámetros de resistencia ( $c'$  y  $\phi'$ ).

El método de reducción de los parámetros de resistencia es una opción que se encuentra disponible en Plaxis para el cálculo de factores de seguridad. El procedimiento de este método consiste en reducir progresivamente los parámetros de resistencia  $\tan\phi$  y  $c$  del suelo hasta que se produce la falla. El multiplicador total  $\sum Msf$  se utiliza para definir el valor de los parámetros de resistencia del suelo en cada etapa del análisis:

$$\sum Msf = \frac{\tan\phi_{input}}{\tan\phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (6)$$

Donde los parámetros de resistencia con el subíndice 'input' hacen referencia a las propiedades introducidas a los materiales inicialmente y los parámetros con el subíndice 'reduced' se refieren a los valores reducidos utilizados en el análisis. Finalmente, el factor de seguridad viene dado por:

$$SF = \frac{\text{Resistencia disponible}}{\text{Resistencia en ruptura}} = \text{Valor de } \sum Msf \text{ en la rotura} \quad (7)$$

Adicional a esto, en los modelos realizados con Plaxis 2D, se analizaron las deformaciones y concentraciones de esfuerzos para poder identificar las zonas de mayor afectación y así poder analizar el mecanismo de falla de cada modelo.

#### 4.8.1 Determinación de la profundidad de la superficie de falla.

Para determinar la profundidad de la superficie de falla de los modelos realizados en Slide, se trazó una línea paralela a la superficie del talud que coincidiera o tocara el punto más lejano de la superficie de falla del modelo. A continuación, se trazó una línea perpendicular a la superficie del talud que iniciara en el punto donde coinciden la línea paralela y la superficie de falla. La profundidad de la superficie corresponde a la distancia de esta línea perpendicular a la superficie del talud, la cual se designa con la letra  $d$ , como se puede observar en la Figura 40.

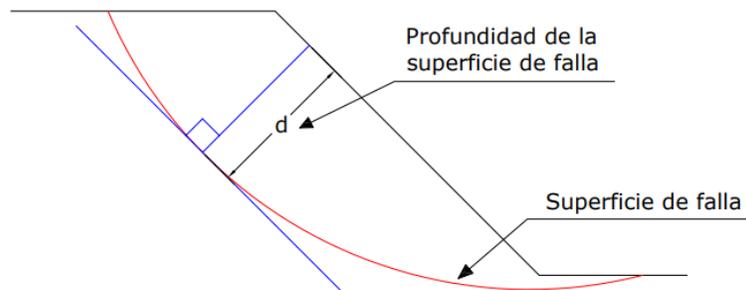


Figura 40. Determinación de la superficie de falla. (Fuente propia)

#### 4.8.2 Determinación de los esfuerzos cortantes y de las deformaciones de cada modelo.

Para determinar las concentraciones de esfuerzos cortantes y deformaciones para poder analizar el mecanismo de falla de cada modelo y poder cuantificar el efecto de las raíces en el mecanismo de falla, se dividió el talud en cuatro áreas. El área 1 (A1), se ubica en la parte superior del talud y corresponde a la corona del talud. La parte inclinada del talud se dividió en dos áreas con una línea vertical que pasa por la altura media del talud ( $H/2$ ). Estas áreas son el área 2 (A2) y el área 3 (A3), esta última corresponde al pie del talud. Por último, el área 4 (A4) se ubica en base del talud. En la

Figura 41 se pueden observar las cuatro áreas en las que se divide el talud y la ubicación de cada una de ellas.

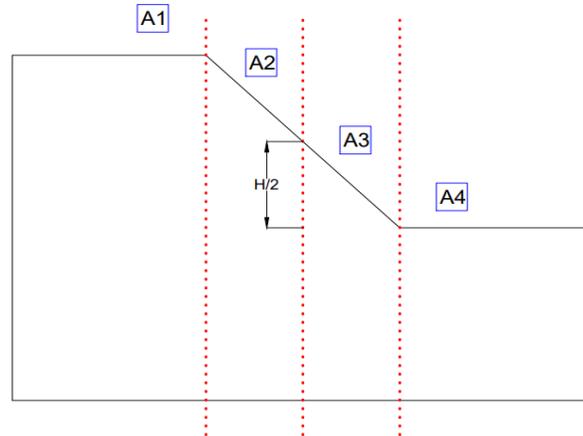


Figura 41. Áreas de análisis para la determinación de esfuerzos cortantes y deformaciones. (Fuente propia)

Después de identificar las cuatro áreas, se tomaron los valores máximos del esfuerzo cortante y de las deformaciones de cada modelo y los valores máximos del esfuerzo cortante y las deformaciones de cada área (normalizados). Para tomar los valores máximos de cada área, se tomó como referencia la superficie de falla calculada con Slide y se seleccionaron los valores que estaban dentro de estas zonas. No se seleccionaron las zonas en las que la superficie de falla no tomara. En la Figura 42 se muestra lo mencionado anteriormente.

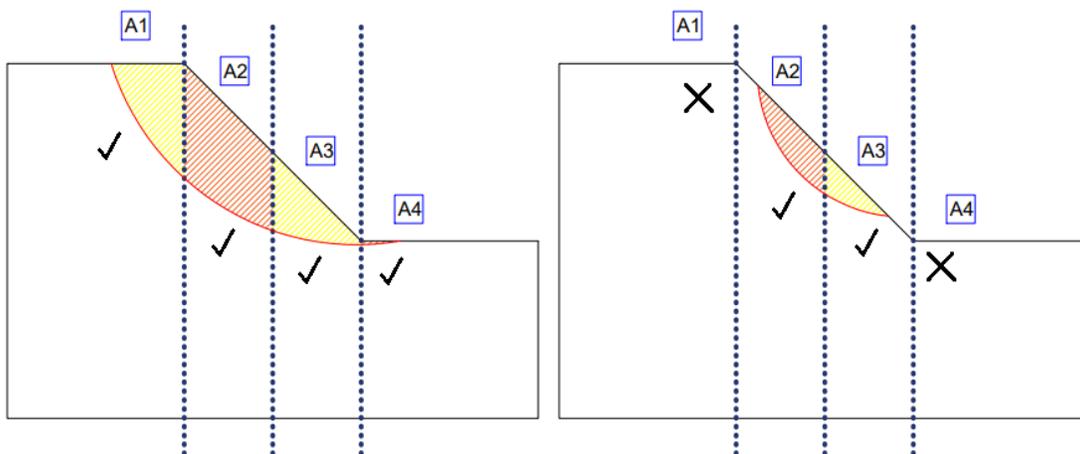


Figura 42. Selección de valores máximos teniendo en cuenta la superficie de falla calculada con Slide. (Fuente propia)

#### **4.9 Actividad 9: Identificación del tipo de modelación numérica que mejor represente la influencia de las raíces de pasto vetiver en la estabilidad de taludes**

Como se mencionó a lo largo de la revisión bibliográfica, diferentes autores han representado numéricamente la presencia de las raíces en la masa de suelo a través de diferentes métodos, pero a pesar de esto, no se tiene claridad o certeza de cuál es el tipo de modelación numérica que mejor representa la influencia de las raíces en la estabilidad de taludes. Por esta razón, uno de los objetivos específicos del presente trabajo de investigación fue identificar el tipo de modelación numérica que mejor represente el efecto de las raíces en los análisis de estabilidad.

Para esto, se compararon y analizaron los resultados de los Factores de Seguridad, ubicación de la superficie de falla, deformaciones y concentración de esfuerzos (en los casos que aplique), obtenidos en el numeral anterior, para establecer relaciones o diferencias entre los resultados de cada modelación, y posterior a esto, identificar el tipo de modelación que mejor represente la contribución de las raíces de pasto vetiver en la estabilidad de taludes.

#### **4.10 Actividad 10: Realización del Análisis Paramétrico.**

Se realizó un análisis paramétrico donde se evaluó el efecto de la variación de los parámetros de resistencia del suelo (cohesión y ángulo de fricción) en los resultados del Factor de Seguridad, profundidad de la superficie de falla y en el mecanismo de falla de un talud reforzado con raíces.

Para realizar este análisis, los parámetros de entrada fueron los siguientes:

- Posición de la raíz: Posición 3 (Corona + Pendiente + Pie del talud)
- Pendiente:  $\beta = 45^\circ$
- Posición del Nivel Freático: Posición 1. Sin nivel freático

Los valores de cohesión ( $c'$ ) y ángulo de fricción ( $\phi'$ ) considerados fueron los siguientes:

$$c' = \{1 \text{ kPa}, 2 \text{ kPa}, 3 \text{ kPa}, 4 \text{ kPa}, 5 \text{ kPa}\}$$

$$\phi' = \{20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ\}$$

## 5 Resultados y Análisis de Resultados

A continuación, se darán a conocer los resultados del Factor de Seguridad para cada tipo de modelación mencionada en la metodología. Para cada una de estas modelaciones, se utilizaron los mismos enfoques, métodos de análisis, software, geometría, parámetros de entrada y variables que se describen en dicho numeral. En cuanto a los modelos desarrollados en Slide, se darán a conocer las profundidades de la superficie de falla de cada uno de los modelos. Por otra parte, para los modelos realizados en Plaxis, se darán a conocer las áreas donde se presentan las mayores concentraciones de esfuerzos de cada modelo. Esto se hace con el fin de establecer la relación e influencia que tiene cada uno de estos aspectos con la presencia de las raíces.

Adicional a esto, se darán a conocer algunos modelos (a manera de ejemplo), que se realizaron para cada una de las tres posiciones en las que se ubican las raíces. Para cada tipo de modelación, se realizaron modelos sin la presencia de raíces (Posición SP), los cuales se toman como modelos de control para establecer los incrementos del Factor de Seguridad generados por la presencia de las raíces, cambios en la profundidad de la superficie de falla y cambios en las zonas de concentraciones de esfuerzos y deformaciones, como se mencionó anteriormente. En la Tabla 25 se pueden observar las características de cada uno de los modelos analizados.

Las modelaciones con el resultado del Factor de Seguridad y la ubicación de la superficie de falla de cada uno de los modelos y profundidad de la superficie de falla, se pueden observar en el Anexo 1 y el Anexo 2.

## 5.1 Modelación 1: Modificación de las propiedades del suelo - Slide 2D

En la Figura 43a, la Figura 43b y la Figura 43c, se pueden observar algunos ejemplos de los modelos realizados en Slide para la obtención de los Factores de Seguridad. Los tres modelos tienen un ángulo de inclinación de  $45^\circ$  y no tienen presencia del nivel freático. Allí se puede apreciar la capa de 1.5 m que corresponde a las raíces (capas de suelo de color verde), las tres posiciones en las que se ubicaron las raíces y las seis subcapas en las que se divide la capa de 1.5 m, las cuales tienen valores de cohesión diferentes en cada una de ellas los cuales disminuyen con la profundidad, como se muestra en la Figura 34 y la Tabla 22.

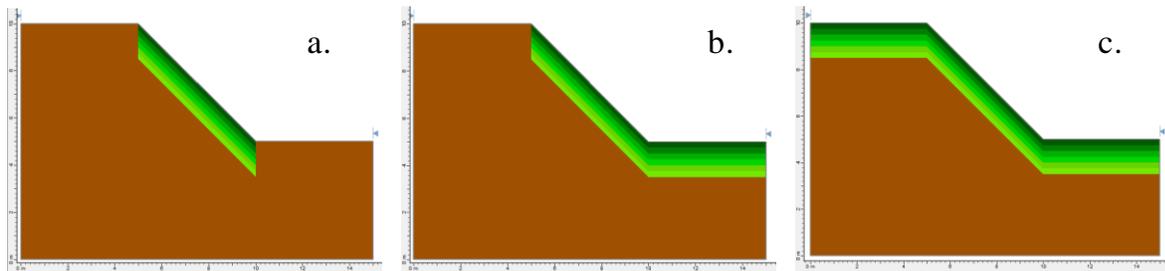


Figura 43. Posición de las raíces modeladas mediante la modificación de las propiedades del suelo en el talud de análisis. a) Modelo 13 - P1 (pendiente) -  $45^\circ$ , b) Modelo 21 - P2 (pendiente + pie) -  $45^\circ$ , c) Modelo 29 - P3 (corona + pendiente + pie) -  $45^\circ$ .

### 5.1.1 Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados.

En la Tabla 26 y la Tabla 27, se dan a conocer los resultados del Factor de Seguridad obtenidos en las modelaciones, para cada una de las posiciones de las raíces y los diferentes ángulos de inclinación que se tuvieron en cuenta para el análisis, para la condición con nivel freático y sin nivel freático. En la Figura 44 y la Figura 45, se muestra la representación gráfica de los resultados del factor de seguridad mostrados en las tablas mencionadas.

Tabla 26. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

Ángulo de inclinación del talud (°)	FACTOR DE SEGURIDAD – Sin NF			
	Sin raíces	Posición de las raíces		
		Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	2,02	2,11	2,12	2,17
35	1,53	1,63	1,63	1,68
45	1,23	1,33	1,33	1,38
55	1,02	1,11	1,11	1,14

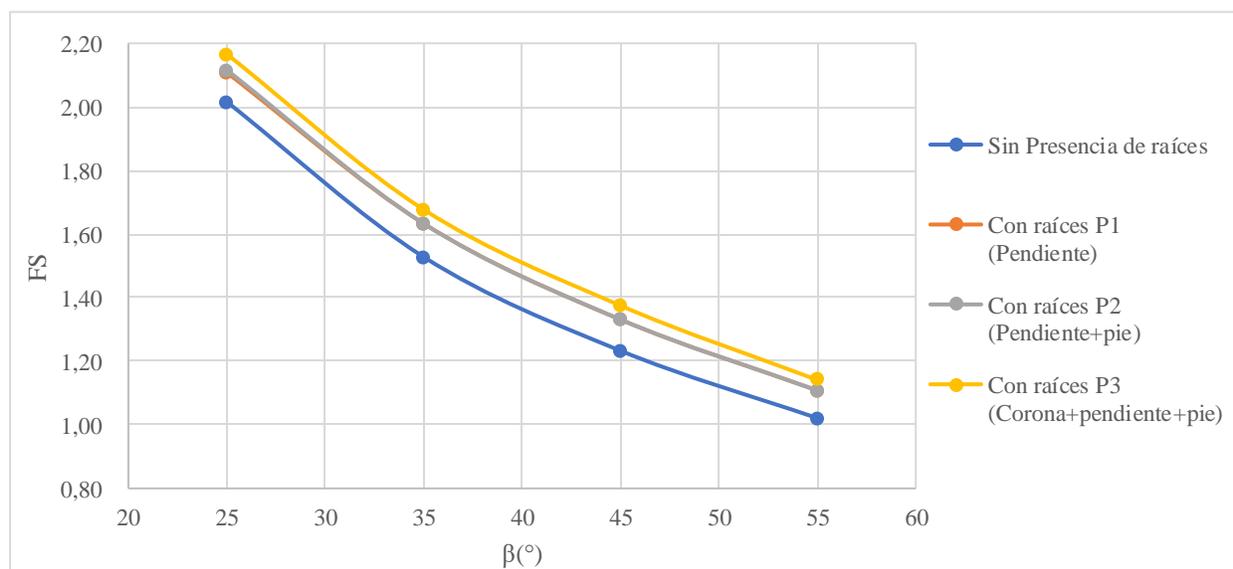
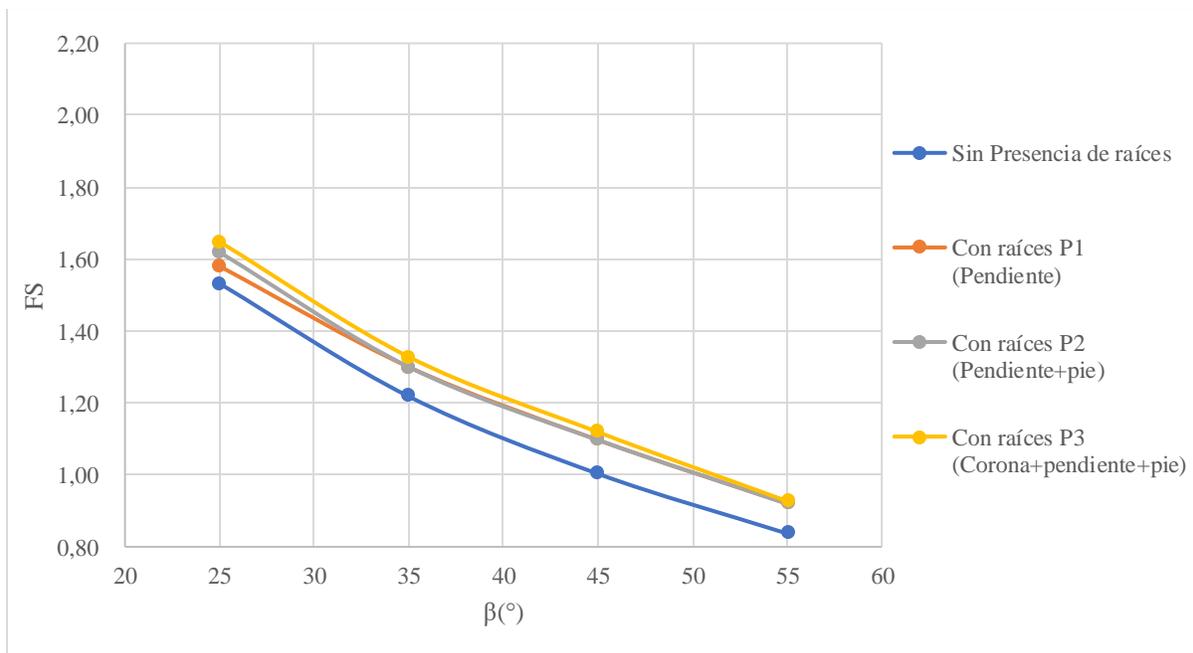


Figura 44. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

Tabla 27. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide. .

Ángulo de inclinación del talud (°)	FACTOR DE SEGURIDAD – Con NF			
	Sin raíces	Posición de las raíces		
		Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	1,53	1,58	1,62	1,65
35	1,22	1,30	1,30	1,33
45	1,00	1,10	1,10	1,12
55	0,84	0,92	0,92	0,93



*Figura 45.* Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

Como se puede observar en la Figura 44 y la Figura 45, el Factor de seguridad es más alto en los modelos con la presencia de raíces que en los modelos donde no se tuvieron en cuenta. Para ambas condiciones, tanto con nivel freático como sin nivel freático, se puede observar claramente un aumento en los factores de seguridad de los modelos en que se representó la presencia de las raíces. Por otro lado, se observa que la posición de las raíces en las que se presenta un mayor aumento del factor de seguridad es la posición 3 (corona + pendiente + pie del talud), indicando así que cuando se extiende la vegetación sobre toda la superficie del talud, el incremento del Factor de Seguridad será más significativo, aspecto que favorece a la estabilidad. En el siguiente numeral se relacionan en detalle los incrementos que se presentan en los factores de seguridad generados por la presencia de las raíces.

En cuanto al ángulo de inclinación del talud, se puede apreciar que los factores de seguridad disminuyen a medida que aumenta la pendiente del talud, como era de esperarse, pero a pesar de que el ángulo de inclinación aumente, la presencia de las raíces hace que el Factor de Seguridad

sea mayor con respecto a los modelos que no tienen raíces. Para este tipo de modelación, siempre se evidenció un aumento de los Factores de Seguridad, aunque el ángulo de inclinación aumentara.

Por otra parte, se puede observar que los Factores de Seguridad son los mismos para los modelos con la presencia de las raíces en las posiciones 1 (pendiente) y 2 (pendiente + pie), para los ángulos de inclinación del talud de  $35^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $55^\circ$ , para ambas condiciones (con nivel freático y sin nivel freático). Esto se debe a que, en estos modelos, la superficie de falla no alcanza a tener mayor influencia en el pie del talud, como se muestra en la Figura 46a y Figura 46b, donde el factor de seguridad es el mismo. En los casos donde la superficie de falla no sobrepase el pie del talud o la parte inferior del talud, la vegetación sembrada en esta zona no genera ningún efecto.

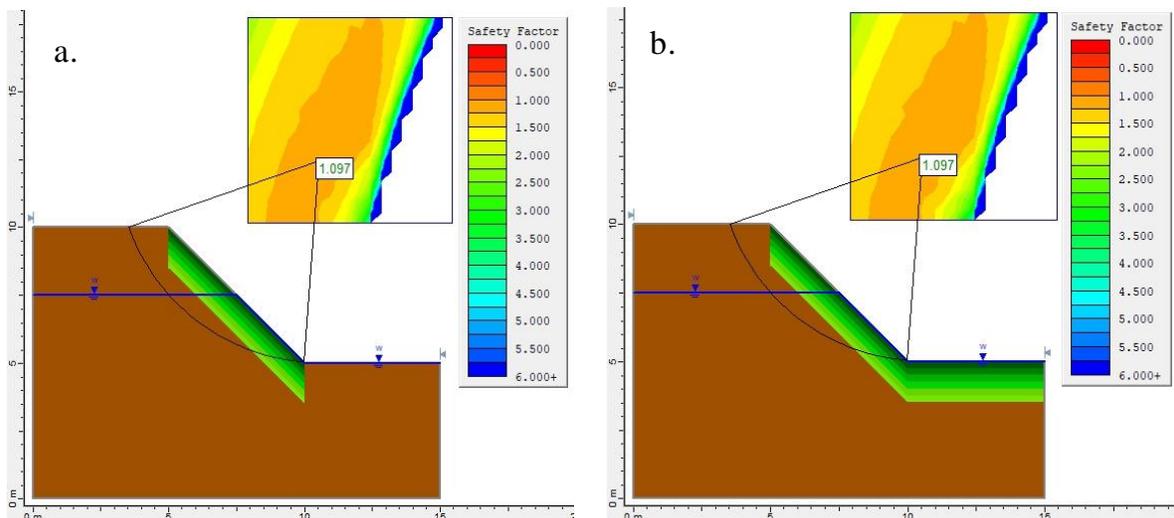


Figura 46. Relación de la superficie de falla con la posición de las raíces en el Talud y su efecto en el Factor de Seguridad. a) Modelo 14 - P1 (Pendiente) -  $45^\circ$ , b) Modelo 22 - P2 (Pendiente + pie) -  $45^\circ$ .

### 5.1.2 Análisis del incremento del Factor de seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.

La presencia de las raíces genera un incremento significativo en los Factores de Seguridad obtenidos en cada una de las modelaciones, independientemente de la posición que ocupen y la presencia o no del nivel freático. En la Tabla 28 y en la Tabla 29, se dan a conocer los incrementos del factor de seguridad obtenidos para cada una de las posiciones de la raíz y cada uno de los

ángulos de inclinación del talud. En la Figura 47 y la Figura 48, se puede observar la representación gráfica de los resultados. Para el cálculo de los incrementos del factor de seguridad se toman como referencia los modelos que no tienen presencia de raíces (modelos de control).

Tabla 28. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

Ángulo de inclinación el talud (°)	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) - SIN NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1	Posición 2	Posición 3
	Pendiente	Pendiente + pie	Corona+pendiente+pie
25	4,56	4,96	7,44
35	6,87	6,87	9,75
45	7,95	7,95	11,52
55	8,52	8,52	11,75

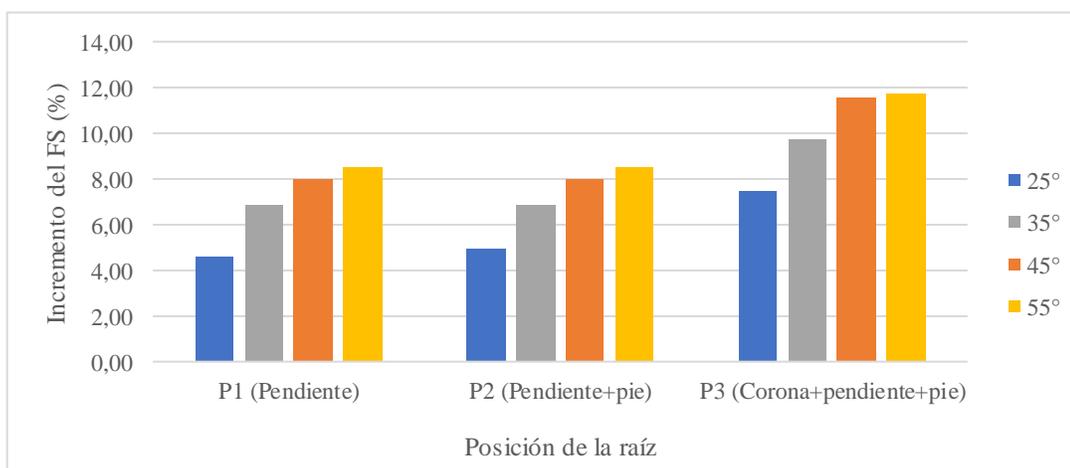


Figura 47. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

Tabla 29. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

Ángulo de inclinación el talud (°)	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) - CON NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1	Posición 2	Posición 3
	Pendiente	Pendiente + pie	Corona+pendiente+pie
25	3,13	5,68	7,57
35	6,73	6,73	9,03
45	9,37	9,37	11,57
55	9,92	9,92	10,75

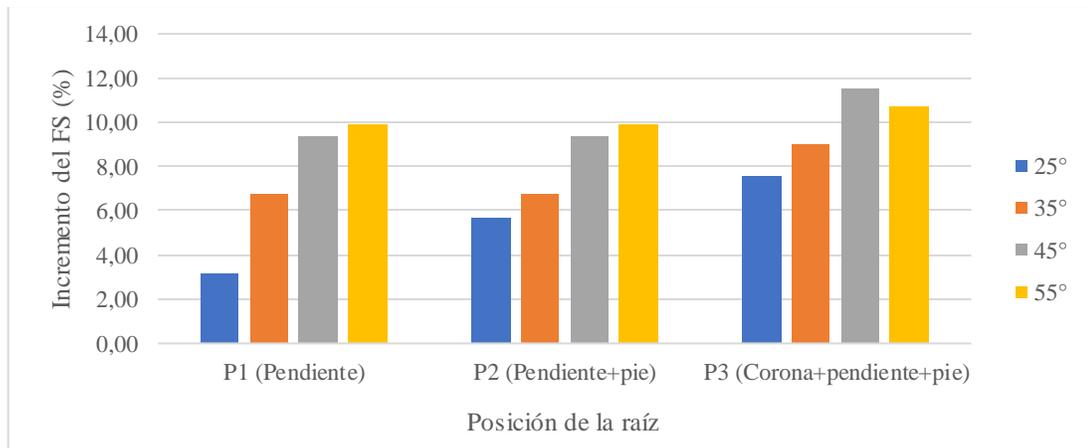


Figura 48. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

En la Figura 47 y la Figura 48 se observa que el incremento del factor de seguridad es más significativo cuando las raíces se extienden sobre toda la superficie del talud. Los incrementos son mayores en la posición 3 (Corona + pendiente + pie) de las raíces, alcanzando valores de cerca del 12%, con respecto a los modelos que no tienen presencia de raíces. Este comportamiento se observa para los modelos en los que se analizó la condición con agua y sin agua. Comparando los resultados obtenidos de cada una de las tres posiciones en las que se ubican las raíces, se pudo evidenciar que los incrementos del factor de seguridad de los modelos en los que las raíces se ubican en toda la superficie del talud (Corona + pendiente + pie), son superiores en un 40% en la condición sin nivel freático y en un 30 – 35% en la condición con nivel freático (en promedio), a los incrementos del factor de seguridad obtenidos cuando las raíces se ubican en las posiciones 1 (pendiente) y 2 (pendiente + pie) de las raíces.

Los valores obtenidos del incremento del Factor de Seguridad son muy similares a los incrementos obtenidos por Chok et al., (2004); Gentile et al., (2010) y Sambasivarao, (2015), en los cuales se obtuvieron incrementos del 2% al 12%, para taludes con condiciones similares a los que se modelaron. La variación de los incrementos de estas investigaciones radica en la ubicación en la que se ubicaron las raíces, los parámetros de resistencia del suelo, pendiente del talud,

presencia o no del nivel freático, entre otros, al igual que ocurre en los modelos realizados y mostrados en el presente trabajo de investigación. Los incrementos del Factor de Seguridad son los mismos para las posiciones 1 (Pendiente) y 2 (Pendiente + pie), para los ángulos de inclinación de 35°, 45° y 55° por las razones ya mencionadas en el numeral anterior.

Por otro lado, se observa que a medida que aumenta el ángulo de inclinación del talud, los incrementos del Factor de Seguridad son mayores (los incrementos del factor de seguridad de los modelos con pendientes de 55° son superiores que los incrementos de los modelos con pendientes de 25°, en un 70 - 80 % en promedio), lo que conduce a afirmar que la presencia de este tipo de raíces tiene efectos positivos en taludes con grandes pendientes.

### 5.1.3 Análisis de la influencia de la presencia de las raíces en la profundidad de la superficie de falla.

En la Tabla 30 y la Tabla 31, se da a conocer la profundidad de la superficie de falla de los modelos para cada una de las posiciones de las raíces y los ángulos de inclinación que se tuvieron en cuenta para cada una de las modelaciones, para la condición con nivel freático y sin nivel freático. La representación gráfica de los valores de las tablas mencionadas anteriormente, se muestran en la Figura 49 y la Figura 50. La manera en la que se determinó la profundidad de la superficie de falla se describe detalladamente en el numeral 4.8 de la metodología.

Tabla 30. Profundidad de la superficie de falla para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

Ángulo de inclinación el talud (°)	PROFUNDIDAD SUPERFICIE DE FALLA (m) - Sin NF			
	Sin raíces	Posición de las raíces		
		Posición 1	Posición 2	Posición 3
		Pendiente	Pendiente + pie	Corona+pendiente+pie
25	1,75	2,29	1,99	1,98
35	1,58	1,83	1,84	1,84
45	1,28	1,55	1,55	1,78
55	1,29	1,47	1,47	1,47

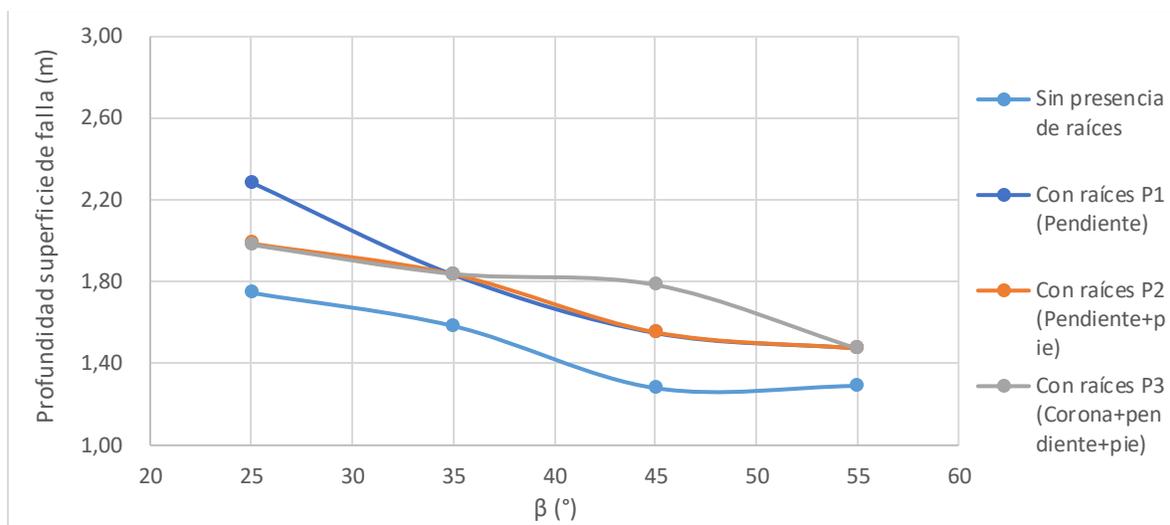


Figura 49. Profundidad de la superficie de falla en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

Tabla 31. Profundidad de la superficie de falla para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

Ángulo de inclinación el talud (°)	PROFUNDIDAD SUPERFICIE DE FALLA (m) - Con NF			
	Sin raíces	Posición de las raíces		
		Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	2,30	2,67	2,61	2,61
35	1,75	2,01	2,01	2,01
45	1,43	1,79	1,79	1,68
55	1,19	1,52	1,52	1,66

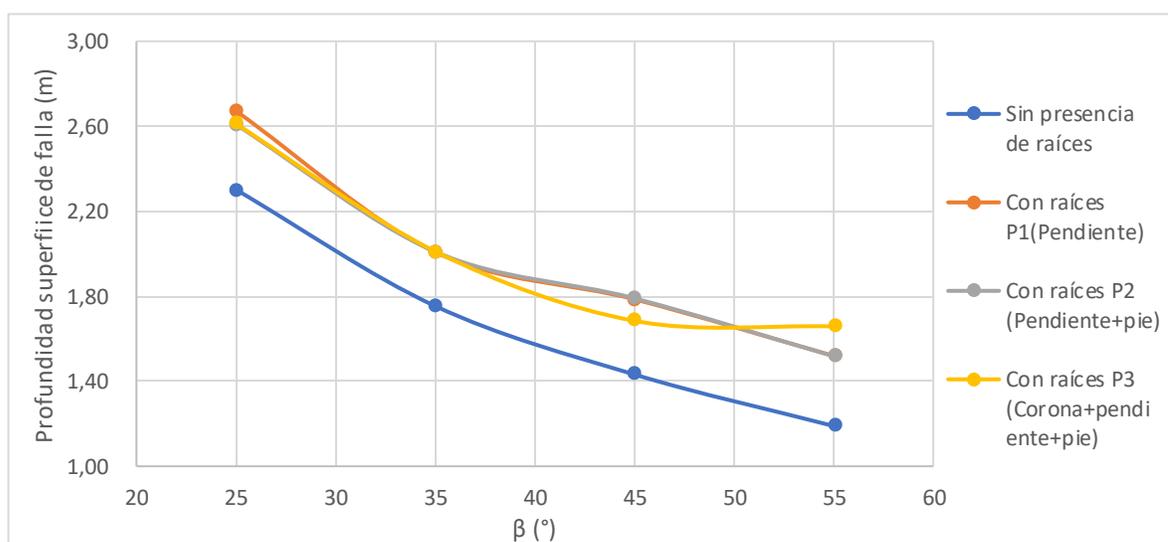


Figura 50. Profundidad de la superficie de falla en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación Incremento de la cohesión – Slide.

En la Figura 49 y la Figura 50, se puede observar que la presencia de las raíces genera que la superficie de falla se desplace a una mayor profundidad para la condición con nivel freático y sin nivel freático. En promedio, la profundidad de la superficie de falla aumenta en un 20%. Independientemente de la posición en la que se ubiquen las raíces, se puede ver claramente esta tendencia y adicional a esto, se puede observar que el rango de valores de profundidad de la superficie de falla para cada una de las posiciones de la raíz con un mismo ángulo de inclinación del talud, tienden a ser muy cercanos, especialmente en la condición con nivel freático.

Por otro lado, en cuanto al ángulo de inclinación del talud, se puede evidenciar que la profundidad de la superficie de falla disminuye a medida que aumenta el ángulo de inclinación del talud, pero a pesar de que la pendiente del talud aumente, la profundidad de la superficie de falla de los modelos con presencia de raíces es mayor que la de los modelos sin la presencia de raíces.

## 5.2 Modelación 2: Modelación del sistema de raíces como anclajes - Slide 2D

En la Figura 51a, La Figura 51b y la Figura 51c, se muestran algunos ejemplos de los modelos realizados en Slide para este tipo de modelación. Estos modelos tienen una pendiente de  $45^\circ$  y no tienen nivel freático. En ellos se pueden observar los anclajes que simulan la presencia de las raíces, los cuales tienen una longitud de 1.5 m y están separados horizontalmente a 1 m de distancia; en ellos también se pueden observar las tres posiciones en las que se ubicaron las raíces.

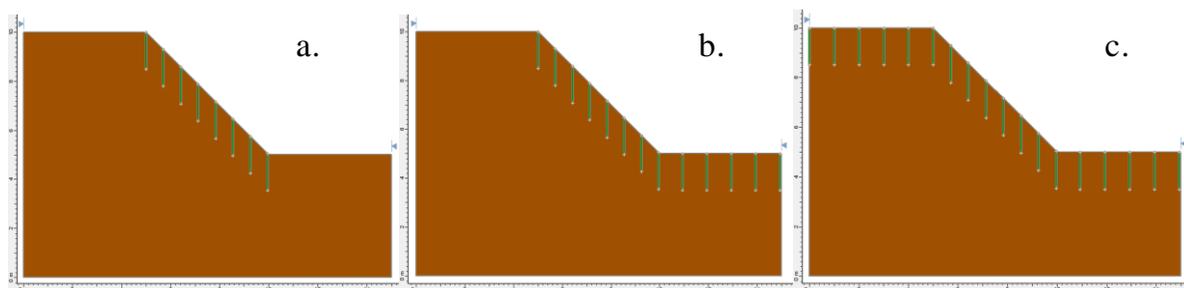


Figura 51. Posición de las raíces modeladas como anclajes en el talud de análisis. a) Modelo 37-P1 (Pendiente)- $45^\circ$ , Modelo 45-P2 (Pendiente+pie)- $45^\circ$ , c) Modelo 53-P3 (Corona+pendiente+pie)- $45^\circ$ .

### 5.2.1 Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados.

A continuación, se dan a conocer los resultados del Factor de Seguridad obtenidos en las modelaciones, para cada una de las posiciones de las raíces y los diferentes ángulos de inclinación que se tuvieron en cuenta, para la condición con nivel freático y sin nivel freático, los cuales se pueden observar en la Tabla 32 y la Tabla 33. En la Figura 52 y la Figura 53, se muestra la representación gráfica de los resultados del factor de seguridad mostrados en las tablas mencionadas.

Tabla 32. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Ángulo de inclinación del talud ( $^{\circ}$ )	FACTOR DE SEGURIDAD – Sin NF			
	Posición de las raíces			
	Sin raíces	Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	2,016	2,15	2,15	2,143
35	1,528	1,66	1,66	1,631
45	1,233	0,996	0,996	0,996
55	1,021	0,757	0,757	0,757

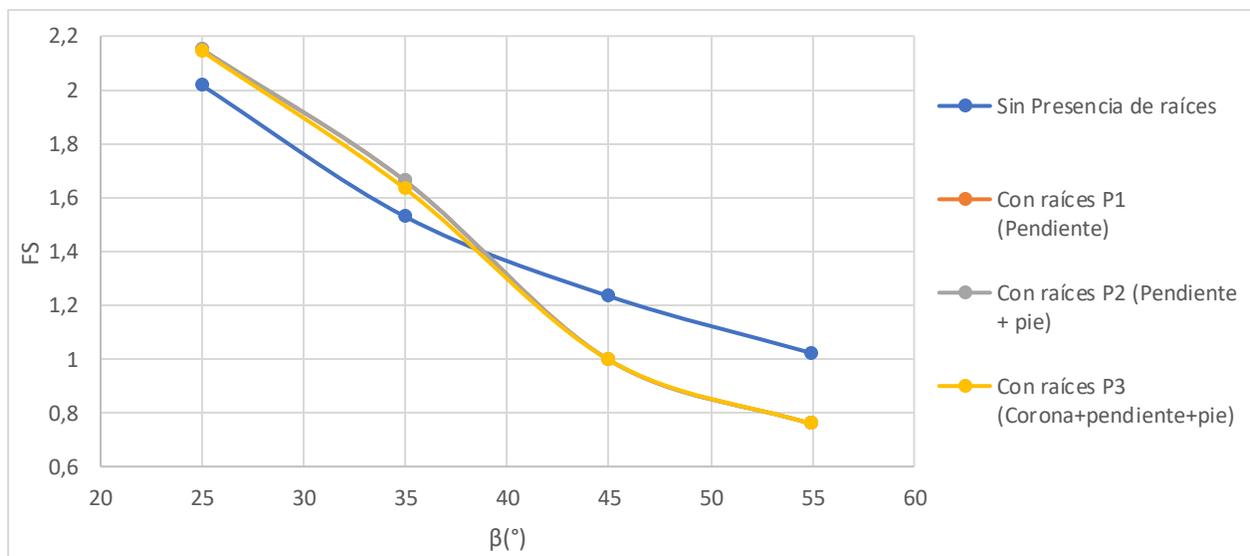


Figura 52. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Tabla 33. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Ángulo de inclinación del talud (°)	FACTOR DE SEGURIDAD – Con NF			
	Posición de las raíces			
	Sin raíces	Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	1,532	1,629	1,629	1,629
35	1,218	1,34	1,34	1,311
45	1,003	0,772	0,772	0,772
55	0,837	0,721	0,721	0,628

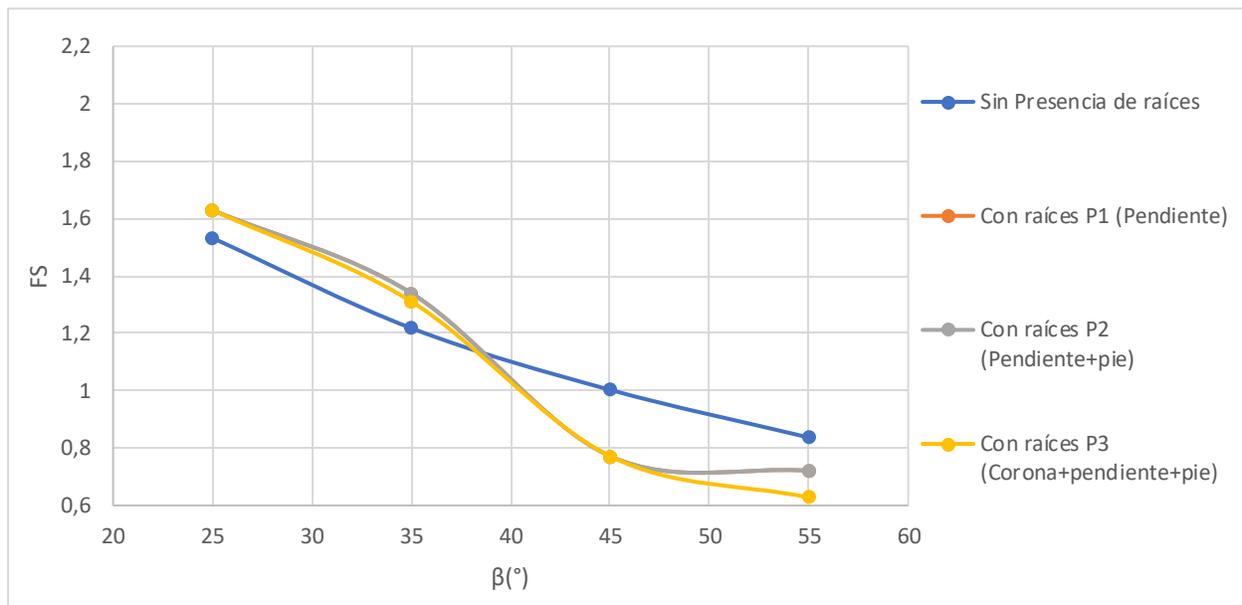


Figura 53. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Los resultados del análisis de estabilidad obtenidos para este tipo de modelación, los cuales se pueden observar en la Figura 52 y la Figura 53, muestran que los Factores de Seguridad son mayores en los modelos donde se representó la presencia de las raíces comparados con los modelos que no tenían raíces, para ángulos de inclinación del talud de 25° y 35°, pero para ángulos de inclinación de 45° y 55°, el comportamiento es totalmente diferente. Esto aplica para la condición en la que se tuvo en cuenta el Nivel Freático y en la que no se tuvo en cuenta. En este caso, el Factor de Seguridad disminuye con la presencia de raíces. En el siguiente numeral se hablará en detalle de este comportamiento.

Adicionalmente, se puede observar que los resultados de las modelaciones son prácticamente iguales, pero con una disminución en algunos de los Factores de Seguridad de los modelos con la Posición 3 (corona + pendiente + pie del talud) de las raíces. Esto se debe a que las superficies de falla de estos modelos, se limitan únicamente a la pendiente del Talud, por lo que los soportes o anclajes que se encuentren en el pie del talud o en la corona no tienen ninguna incidencia en los Factores de Seguridad.

#### ***5.2.1.1 Efecto de la inclinación de los anclajes en el Factor de Seguridad.***

Para este tipo de modelación, en donde los anclajes se modelaron completamente verticales ( $90^\circ$ ) debido a que se ha evidenciado que la raíz del pasto Vetiver crece hacia abajo y no en dirección perpendicular a la superficie del talud, para taludes con pendientes superiores a  $38^\circ$ , este tipo de soportes verticales no tienen efectos positivos en la estabilidad del talud. Por el contrario, si el anclaje tiene un ángulo de inclinación con respecto a la superficie del talud, si tiene efectos positivos en la estabilidad.

Para comprobar lo mencionado anteriormente, se tomaron los modelos 37 (raíces ubicadas en la pendiente, pendiente  $45^\circ$ , sin Nivel freático), 38 (raíces ubicadas en la pendiente, pendiente  $45^\circ$ , con Nivel freático), 53 (raíces ubicadas en la corona + pendiente + pie, pendiente  $45^\circ$ , sin Nivel freático) y 54 (raíces ubicadas en la corona + pendiente + pie, pendiente  $45^\circ$ , con Nivel freático), que se pueden observar en la Figura 54, en los cuales se varió el ángulo de inclinación del anclaje con respecto a la superficie del talud con ángulos de  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $75^\circ$  y  $90^\circ$ . Los modelos mencionados se tomaron con pendientes del talud de  $45^\circ$ , ya que para estas pendientes los Factores de Seguridad obtenidos son menores que los modelos de control (modelos sin la presencia de raíces), con diferentes posiciones de las raíces para evaluar si este comportamiento depende de su ubicación y se hizo el análisis para la condición con Nivel Freático y sin Nivel Freático.

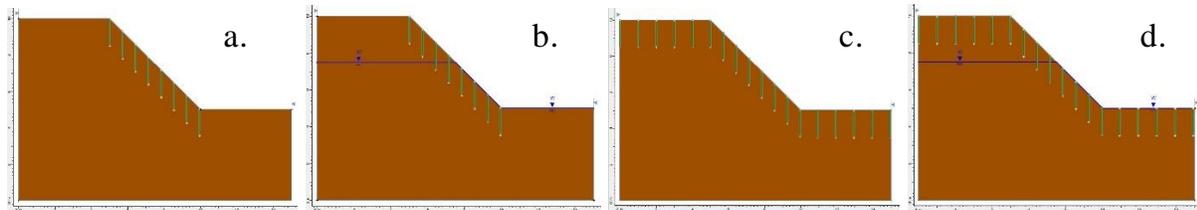


Figura 54. Modelos con presencia de raíces simuladas como anclajes usados para explicar el efecto negativo de los anclajes verticales en los Factores de Seguridad. a) Modelo 37 – P1 (pendiente) – 45° - Sin NF, b) Modelo 38 – P1 (pendiente) – 45° - Con NF, c) Modelo 53 – P3 (corona+pendiente+pie) – 45° - Sin NF, d) Modelo 54 – P3 (corona+pendiente+pie) – 45° - Con NF.

En la Figura 55 y la Figura 56, se dan a conocer los resultados de las modelaciones mencionadas anteriormente. En ellas se observa que, para la condición sin Nivel freático, hay un leve incremento del Factor de Seguridad para ángulos de inclinación del anclaje hasta los 55° para el modelo 37 y los 45° para el modelo 53. Para ángulos de inclinación del anclaje mayores, los Factores de Seguridad empiezan a disminuir considerablemente hasta llegar a los 90°. Lo mismo sucede para la condición con Nivel Freático, donde el Factor de Seguridad tiene un leve incremento hasta los 55° para el modelo 38 y los 45° para el modelo 54. Si se tienen ángulos de inclinación del anclaje mayores, al Factor de Seguridad empieza a disminuir considerablemente, independientemente de que el talud tenga presencia de agua o no.

Por otra parte, se puede observar que para ángulos de inclinación del anclaje menores a 45°, se observa un mayor incremento en los Factores de Seguridad cuando las raíces se ubican en la corona, pendiente y pie del talud (Posición 3), comparado con los modelos en que sólo se ubicaron las raíces en la pendiente del talud (Posición 1). Para ángulos de inclinación del anclaje mayores a 45°, la situación cambia. Los incrementos del Factor de Seguridad son mayores con las raíces ubicadas en la pendiente del talud (Posición 1), que en los modelos donde las raíces se ubicaron en toda la superficie del talud (Posición 3). Con esto se puede evidenciar que los anclajes con ángulos de inclinación superiores a 45° en la corona del talud, generan efectos que favorecen la inestabilidad del talud.

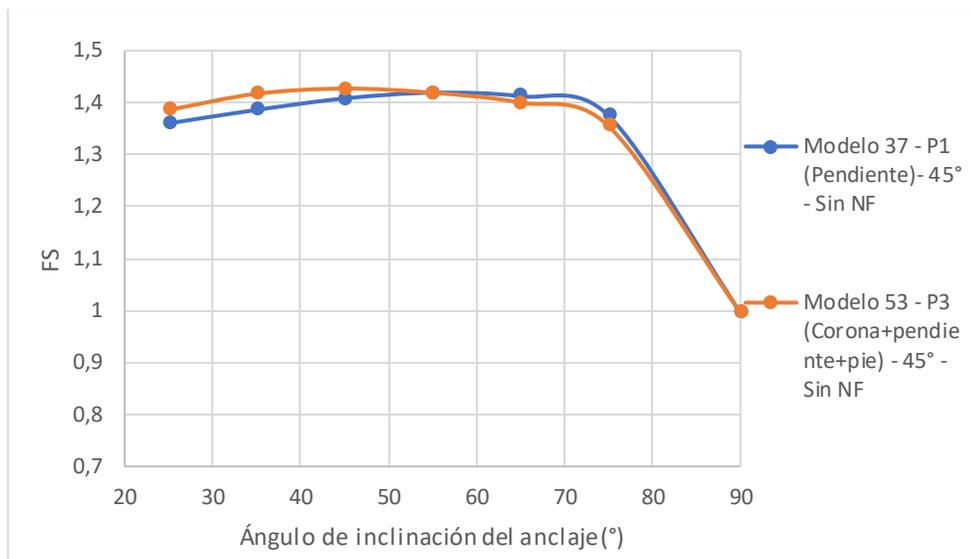


Figura 55. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del anclaje. (Sin nivel freático).

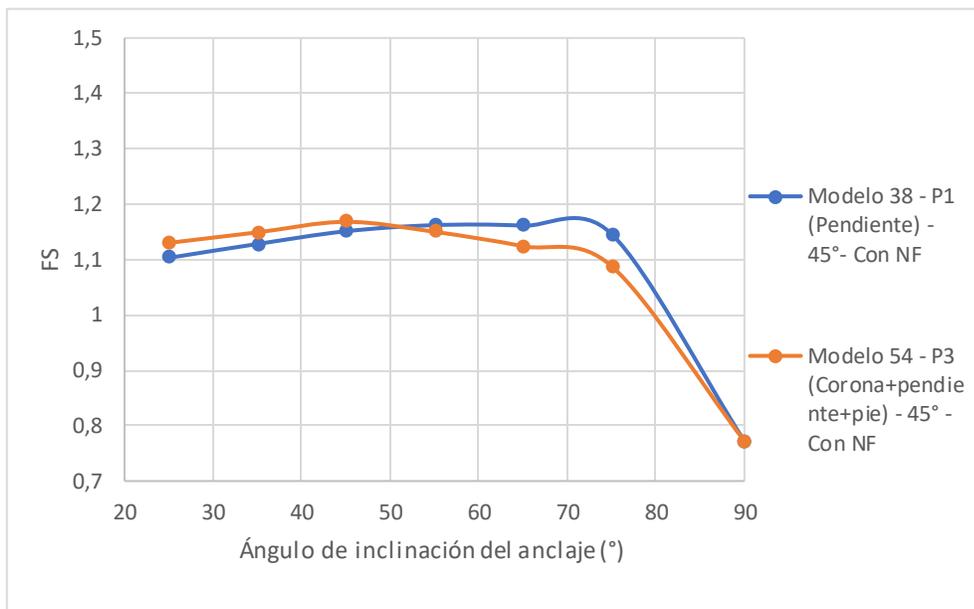


Figura 56. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del anclaje (Con nivel freático)

En el caso en el que la superficie de falla alcance la corona del talud, los anclajes con altos ángulos de inclinación (superiores a 45°, teniendo en cuenta lo mostrado en la Figura 55 y la Figura 56) ubicados en la corona, generan efectos negativos en la estabilidad, razón por la cual, se presentan los valores más bajos de Factores de Seguridad.

En cuanto al ángulo de inclinación del talud, se puede apreciar que los Factores de Seguridad disminuyen a medida que aumenta la pendiente del talud. Para pendientes menores a  $38^\circ$  (como se mencionó anteriormente), los Factores de Seguridad aumentan con la presencia de las raíces con respecto a los modelos que no tienen raíces, pero para pendientes del talud mayores a  $38^\circ$ , los Factores de Seguridad disminuyen con respecto a los modelos de control. Para este tipo de modelación no siempre se evidenció un aumento de los Factores de Seguridad con la presencia de las raíces.

### 5.2.2 Análisis del Incremento del Factor de Seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.

En este tipo de modelación, la presencia de las raíces genera un incremento en los factores de seguridad para taludes con pendientes menores a los  $38^\circ$ ; para taludes con pendientes mayores a  $38^\circ$ , el Factor de Seguridad disminuye con la presencia de las raíces, como se estableció en el numeral anterior. En la Tabla 34 y en la Tabla 35, se muestran los incrementos y descensos del Factor de Seguridad obtenidos para cada una de las posiciones de la raíz y cada uno de los ángulos de inclinación del talud. Estos resultados se calcularon tomando como referencia los modelos de control.

Tabla 34. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Ángulo de inclinación del talud ( $^\circ$ )	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) - SIN NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1	Posición 2	Posición 3
	Pendiente	Pendiente + pie	Corona + pendiente + pie
25	6,65	6,65	6,30
35	8,64	8,64	6,74
45	-19,22	-19,22	-19,22
55	-25,86	-25,86	-25,86

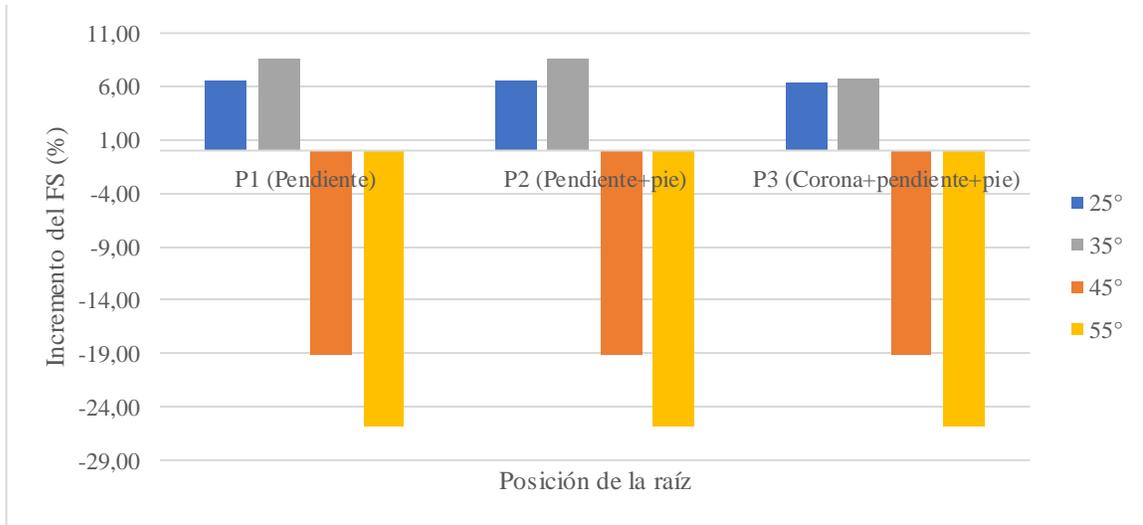


Figura 57. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Tabla 35. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Ángulo de inclinación del talud (°)	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) - CON NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1	Posición 2	Posición 3
	Pendiente	Pendiente + pie	Corona+pendiente+pie
25	6,33	6,33	6,33
35	10,02	10,02	7,64
45	-23,03	-23,03	-23,03
55	-13,86	-13,86	-24,97

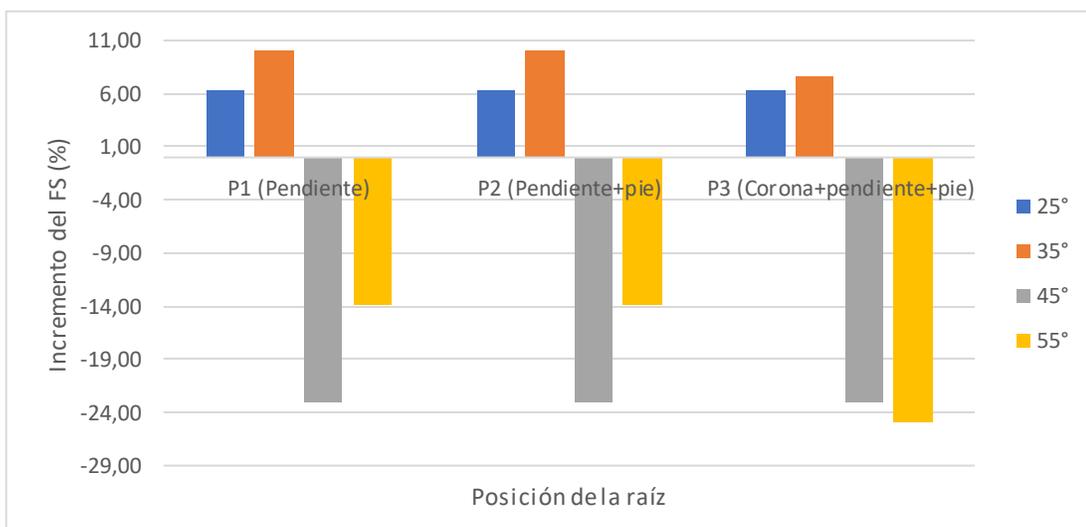


Figura 58. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

A diferencia del tipo de modelación 1, donde se evidencia que la posición 3 de las raíces genera mayores incrementos del Factor de Seguridad, en la Figura 57 y la Figura 58 se observa que el incremento del factor de seguridad es más significativo cuando las raíces se extienden en la parte inclinada y el pie del talud (Posición 2), para ángulos de inclinación del talud menores a  $38^\circ$ . En la posición 3 (corona + pendiente + pie) siempre se observó que el incremento del Factor de Seguridad tiende a ser menor en un 20% (para ángulos de inclinación del talud menores a  $38^\circ$ ), y en algunos casos es igual que en las posiciones 1 (Pendiente) y 2 (Pendiente + pie), pero nunca superior. Adicionalmente, se puede observar que el mayor incremento del factor de seguridad para este tipo de modelación es de casi el 7%.

De forma similar al tipo de modelación del incremento de cohesión – Slide, los resultados obtenidos del incremento del factor de seguridad, modelando las raíces como anclajes, se encuentra en el mismo rango de magnitudes de las investigaciones realizadas por Chok et al., (2004); Gentile et al., (2010) y Sambasivarao, (2015), las cuales fueron citadas anteriormente, donde también se encontraron incrementos del factor de seguridad del orden de 7%.

Por otro lado, se puede observar que para ángulos superiores a  $38^\circ$ , el descenso del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces puede llegar a ser del orden del 20% a 25%, lo que querría decir que para taludes que tengan ángulos de inclinación del talud altos, este tipo de refuerzo podría generar la inestabilidad y la falla de un talud. Por esta razón, se puede afirmar que este tipo de modelación no es adecuada para taludes con ángulos de inclinación mayores a  $38^\circ$ .

Como ya se mencionó en el numeral anterior, la mayoría de los resultados de los Factores de Seguridad son iguales en las tres posiciones de la raíz, para cada ángulo de inclinación del talud, a excepción de unos pocos que son menores en la posición 3. Por esta razón, los incrementos y descensos del Factor de Seguridad son los mismos para cada pendiente del talud.

### 5.2.3 Análisis de la influencia de la presencia de las raíces en la profundidad de la superficie de falla.

A continuación, se da a conocer la profundidad de la superficie de falla de los modelos para cada una de las posiciones de las raíces y cada ángulo de inclinación, para la condición con nivel freático y sin nivel freático, los cuales se muestran en la Tabla 36 y la Tabla 37. La representación gráfica de los valores de las tablas mencionadas anteriormente, se muestran en la Figura 59 y la Figura 60.

Tabla 36. Profundidad de la superficie de falla para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Ángulo de inclinación del talud (°)	PROFUNDIDAD SUPERFICIE DE FALLA (m)			
	Posición de las raíces			
	Sin raíces	Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	1,75	2,00	1,98	1,99
35	1,58	1,84	1,84	1,57
45	1,28	0,40	0,40	0,40
55	1,29	0,64	0,65	0,60

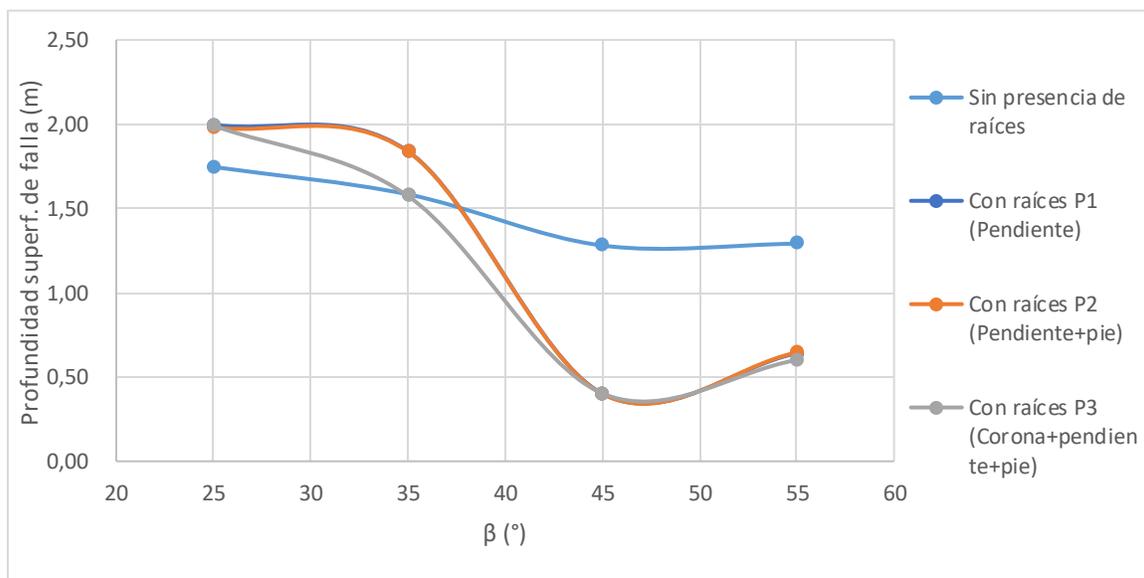


Figura 59. Profundidad de la superficie de falla en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Tabla 37. Profundidad de la superficie de falla para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

Ángulo de inclinación del talud (°)	PROFUNDIDAD SUPERFICIE DE FALLA (m)			
	Posición de las raíces			
	Sin raíces	Posición 1	Posición 2	Posición 3
25	2,3015	2,3010	2,2959	2,2986
35	1,7538	1,2822	1,2773	2,0038
45	1,4319	0,7573	0,7545	0,7573
55	1,1895	0,6469	0,6460	0,9543

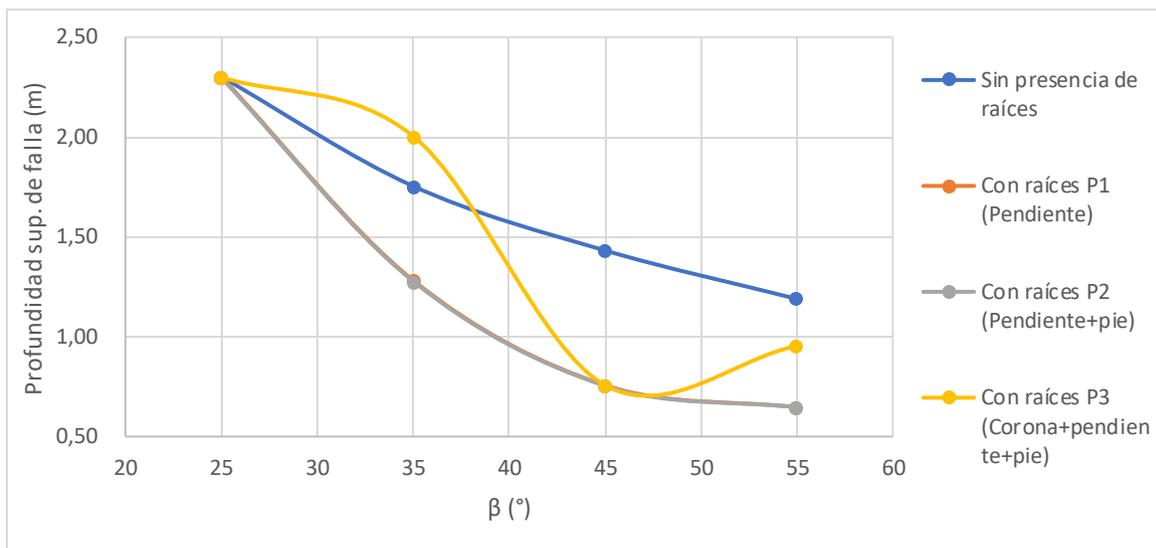


Figura 60. Profundidad de la superficie de falla en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación Raíces como anclajes – Slide.

En la Figura 59 y la Figura 60, se puede observar que la presencia de las raíces genera que la superficie de falla se desplace a una mayor profundidad para la condición sin nivel freático, pero solamente para los taludes con ángulos de inclinación de 25° y 35°, para los modelos con pendientes mayores la profundidad de la superficie de falla es menor a la del talud sin presencia de raíces. En cuanto a los modelos en los que se tuvo en cuenta el Nivel freático, se observa que la profundidad de la superficie de falla del modelo sin presencia de raíces es mayor que la de los modelos que sí la tienen, independientemente de la posición en la que se encuentren, a excepción del talud de 35° de inclinación, en el que se modeló la presencia de las raíces en toda la superficie

del talud. Esto coincide con el efecto negativo que tiene este tipo de modelación mediante el uso de anclajes, en el factor de seguridad, de acuerdo a lo que se mencionó en el numeral 5.2.1.1.

### 5.3 Modelación 3: Modificación de las propiedades del suelo – Plaxis 2D

En la Figura 61a, La Figura 61b y la Figura 61c, se pueden observar algunos ejemplos de los modelos realizados en Plaxis para la obtención de los Factores de Seguridad, concentraciones de esfuerzos y deformaciones. Los tres modelos tienen un ángulo de inclinación de  $45^\circ$  y no tienen presencia del nivel freático. Al igual que en los modelos de Slide correspondientes al tipo de modelación del incremento de la cohesión – Slide, donde también se modifican las propiedades del suelo, en ellos se puede apreciar la capa de 1.5 m que corresponde a las raíces (capas de suelo de color verde), las tres posiciones en las que se ubicaron las raíces y las seis subcapas en las que se divide la capa de 1.5 m, las cuales tienen valores de cohesión diferentes en cada una de ellas los cuales disminuyen con la profundidad.

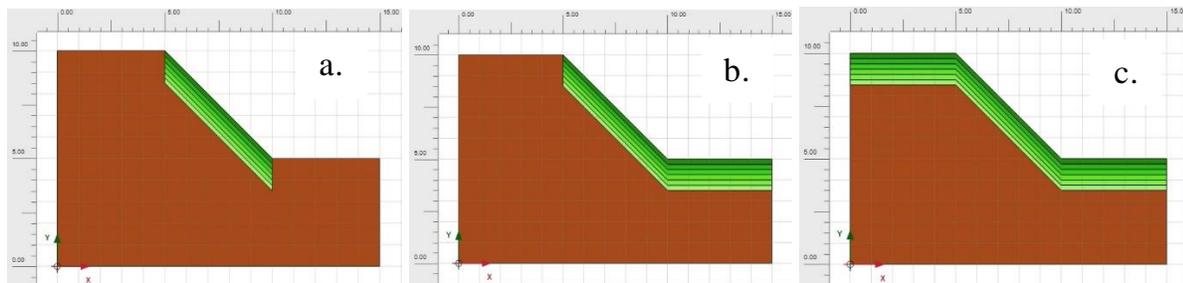


Figura 61. Posición de las raíces modeladas mediante la modificación de las propiedades del suelo en el talud de análisis. a) Modelo 69 - P1 (pendiente) -  $45^\circ$ , b) Modelo 77 - P2 (pendiente+pie) -  $45^\circ$ , c) Modelo 85 - P3 (Corona+pendiente+pie) -  $45^\circ$ .

#### 5.3.1 Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados.

A continuación, se dan a conocer los resultados del Factor de Seguridad obtenidos en las modelaciones, para cada una de las posiciones de las raíces y los diferentes ángulos de inclinación que se tuvieron en cuenta, para la condición con nivel freático y sin nivel freático, los cuales se

pueden observar en la Tabla 38 y la Tabla 39. En la Figura 62 y la Figura 63, se muestra la representación gráfica de los resultados del factor de seguridad mostrados en las tablas mencionadas.

En los casos en los que el Factor de Seguridad obtenido en Plaxis es menor a 1, durante el cálculo de las fases, el programa arroja una alerta indicando que el cuerpo del suelo está colapsando por lo que el programa no indica el valor del Factor de Seguridad. Por esta razón, los espacios en blanco de los resultados del Factor de Seguridad que se observan en la Tabla 38 y la Tabla 39, corresponden a valores inferiores a 1.

Tabla 38. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	FACTOR DE SEGURIDAD - Sin NF			
	Sin raíces	Posición de las raíces		
		Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	1,954	2,035	2,062	2,085
35	1,436	1,557	1,565	1,577
45	1,119	1,213	1,222	1,249
55	-	-	-	-

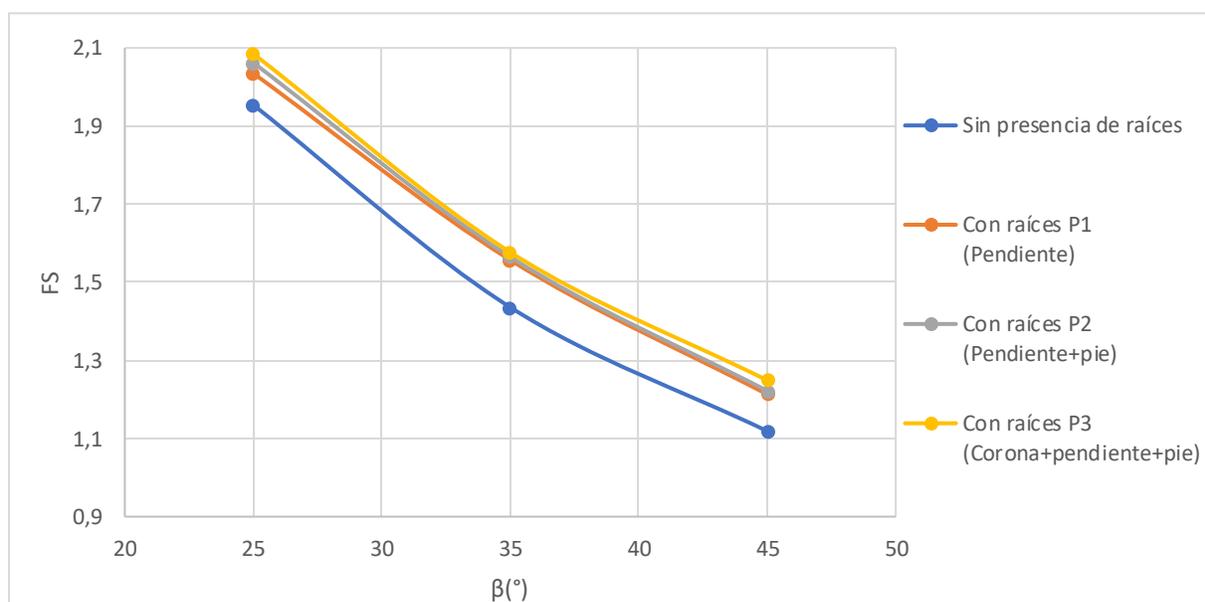


Figura 62. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Tabla 39. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	FACTOR DE SEGURIDAD - Con NF			
	Posición de las raíces			
	Sin raíces	Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	1,474	1,515	1,566	1,580
35	1,039	1,098	1,106	1,126
45	-	-	-	-
55	-	-	-	-

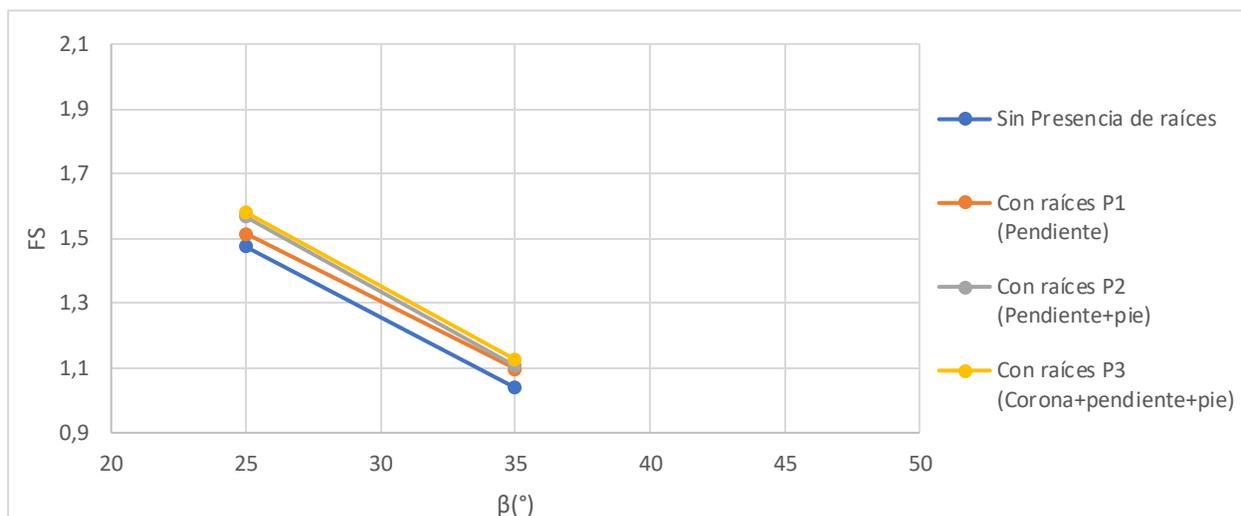


Figura 63. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Para este tipo de modelación también se puede observar que el Factor de seguridad es más alto en los modelos con presencia de las raíces que en los modelos donde no se tuvieron en cuenta, para la condición con nivel freático y sin nivel freático. Adicional a esto, se puede observar que la posición 3 de las raíces (corona + pendiente+ pie), es la posición en la que se presenta un mayor incremento del Factor de Seguridad. En el siguiente numeral se mencionarán en detalle los incrementos del factor de seguridad obtenidos por este tipo de modelación.

En cuanto al ángulo de inclinación del talud, a medida que este aumenta, los Factores de Seguridad disminuyen, pero a pesar de esto, se sigue observando que la presencia de las raíces

genera incrementos en el Factor de Seguridad en comparación con los modelos sin presencia de raíces.

### 5.3.2 Análisis del incremento del Factor de seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.

La presencia de las raíces genera un incremento en el Factor de Seguridad obtenido en cada una de las modelaciones, independientemente del ángulo de inclinación del talud, de la posición que ocupen y la presencia o no del nivel freático. En la Tabla 40 y en la Tabla 41, se dan a conocer los incrementos del factor de seguridad obtenidos para cada una de las posiciones de la raíz y cada uno de los ángulos de inclinación del talud. En la Figura 64 y la Figura 65, se puede observar la representación gráfica de los resultados.

Tabla 40. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis..

Ángulo de inclinación del talud (°)	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) - Sin NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1	Posición 2	Posición 3
	Pendiente	Pendiente + pie	Corona+pendiente+pie
25	4,15	5,53	6,70
35	8,43	8,98	9,82
45	8,40	9,20	11,62
55	-	-	-

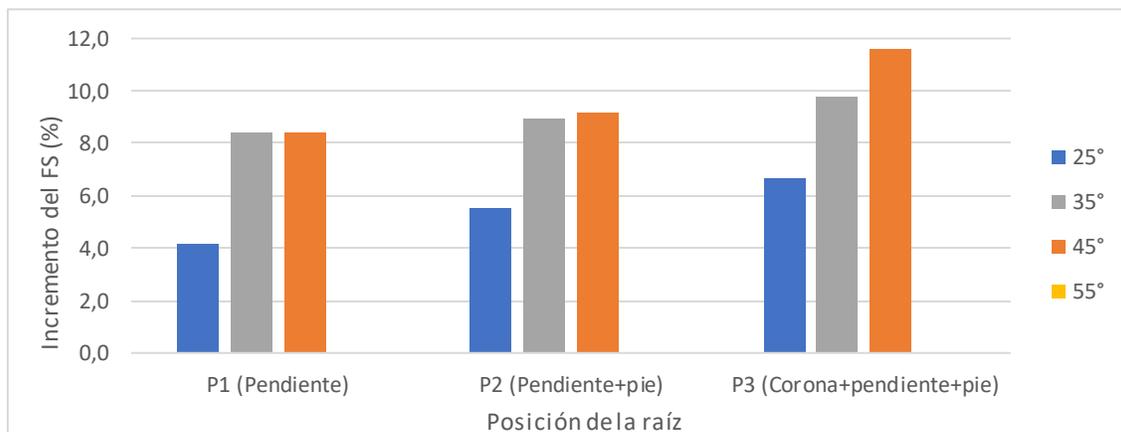


Figura 64. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Tabla 41. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) – Con NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona + pendiente + pie
25	2,78	6,24	7,19
35	5,68	6,45	8,37
45	-	-	-
55	-	-	-

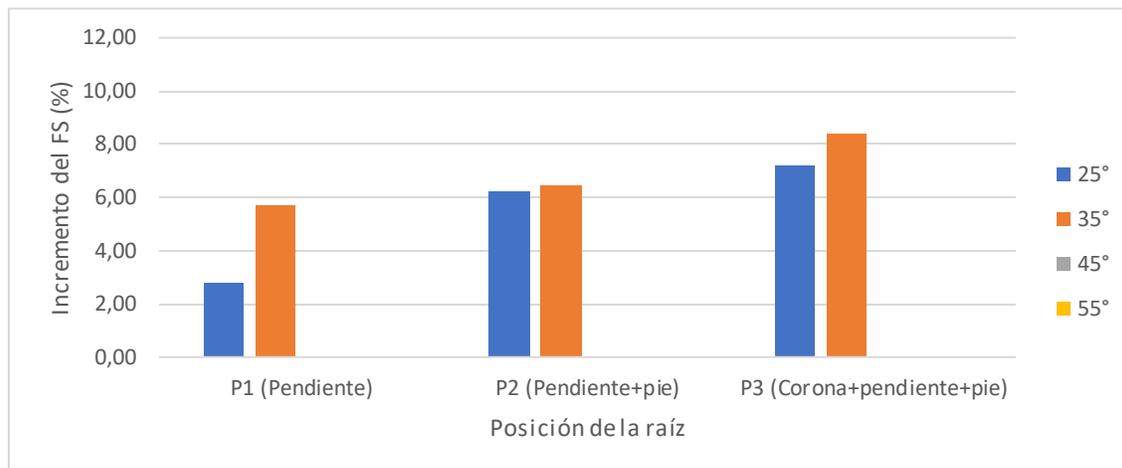


Figura 65. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Como se puede observar en la Figura 64 y la Figura 65, los incrementos del Factor de Seguridad más significativos se observan en la posición 3 de las raíces (Corona + pendiente + pie), cuando se extienden sobre toda la superficie del talud. Estos incrementos alcanzan valores cercanos al 12% para la condición sin Nivel Freático y del 8% para la condición con Nivel Freático. Comparando los resultados obtenidos de cada una de las tres posiciones, se pudo observar que los incrementos del factor de seguridad de los modelos en los que las raíces se ubican en la posición 3 (Corona + pendiente + pie), son superiores en un 35% y un 20 % que los incrementos obtenidos del talud con vegetación ubicada en la posición 1 (pendiente) y en la posición 2 (pendiente + pie) respectivamente, en la condición sin nivel freático, y superiores en un 80% y un 20% que los

incrementos con las raíces ubicadas en la posición 1 (pendiente) y en la posición 2 (pendiente + pie), en la condición con nivel freático (en promedio). Los valores del incremento del factor de seguridad obtenidos por este tipo de modelación están en el mismo rango y tienen gran similitud con los resultados obtenidos por el tipo de modelación del incremento de la cohesión – Slide y el tipo de modelación de raíces como anclajes – Slide.

Adicional a esto, se puede observar que los incrementos del Factor de Seguridad son mayores o aumentan a medida que aumenta el ángulo de inclinación del talud, donde se puede identificar que los incrementos del factor de seguridad de los modelos con pendientes de  $45^\circ$  son superiores que los incrementos de los modelos con pendientes de  $25^\circ$ , en un 70 - 80 % en promedio, para el caso sin nivel freático, y para la condición con nivel freático, los modelos con pendientes de  $35^\circ$  son superiores que los incrementos de los modelos con pendientes de  $25^\circ$ , en un 40 % en promedio. Los efectos de la vegetación son más significativos y más visibles cuando el talud tiende a ser más inestable.

### **5.3.3 Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces.**

Para evaluar la influencia de las raíces en el mecanismo de falla, se tomaron los valores máximos de las deformaciones y de los esfuerzos cortantes de cada modelo y de cada una de las cuatro áreas en las que se dividió el talud, de acuerdo a lo mencionado en el numeral 4.8.2. Después de dar a conocer los valores de las deformaciones y esfuerzos cortantes de cada uno, se realizó un análisis del mecanismo de falla para cada ángulo de inclinación del talud.

A continuación, se muestran los resultados de las deformaciones y esfuerzos cortantes máximos de cada uno de los modelos y de las cuatro áreas en las que se dividió el talud para efectos de análisis, para la condición con Nivel Freático y sin Nivel Freático, los cuales se dan a conocer en la Tabla 42, la Tabla 43, la Tabla 44 y la Tabla 45. En la Figura 66, la Figura 67, la Figura 68 y la

Figura 69, se representa la relación entre los valores máximos de la deformación y el esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para cada uno de los ángulos de inclinación analizados. Como se mencionó en el numeral 4.8.2, los valores máximos que se tomaron para cada área se obtuvieron teniendo en cuenta la superficie de falla determinada en Slide.

Tabla 42. Deformaciones máximas obtenidas para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	DEFORMACIONES MÁXIMAS (SIN NF)								
	Sin raíces								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
	Def. Área	Def/Def máx	Def. Área	Def/Def máx	Def. Área	Def/Def máx	Def. Área	Def/Def máx	Def. Área
25	0,0057	0,0006	0,1033	0,0025	0,4437	0,0027	0,4718	0,0014	0,2407
35	0,0082	0,0013	0,1546	0,0038	0,4588	0,0082	1,0000	0,0053	0,6499
45	0,0222	0,0019	0,0860	0,0063	0,2825	0,0222	1,0000	0,0079	0,3572
55	0,0308	0,0009	0,0282	0,0185	0,6010	0,0308	1,0000	0,0114	0,3687
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 1 (Pendiente)								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def. Área	Def/Def máx						
25	0,0057	0,0007	0,1192	0,0028	0,4987	0,0030	0,5228	0,0014	0,2376
35	0,0061	0,0013	0,2092	0,0038	0,6127	0,0053	0,8595	0,0052	0,8429
45	0,0271	0,0020	0,0733	0,0053	0,1955	0,0112	0,4135	0,0271	1,0000
55	0,0441	0,0014	0,0315	0,0200	0,4537	0,0330	0,7486	0,0441	1,0000
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 2 (Pendiente + pie)								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def. Área	Def/Def máx						
25	0,0057	0,0007	0,1190	0,0027	0,4719	0,0026	0,4659	0,0015	0,2589
35	0,0061	0,0013	0,2130	0,0038	0,6184	0,0057	0,9244	0,0041	0,6771
45	0,0145	0,0019	0,1336	0,0053	0,3644	0,0145	1,0000	0,0104	0,7132
55	0,0340	0,0019	0,0560	0,0171	0,5043	0,0340	1,0000	0,0145	0,4280

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 3 (Corona + pendiente + pie)								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def. Área	Def/Def máx						
25	0,0057	0,0007	0,1203	0,0027	0,4691	0,0027	0,4761	0,0015	0,2579
35	0,0061	0,0013	0,2148	0,0038	0,6188	0,0057	0,9229	0,0041	0,6769
45	0,0145	0,0021	0,1415	0,0053	0,3622	0,0145	1,0000	0,0104	0,7146
55	0,0381	0,0014	0,0363	0,0189	0,4963	0,0381	1,0000	0,0139	0,3631

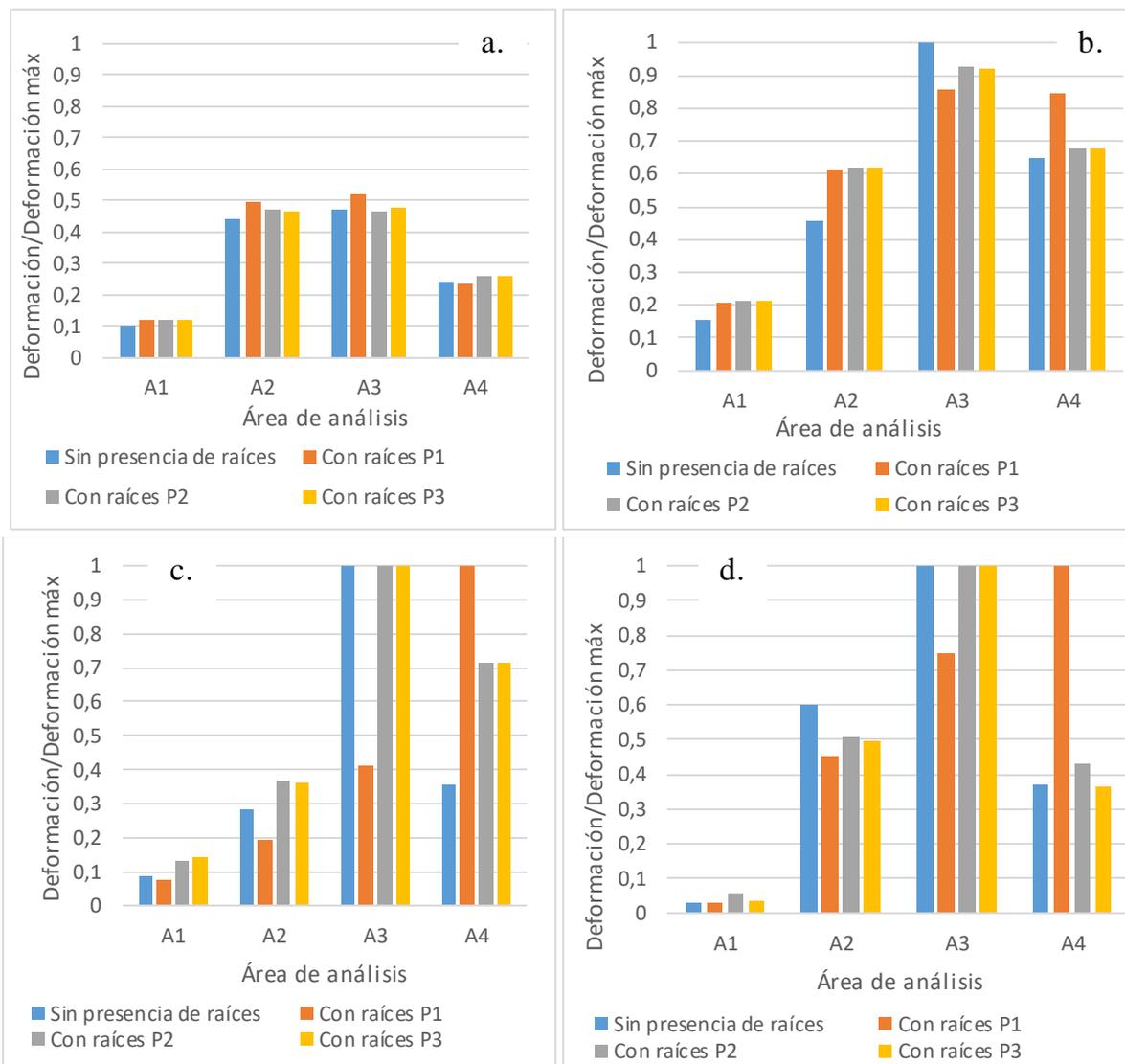


Figura 66. Relación entre los valores máximos de la deformación de cada área, con los valores máximos de la deformación de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.

Tabla 43. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	ESFUERZOS CORTANTES MÁXIMOS (kN/m <sup>2</sup> ) (SIN NF)								
	Sin raíces								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	
25	16,39	1,73	0,11	7,30	0,45	7,70	0,47	3,85	0,23
35	17,66	3,55	0,20	10,86	0,61	12,06	0,68	6,84	0,39
45	18,38	5,38	0,29	14,70	0,80	15,90	0,87	6,96	0,38
55	18,97	2,68	0,14	9,03	0,48	10,70	0,56	9,96	0,53
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 1 (Pendiente)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	16,39	1,93	0,12	8,15	0,50	8,60	0,52	3,80	0,23
35	17,66	3,69	0,21	10,80	0,61	15,12	0,86	8,27	0,47
45	24,46	5,65	0,23	15,26	0,62	24,46	1,00	16,85	0,69
55	26,63	4,07	0,15	13,85	0,52	26,63	1,00	19,96	0,75
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 2 (Pendiente + pie)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	16,39	1,97	0,12	7,71	0,47	7,59	0,46	4,37	0,27
35	17,66	3,77	0,21	10,95	0,62	16,21	0,92	11,97	0,68
45	24,81	5,70	0,23	15,24	0,61	24,81	1,00	22,47	0,91
55	28,81	4,17	0,14	13,76	0,48	28,81	1,00	28,08	0,97
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 3 (Corona + pendiente + pie)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	16,39	1,99	0,12	7,70	0,47	7,80	0,48	4,31	0,26
35	17,66	3,76	0,21	10,94	0,62	16,16	0,92	11,96	0,68
45	24,81	5,94	0,24	15,32	0,62	24,81	1,00	22,44	0,90
55	28,67	4,05	0,14	13,64	0,48	28,67	1,00	26,39	0,92

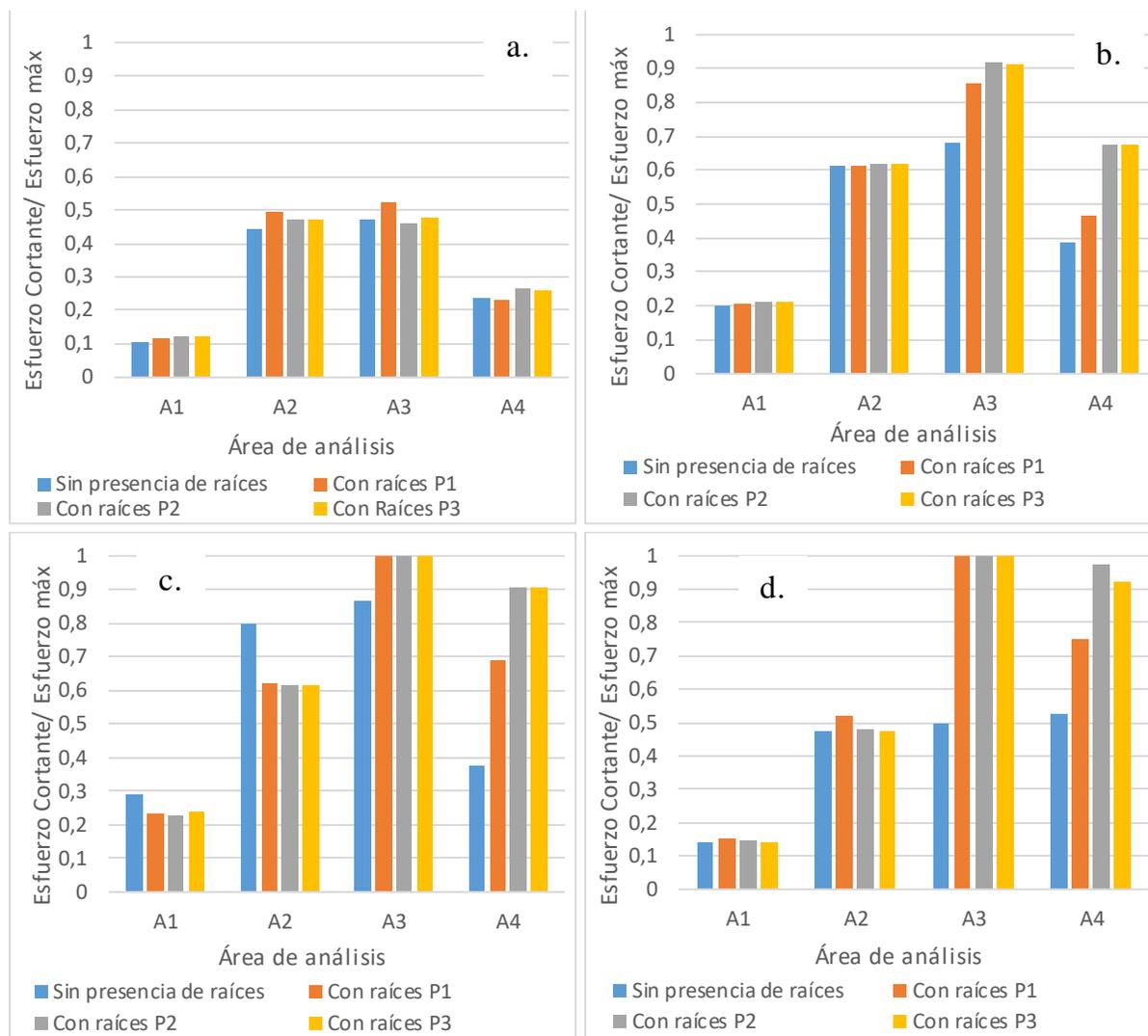


Figura 67. Relación entre los valores máximos del esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos del esfuerzo cortante de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.

Tabla 44. Deformaciones máximas obtenidas para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	DEFORMACIONES MÁXIMAS (CON NF)								
	Def. máx modelo	Sin raíces							
		A1		A2		A3		A4	
		Def. máx modelo	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx
25	0,0074	0,0004	0,0570	0,0029	0,3989	0,0033	0,4410	0,0024	0,3189
35	0,0214	0,0003	0,0144	0,0123	0,5750	0,0214	1,0000	0,0124	0,5778
45	0,0244	0,0005	0,0203	0,0079	0,3234	0,0244	1,0000	0,0061	0,2493
55	0,0110	0,0003	0,0290	0,0102	0,9288	0,0110	1,0000	0,0047	0,4269

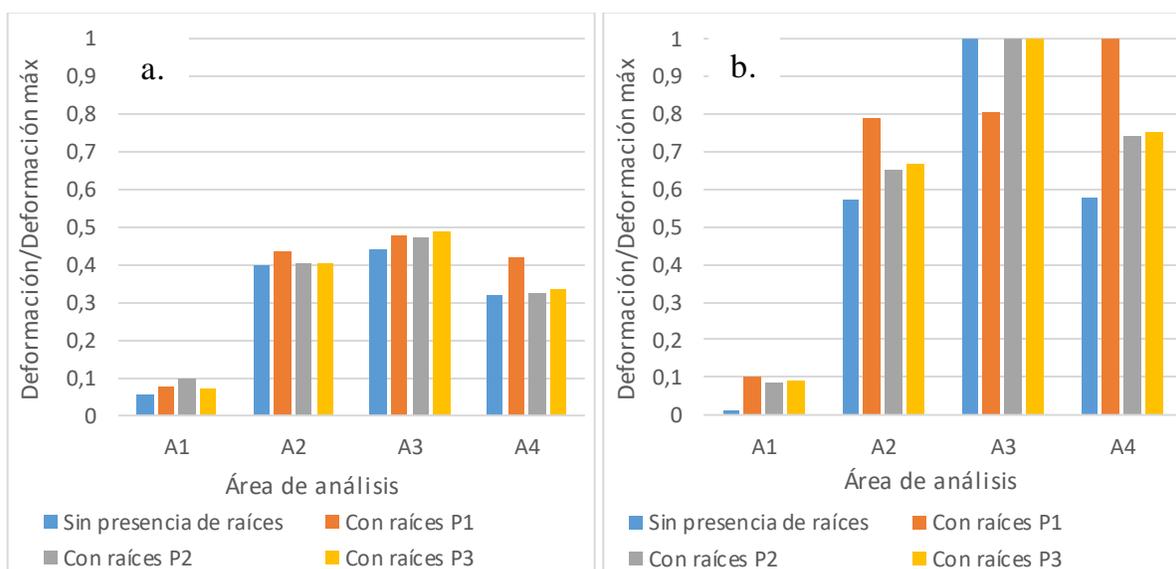
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 1 (Pendiente)								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def. máx modelo	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx
25	0,0074	0,0006	0,0746	0,0032	0,4333	0,0035	0,4754	0,0031	0,4191
35	0,0098	0,0010	0,0994	0,0078	0,7915	0,0079	0,8038	0,0098	1,0000
45	0,0590	0,0009	0,0156	0,0168	0,2844	0,0520	0,8814	0,0575	0,9746
55	0,2729	0,0008	0,0030	0,0263	0,0963	0,2729	1,0000	0,0220	0,0806

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 2 (Pendiente + pie)								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def.	Def/Def máx						
25	0,0074	0,0007	0,0974	0,0030	0,4017	0,0035	0,4748	0,0024	0,3249
35	0,0108	0,0009	0,0869	0,0070	0,6512	0,0108	1,0000	0,0080	0,7424
45	0,0593	0,0009	0,0154	0,0200	0,3369	0,0593	1,0000	0,0149	0,2518
55	0,3488	0,0010	0,0029	0,2700	0,7741	0,3488	1,0000	0,0275	0,0788

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 3 (Corona + pendiente + pie)								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def.	Def/Def máx						
25	0,0074	0,0005	0,0694	0,0030	0,4040	0,0036	0,4885	0,0025	0,3339
35	0,0107	0,0010	0,0901	0,0002	0,0141	0,0107	1,0000	0,0080	0,7514
45	0,0495	0,0009	0,0183	0,0221	0,4464	0,0488	0,9855	0,0148	0,2989
55	0,2977	0,0010	0,0032	0,2405	0,8079	0,2977	1,0000	0,0248	0,0831



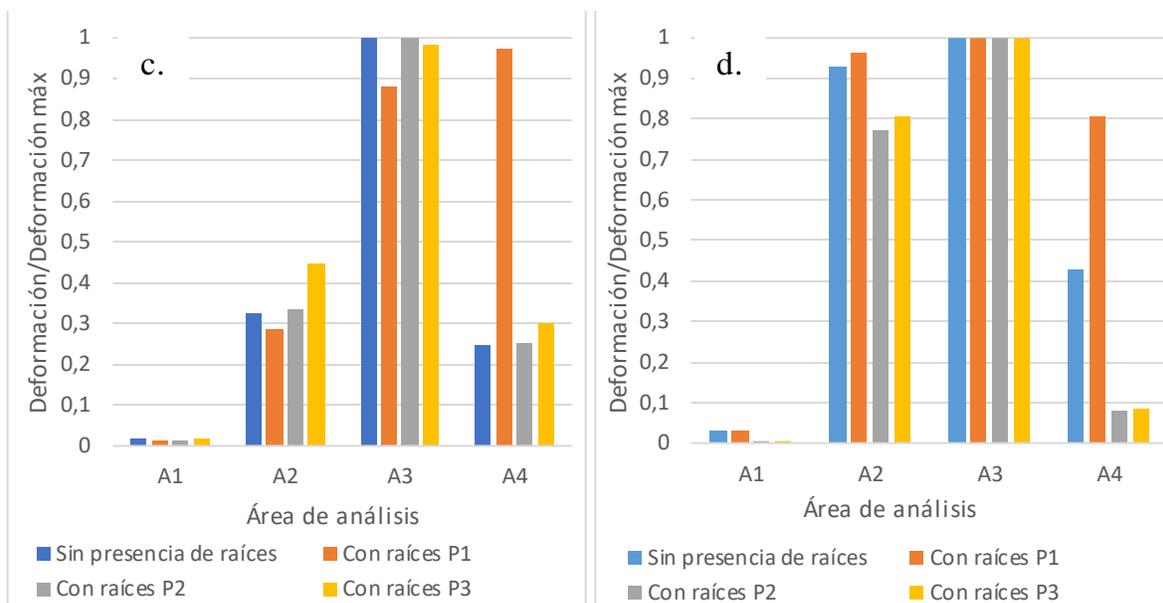


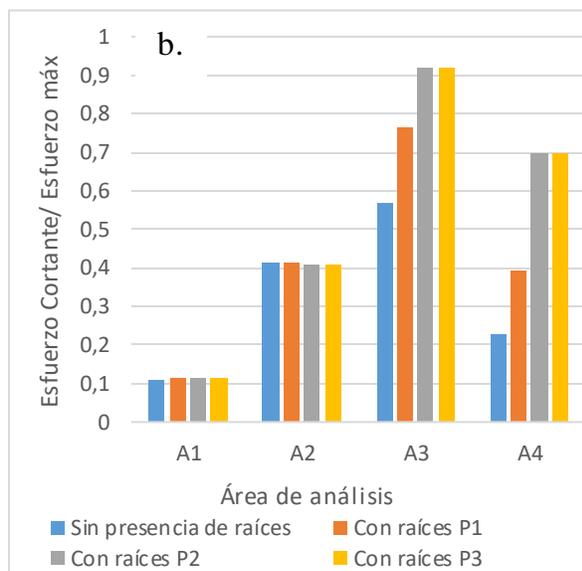
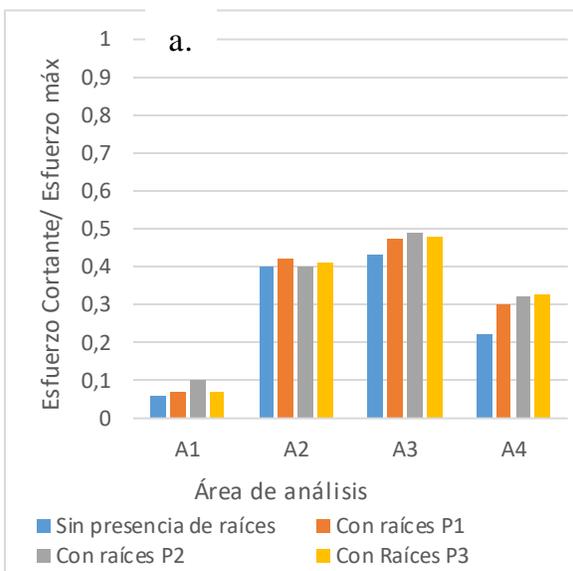
Figura 68. Relación entre los valores máximos de la deformación de cada área, con los valores máximos de la deformación de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.

Tabla 45. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	ESFUERZOS CORTANTES MÁXIMOS (kN/m <sup>2</sup> ) (CON NF)								
	Esf. Máx. modelo	Sin raíces							
		A1		A2		A3		A4	
	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	
25	21,26	1,27	0,06	8,49	0,40	9,16	0,43	4,75	0,22
35	24,03	2,66	0,11	9,99	0,42	13,70	0,57	5,50	0,23
45	14,23	1,96	0,14	8,81	0,62	10,24	0,72	7,03	0,49
55	9,30	0,91	0,10	2,47	0,27	9,30	1,00	8,93	0,96
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 1 (Pendiente)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	21,27	1,54	0,07	8,96	0,42	10,06	0,47	6,42	0,30
35	24,17	2,77	0,11	9,97	0,41	18,44	0,76	9,45	0,39
45	25,30	2,58	0,10	15,85	0,63	25,30	1,00	16,85	0,67
55	29,14	2,31	0,08	8,90	0,31	29,14	1,00	20,82	0,71

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 2 (Pendiente + pie)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	21,27	2,11	0,10	8,47	0,40	10,37	0,49	6,81	0,32
35	24,25	2,76	0,11	9,91	0,41	22,29	0,92	16,98	0,70
45	26,74	2,65	0,10	15,78	0,59	26,74	1,00	21,12	0,79
55	28,04	2,88	0,10	23,21	0,83	28,04	1,00	27,25	0,97

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 3 (Corona + pendiente + pie)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	21,26	1,50	0,07	8,72	0,41	10,23	0,48	6,92	0,33
35	24,27	2,81	0,12	9,88	0,41	22,31	0,92	16,98	0,70
45	26,57	2,63	0,10	16,08	0,61	26,57	1,00	21,18	0,80
55	27,07	2,74	0,10	22,60	0,83	27,07	1,00	26,93	0,99



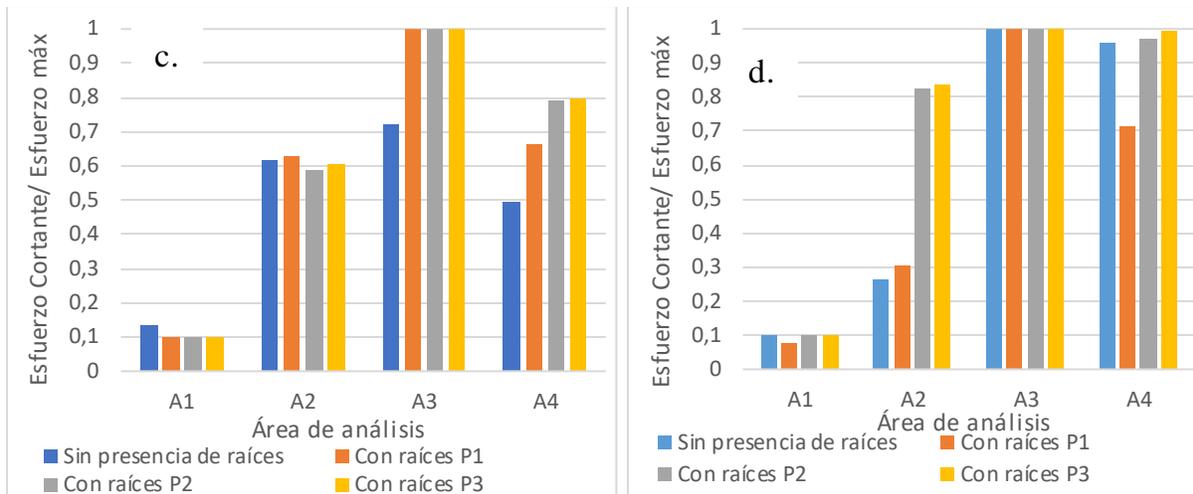


Figura 69. Relación entre los valores máximos del esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos del esfuerzo cortante de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.

### 5.3.3.1 *Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=25^\circ$ , sin nivel freático.*

En la Figura 70, la Figura 71 y la Figura 72, se puede observar que la mayor concentración de esfuerzos y deformaciones se presentan en las áreas 2 y 3, teniendo valores mayores hacia el pie del talud. En estas figuras se puede evidenciar que no hay un cambio significativo en el mecanismo de falla del modelo a pesar de que se haya modelado el efecto de las raíces. Los valores máximos de esfuerzos y deformaciones se mantienen prácticamente constantes en cada una de las cuatro áreas en las que se dividió el talud, para cada posición de las raíces. Esto se debe a que la mayor concentración de esfuerzos y deformaciones del talud que se está analizando se ubica en la parte inferior ya que el talud es estable (los resultados del Factor de Seguridad que se obtuvieron son mayores a 1.9 para todos los modelos con este ángulo de inclinación) y los esfuerzos y deformaciones en la parte superior del talud tienden a ser bajos y de magnitudes similares.

En la Figura 70 y la Figura 71, se puede apreciar un ligero descenso de la concentración de esfuerzos cortantes y deformaciones a nivel general en el área 3 debido a la presencia de las capas de suelo que simulan las raíces, pero como se mencionó anteriormente, no es muy significativo.

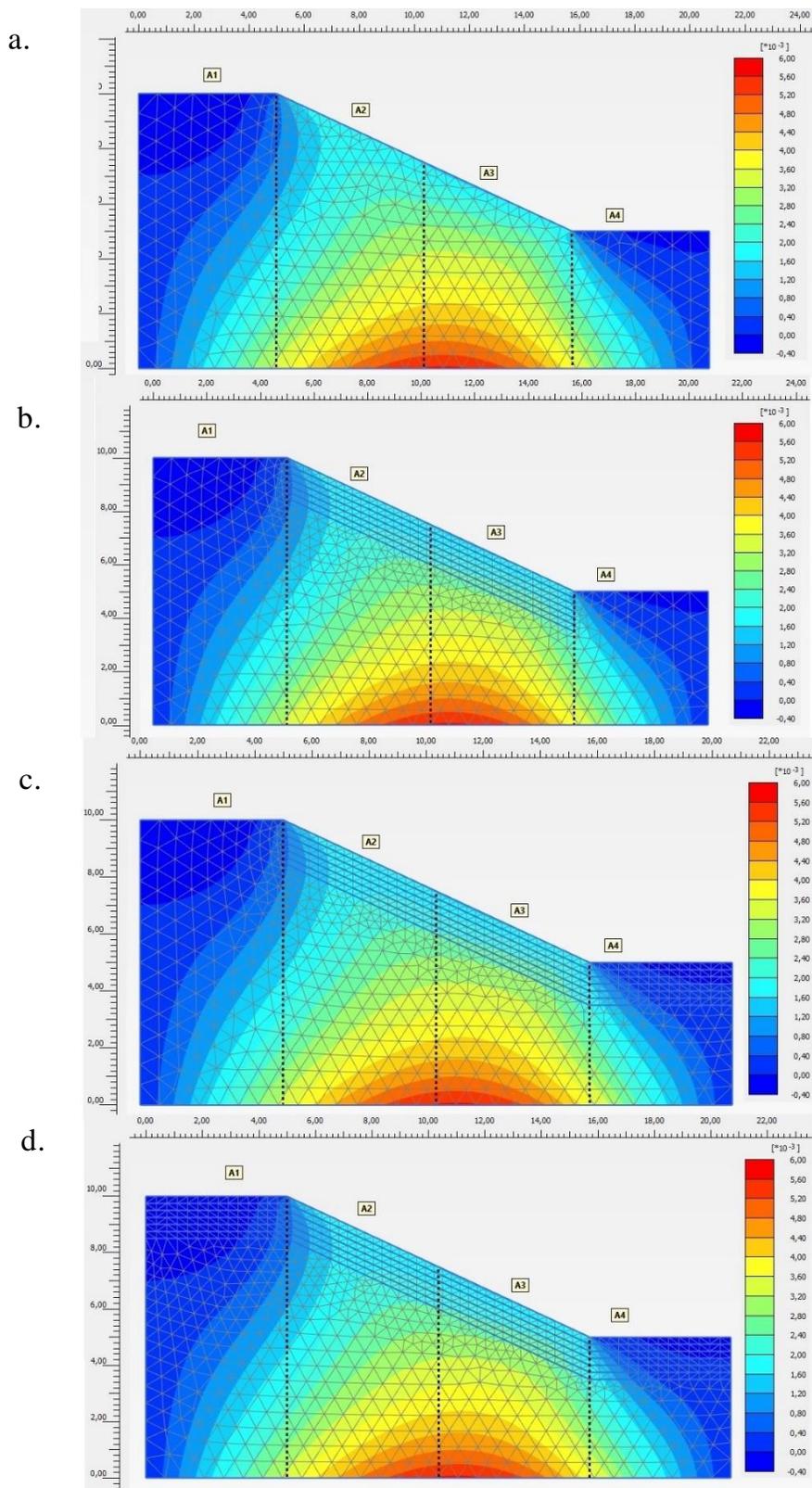


Figura 70. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Sin nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

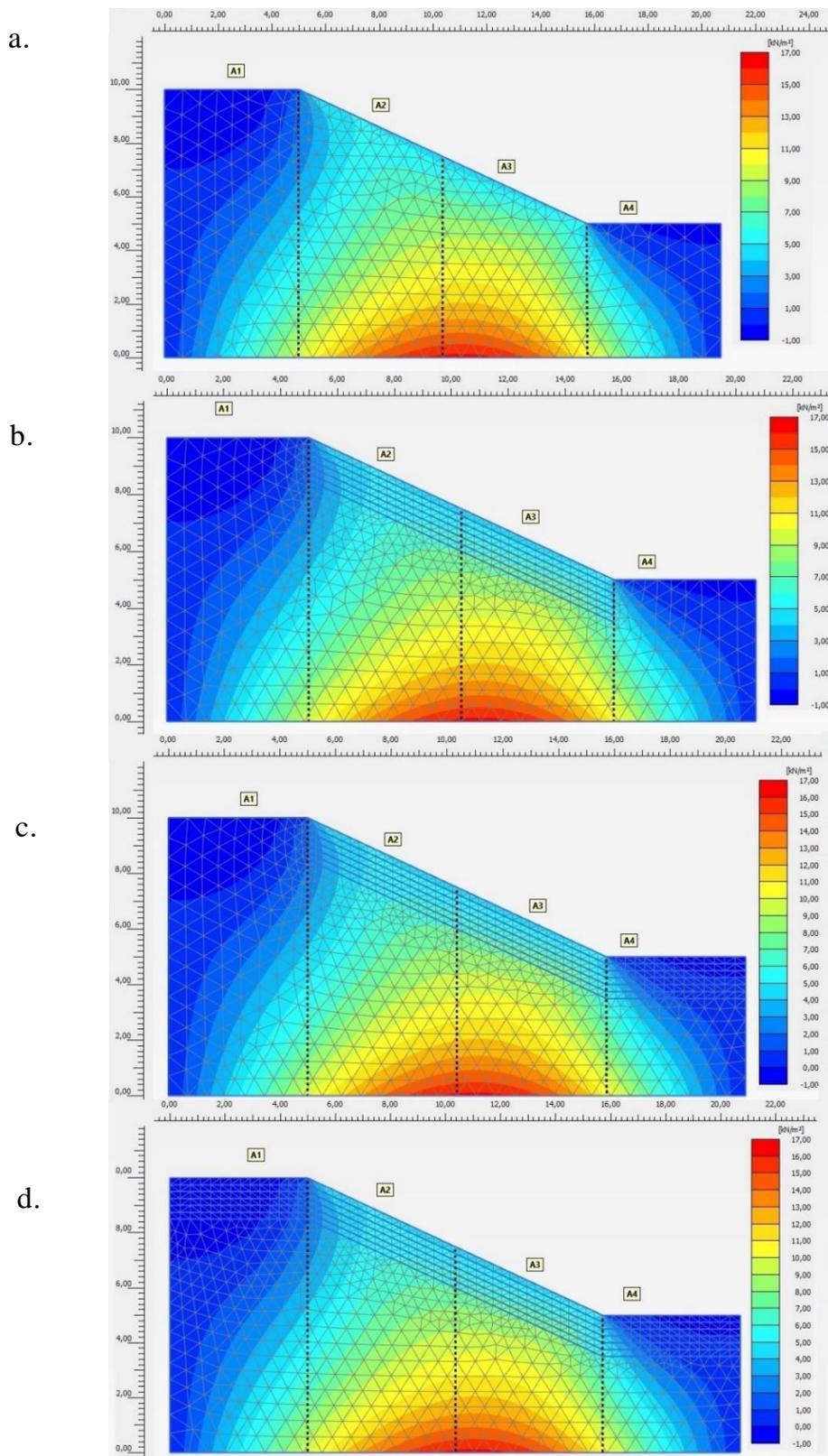


Figura 71. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Sin Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

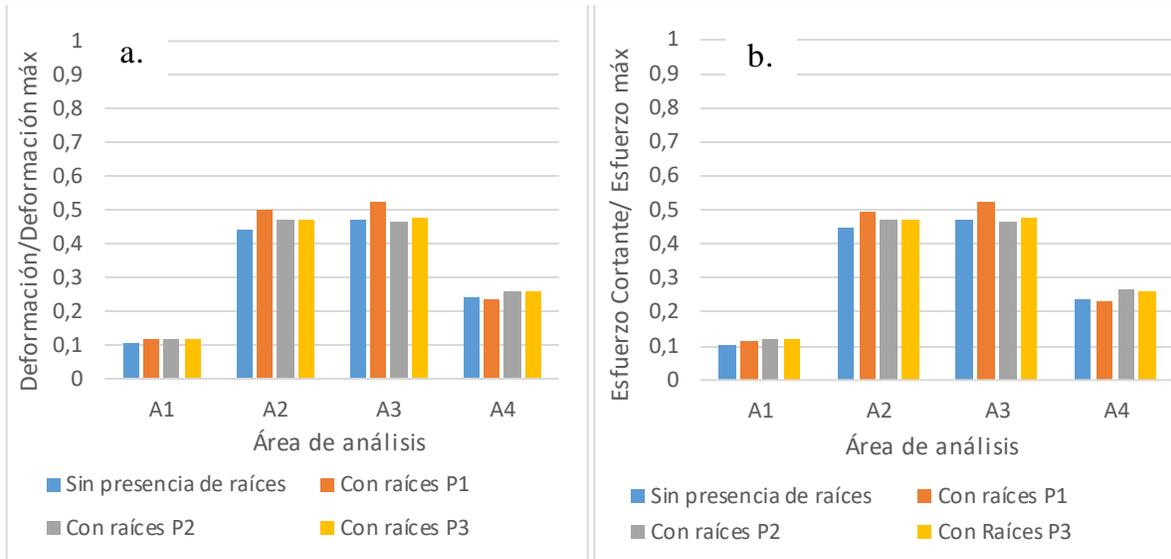


Figura 72. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 25°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

### **5.3.3.2 Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=25^\circ$ , con nivel freático.**

Del mismo modo que en los modelos sin nivel freático, En la Figura 73, la Figura 74 y la Figura 75, se puede observar que la mayor concentración de esfuerzos y deformaciones se presentan en las áreas 2 y 3, teniendo valores mayores hacia el pie del talud. No hay un cambio significativo en el mecanismo de falla del modelo a pesar de la presencia de las raíces. Igualmente, los valores máximos de esfuerzos y deformaciones se mantienen prácticamente constantes en cada una de las cuatro áreas en las que se dividió el talud, para cada una de las posiciones de las raíces por las razones ya mencionadas en el numeral anterior.

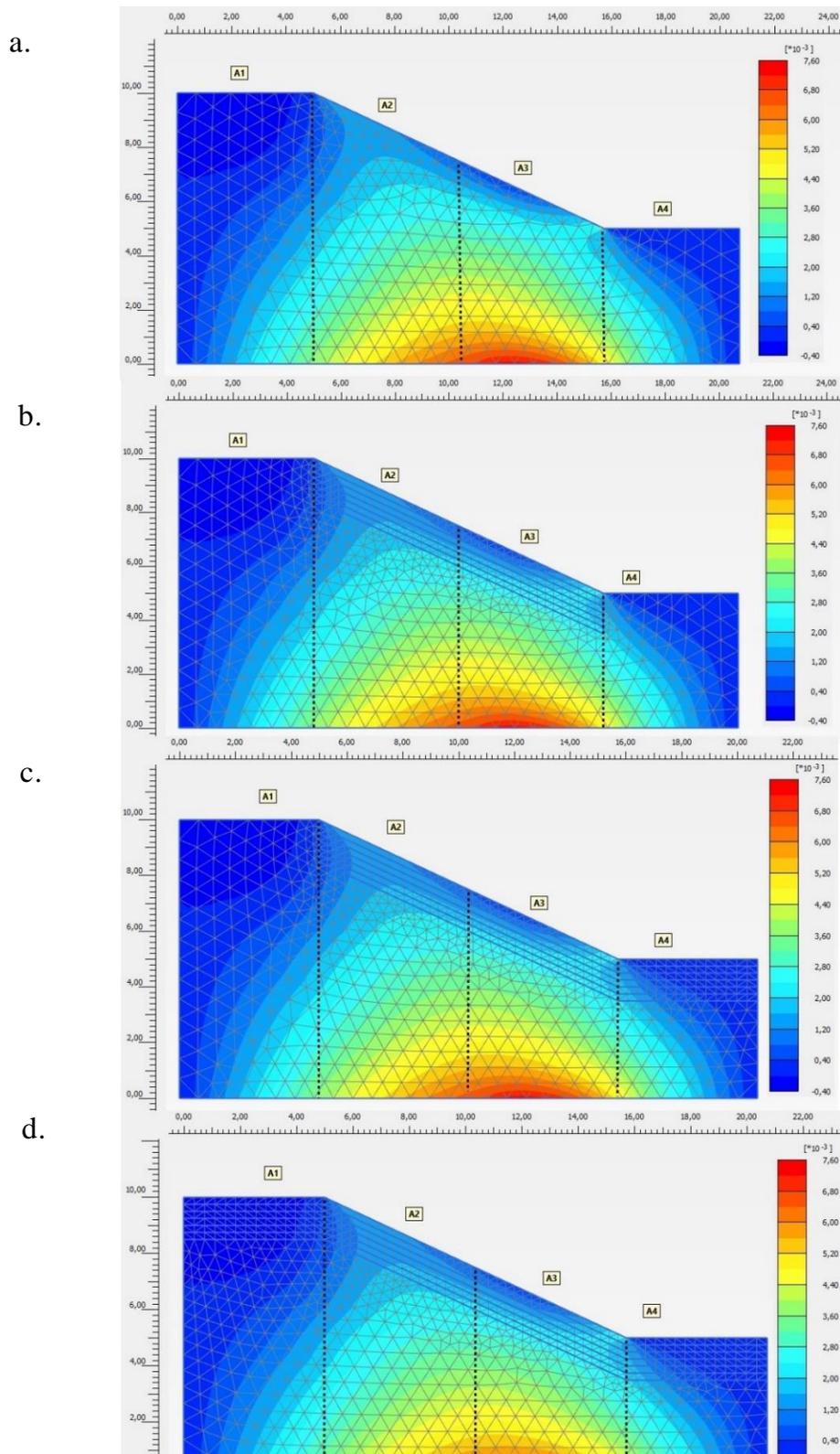


Figura 73. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

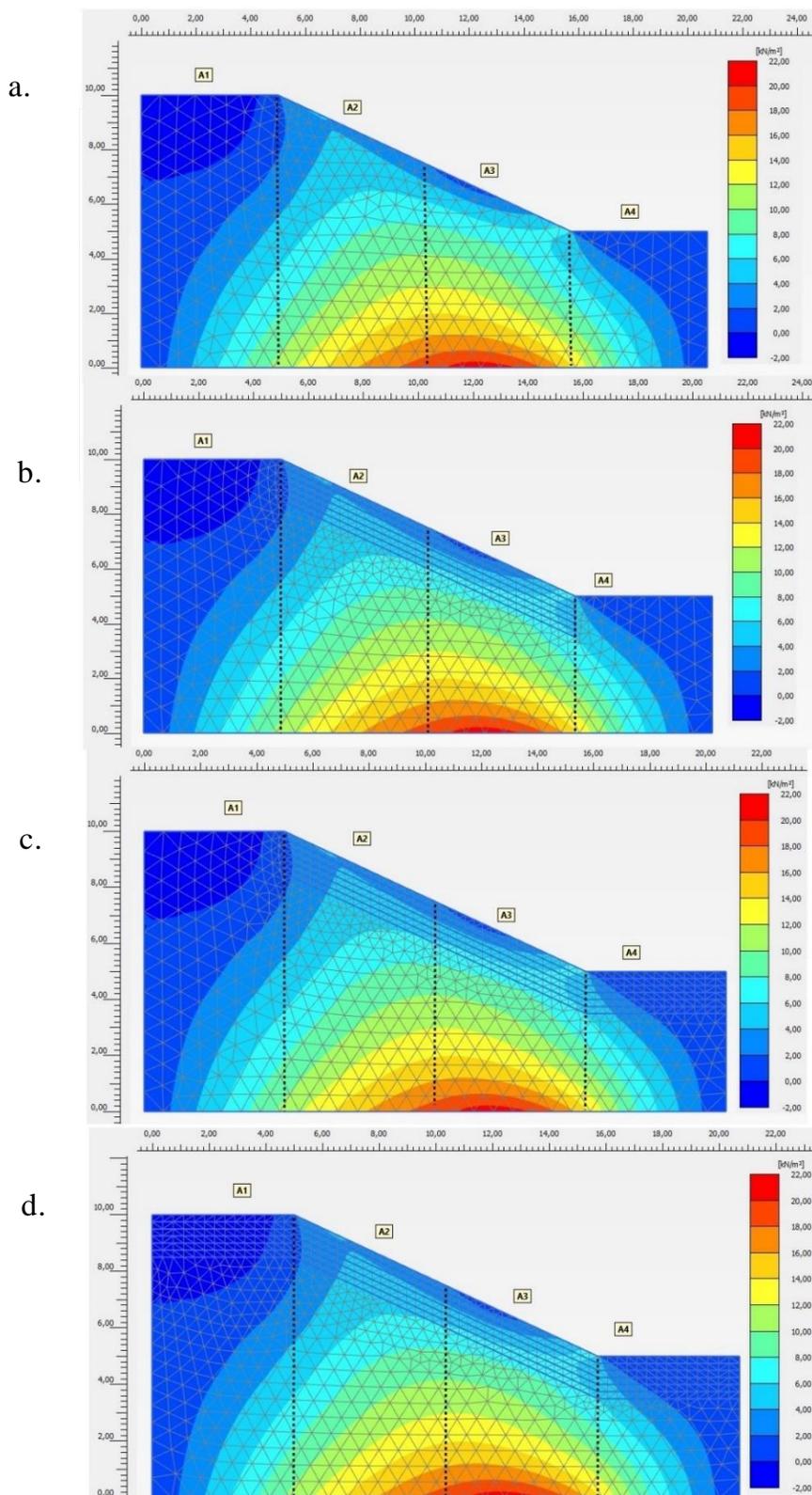
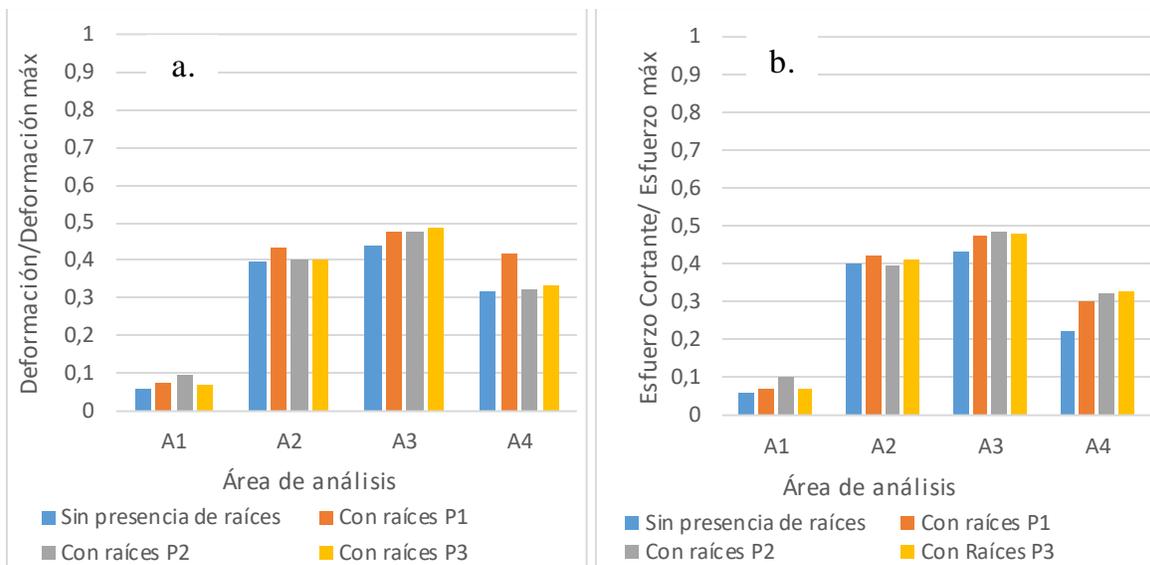


Figura 74. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de  $25^\circ$ . Con Nivel Freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).



*Figura 75.* Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 25°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

### **5.3.3.3 *Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=35^\circ$ , sin nivel freático.***

Para los taludes con ángulos de inclinación de  $35^\circ$ , ya empiezan a ser notorias algunas diferencias en el mecanismo de falla de los modelos que no tienen presencia de raíces y los que si tienen raíces. En la Figura 76, la Figura 77 y la Figura 78, se puede observar la mayor concentración de esfuerzos cortantes y deformaciones se presenta en el área 3, en el pie del talud, y también algunas concentraciones grandes (pero menores al área 3), en las áreas 2 y 4.

En cuanto a las deformaciones, en la Figura 76 y la Figura 78a, se puede observar que la presencia de las raíces hace que estas se concentren hacia el pie del talud, pero, las deformaciones que se presentan son menores que las que se presentan en el talud sin presencia de raíces. Por otro lado, en el caso de los esfuerzos cortantes, en la Figura 77 y la Figura 78b, se puede observar que la mayor concentración de esfuerzos se sigue presentando en el área 3, el pie del talud, y adicionalmente, se puede evidenciar que los esfuerzos cortantes de las áreas 3 y 4 de los modelos con presencia de raíces, son mayores a los del modelo sin presencia de raíces.

Como se ha mencionado a lo largo del presente trabajo de investigación, la presencia de las raíces genera un aumento de la resistencia al corte del suelo, por lo tanto, a pesar de que se evidencie un incremento de los esfuerzos cortantes en el pie y la base del talud por la presencia de las raíces, también se presenta un incremento de la resistencia al corte del suelo, por lo que este incremento de los esfuerzos cortantes no sería un efecto negativo en la estabilidad. Por el contrario, como se evidencia en la Figura 77, la presencia de las raíces hace que estas concentraciones de esfuerzos tiendan a homogenizarse a lo largo del talud y a desplace por debajo de la zona de las raíces, lo cual favorece la estabilidad.

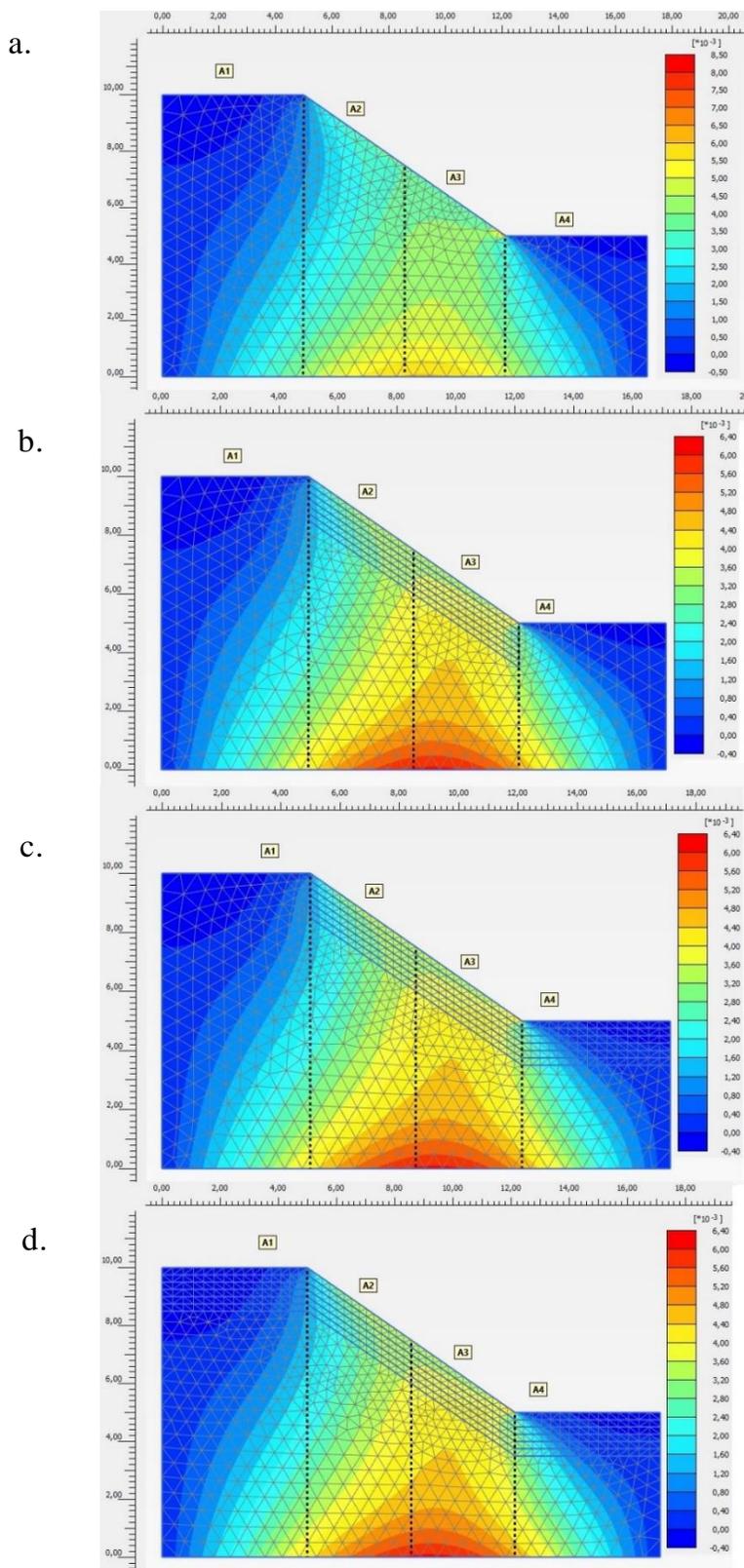


Figura 76. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Sin nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

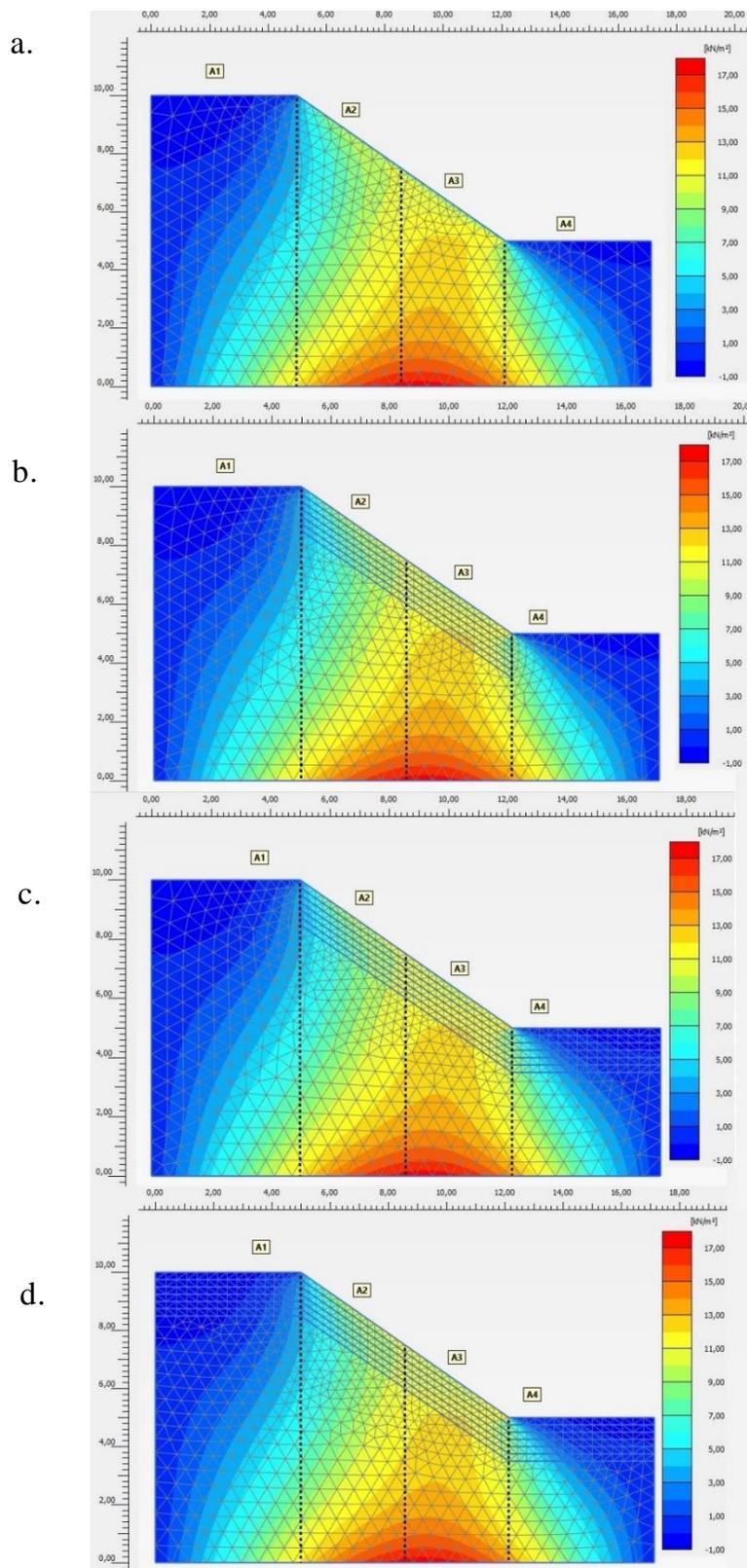
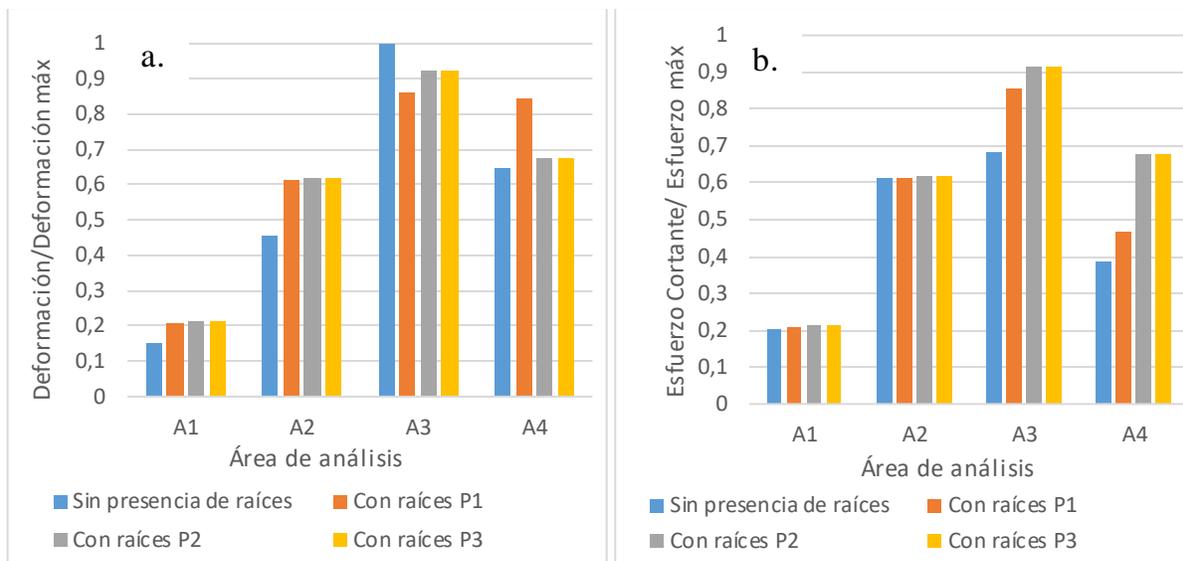


Figura 77. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Sin Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).



**Figura 78.** Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 35°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Sin nivel freático).  
 a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

#### **5.3.3.4 *Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=35^\circ$ , con nivel freático.***

En estos modelos, al igual que en los que no tienen presencia del nivel freático, también se pueden evidenciar diferencias más notorias en el mecanismo de falla para un talud sin raíces y un talud con presencia de raíces. Se sigue observando una mayor concentración de esfuerzos cortantes y deformaciones en el área 3 o pie del talud y algunas concentraciones en las áreas 2 y 4, lo cual se puede evidenciar en la Figura 79, la Figura 80 y la Figura 78.

Las deformaciones que se presentan en estos modelos, tienden a concentrarse más en el pie del talud para los modelos con y sin raíces como se mencionó anteriormente, pero son de mayor magnitud en el caso del talud sin presencia de raíces. Adicional a esto, en la Figura 79, se puede evidenciar que la presencia de las raíces hace que esa gran concentración de deformaciones localizada en el pie del talud, se empiece a desplazar por debajo de la zona de las raíces generando así, una gran disminución de deformaciones en el pie del talud.

En cuanto a los esfuerzos cortantes, al igual que en los modelos sin nivel freático, en la Figura 80 y la Figura 81, se observa una concentración de esfuerzos en el área 3 y el área 4, principalmente en el pie del talud, y que los esfuerzos cortantes que se presentan en los modelos con la presencia de raíces son mayores que los que no tienen presencia de raíces, pero como se mencionó en el numeral anterior, esto no es un efecto negativo porque también se presenta un aumento en la resistencia al corte del suelo. Adicional a esto, se observa la tendencia de uniformar las concentraciones de esfuerzos en el talud.

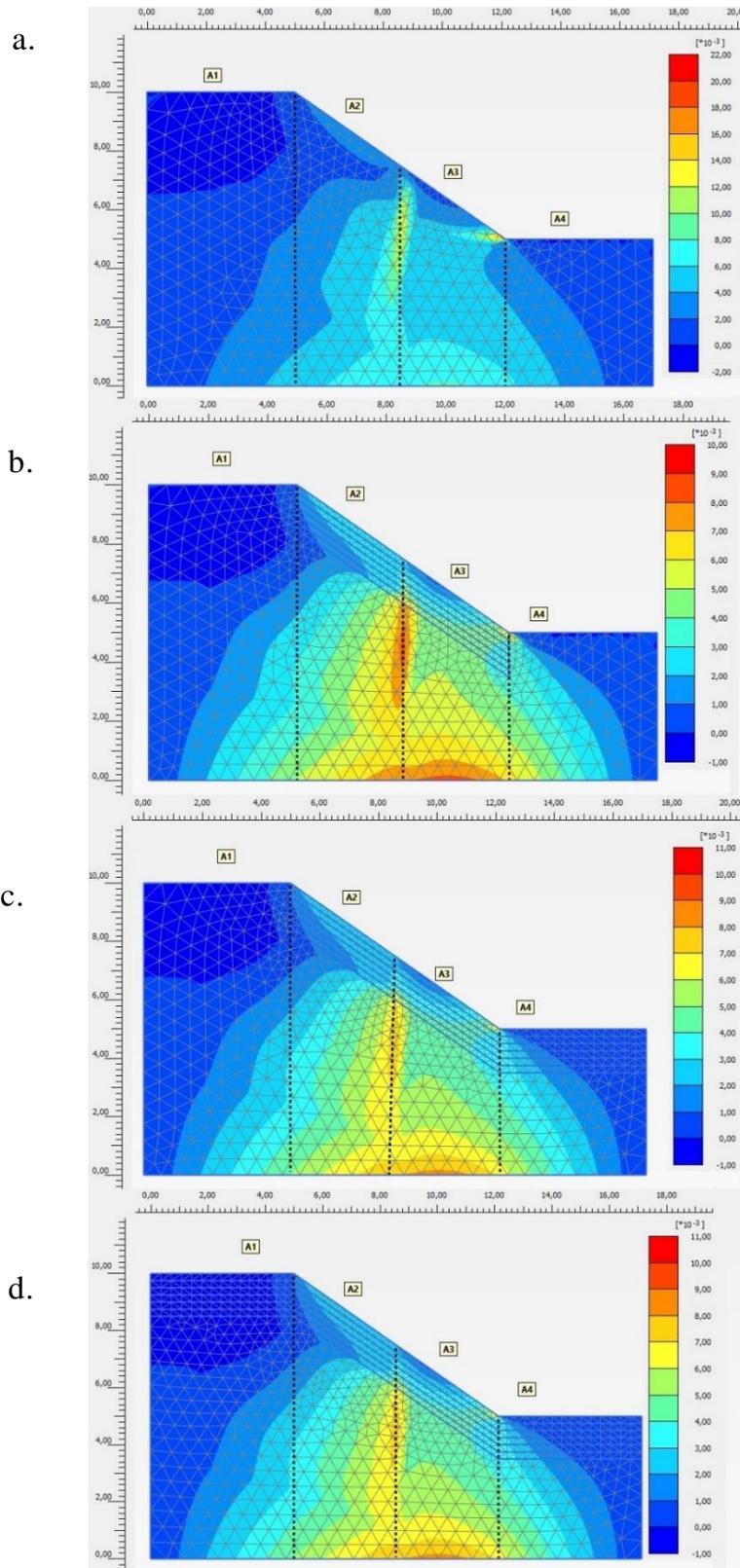


Figura 79. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de  $35^\circ$ . Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

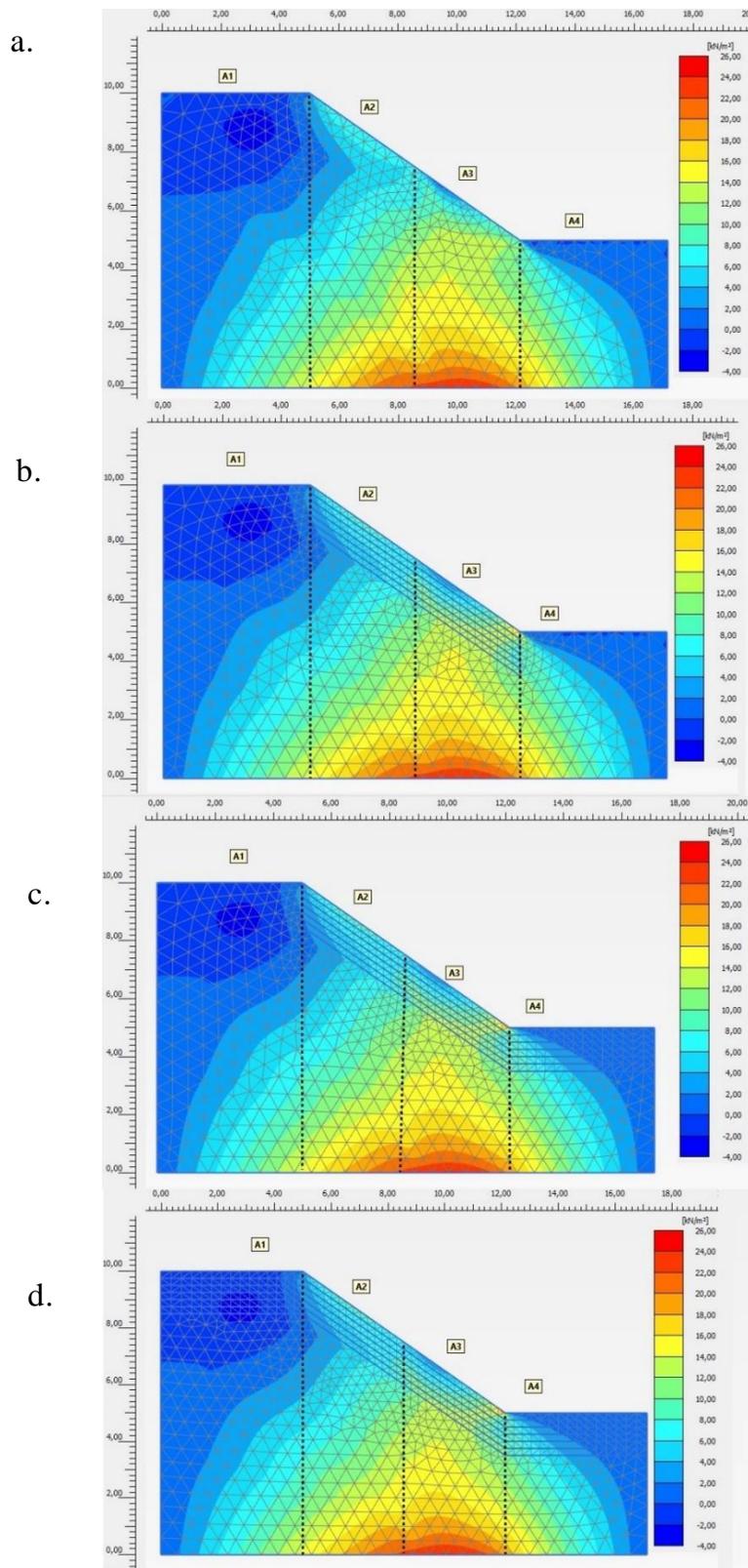
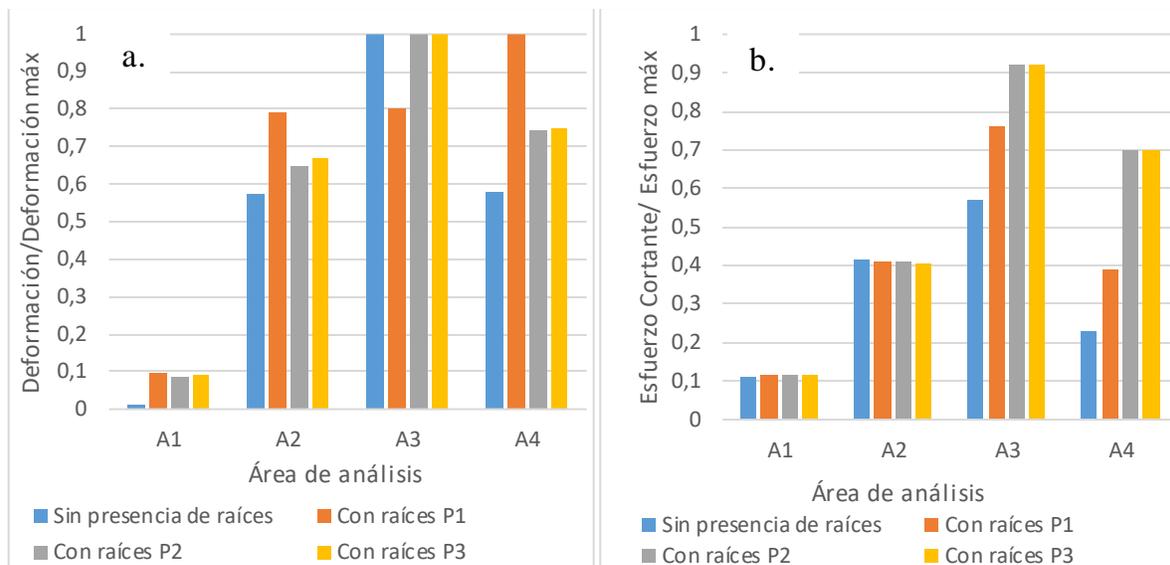


Figura 80. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de  $35^\circ$ . Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).



*Figura 81.* Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 35°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

### ***5.3.3.5 Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=45^\circ$ , sin nivel freático.***

En los modelos realizados de los taludes con ángulos de inclinación de  $45^\circ$ , se puede evidenciar con claridad el mecanismo de falla del modelo sin la presencia de raíces y la contribución y el efecto de las raíces en dicho mecanismo.

En la Figura 82 y la Figura 84a, se puede observar que la mayor concentración de deformaciones se da en el pie del talud, el área 3, en la cual se alcanzan los valores máximos de deformación y además de esto, se puede observar claramente en la Figura 82, como la presencia de las raíces hace que la magnitud de esas deformaciones se reduzca y que desaparezca la concentración de deformaciones que se había generado, cuando las raíces se ubican en las zonas donde se presentan dichas concentraciones que para este caso, es la parte baja del talud.

En la Figura 83 se puede evidenciar la superficie de falla en el modelo sin la presencia de raíces y como esa superficie se disipa o desaparece por la presencia de dichas raíces (se homogenizan los esfuerzos cortantes en la zona). Las mayores concentraciones de esfuerzos se dan en el pie del talud e igual que en los casos anteriores, se evidencia un aumento de los esfuerzos cortantes del talud y un incremento en la resistencia al corte del suelo. Se ratifica que el efecto de las raíces es más notorio a medida que el talud es más inestable, en este caso, por contar con un mayor ángulo de inclinación.

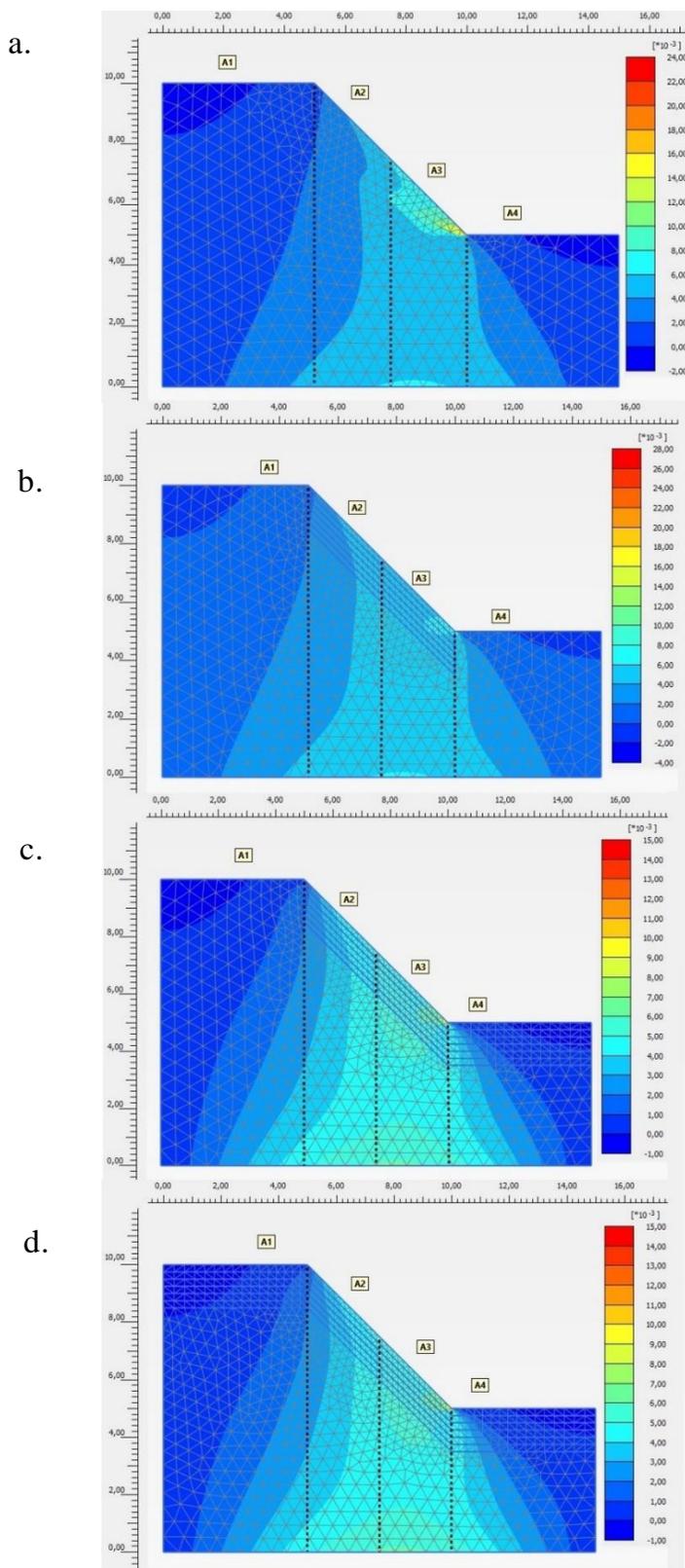
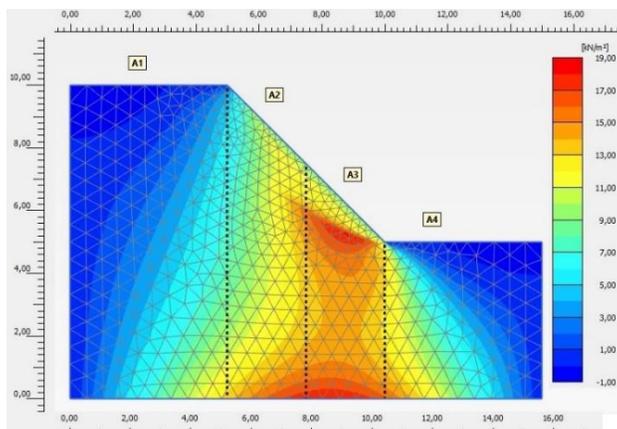
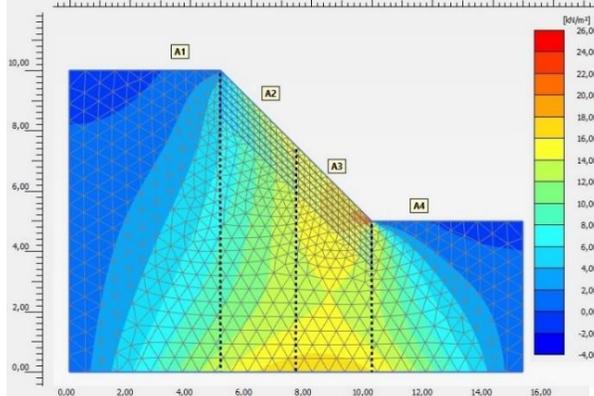


Figura 82. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de  $45^\circ$ . Sin nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

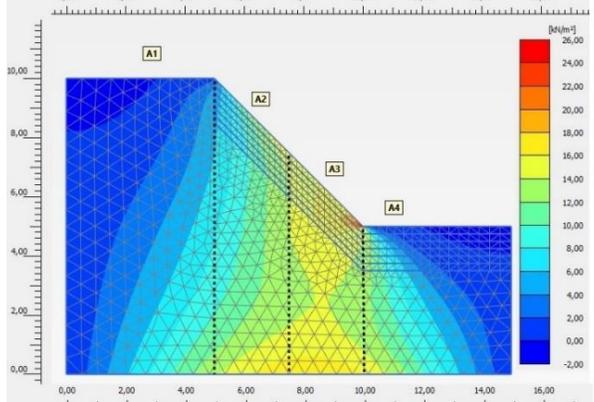
a.



b.



c.



d.

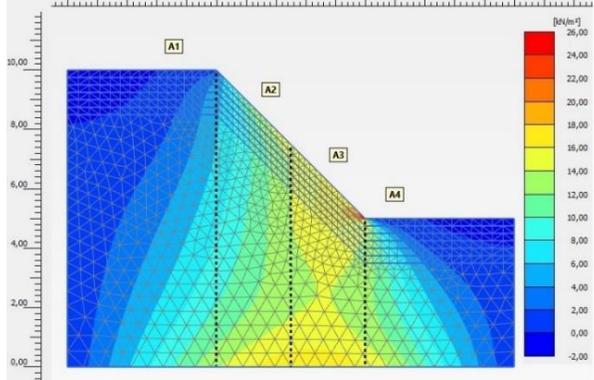
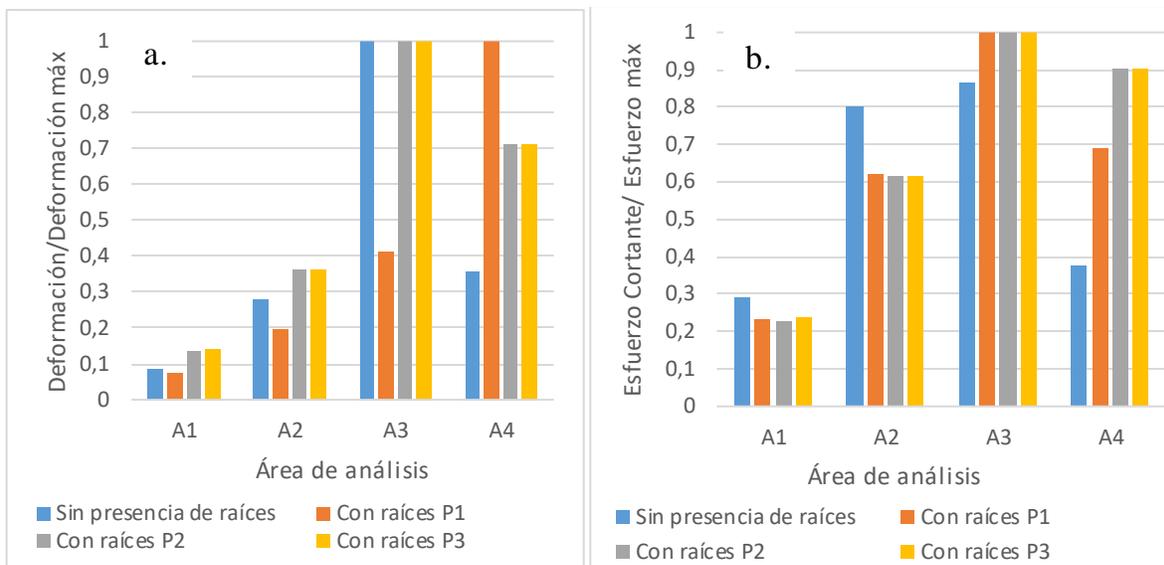


Figura 83. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Sin Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).



**Figura 84.** Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

### **5.3.3.6 Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=45^\circ$ , con nivel freático.**

En la Figura 85, Figura 86 y Figura 87, se puede observar que en estos modelos la mayor concentración de esfuerzos y deformaciones se da, igualmente, en el pie del talud y adicional a esto, en el caso de las deformaciones generadas en el talud, se puede evidenciar en la Figura 85, que en el modelo sin la presencia de raíces se marca una superficie de falla con los valores más altos de deformaciones en esta zona, pero en los modelos con la presencia de raíces, esta superficie de falla se desplaza a la zona donde se divide el área 2 y el área 3, y por debajo de la zona que comprenden las raíces.

En cuanto a los esfuerzos cortantes, caso contrario a los mecanismos descritos anteriormente, se evidencia que con la presencia de las raíces la concentración de esfuerzos cortantes tiende a localizarse en el pie del talud en comparación con el modelo sin la presencia de raíces, pero tiende a homogenizar los esfuerzos del área 4.

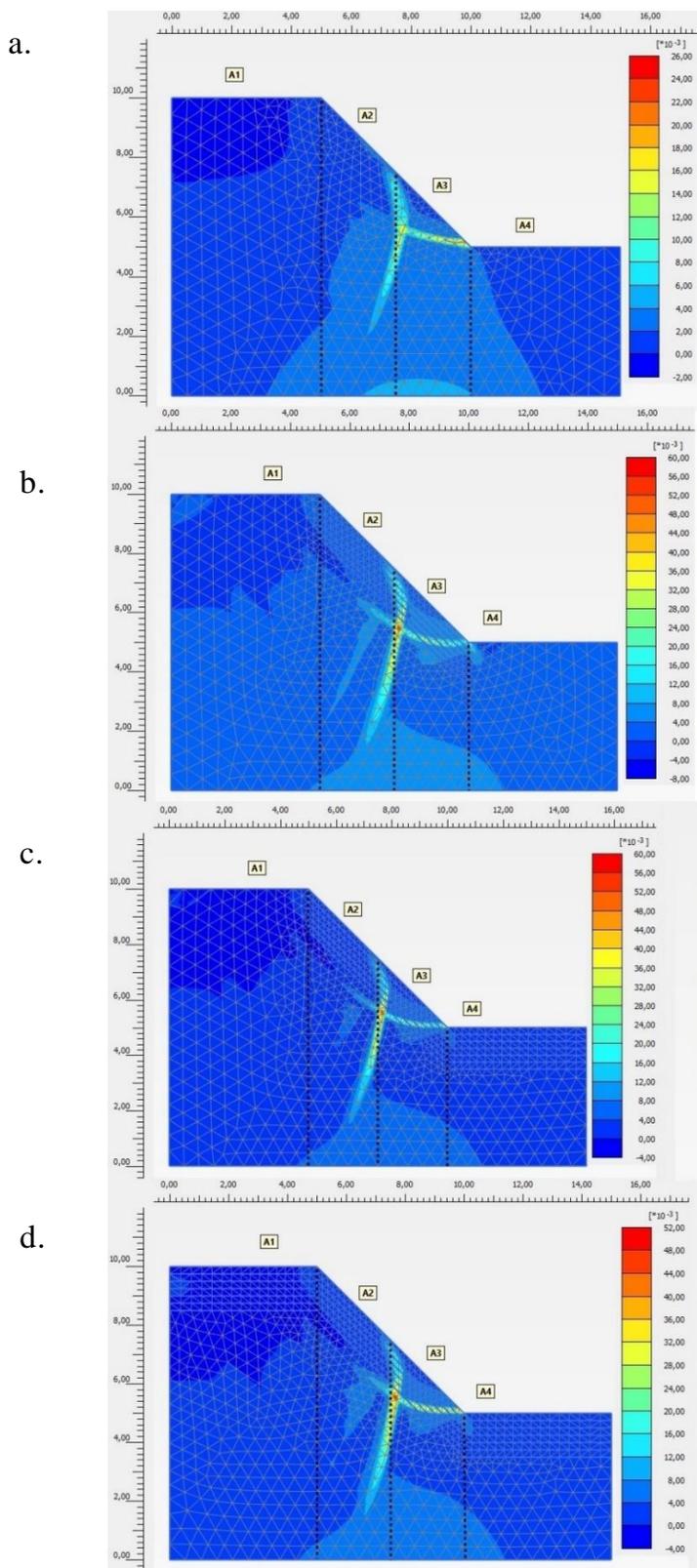


Figura 85. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

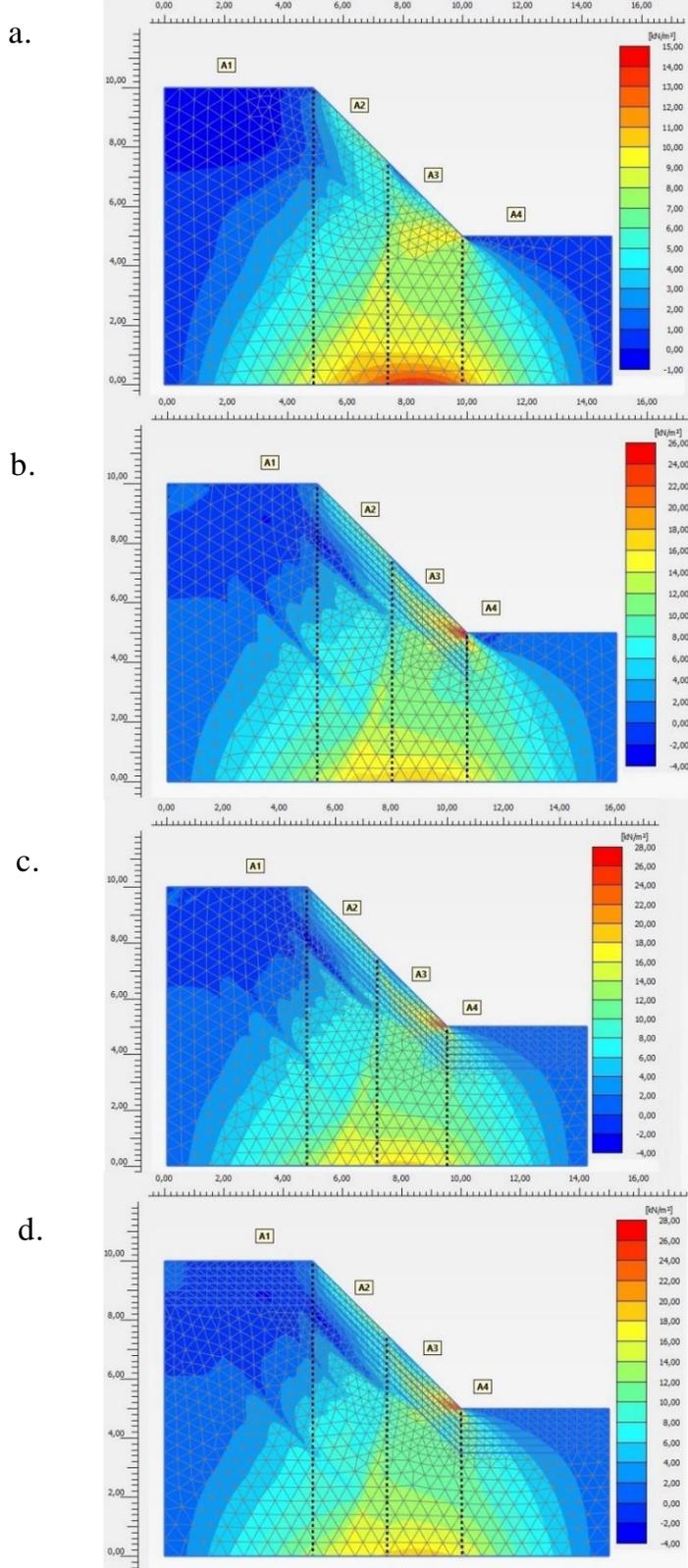
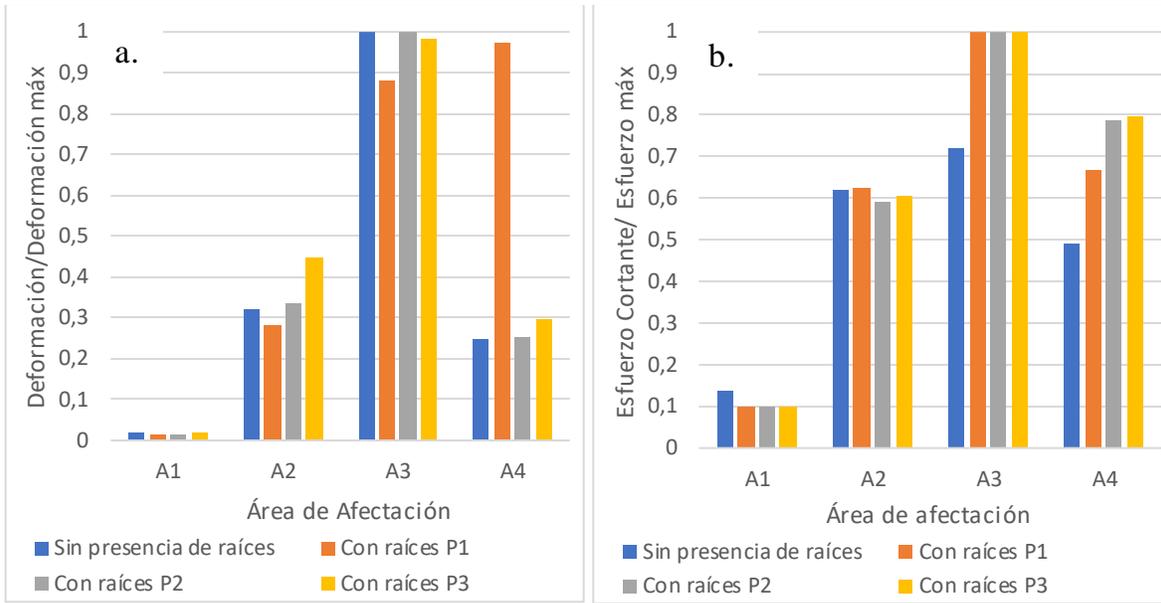


Figura 86. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).



**Figura 87.** Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

### ***5.3.3.7 Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=55^\circ$ , sin nivel freático.***

Del mismo modo que el talud con pendiente de  $45^\circ$ , en los modelos realizados de los taludes con ángulos de inclinación de  $55^\circ$ , en la Figura 88, Figura 89 y Figura 90, se puede evidenciar claramente el mecanismo de falla del modelo sin la presencia de raíces y la contribución y el efecto de las raíces en el modelo.

La mayor concentración de esfuerzos cortantes y deformaciones se presenta en el área 3 o pie del talud. En el modelo sin vegetación se puede observar una gran concentración de deformaciones localizadas en el pie del talud pero que, con la presencia de las raíces, esta se va reduciendo en gran medida como se puede observar en la Figura 88.

Por otra parte, en la Figura 89 y la Figura 90b, se evidencia una clara disminución en la concentración de esfuerzos de las áreas 2 y 3 del modelo sin de raíces, generado por la presencia de estas en el talud. Para este caso, esa gran concentración de esfuerzos cortantes se reduce en gran medida localizándose únicamente en el pie del talud y se homogeniza en un gran porcentaje la zona inclinada del talud, comparado con la condición inicial del talud sin presencia de raíces. También se puede observar que se presenta un aumento en los esfuerzos cortantes, como el resto de los modelos, pero del mismo modo que se comentó anteriormente, se genera a su vez un incremento de la resistencia al corte.

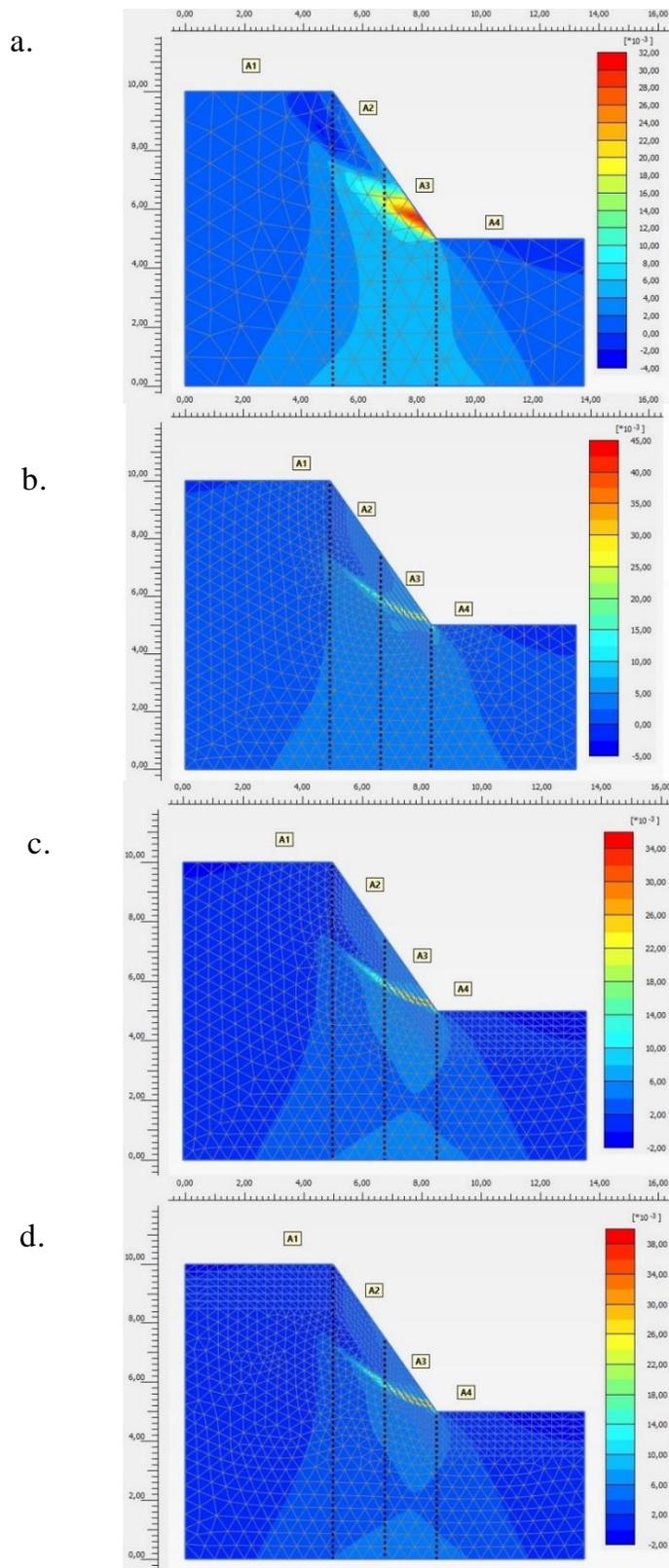
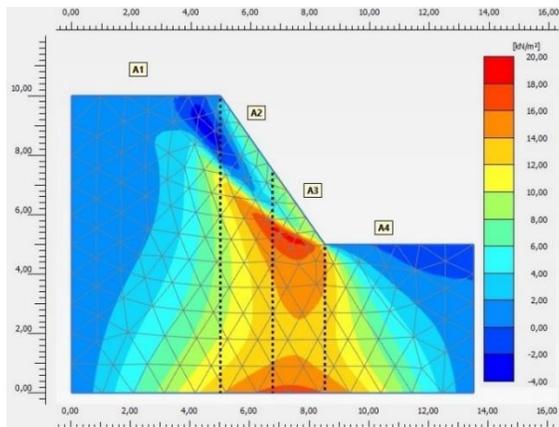
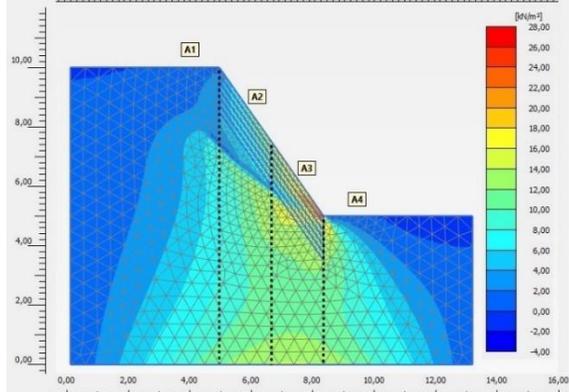


Figura 88. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 55°. Sin nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

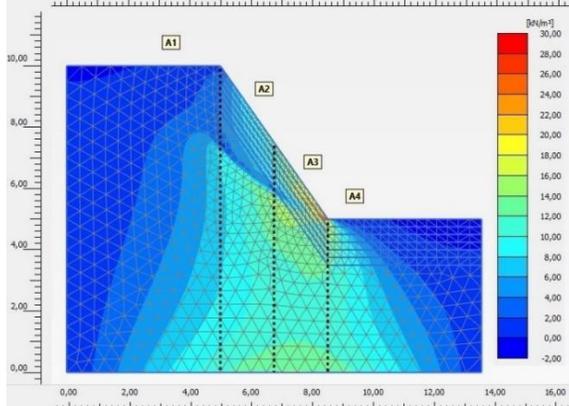
a.



b.



c.



d.

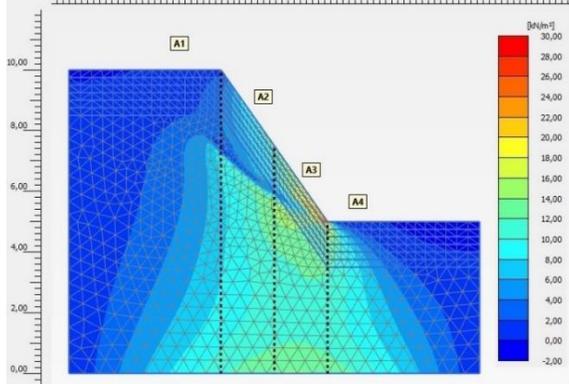
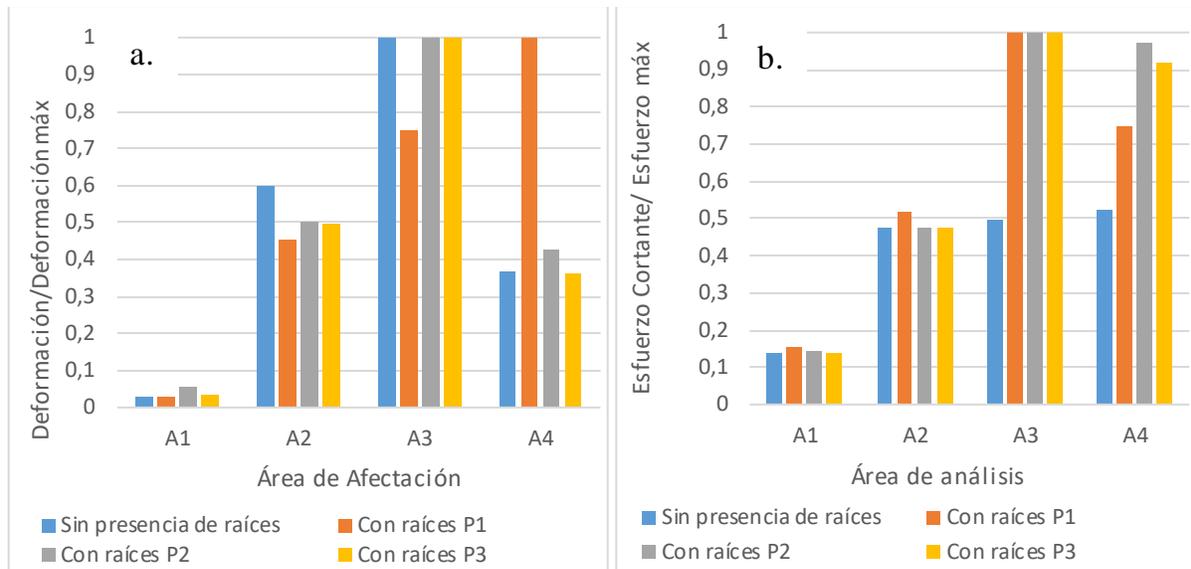


Figura 89. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 55°. Sin Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).



**Figura 90.** Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 55°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

### **5.3.3.8 Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=55^\circ$ , con nivel freático.**

En estos modelos, la concentración de deformaciones y esfuerzos cortantes, se presenta en las áreas 2, 3 y 4, como se puede observar en la Figura 91, Figura 92 y Figura 93

En cuanto a la deformación, se puede evidenciar que, en el modelo sin presencia de raíces, hay una gran concentración en el pie del talud, la cual disminuye en cierta medida por la presencia de las raíces, sin embargo, también se puede observar que los desplazamientos que se pueden generar por la presencia de raíces son mayores que en el caso en donde no hay presencia sin raíces.

Por otro lado, los esfuerzos cortantes que se presentan en el talud, en la Figura 91 se evidencia que el mecanismo de falla inicial se sitúa en el pie del talud con una concentración de esfuerzos en esa zona, la cual tiende a homogenizarse o reducirse en cierta medida con la presencia de las raíces, pero de igual forma, se localiza en la misma posición. El comportamiento observado es muy similar a los modelos sin presencia del nivel freático.

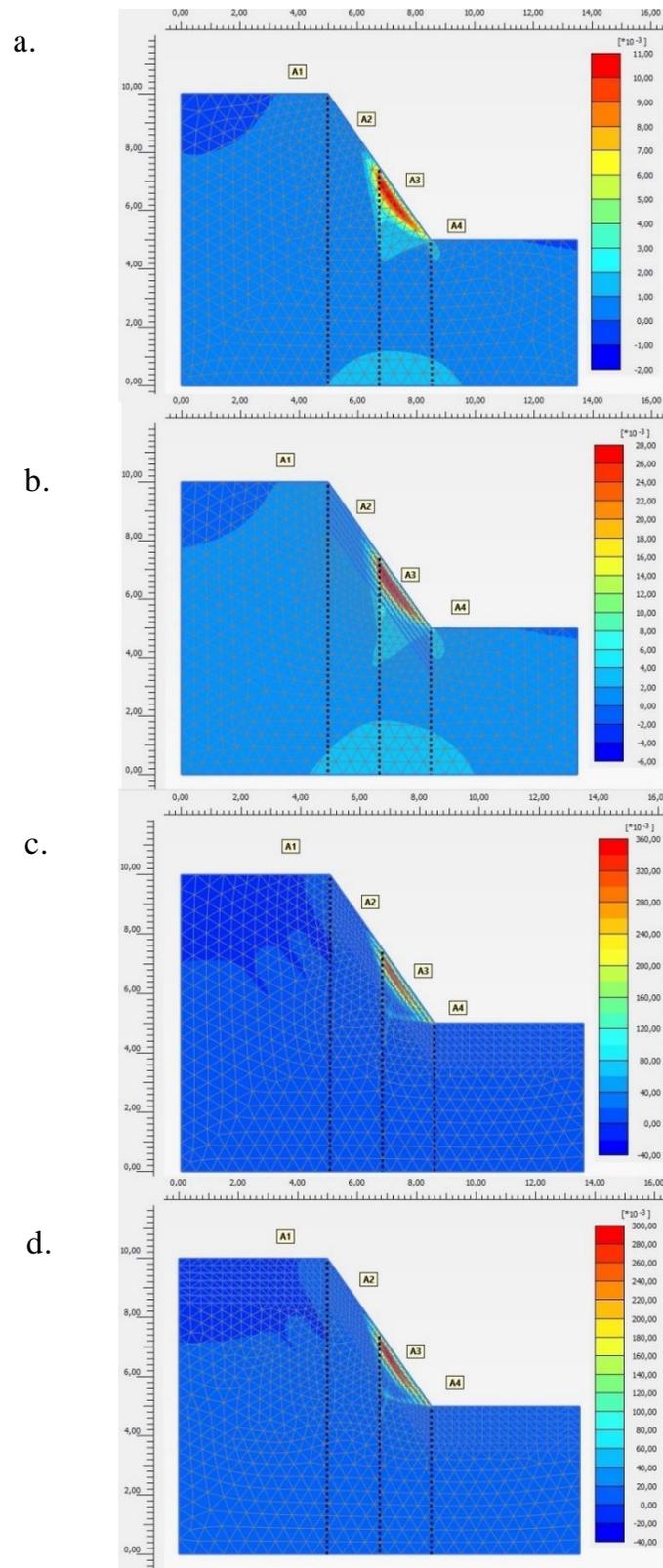
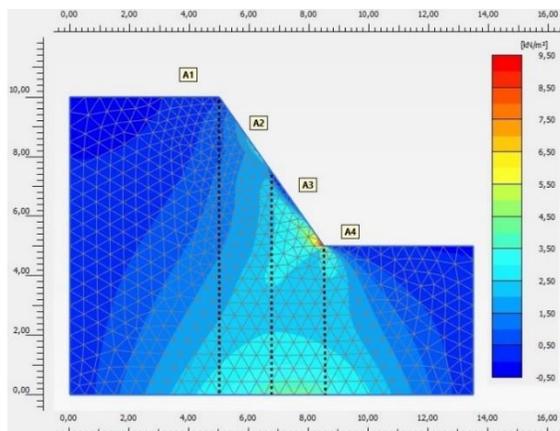
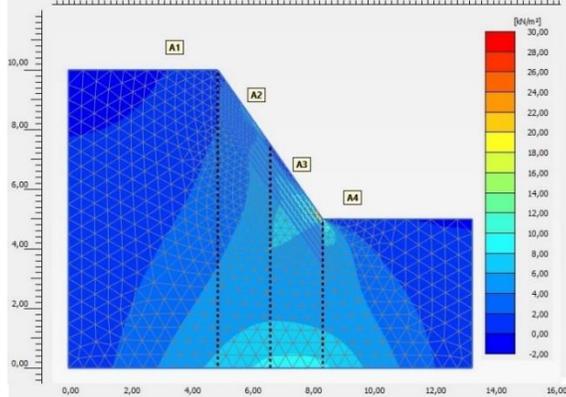


Figura 91. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

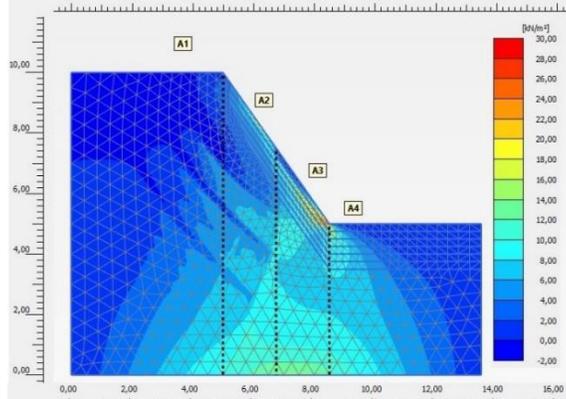
a.



b.



c.



d.

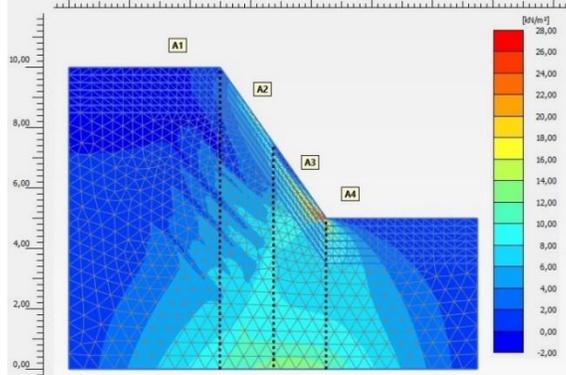


Figura 92. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con Nivel freático. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

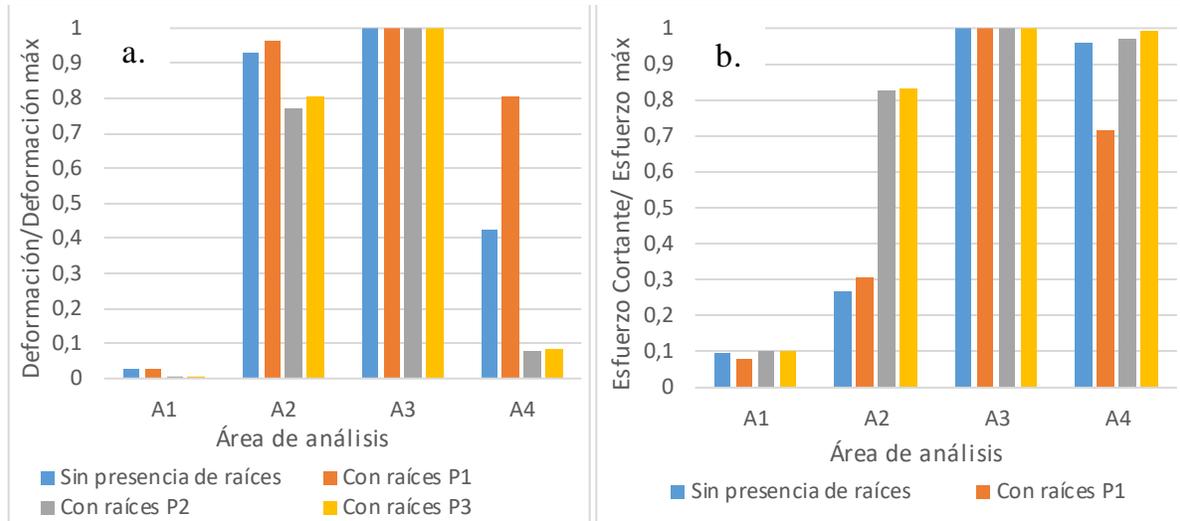


Figura 93. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de  $45^\circ$ , en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación incremento de la cohesión – Plaxis. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

#### 5.4 Modelación 4: Modelación del sistema de raíces como anclajes – Plaxis 2D

En la Figura 94a, la Figura 94b y la Figura 94c, se pueden observar algunos de los modelos realizados en Plaxis para la obtención de los Factores de Seguridad, concentraciones de esfuerzos y deformaciones. Los tres modelos tienen un ángulo de inclinación de  $45^\circ$  y no tienen presencia del nivel freático. Al igual que en los modelos realizados en Slide de las raíces como anclajes, en ellos se pueden observar los anclajes que simulan la presencia de las raíces, los cuales tienen una longitud de 1.5 m, son completamente verticales y que están separados a una distancia horizontal de 1 m; en estas figuras también se observan las tres posiciones en las que se ubicaron las raíces.

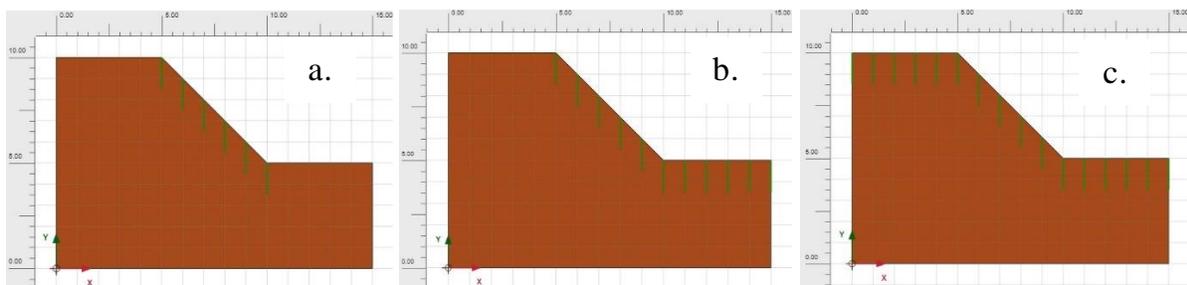


Figura 94. Posición de las raíces modeladas mediante la modelación del sistema de raíces como anclajes - Plaxis, en el talud de análisis. a) Modelo 93 - P1 (pendiente) -  $45^\circ$ , b) Modelo 101 - P2 (pendiente+pie)-  $45^\circ$ , c) Modelo 109 - P3 (corona+pendiente+pie) -  $45^\circ$

#### 5.4.1 Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados.

En la Tabla 46 y la Tabla 47, se dan a conocer los resultados del Factor de Seguridad obtenidos en las modelaciones, para cada una de las posiciones de las raíces y los diferentes ángulos de inclinación del talud, para la condición con nivel freático y sin nivel freático. En la Figura 95 y Figura 96, se muestra la representación gráfica de los resultados mostrados en las tablas mencionadas.

Nuevamente se aclara que los espacios en blanco en estas tablas, corresponden a valores inferiores a uno. Adicionalmente se presentó un inconveniente en los modelos con ángulos de inclinación de 25°, para la posición 1, 2 y 3 de las raíces, y sin nivel freático; el programa no corría el modelo y arrojaba un error, probablemente por algún código que se estaba ejecutando de manera errónea, por lo que para estos modelos tampoco arrojó el resultado del Factor de Seguridad. Por esta razón, también están vacíos.

Tabla 46. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	FACTOR DE SEGURIDAD - Sin NF			
	Sin raíces	Posición de las raíces		
		Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	1,954	-	-	-
35	1,436	1,501	1,502	1,500
45	1,119	1,188	1,178	1,187
55	-	-	-	-

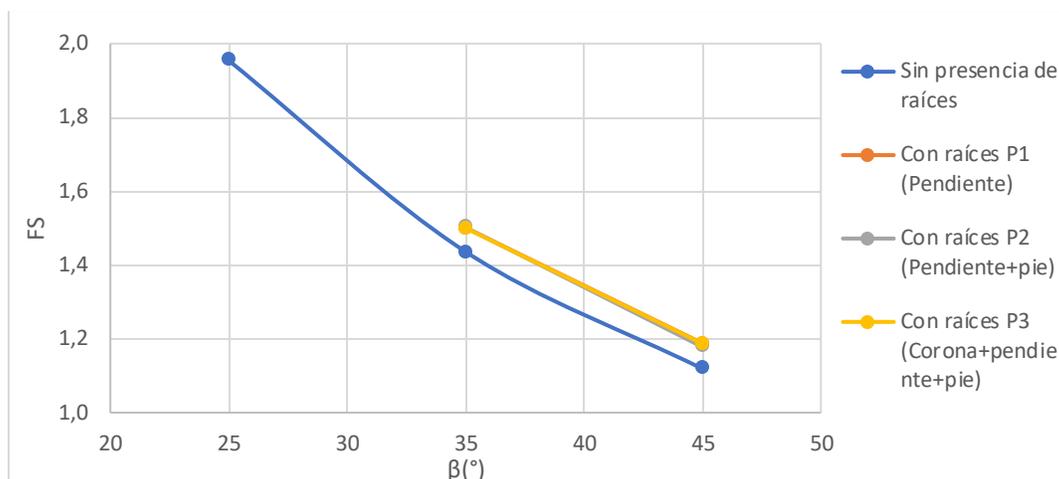


Figura 95. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

Tabla 47. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	FACTOR DE SEGURIDAD - Con NF			
	Sin raíces	Posición de las raíces		
		Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	1,474	1,506	1,533	1,521
35	1,039	-	-	1,057
45	-	-	-	-
55	-	-	-	-

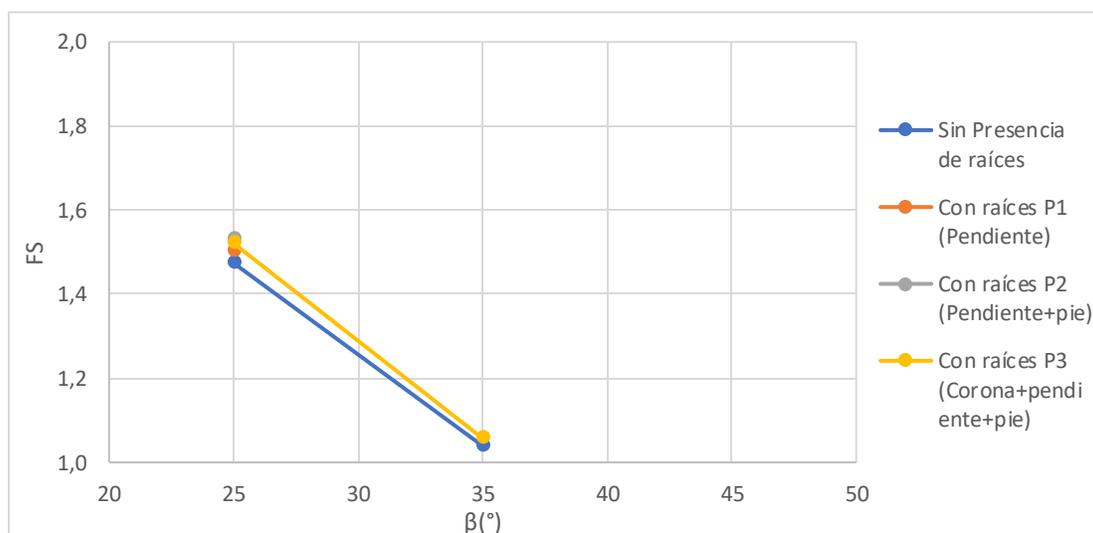


Figura 96. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

Como se puede observar en la Figura 95 y la Figura 96, el Factor de seguridad es más alto en los modelos con presencia de las raíces que en los modelos sin la presencia de ellas. Para ambas condiciones, tanto con nivel freático como sin nivel freático, se puede observar un aumento en los factores de seguridad de los modelos en que se representó la presencia de las raíces, aunque no es tan notorio como el caso de los otros tipos de modelación. El hecho de que haya pocos datos que representar, debido a que los factores de seguridad son inferiores a 1 de acuerdo a lo mencionado anteriormente, genera que se presente mayor dificultad para compararlos.

Por otro lado, se observa que los resultados son muy similares para las tres posiciones de la raíz, por lo que no se podría indicar que hay una posición en particular que genere un mayor incremento del Factor de Seguridad.

En cuanto al ángulo de inclinación del talud, se puede apreciar que a pesar de que el ángulo de inclinación aumente, la presencia de las raíces hace que el Factor de Seguridad sea mayor con respecto a los modelos que no tienen raíces. Para este tipo de modelación, siempre se evidenció un aumento de los Factores de Seguridad, aunque el ángulo de inclinación aumentara.

#### **5.4.2 Análisis del incremento del Factor de seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.**

Para este tipo de modelación, la presencia de las raíces genera un incremento en los Factores de Seguridad obtenidos en cada una de las modelaciones, independientemente de la posición que ocupen y la presencia o no del nivel freático. En la Tabla 28 y en la Tabla 29, se dan a conocer los incrementos del factor de seguridad obtenidos para cada una de las posiciones de la raíz y cada uno de los ángulos de inclinación del talud. En la Figura 47 y la Figura 48, se puede observar la representación gráfica de los resultados. Para el cálculo de los incrementos del factor de seguridad se toman como referencia los modelos que no tienen presencia de raíces (modelos de control).

Tabla 48. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

Ángulo de inclinación el talud (°)	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) - SIN NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona + pendiente + pie
25	-	-	-
35	4,53	4,60	4,46
45	6,17	5,27	6,08
55	-	-	-

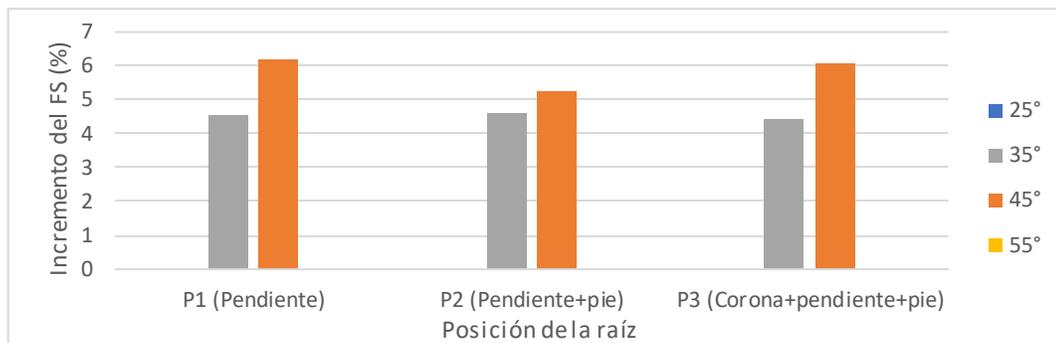


Figura 97. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

Tabla 49. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

Ángulo de inclinación el talud (°)	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) - Con NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona + pendiente + pie
25	2,17	4,00	3,19
35	-	-	1,73
45	-	-	-
55	-	-	-

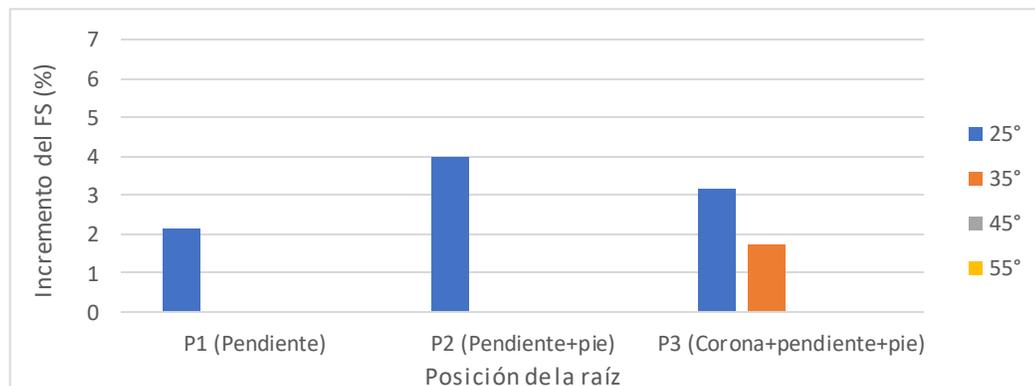


Figura 98. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

En la Figura 97 y la Figura 98 se observa que, a diferencia de los otros tipos de modelaciones y como se mencionaba en el numeral anterior, no hay una posición de las raíces que genere un mayor incremento en el factor de seguridad con respecto a las otras. En los modelos sin la presencia de nivel freático, se puede observar que hay un mayor incremento en las posiciones de las raíces 1 (pendiente) y 3 (corona + pendiente + pie), pero este incremento no es muy significativo comparado con el incremento generado por la posición 2 de las raíces (pendiente + pie); existe una variación entre los incrementos de estos modelos del 6% al 8%. En cuanto a los modelos con nivel freático se puede evidenciar lo contrario, el mayor incremento se da en la posición 2 de las raíces (pendiente + pie) y el valor de dicho incremento tiende a ser mayor en un 60% - 80%, que los incrementos generados por las posiciones de las raíces 1 (pendiente) y 3 (corona + pendiente + pie).

Adicional a esto, es importante mencionar que el mayor incremento del factor de seguridad obtenido por este tipo de modelación está en el orden del 6%, el cual se encuentra por debajo de las otras modelaciones, sin embargo, también es un resultado similar a los que se han obtenido en las investigaciones de Chok et al., (2004); Gentile, et al., (2010) y Sambasivarao, (2015).

#### **5.4.3 Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces.**

Del mismo modo que en el tipo de modelación 3, para evaluar la influencia de las raíces en el mecanismo de falla, se tomaron los valores máximos de las deformaciones y de los esfuerzos cortantes de cada modelo y de cada una de las cuatro áreas en las que se dividió el talud (valores normalizados), y se realizó el análisis para cada ángulo de inclinación del talud.

A continuación, se muestran los resultados de las deformaciones y esfuerzos cortantes máximos de cada uno de los modelos y de las cuatro áreas en las que se dividió el talud, para la condición con Nivel Freático y sin Nivel Freático, los cuales se muestran en la Tabla 50, la Tabla 51, la Tabla 52 y la Tabla 53. En la Figura 99, la Figura 100, la Figura 101 y la Figura 102, se representan los

valores normalizados de esfuerzos cortantes y deformaciones de cada modelo, para cada uno de los ángulos de inclinación analizados. Como se mencionó en el numeral 4.8.2, los valores máximos que se tomaron para cada área se obtuvieron teniendo en cuenta la superficie de falla determinada en Slide. Si la superficie de falla no tomaba alguna de las cuatro áreas, esta casilla se dejó vacía.

Tabla 50. Deformaciones máximas obtenidas para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	DEFORMACIONES MÁXIMAS - SIN NF								
	Sin raíces								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
	Def. Área	Def/Def máx	Def. Área	Def/Def máx	Def. Área	Def/Def máx	Def. Área	Def/Def máx	Def. Área
25	0,0057	0,0006	0,1033	0,0025	0,4437	0,0027	0,4718	0,0014	0,2407
35	0,0082	0,0013	0,1546	0,0038	0,4588	0,0082	1,0000	0,0053	0,6499
45	0,0222	0,0019	0,0860	0,0063	0,2825	0,0222	1,0000	0,0079	0,3572
55	0,0308	0,0009	0,0282	0,0185	0,6010	0,0335	1,0884	0,0308	1,0000
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 1 (Pendiente)								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def. Área	Def/Def máx						
25	0,7932	0,0038	0,0048	0,3500	0,4413	0,4900	0,6178	0,0013	0,0016
35	2,4190	0,0061	0,0025	0,0038	0,0016	2,2690	0,9380	0,0074	0,0031
45	0,1529		0,0000	0,1167	0,7632	0,1529	1,0000		0,0000
55	0,7544	0,0011	0,0014	0,0029	0,0039	0,0048	0,0064		0,0000
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 2 (Pendiente + pie)								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def. Área	Def/Def máx						
25	0,7263	0,0008	0,0011	0,0026	0,0036	0,7263	1,0000	0,0017	0,0024
35	0,8757	0,0013	0,0015	0,0039	0,0044	0,8757	1,0000	0,0057	0,0065
45	0,1529		0,0000	0,1278	0,8358	0,1529	1,0000		0,0000
55	19,8800	0,0095	0,0005	0,0117	0,0006	0,0544	0,0027		0,0000
Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 3 (Corona + pendiente + pie)								
	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def. Área	Def/Def máx						
25	1,2890	0,0050	0,0039	0,6390	0,4957	1,2890	1,0000	0,0018	0,0014
35	2,3120	0,0013	0,0006	0,6700	0,2898	0,9700	0,4196	0,0066	0,0029
45	0,1437		0,0000	0,1170	0,8142	0,1437	1,0000		0,0000
55	0,6699	0,0011	0,0016	0,3835	0,5725	0,6699	1,0000		0,0000

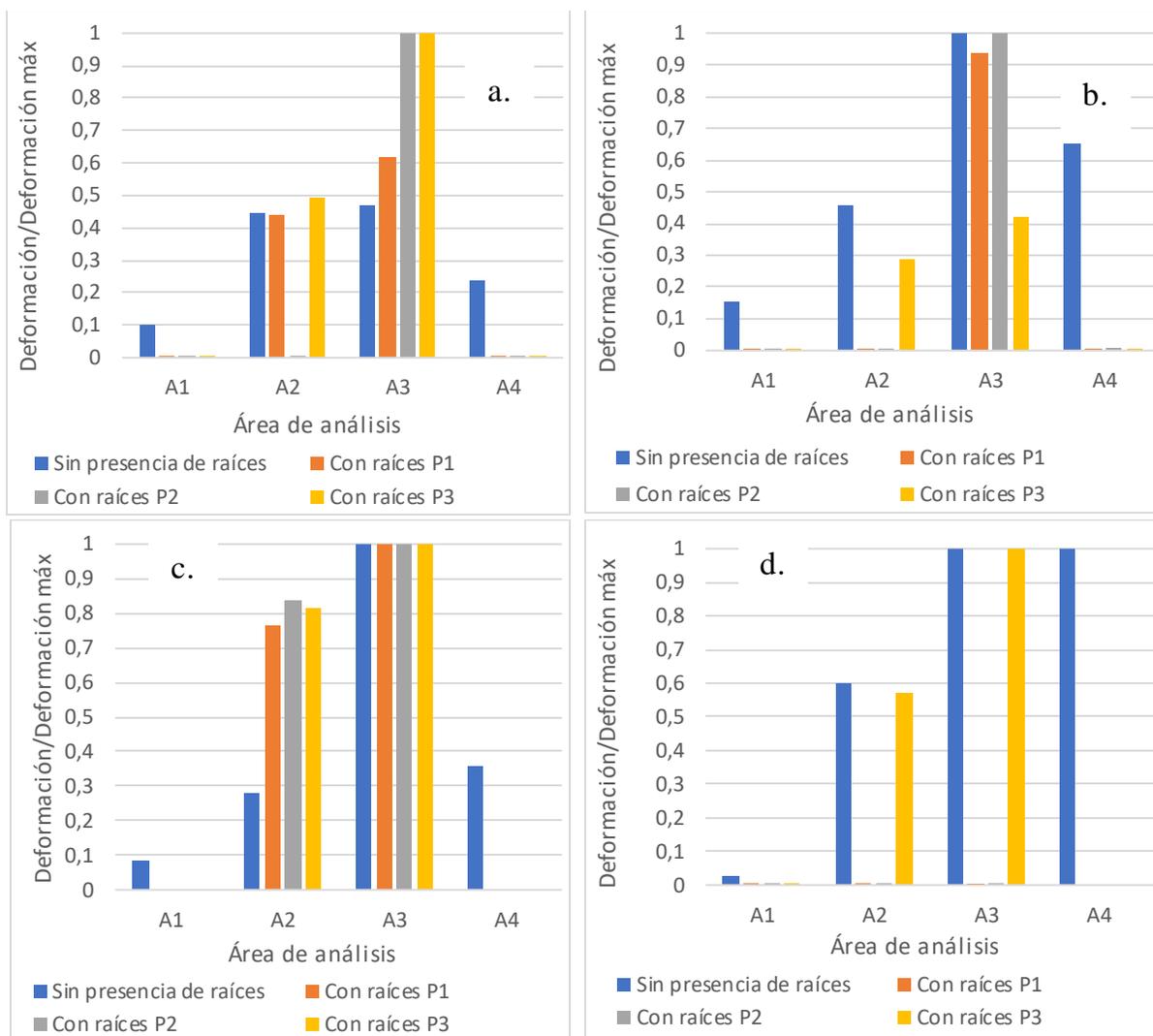


Figura 99. Relación entre los valores máximos de la deformación de cada área, con los valores máximos de la deformación de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.

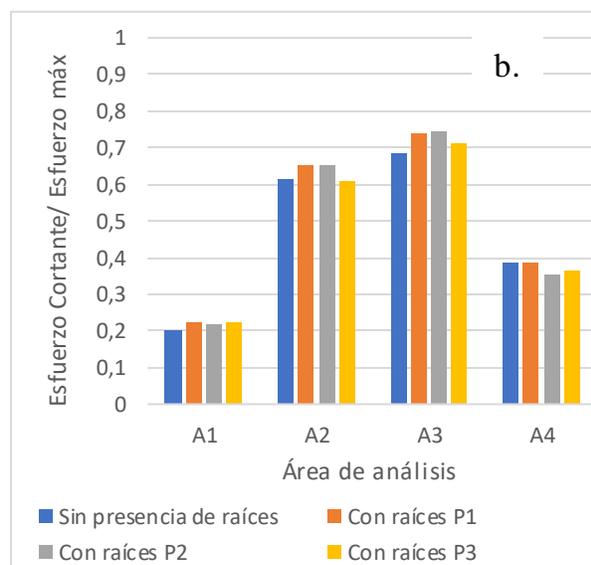
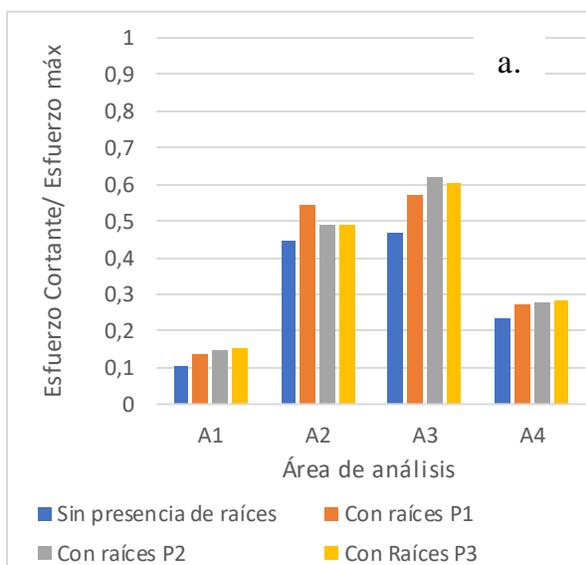
Tabla 51. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.

Ángulo de inclinación del talud (°)	ESFUERZOS CORTANTES MÁXIMOS (kN/m <sup>2</sup> ) - SIN NF								
	Esf. Máx. modelo	Sin raíces							
		A1		A2		A3		A4	
	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	
25	16,39	1,73	0,11	7,30	0,45	7,70	0,47	3,85	0,23
35	17,66	3,55	0,20	10,86	0,61	12,06	0,68	6,84	0,39
45	18,38	5,38	0,29	14,70	0,80	15,90	0,87	6,96	0,38
55	18,97	2,68	0,14	9,03	0,48	10,70	0,56	9,96	0,53

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 1 (Pendiente)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	13,85	1,89	0,14	7,50	0,54	7,90	0,57	3,80	0,27
35	17,65	3,92	0,22	11,51	0,65	13,05	0,74	6,81	0,39
45	20,15		0,00	10,46	0,52	10,60	0,53		0,00
55	14,54	3,21	0,22	7,95	0,55	8,23	0,57		0,00

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 2 (Pendiente + pie)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	16,39	2,46	0,15	8,06	0,49	10,19	0,62	4,56	0,28
35	17,67	3,89	0,22	11,50	0,65	13,16	0,74	6,27	0,36
45	20,70		0,00	10,67	0,52	10,90	0,53		0,00
55	23,47	5,28	0,23	9,00	0,38	11,22	0,48		0,00

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 3 (Corona + pendiente + pie)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	16,39	2,51	0,15	8,03	0,49	9,90	0,60	4,67	0,28
35	17,67	3,92	0,22	10,81	0,61	12,56	0,71	6,48	0,37
45	20,73		0,00	10,73	0,52	10,80	0,52		0,00
55	15,88	3,09	0,19	8,75	0,55	15,88	1,00		0,00



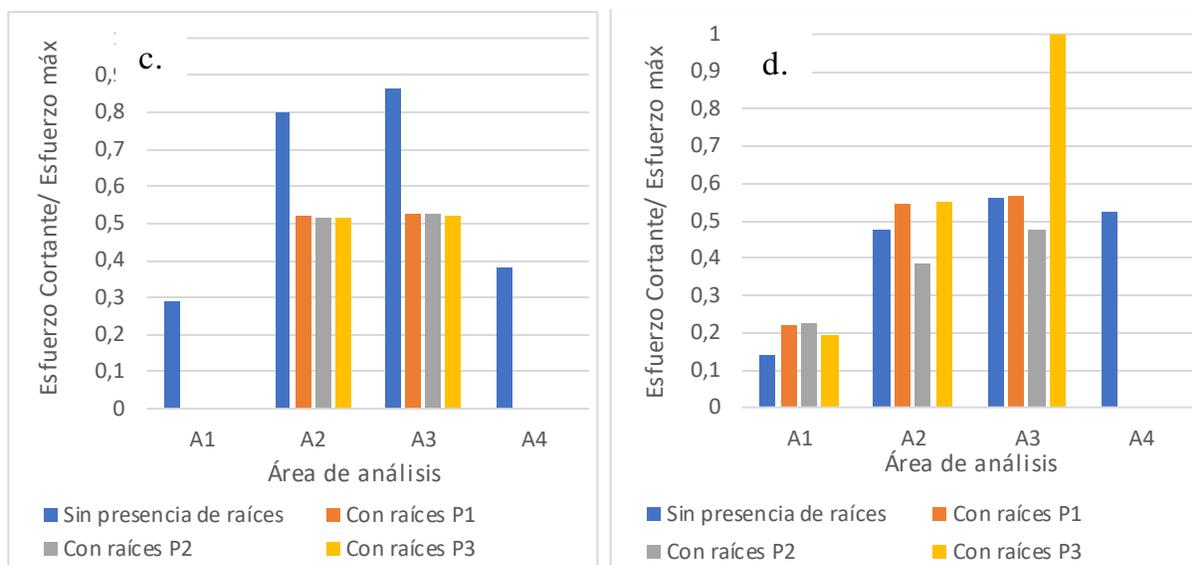


Figura 100. Relación entre los valores máximos del esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos del esfuerzo cortante de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis. A) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.

Tabla 52. Deformaciones máximas obtenidas para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis..

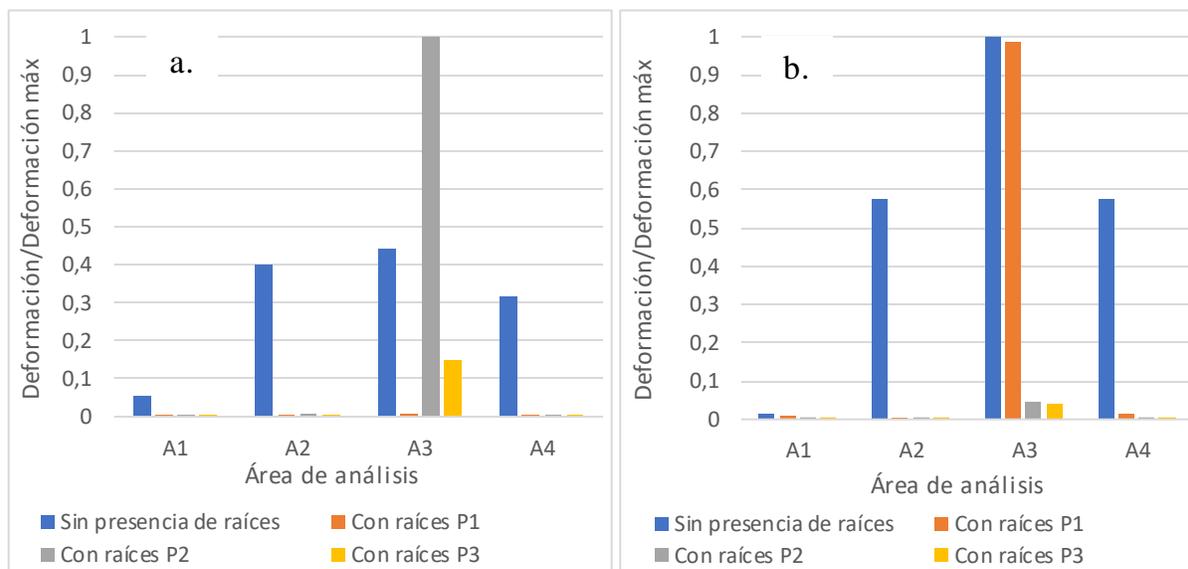
Ángulo de inclinación del talud (°)	DEFORMACIONES MÁXIMAS – CON NF								
	Sin raíces								
	A1		A2		A3		A4		
DEF. MÁX	Def. máx modelo	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx	
25	0,0074	0,0004	0,0570	0,0029	0,3989	0,0033	0,4410	0,0024	0,3189
35	0,0214	0,0003	0,0144	0,0123	0,5750	0,0214	1,0000	0,0124	0,5778
45	0,0244	0,0005	0,0203	0,0079	0,3234	0,0244	1,0000	0,0061	0,2493
55	0,0110	0,0003	0,0290	0,0102	0,9288	0,0110	1,0000	0,0047	0,4269

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 1 (Pendiente)								
	A1		A2		A3		A4		
	DEF. MÁX	Def. máx modelo	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx	Def.	Def/Def máx
25	0,5999	0,0008	0,0013	0,0028	0,0047	0,0053	0,0089	0,0027	0,0045
35	0,4979	0,0055	0,0111	0,0035	0,0069	0,4921	0,9884	0,0076	0,0152
45	0,7277	0,0050	0,0069	0,1227	0,1686	0,1997	0,2744		0,0000
55	2,2810		0,0000	0,0119	0,0052	0,1485	0,0651		0,0000

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 2 (Pendiente + pie)								
	DEF. MÁX	A1		A2		A3		A4	
		Def.	Def/Def máx						
25	0,4948	0,0024	0,0048	0,0029	0,0058	0,4948	1,0000	0,0024	0,0049
35	18,1800	0,0076	0,0004	0,0239	0,0013	0,8800	0,0484	0,0184	0,0010
45	0,4562	0,0030	0,0066	0,1634	0,3582	0,1994	0,4371		0,0000
55	4,1590		0,0000	0,0228	0,0055	0,0235	0,0056		0,0000

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 3 (Corona + pendiente + pie)								
	DEF. MÁX	A1		A2		A3		A4	
		Def.	Def/Def máx						
25	1,6670	0,0008	0,0005	0,0029	0,0017	0,2460	0,1476	0,0023	0,0014
35	35,2800	0,0118	0,0003	0,0626	0,0018	1,5000	0,0425	0,0735	0,0021
45	0,0382	0,0050	0,1312	0,0363	0,9495	0,0382	1,0000		0,0000
55	2,1140	0,0042	0,0020	0,0127	0,0060	2,1140	1,0000		0,0000



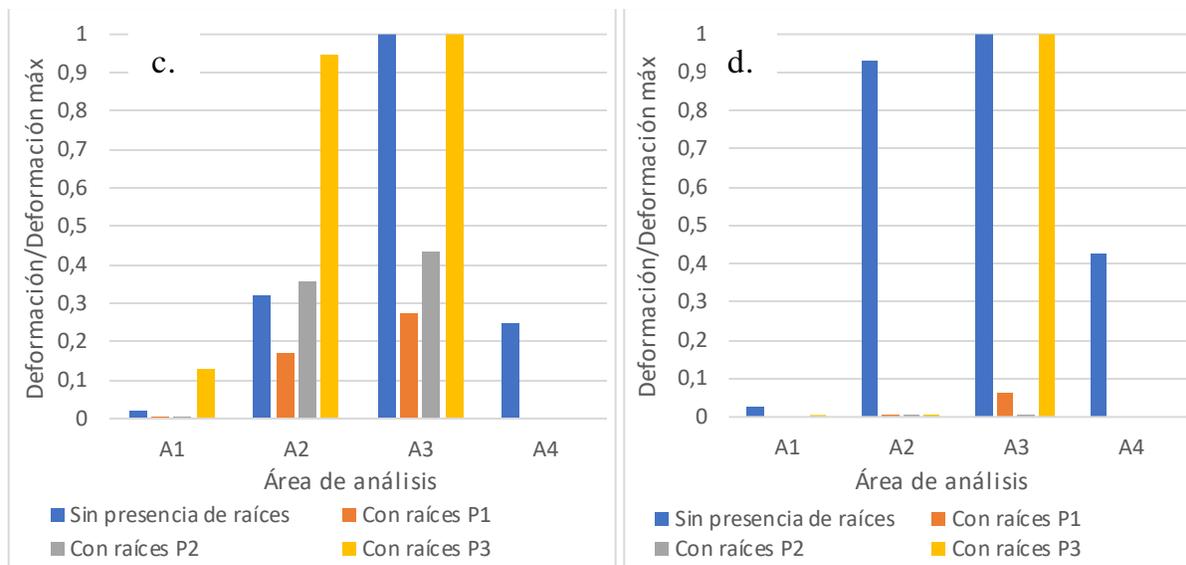


Figura 101. Relación entre los valores máximos de la deformación de cada área, con los valores máximos de la deformación de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis.. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.

Tabla 53. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación 4.

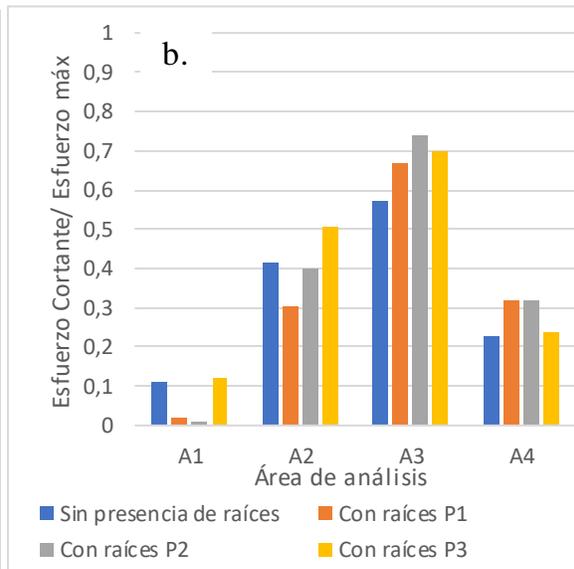
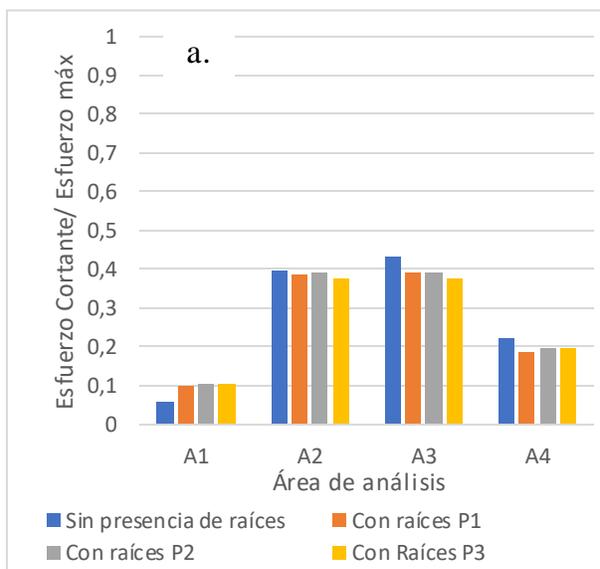
		ESFUERZOS CORTANTES MÁXIMOS (kN/m <sup>2</sup> ) – CON NF							
		Sin raíces							
Ángulo de inclinación del talud (°)	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx
25	21,26	1,27	0,06	8,49	0,40	9,16	0,43	4,75	0,22
35	24,03	2,66	0,11	9,99	0,42	13,70	0,57	5,50	0,23
45	14,23	1,96	0,14	8,81	0,62	10,24	0,72	7,03	0,49
55	9,30	0,91	0,10	2,47	0,27	9,30	1,00	8,93	0,96

		Posición 1 (Pendiente)							
Ángulo de inclinación del talud (°)	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx	Esf. Área	Esf/Esf máx
25	21,24	2,17	0,10	8,18	0,39	8,36	0,39	4,00	0,19
35	18,31	0,40	0,02	5,60	0,31	12,23	0,67	5,83	0,32
45	19,36	0,02	0,00	9,61	0,50	10,11	0,52		0,00
55	11,85		0,00	6,48	0,55	10,67	0,90		0,00

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 2 (Pendiente + pie)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	21,24	2,19	0,10	8,28	0,39	8,30	0,39	4,19	0,20
35	21,59	0,18	0,01	8,66	0,40	15,93	0,74	6,91	0,32
45	18,11	1,25	0,07	8,90	0,49	9,50	0,52		0,00
55	12,06		0,00	8,27	0,69	9,15	0,76		0,00

Ángulo de inclinación del talud (°)	Posición 3 (Corona + pendiente + pie)								
	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
25	21,23	2,27	0,11	7,96	0,38	8,02	0,38	4,21	0,20
35	24,94	3,05	0,12	12,57	0,50	17,42	0,70	5,98	0,24
45	13,93	0,07	0,00	8,80	0,63	8,81	0,63		0,00
55	11,23	1,53	0,14	6,37	0,57	7,98	0,71		0,00



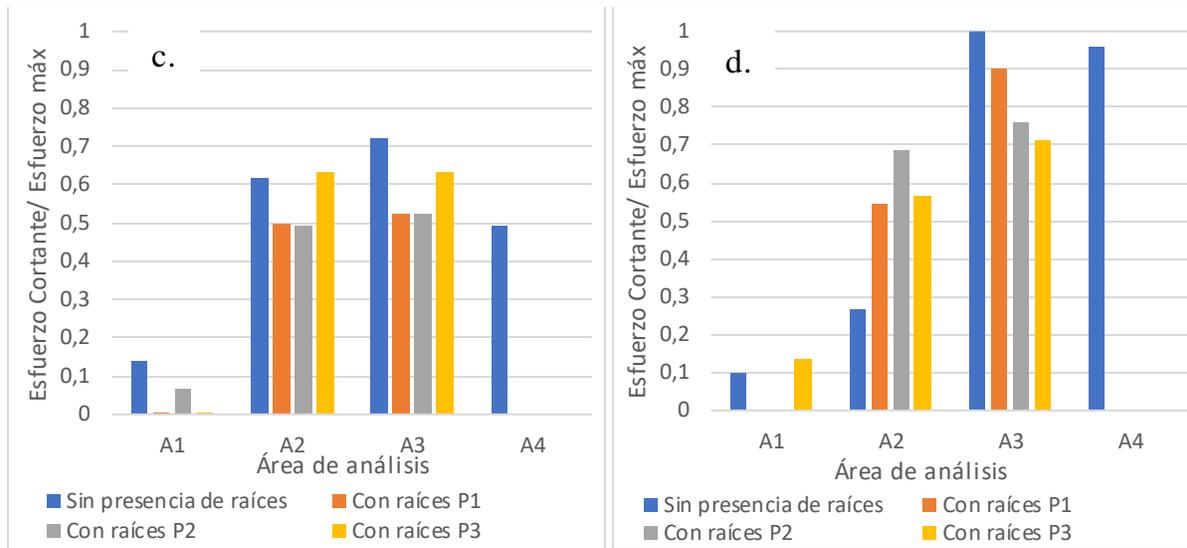


Figura 102. Relación entre los valores máximos del esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos del esfuerzo cortante de cada modelo, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Con nivel freático). Modelación de raíces como anclajes – Plaxis. a) Talud con pendiente de 25°, b) Talud con pendiente de 35°, c) Talud con pendiente de 45°, d) Talud con pendiente de 55°.

#### 5.4.3.1 *Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=25^\circ$ , sin nivel freático.*

En la Figura 103, la Figura 104 y la Figura 105, se puede observar que la mayor concentración de esfuerzos y deformaciones se presentan en las áreas 2 y 3, teniendo valores mayores hacia el pie del talud. En cuanto a las deformaciones, se puede evidenciar que en los modelos donde se modeló la presencia de las raíces, se obtuvieron mayores deformaciones, en especial en la posición 3 (corona + pendiente + pie), en comparación con el modelo que no tiene raíces. Adicional a esto, se puede evidenciar que en las áreas 1 y 4, las deformaciones son muy pequeñas en comparación con las de las áreas 2 y 3.

Por otro lado, en la Figura 105, se puede observar que los esfuerzos cortantes tienen mayor concentración en las áreas 2 y 3, y que la relación de los esfuerzos cortantes tiende a ser constante en las cuatro áreas de análisis en cuanto a los modelos con raíces y sin raíces, pero a pesar de esto, se logran ver mayores valores en los modelos con la presencia de raíces, como pasa en la mayoría de modelos analizados.

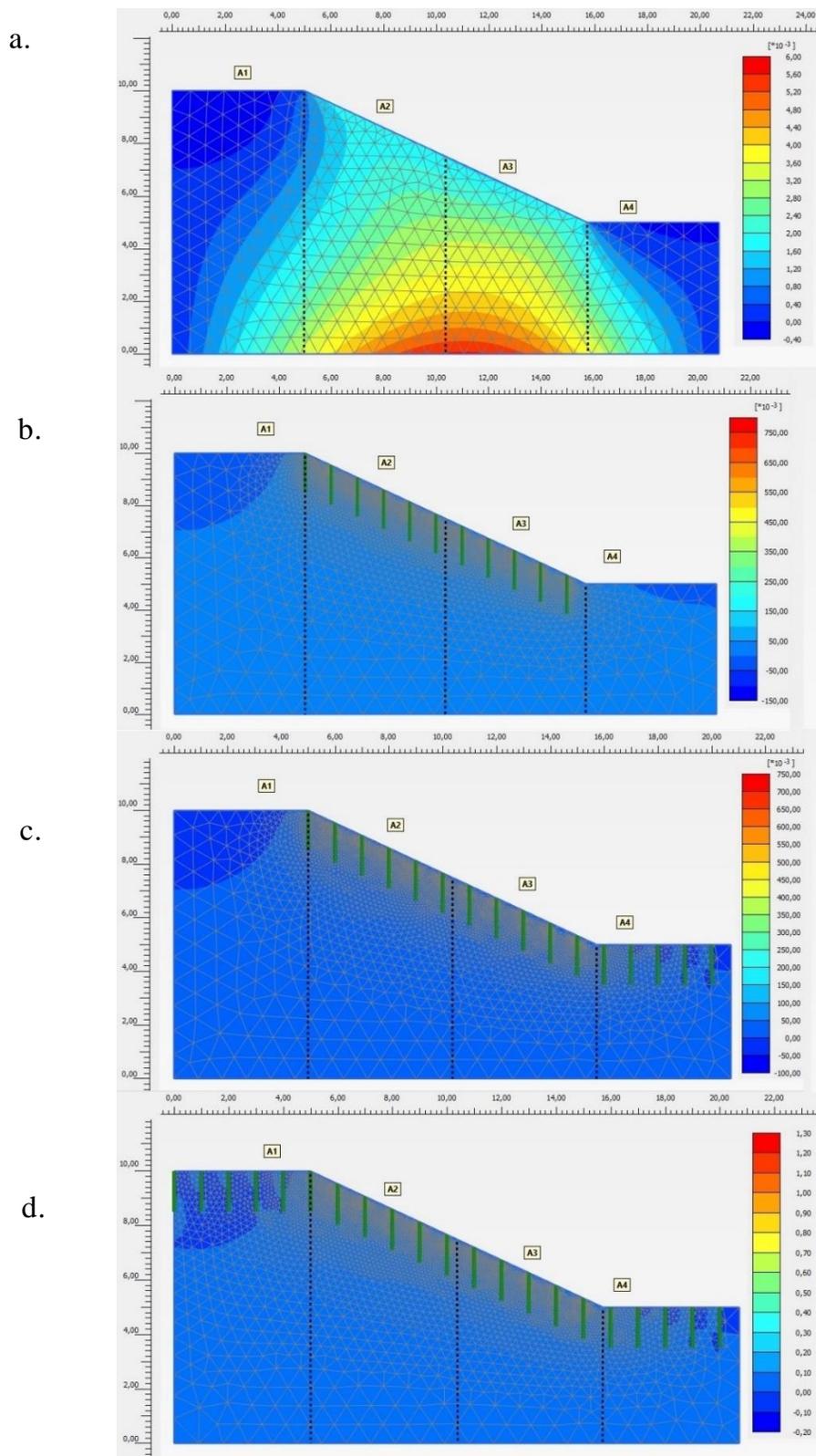
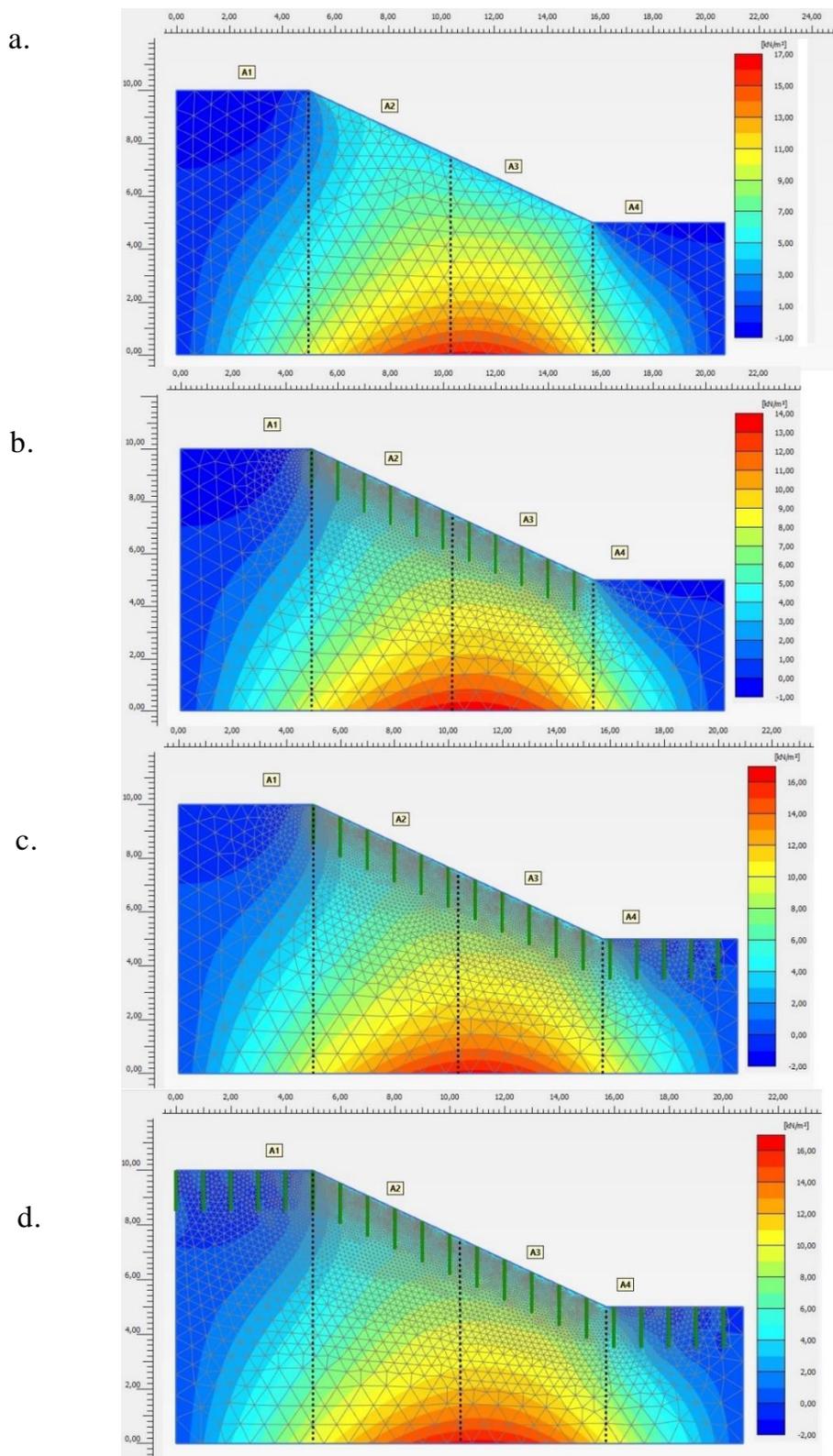


Figura 103. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Sin nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).



*Figura 104.* Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Sin Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

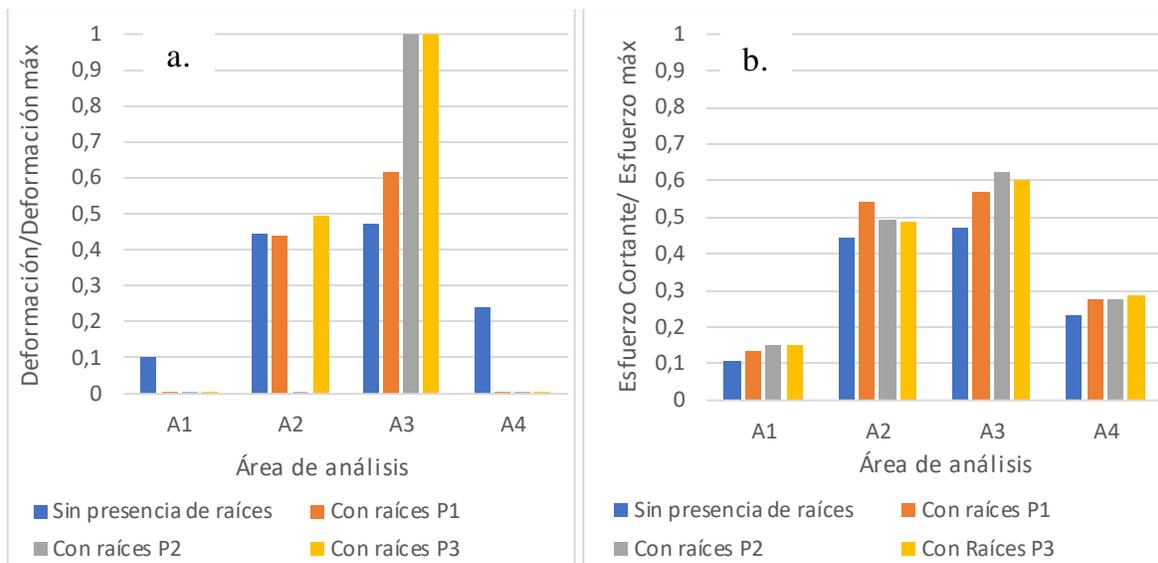


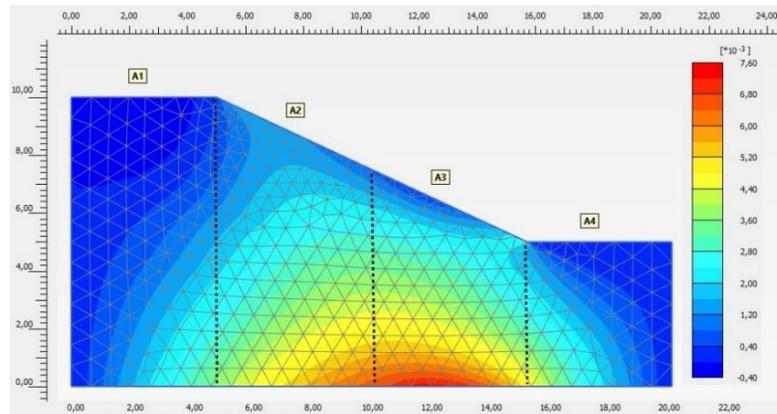
Figura 105. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de  $25^\circ$ , en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

#### 5.4.3.2 *Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=25^\circ$ , con nivel freático.*

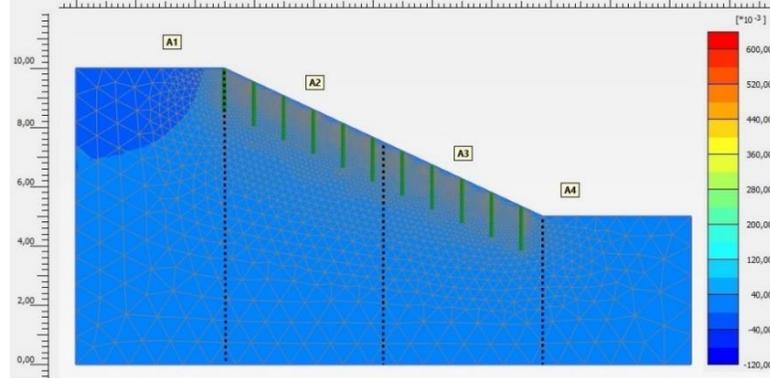
En la Figura 107 y la Figura 108, se puede observar que la mayor concentración de esfuerzos cortantes se presentan en las áreas 2 y 3, teniendo valores mayores hacia el pie del talud; al igual que en los modelos sin nivel freático, se observa que los esfuerzos cortantes de las diferentes posiciones de las raíces, en una misma área, tienden a ser de magnitudes similares, pero en estos modelos se puede observar que se presentan mayores esfuerzos cortantes en el modelo donde no se tuvo en cuenta la presencia de las raíces, a diferencia de los modelos sin nivel freático.

En cuanto a las deformaciones, en la Figura 108, se puede observar que la relación de las deformaciones en las áreas 1, 2 y 4 son muy pequeñas en comparación con la de los modelos con la presencia de raíces y del área 3, donde se observa un valor alto de esta relación de deformaciones para la posición 2 (pendiente + pie) de las raíces.

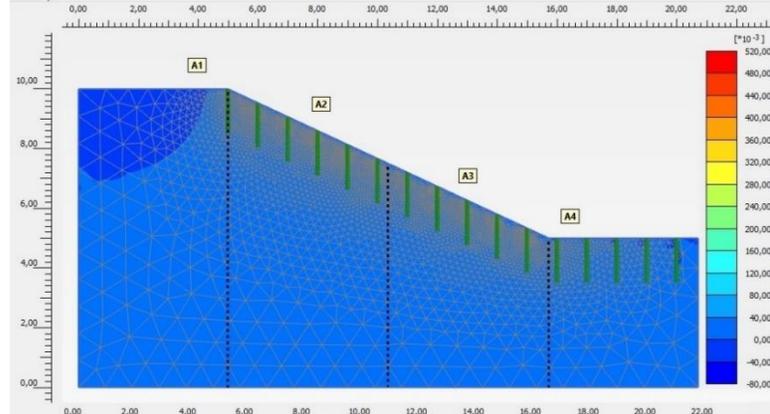
a.



b.



c.



d.

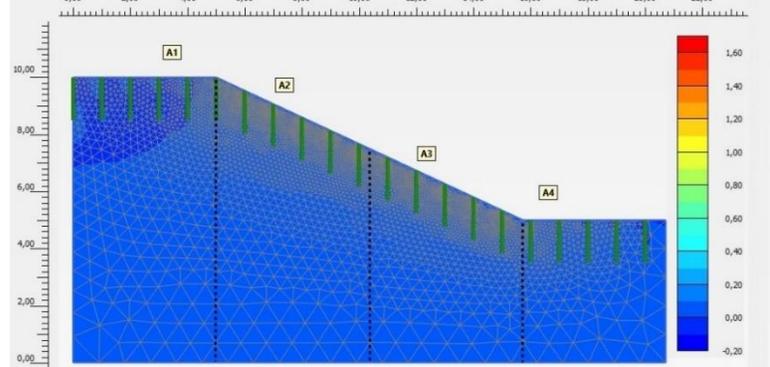


Figura 106. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 25°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

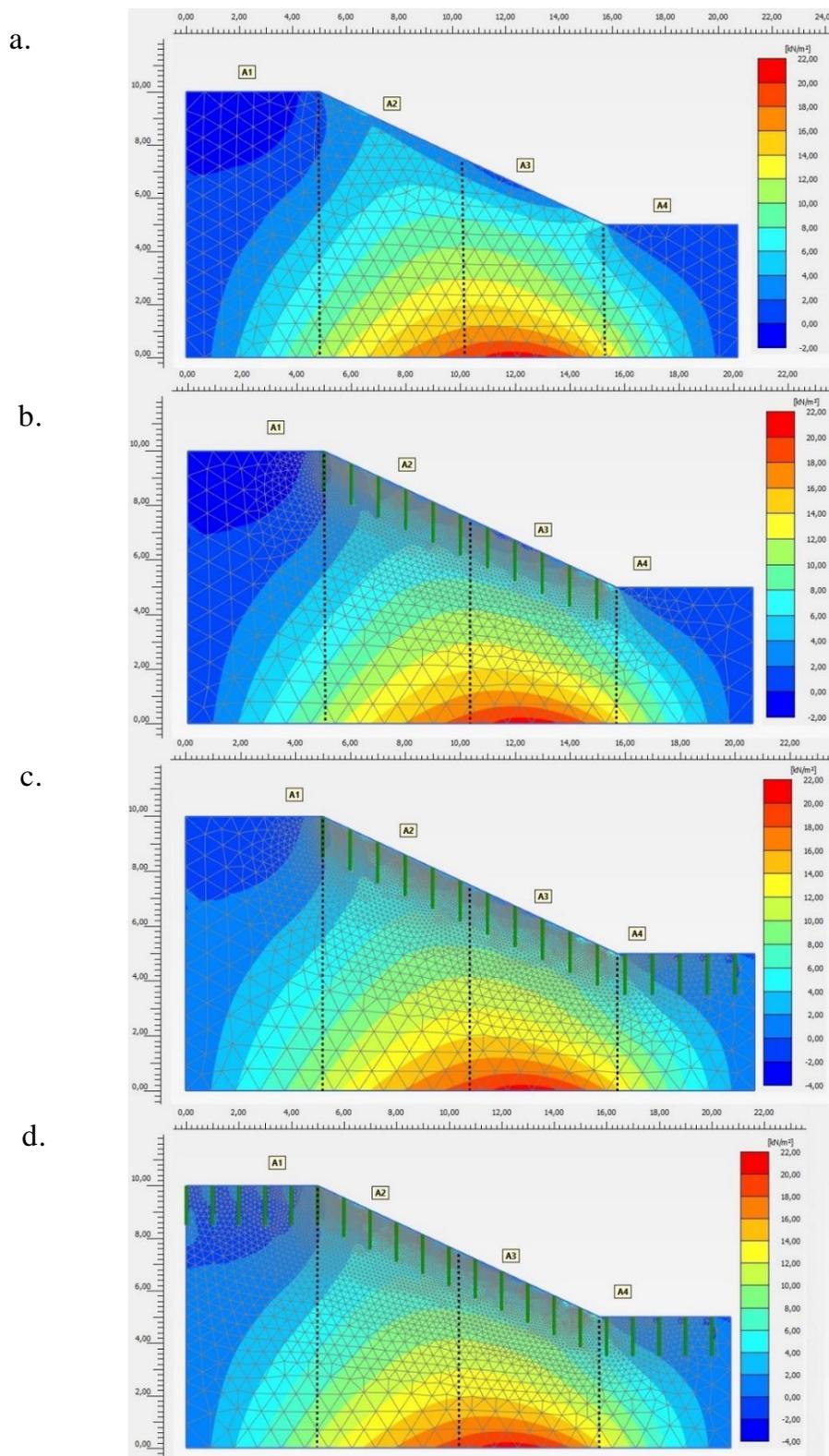


Figura 107. Dia grama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de  $25^\circ$ . Con Nivel Freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

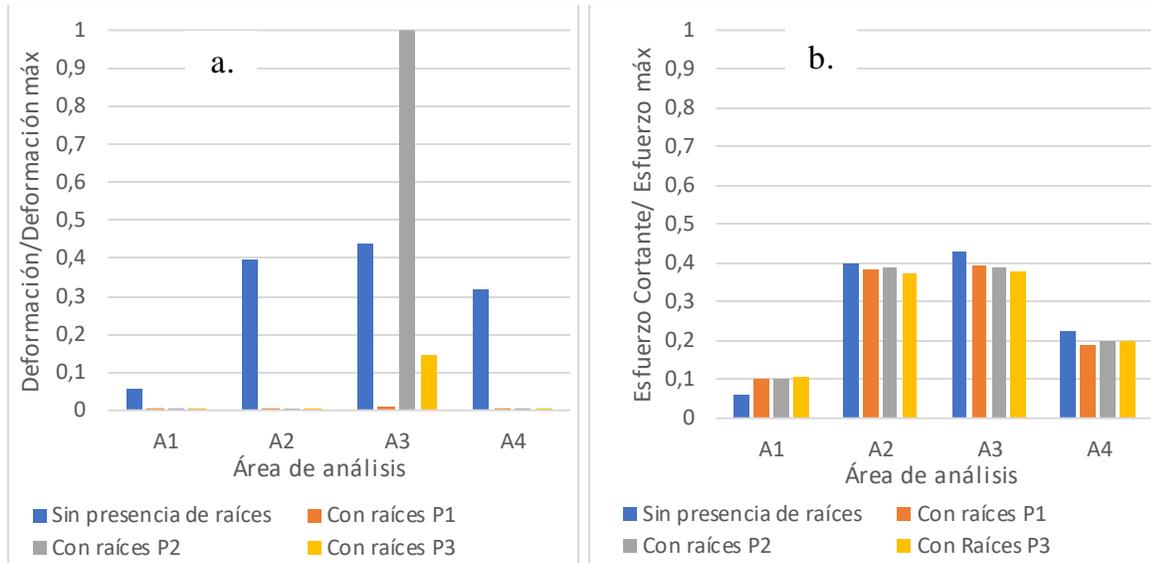


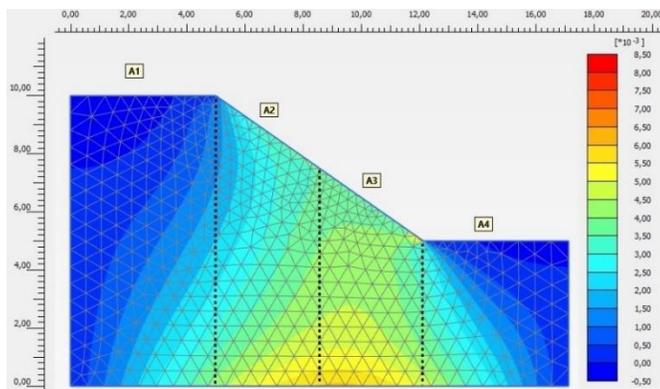
Figura 108. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 25°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

#### 5.4.3.3 *Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=35^\circ$ , sin nivel freático.*

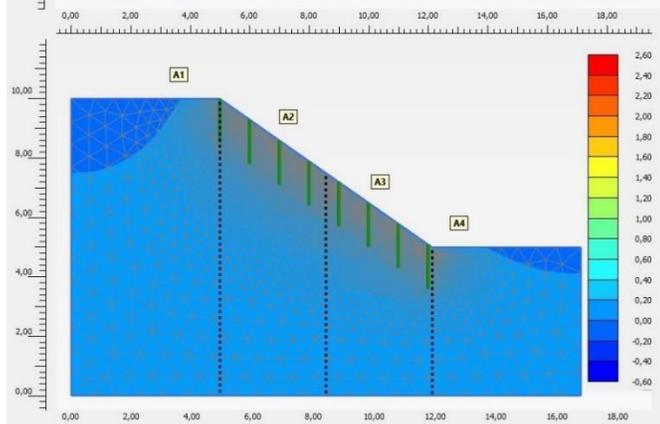
En los taludes con ángulos de inclinación de 35°, se empiezan a notar algunas diferencias en el mecanismo de falla en cuanto al diagrama de los esfuerzos cortantes, el cual se puede observar en la Figura 110, en la cual se observa que la concentración de esfuerzos que está localizada en el pie del talud se desplaza en cierta medida a la parte inferior de los anclajes debido al reforzamiento que estos generan en el suelo. En la Figura 109 y la Figura 111, se puede observar que la concentración de esfuerzos es mayor en las áreas 2 y 3, principalmente la 3, y las deformaciones son mayores en las áreas 3 y en cierta medida de la 4.

La relación de los esfuerzos cortantes tiende a ser constante para las diferentes posiciones de las raíces, mostrando un ligero incremento en los modelos con la presencia de las raíces, pero en las deformaciones es diferente, esta relación muestra que las áreas 1, 2 y 4, los modelos con la presencia de raíces presentan relaciones de deformaciones muy por debajo de las deformaciones que presenta el modelo sin presencia de raíces.

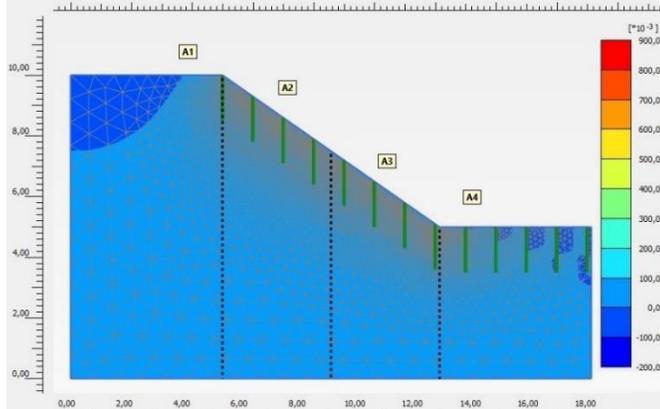
a.



b.



c.



d.

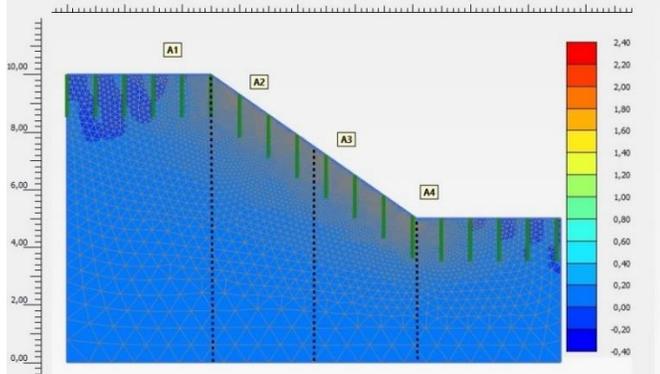
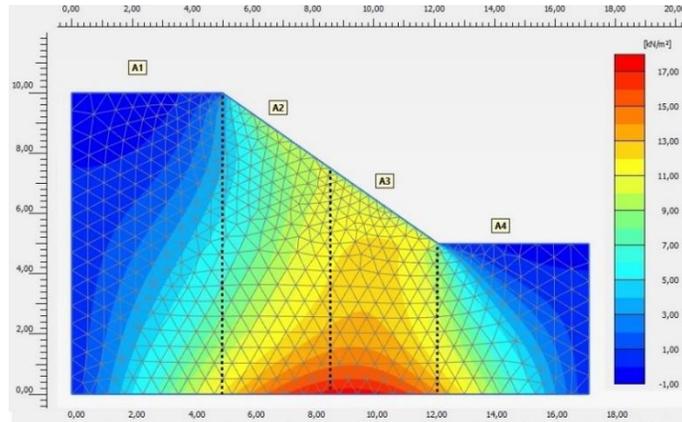
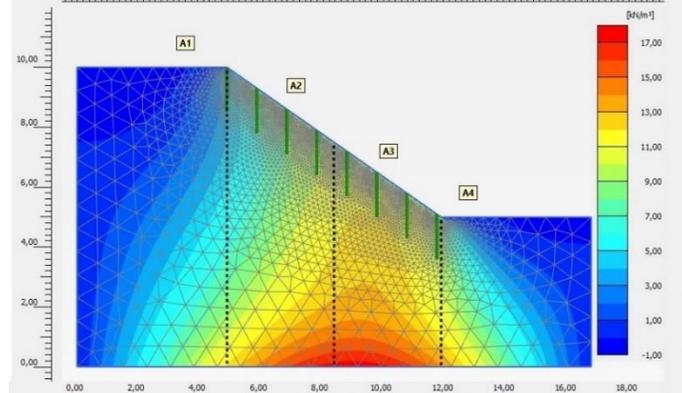


Figura 109. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Sin nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

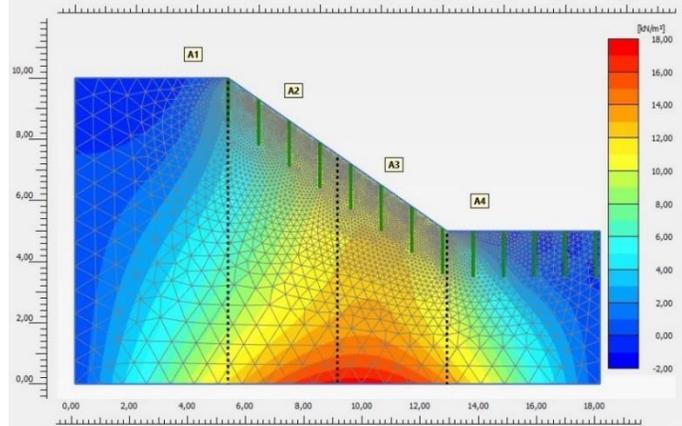
a.



b.



c.



d.

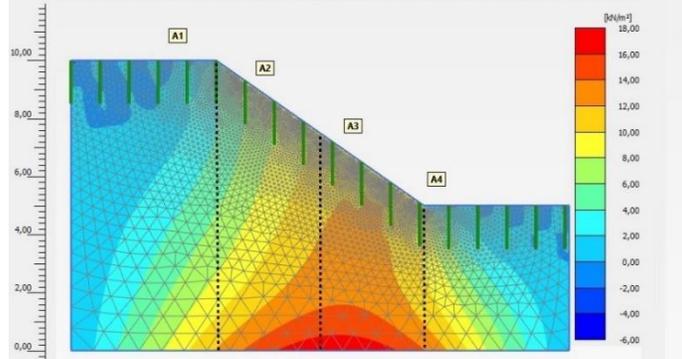
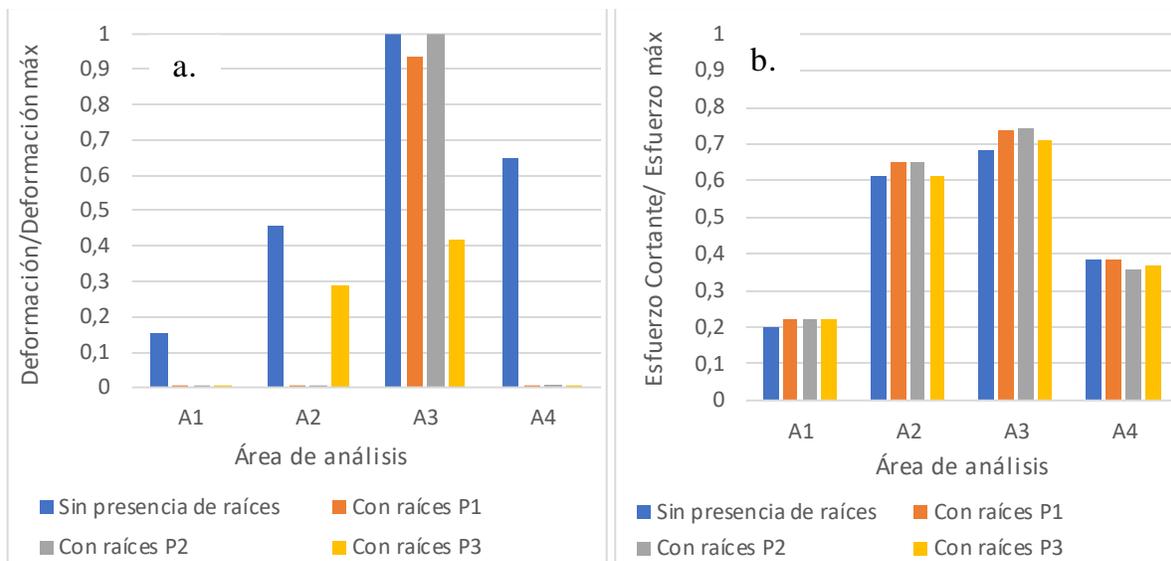


Figura 110. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Sin Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).



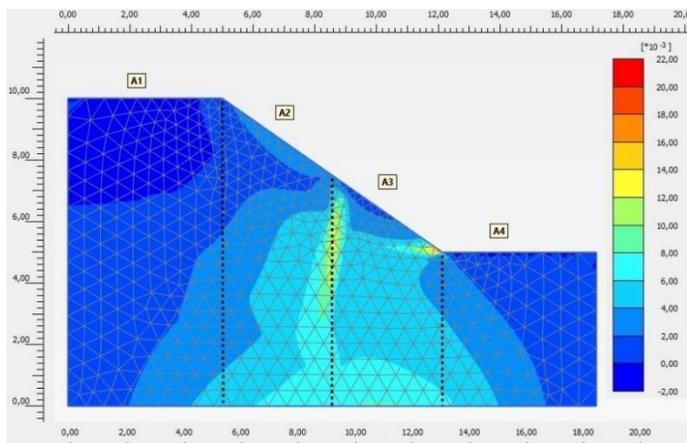
**Figura 111.** Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de  $35^\circ$ , en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

#### **5.4.3.4 Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=35^\circ$ , con nivel freático.**

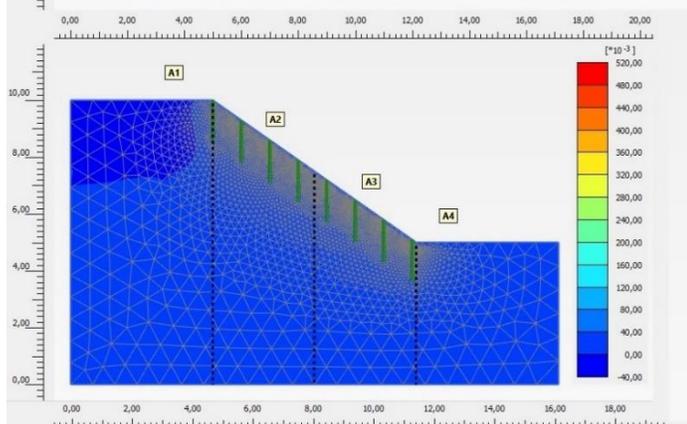
Para estos modelos, en la Figura 114, se puede observar que la mayor concentración de deformaciones se presenta en el pie del talud, pero, de igual forma que en el caso del talud de  $25^\circ$  con presencia del nivel freático, la relación de las deformaciones de todas las áreas de los modelos con presencia de raíces, son mucho menores que la relación de las deformaciones del modelo sin la presencia de raíces, a excepción de las deformaciones que se presentan en el área 3 del modelo que tiene las raíces en la posición 1 (pendiente), donde dicha relación de deformaciones es muy cercana a la del modelo sin la presencia de raíces.

Adicional a esto, en la Figura 113 y en la Figura 114, se puede observar una mayor concentración de esfuerzos cortantes en el pie del talud, el área 3, y otras grandes concentraciones en las áreas 2 y 4 pero menores a las del pie del talud. Así mismo se observa que los modelos con presencia de raíces presentan esfuerzos cortantes más grandes que el modelo sin presencia de raíces, pero así mismo, generan mayor resistencia al corte del suelo.

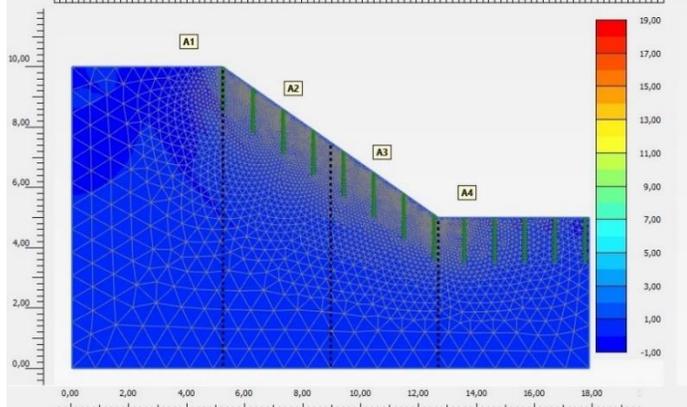
a.



b.



c.



d.

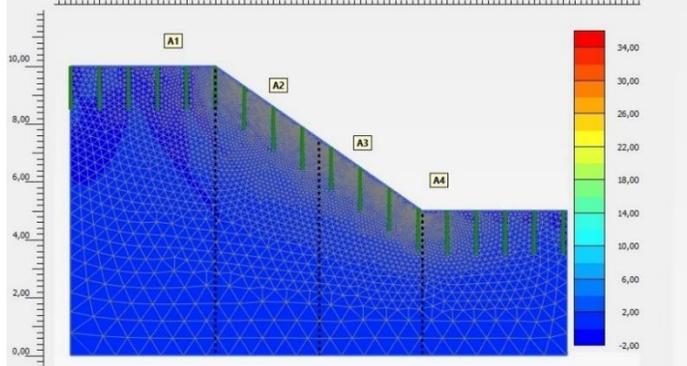
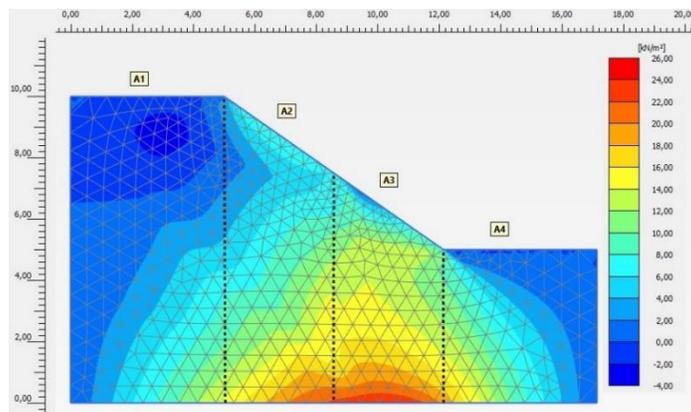
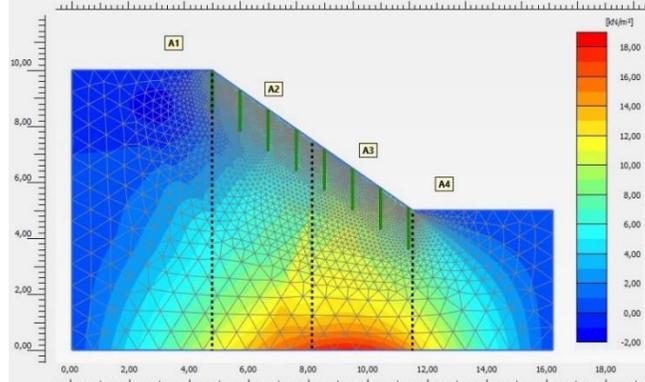


Figura 112. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

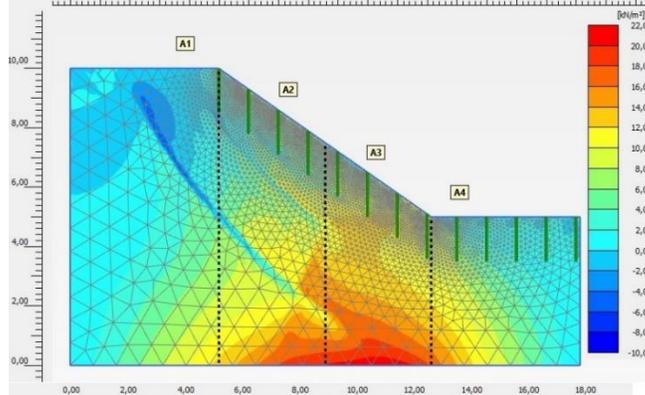
a.



b.



c.



d.

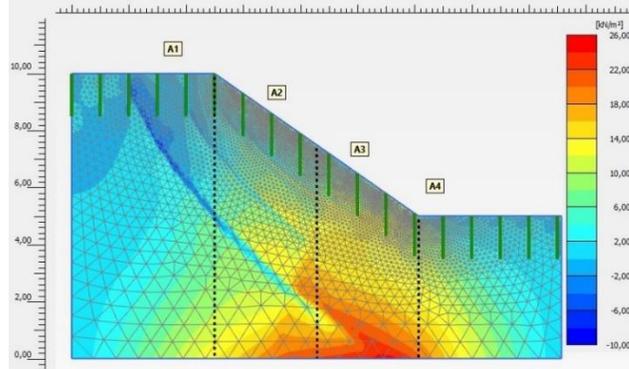
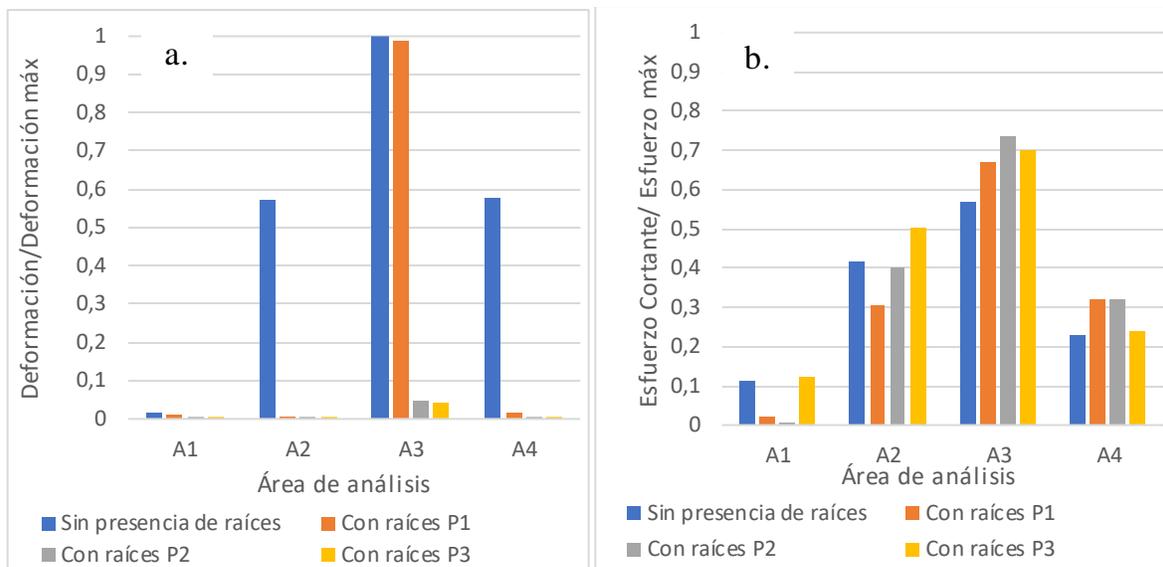


Figura 113. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 35°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie)..



*Figura 114.* Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 35°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

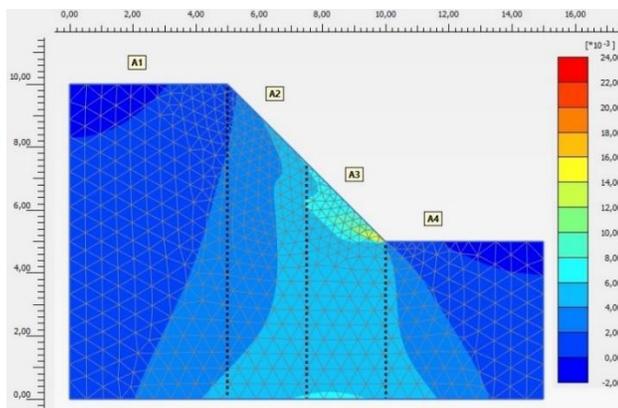
#### **5.4.3.5 *Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=45^\circ$ , sin nivel freático.***

En los modelos realizados de los taludes con ángulos de inclinación de  $45^\circ$ , se puede evidenciar el mecanismo de falla del modelo sin la presencia de raíces, y la contribución y el efecto de las raíces modeladas mediante el uso de anclajes, en dicho mecanismo.

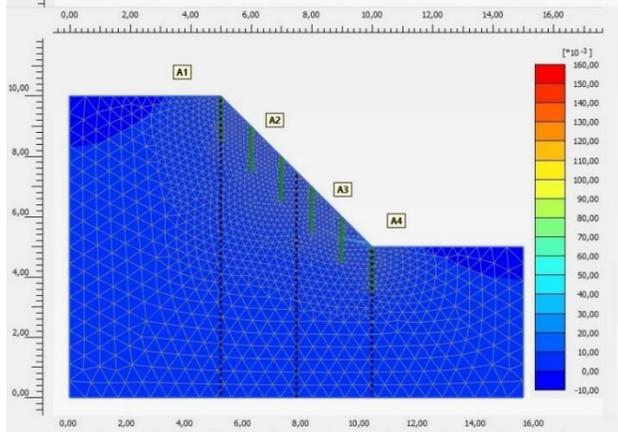
En la Figura 115 y la Figura 117a, se puede evidenciar que en el pie del talud (área3), todos los modelos alcanzan los valores máximos de deformación de cada modelo, y en el área 2 también hay una gran concentración de deformaciones, y además de ello, se puede observar que en las áreas 1 y 4, los modelos que tienen presencia de raíces tienen relaciones de deformaciones muy por debajo de las deformaciones del modelo que no tiene presencia de raíces. Esto mismo sucede en el caso de los esfuerzos cortantes que se presentan.

Por otra parte, es importante mencionar que este tipo de modelación y para este ángulo de inclinación, genera que esa gran concentración de esfuerzos cortantes en la pata del talud que se puede evidenciar en el modelo sin la presencia de raíces, el cual se puede observar en la Figura 116, se desplace por debajo de los anclajes y tiende a generar una disipación o uniformidad de los esfuerzos que se presentan en esta zona.

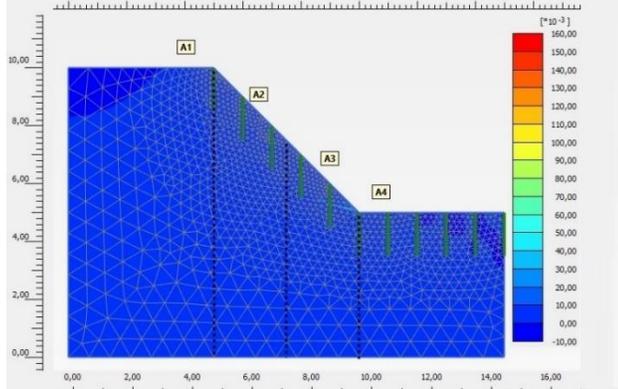
a.



b.



c.



d.

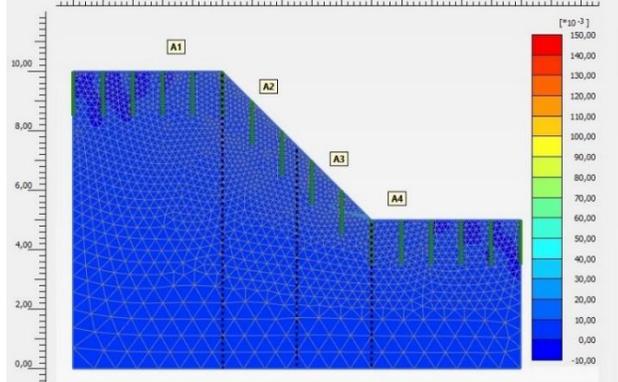
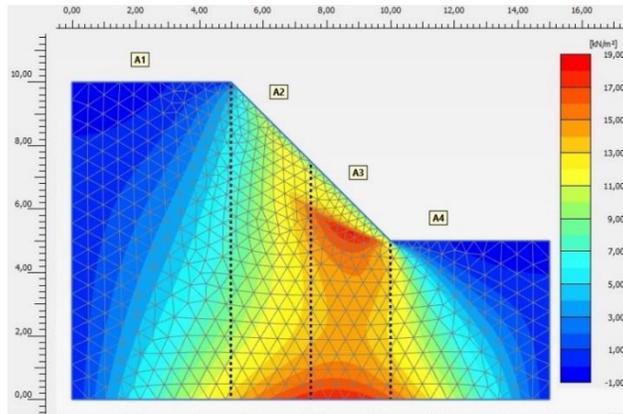
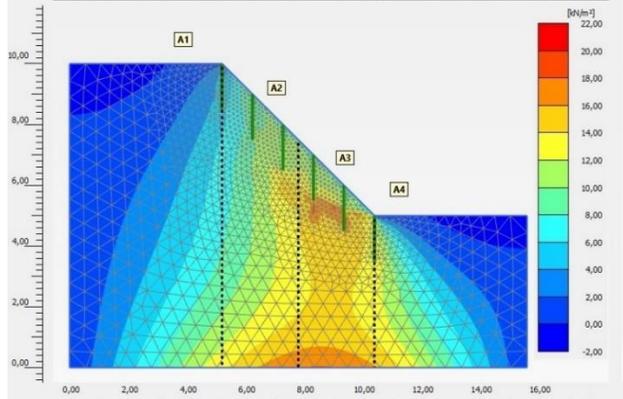


Figura 115. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Sin nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

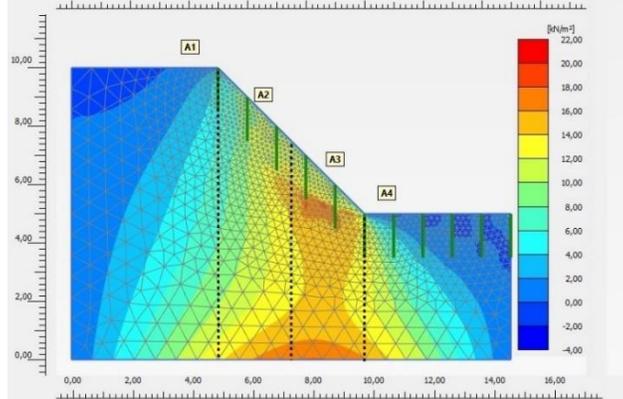
a.



b.



c.



d.

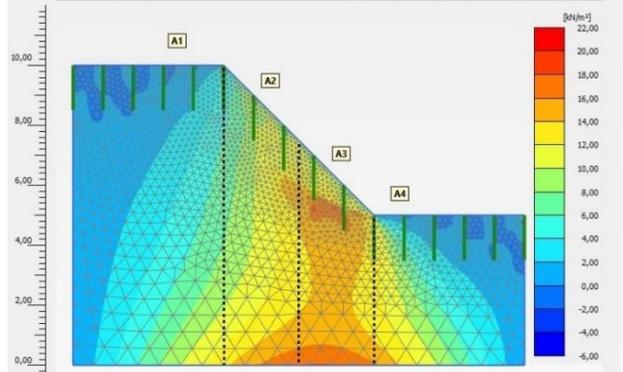


Figura 116. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Sin Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

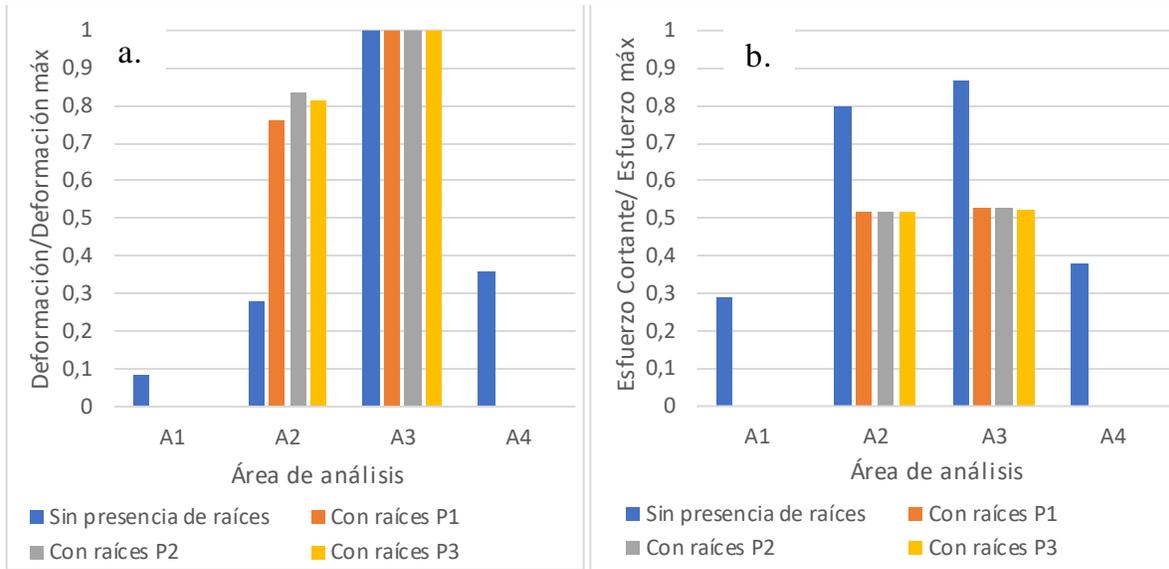


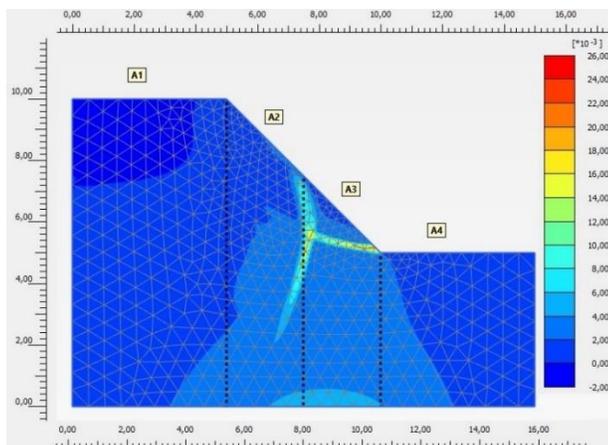
Figura 117. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de  $45^\circ$ , en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

#### 5.4.3.6 *Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=45^\circ$ , con nivel freático.*

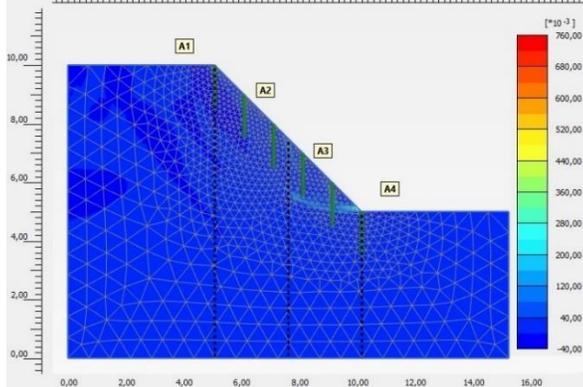
En la Figura 118, la Figura 119 y la Figura 120, se puede observar que en estos modelos la mayor concentración de esfuerzos y deformaciones se da, igualmente, en el pie del talud y adicional a esto, en el caso de las deformaciones generadas, se puede evidenciar que, al igual que en el modelo sin la presencia del nivel freático, la relación de las deformaciones de las áreas 1 y 4, es mucho menor que la del modelo sin raíces.

En cuanto a los esfuerzos cortantes, pasa lo mismo en el caso de los esfuerzos cortantes que se presentan en el área 1 y 4 de los modelos con presencia de raíces con respecto a los modelos que no tienen. En el área 3, los esfuerzos cortantes del modelo sin presencia de raíces tienden a ser mayores que los otros modelos y, en la Figura 119, se puede evidenciar que los anclajes hacen que esos esfuerzos cortantes se desplacen hacia abajo como se mencionó anteriormente y se concentren en esas zonas.

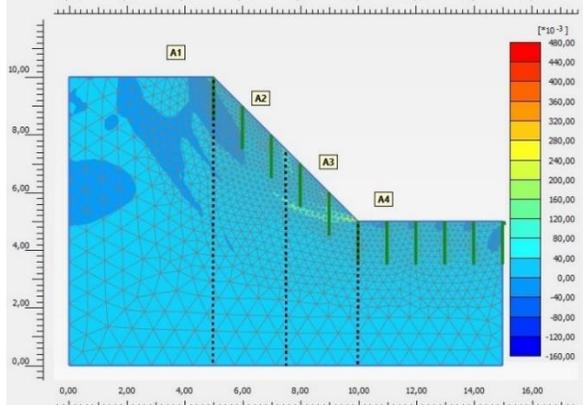
a.



b.



c.



d.

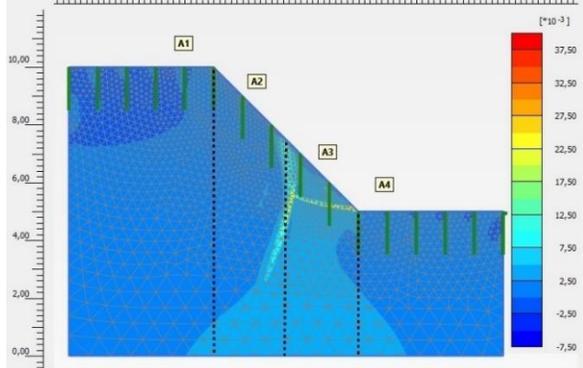
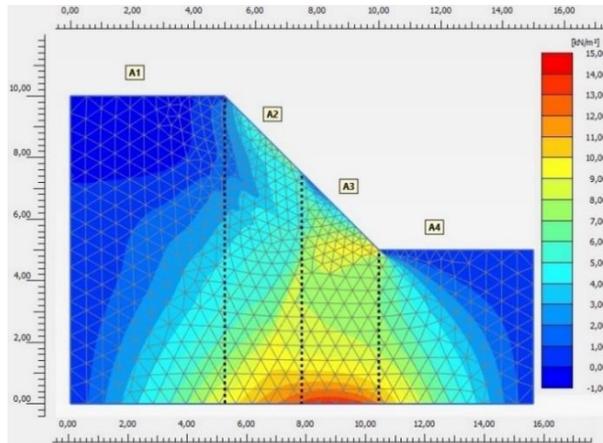
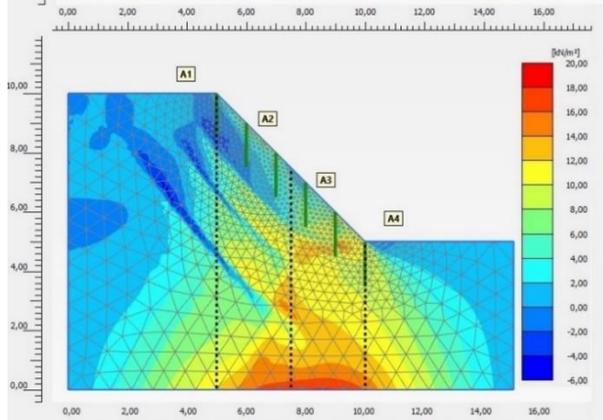


Figura 118. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

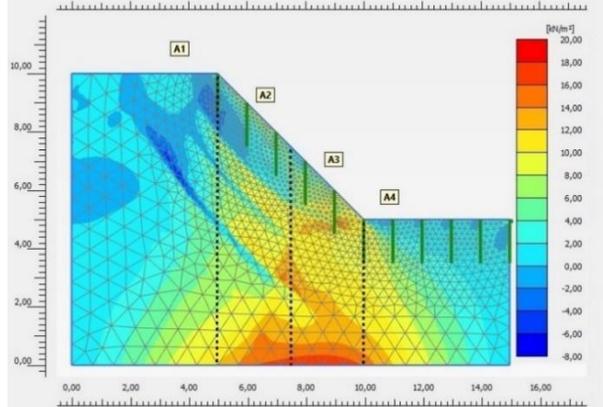
a.



b.



c.



d.

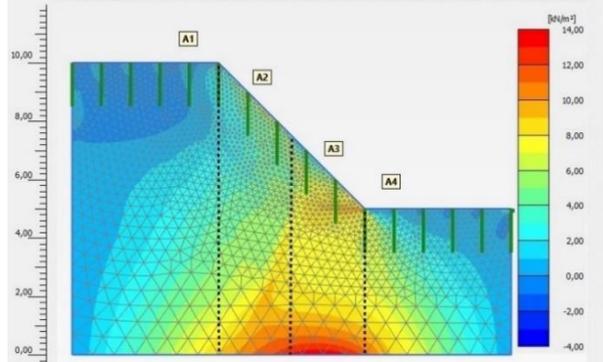
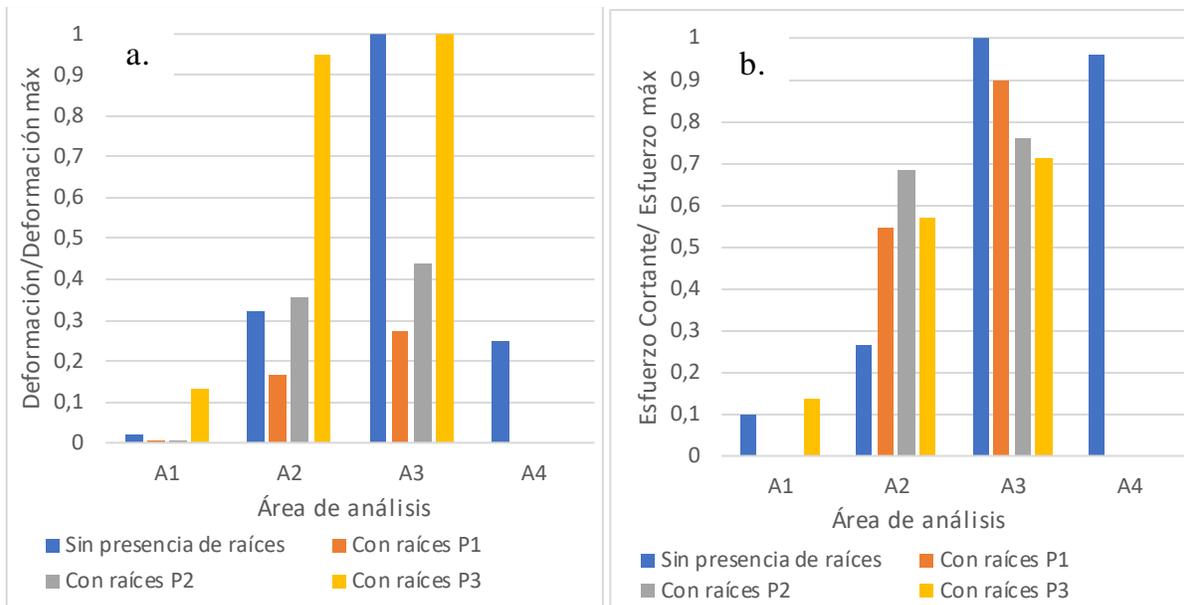


Figura 119. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).



*Figura 120.* Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

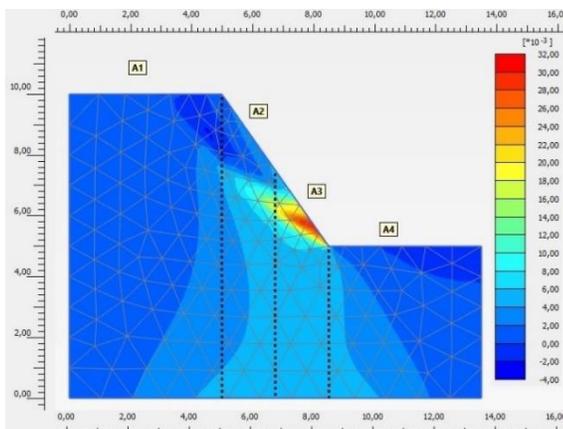
#### **5.4.3.7 *Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=55^\circ$ , sin nivel freático.***

Del mismo modo que el talud con pendiente de  $45^\circ$ , en los modelos realizados de los taludes con ángulos de inclinación de  $55^\circ$ , en la Figura 121, la Figura 122 y la Figura 123, se puede evidenciar el mecanismo de falla del modelo sin la presencia de raíces y la contribución de las raíces en el modelo.

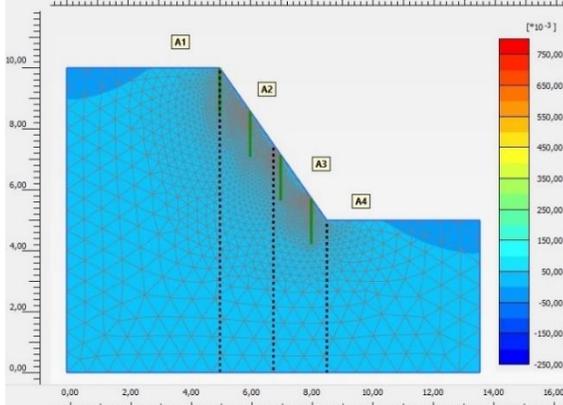
La mayor concentración de deformaciones se presenta en el pie del talud o área 3 y adicional a esto, la relación de las deformaciones que se presentan en los modelos sin la presencia de las raíces tiende a ser mayor que la de los modelos en los que si se tienen en cuenta, donde también se puede evidenciar que los modelos con la posición 3 de las raíces alcanzan valores similares en las áreas 2 y 3.

Para los esfuerzos cortantes, la mayor concentración de esfuerzos se presenta en las áreas 2, 3 y 4, mostrando un valor que sobresale de los demás que es el del modelo de la posición 3, en el pie del talud. Estos valores de la relación de los esfuerzos cortantes tienden a ser similares para los modelos con y sin raíces a excepción del área de la base del talud, donde los esfuerzos cortantes del modelo sin raíces son superiores. Por otro lado, en la Figura 122, se puede observar como claramente los anclajes hacen que esa gran concentración de esfuerzos que se presenta en el pie del talud del modelo sin presencia de raíces se logre disipar y homogenizar por la presencia de estos anclajes.

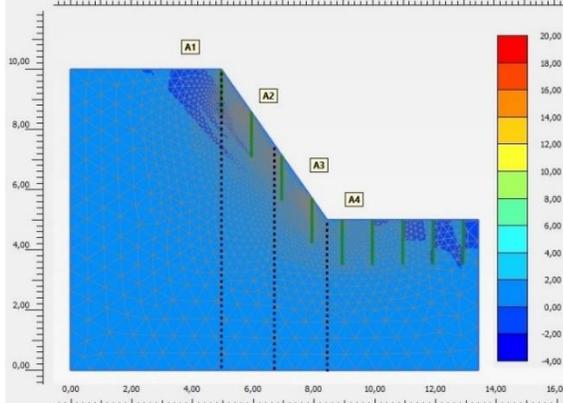
a.



b.



c.



d.

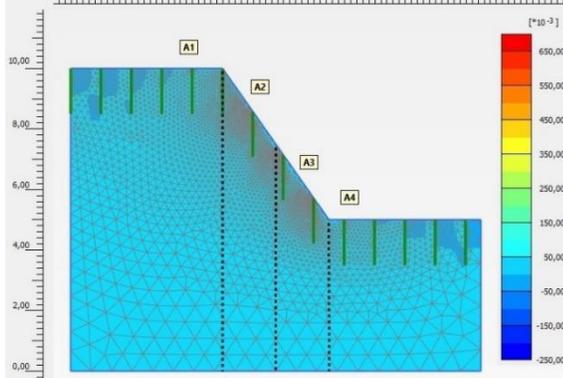
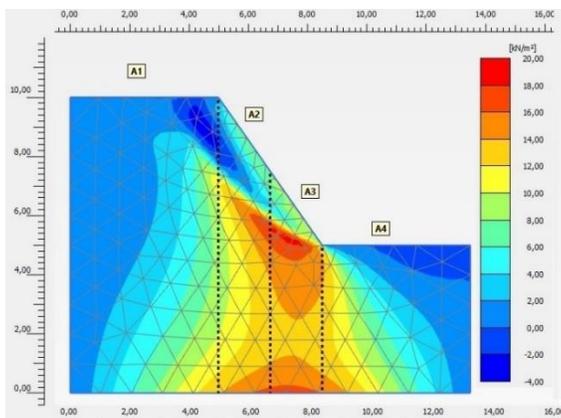
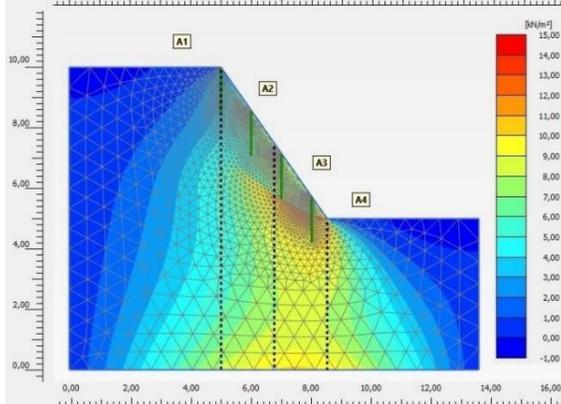


Figura 121. Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 55°. Sin nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

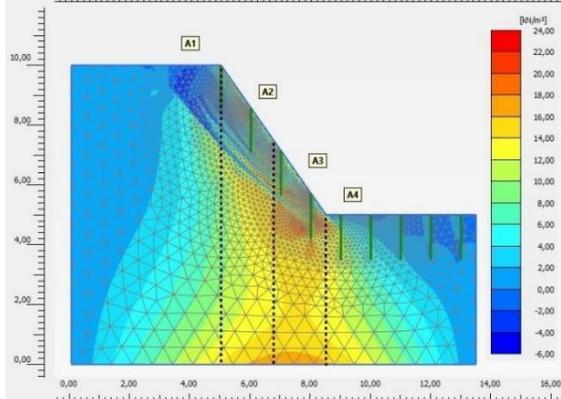
a.



b.



c.



d.

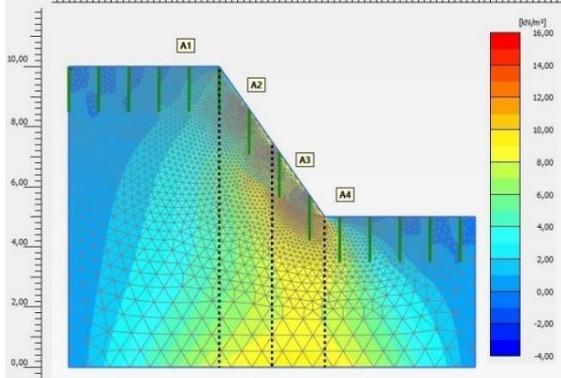
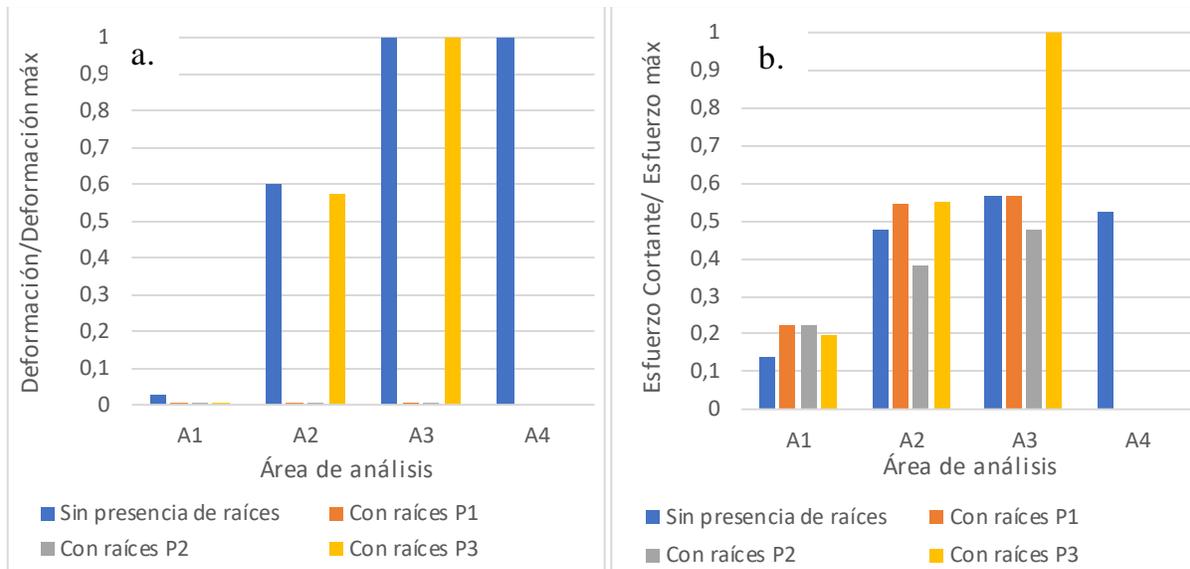


Figura 122. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 55°. Sin Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

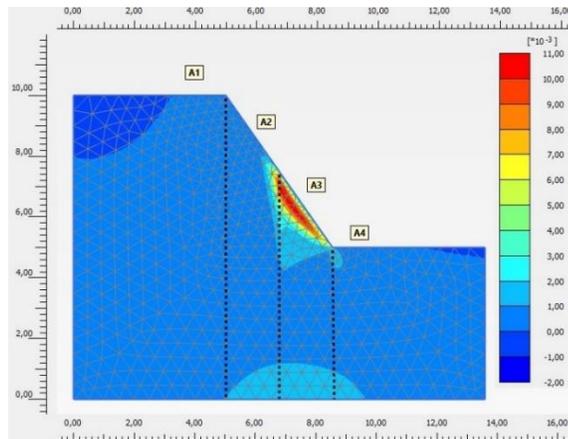


**Figura 123.** Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 55°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Sin nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

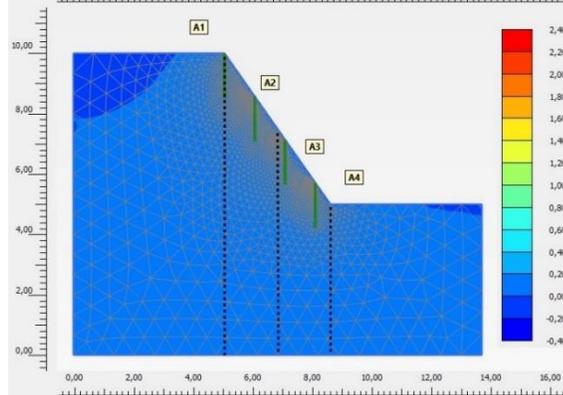
#### **5.4.3.8 Análisis del mecanismo de falla debido a la presencia de las raíces, talud con ángulo de inclinación $\beta=55^\circ$ , con nivel freático.**

Para los modelos sin la presencia de raíces, la concentración de deformaciones se presenta en las áreas 2 y 3, y la concentración de esfuerzos cortantes se presenta en las áreas 3 y 4, como se puede observar en la Figura 125 y Figura 126. Para los modelos con presencia de raíces, la relación de las deformaciones es mucho menor en todas las áreas, excepto en las del área 3 del modelo el cual tiene las raíces en la posición 3 (corona + pendiente + pie), donde también alcanza el valor máximo de deformación. En los esfuerzos cortantes se puede observar que en el área 3, la relación de esfuerzos de los modelos con raíces es menor que la del modelo sin raíces y complementando esto, en la Figura 125, se puede observar que los esfuerzos cortantes en esta área tienen a disiparse como ya se ha mencionado en los otros casos, y también se observa que los valores del esfuerzo cortante que resultan en esta área tienden a ser mayores con la presencia de las raíces. Como se ha comentado, independientemente de que se haya generado un aumento de los esfuerzos cortantes, también se presentó un incremento de la resistencia al corte del suelo.

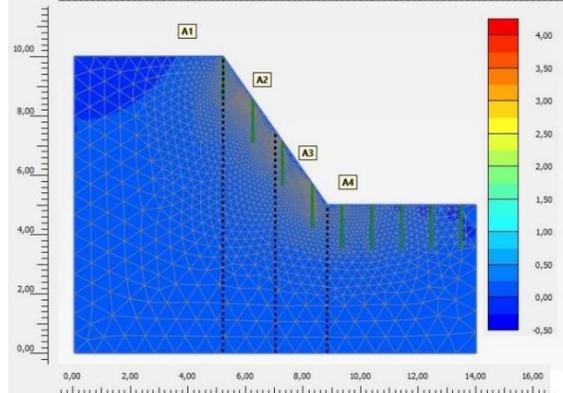
a.



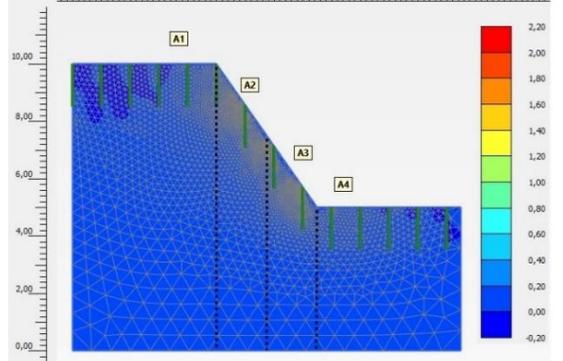
b.



c.

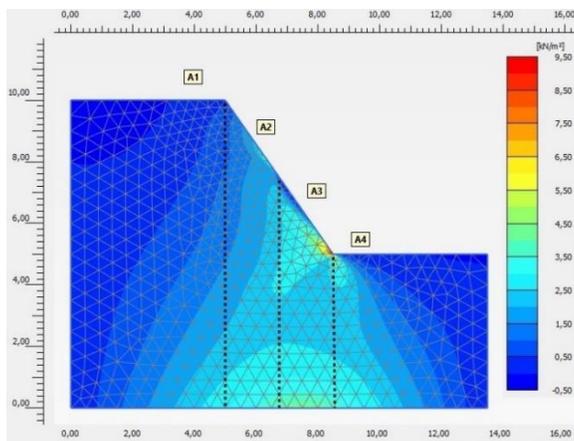


d.

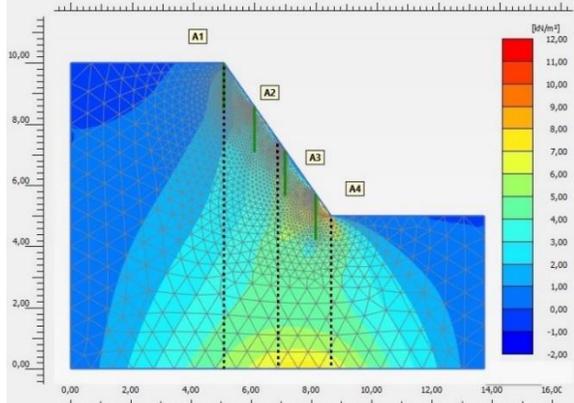


*Figura 124.* Diagrama de deformaciones para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

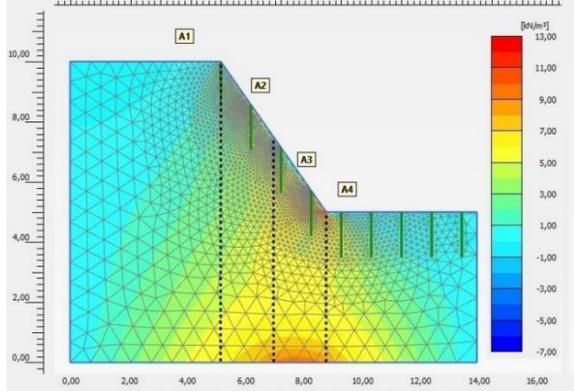
a.



b.



c.



d.

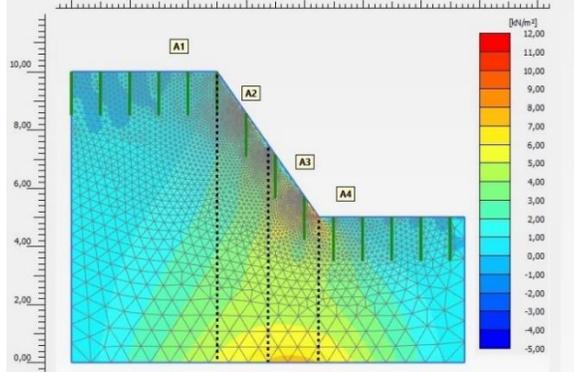


Figura 125. Diagrama de esfuerzos cortantes para los modelos con ángulos de inclinación de 45°. Con Nivel freático. Modelación raíces como anclajes - Plaxis. a) Modelo sin la presencia de raíces, b) Modelo con la posición 1 (Pendiente), c) Modelo con la posición 2 (pendiente+pie), d) Modelo con la posición 3 (corona+pendiente+pie).

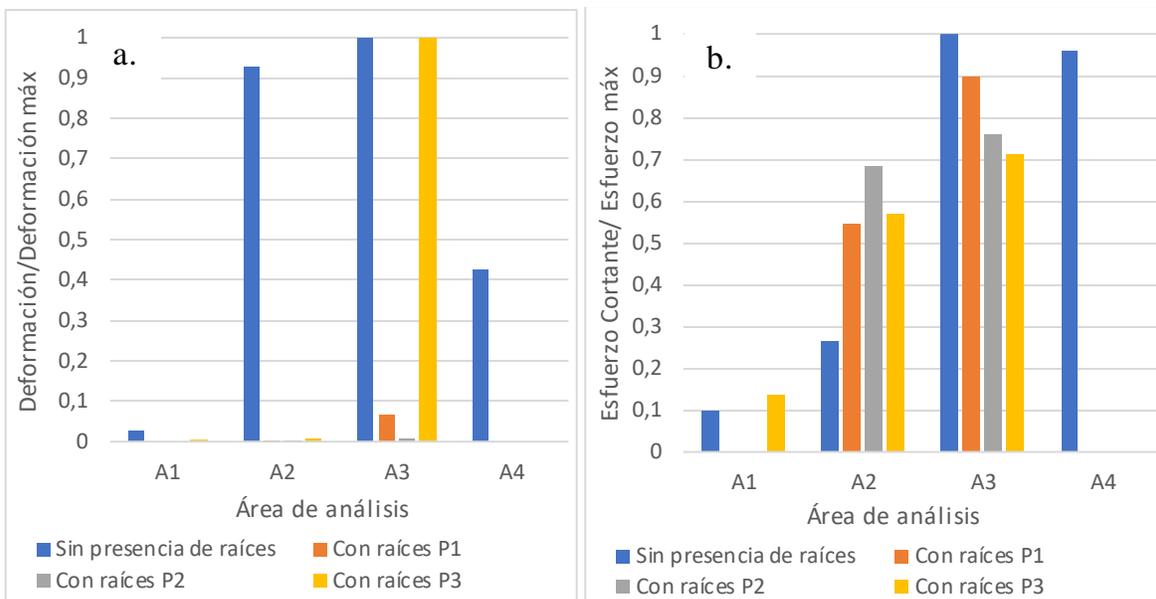


Figura 126. Relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, para un talud de 45°, en función del área de análisis del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. Modelación 4. (Con nivel freático). a) Deformaciones, b) Esfuerzos

## 5.5 Modelación 5: Modelación de la raíz individual – Plaxis 2D.

A continuación, se darán a conocer algunos ejemplos de los modelos realizados en Plaxis para la obtención de los Factores de Seguridad, los cuales se pueden observar en la Figura 127a, la Figura 127b y la Figura 127c. En la Figura 127d se muestra la arquitectura de la raíz en los modelos, la cual se construyó mediante el uso de elementos de estructuras de vigas embebidas, los cuales se unieron de tal forma para la conformación de las raíces, tal como se describe en el numeral 4.3.

Los tres modelos tienen un ángulo de inclinación de 45° y no tienen presencia del nivel freático. En ellos se pueden observar los elementos estructurales que simulan la presencia de las raíces, los cuales tienen una longitud de 1.5 m y están separados a una distancia horizontal de 1 m; en estas figuras también se pueden observar las tres posiciones en las que se ubicaron las raíces.

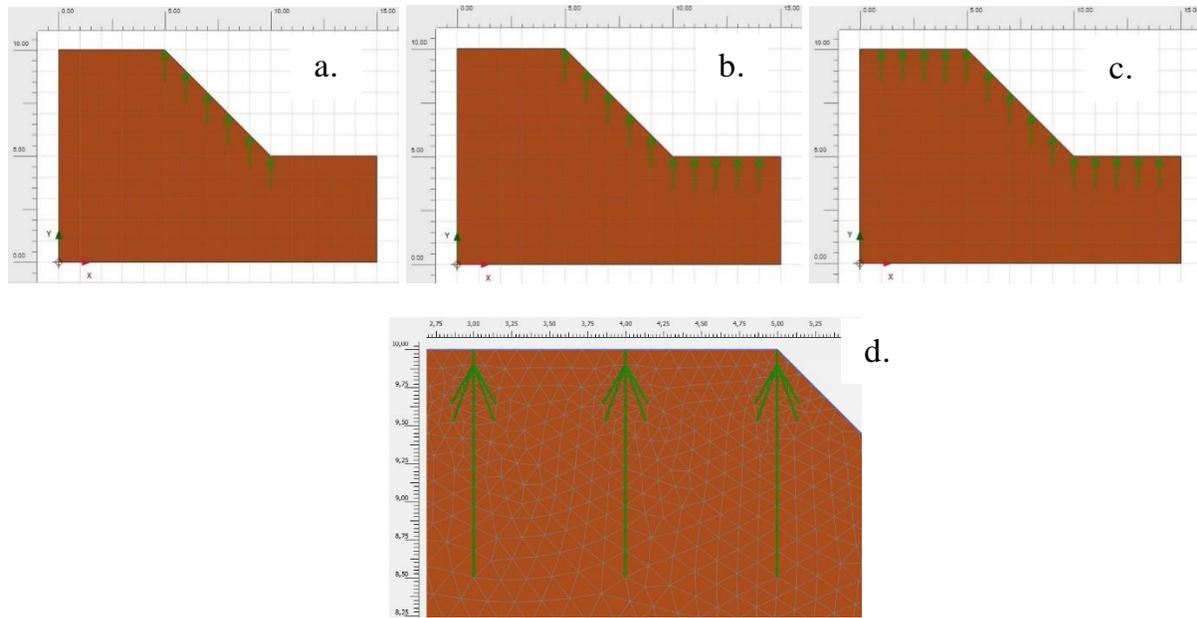


Figura 127. Posición de las raíces modeladas mediante la modelación individual de la raíz en el talud de análisis, a) Modelo 117 - P1 (pendiente) - 45°, b) Modelo 125 - P2 (pendiente + pie) - 45°, c) Modelo 133 - P3 (corona + pendiente + pie) - 45°. d) Arquitectura de la raíz empleada en las modelaciones.

### 5.5.1 Influencia de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud en los resultados del Factor de Seguridad. Resultados.

En la Tabla 54 y la Tabla 55 se dan a conocer los resultados del Factor de Seguridad obtenidos en las modelaciones, para cada una de las posiciones de las raíces y los diferentes ángulos de inclinación que se tuvieron en cuenta, para la condición con nivel freático y sin nivel freático. En la Figura 128 y la Figura 129, se muestra la representación gráfica de los resultados del factor de seguridad mostrados en las tablas mencionadas.

Al igual que en la modelación del incremento de la cohesión - Plaxis y la modelación de raíces como anclajes - Plaxis, en los casos en los que el Factor de Seguridad obtenido en Plaxis es menor a 1, durante el cálculo de las fases, el programa arroja una alerta indicando que el cuerpo del suelo está colapsando por lo que el programa no indica el valor del Factor de Seguridad. Por esta razón, los espacios en blanco de los resultados del Factor de Seguridad que se observan en la Tabla 54 y la Tabla 55, corresponden a valores inferiores a 1. Adicional a esto, en este tipo de modelación

también se presentó el inconveniente mencionado en el numeral 5.4.1, en donde los modelos con ángulos de inclinación de 25°, para la posición de las raíces 1 (pendiente), 2 (pendiente + pie) y 3 (corona + pendiente + pie), y sin nivel freático, arrojaban resultados erróneos.

Tabla 54. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de la raíz individual.

Ángulo de inclinación del talud (°)	FACTOR DE SEGURIDAD - Sin NF			
	Sin raíces	Posición de las raíces		
		Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona + pendiente + pie
25	1,954	-	-	-
35	1,436	1,505	1,502	1,506
45	1,119	1,184	1,181	1,189
55	-	-	-	-

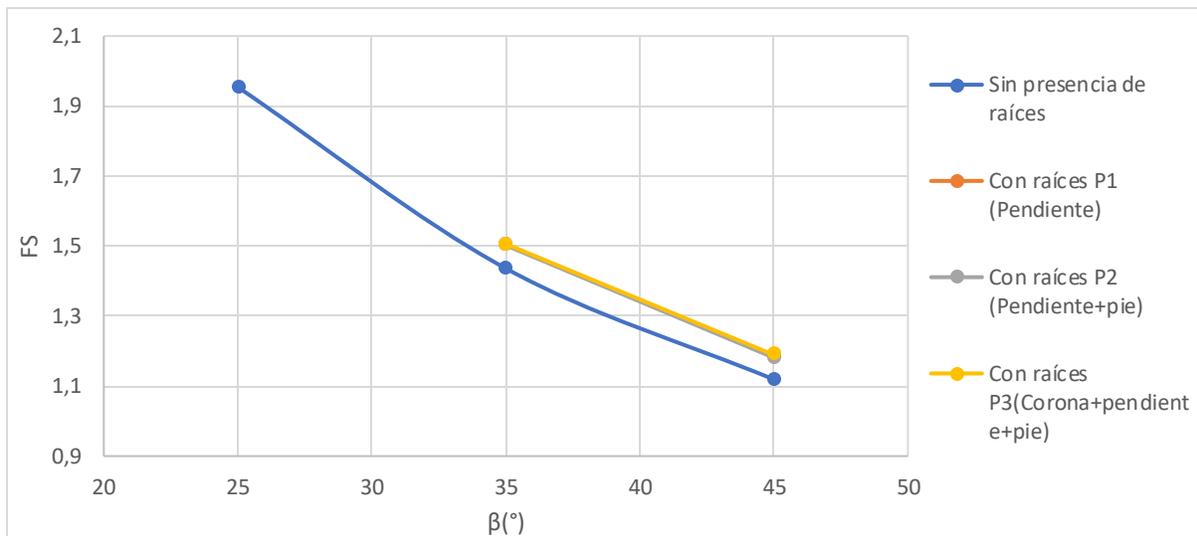


Figura 128. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de la raíz individual.

Tabla 55. Factor de Seguridad obtenido para cada posición de la raíz, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos con nivel freático). Modelación de la raíz individual.

Ángulo de inclinación del talud (°)	FACTOR DE SEGURIDAD - Con NF			
	Sin raíces	Posición de las raíces		
		Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona + pendiente + pie
25	1,474	1,503	1,532	-
35	1,039	1,061	1,061	-
45	-	-	-	-
55	-	-	-	-

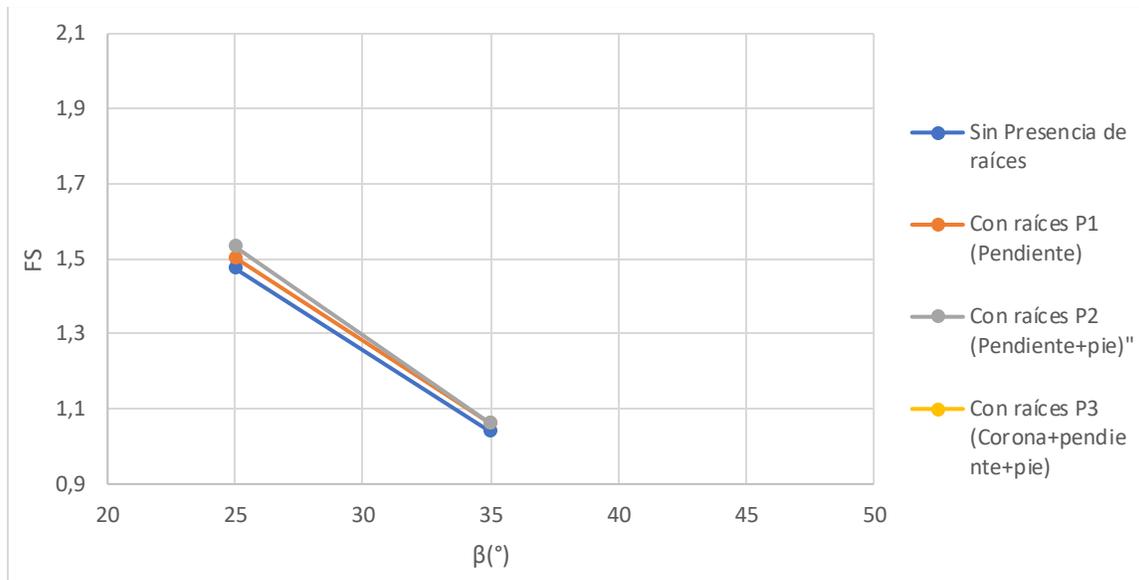


Figura 129. Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, para cada una de las posiciones de la raíz. (Sin nivel freático). Modelación de la raíz individual.

En la Figura 129 y la Figura 130, se puede observar que el Factor de seguridad es más alto en los modelos con presencia de las raíces que en los modelos donde no se tuvieron en cuenta, para la condición con nivel freático y sin nivel freático. Adicional a esto, de manera similar al tipo de modelación de raíces como anclajes – Plaxis, los resultados del Factor de Seguridad son muy similares para las tres posiciones que ocupan las raíces, por lo que no se podría indicar cual es la posición sobre la cual se obtienen mejores resultados. En este tipo de modelación también se obtuvieron pocos datos del factor de seguridad debido a que estos son menores a 1, por lo que no se puede realizar una buena comparación entre estos.

En cuanto al ángulo de inclinación del talud, se puede apreciar que a pesar de que el ángulo de inclinación aumente, se sigue manteniendo la tendencia del aumento del Factor de seguridad debido a la presencia de las raíces en el modelo. Siempre se evidenció un aumento de los Factores de Seguridad, aunque el ángulo de inclinación aumentara.

### 5.5.2 Análisis del incremento del Factor de seguridad (%) en función de la posición de la raíz y del ángulo de inclinación del talud.

En la Tabla 56 y en la Tabla 57, se dan a conocer los incrementos del factor de seguridad obtenidos para cada una de las posiciones de la raíz y cada uno de los ángulos de inclinación del talud. En la Figura 130 y la Figura 131, se puede observar la representación gráfica de los resultados. Para este tipo de modelación, la presencia de las raíces genera un incremento en los Factores de Seguridad, independientemente de la posición que ocupen y la presencia o no del nivel freático. Para el cálculo de los incrementos del factor de seguridad se toman como referencia los modelos que no tienen presencia de raíces (modelos de control).

Tabla 56. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de la raíz individual.

Ángulo de inclinación del talud (°)	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) - Sin NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1 Pendiente	Posición 2 Pendiente + pie	Posición 3 Corona+pendiente+pie
25	-	-	-
35	4,81	4,60	4,87
45	5,81	5,54	6,26
55	-	-	-

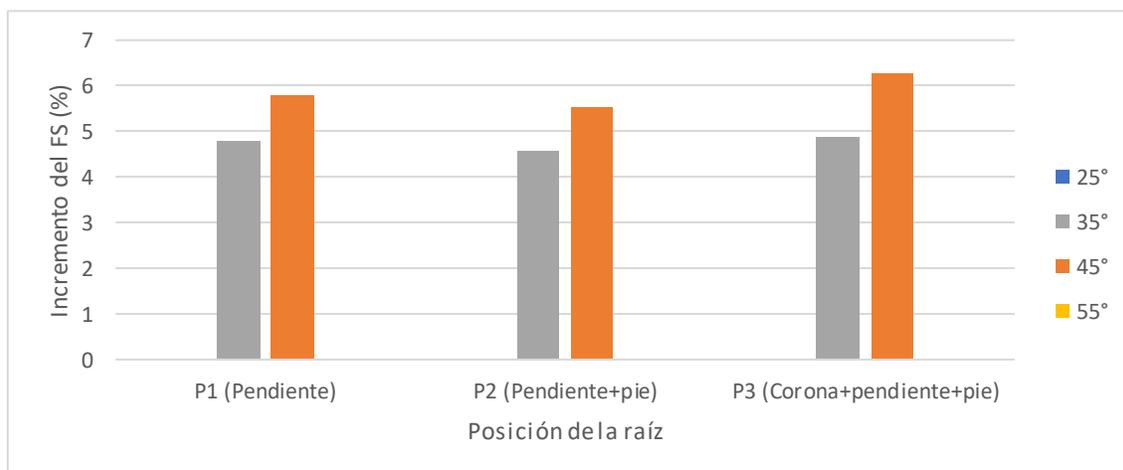


Figura 130. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Sin nivel freático). Modelación de la raíz individual.

Tabla 57. Incremento del Factor de Seguridad generado por la presencia de las raíces, para los distintos ángulos de inclinación del talud (modelos sin nivel freático). Modelación de la raíz individual.

Ángulo de inclinación del talud (°)	INCREMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD (%) - CON NF		
	Posición de la raíz		
	Posición 1	Posición 2	Posición 3
	Pendiente	Pendiente + pie	Corona+pendiente+pie
25	1,97	3,93	-
35	2,12	2,12	-
45	-	-	-
55	-	-	-

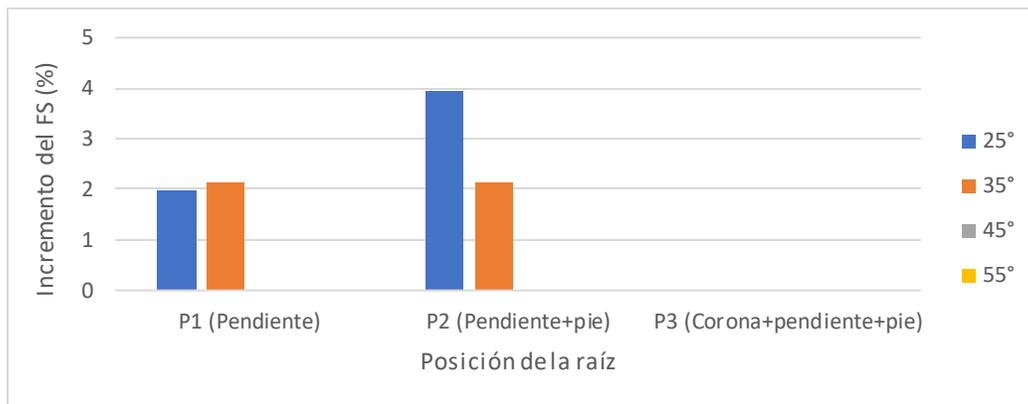


Figura 131. Incremento del Factor de Seguridad en función de la posición de las raíces, para cada uno de los ángulos de inclinación del talud. (Con nivel freático). Modelación de la raíz individual.

Como se puede observar en la Figura 130, en los modelos sin presencia del nivel freático, la posición 3 de las raíces (corona + pendiente + pie), es la que genera un mayor incremento del Factor de Seguridad, pero no es tan significativo comparado con las otras dos posiciones de las raíces, las cuales son menores en un 5% y 10%. Por otro lado, se puede evidenciar que el incremento del factor de seguridad va creciendo a medida que aumenta el ángulo de inclinación del talud. En cuanto a los modelos con nivel freático, se puede observar que la posición 2 de las raíces (pendiente + pie), para un ángulo de 25° tiene el mayor incremento (cerca del 50% con respecto a la posición 1), sin embargo, debido a la ausencia de datos, no se pueden sacar conclusiones en cuanto a la posición que mayores efectos tiene en este tipo de modelación y el efecto que tienen con el ángulo de inclinación del talud. Con este tipo de modelación, se obtienen incrementos del factor de

seguridad del orden de 5%, de manera similar a los obtenidos en el tipo de modelación de las raíces como anclajes – Plaxis.

## 5.6 Comparación entre los resultados del Factor de Seguridad: Modelos en Slide y en Plaxis.

### 5.6.1 Factor de Seguridad de cada una de las modelaciones.

En la Tabla 58 y la Tabla 59, se da a conocer un comparativo de los resultados del Factor de Seguridad para los cinco tipos de modelación analizadas, para cada una de las posiciones en las que se ubicaron las raíces, en función del ángulo de inclinación del talud, para la condición con nivel freático y sin nivel freático. En la Figura 132 y la Figura 133, se muestra la representación gráfica de estos resultados

Tabla 58. Resultados del Factor de Seguridad de los cinco tipos de modelación. Modelos sin Nivel Freático.

FACTOR DE SEGURIDAD - SIN NF																	
Ángulo de inclinación del talud (°)	Modelos SLIDE						Modelos Plaxis										
	Sin raíces	Modelación 1			Modelación 2			Sin raíces	Modelación 3			Modelación 4			Modelación 5		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
25	2,02	2,11	2,12	2,17	2,15	2,15	2,14	1,95	2,04	2,06	2,09	-	-	-	-	-	-
35	1,53	1,63	1,63	1,68	1,66	1,66	1,63	1,44	1,56	1,57	1,58	1,50	1,50	1,50	1,51	1,50	1,51
45	1,23	1,33	1,33	1,38	1,00	1,00	1,00	1,12	1,21	1,22	1,25	1,19	1,18	1,19	1,18	1,18	1,19
55	1,02	1,11	1,11	1,14	0,76	0,76	0,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 59. Resultados del Factor de Seguridad de los cinco tipos de modelación. Modelos sin Nivel Freático.

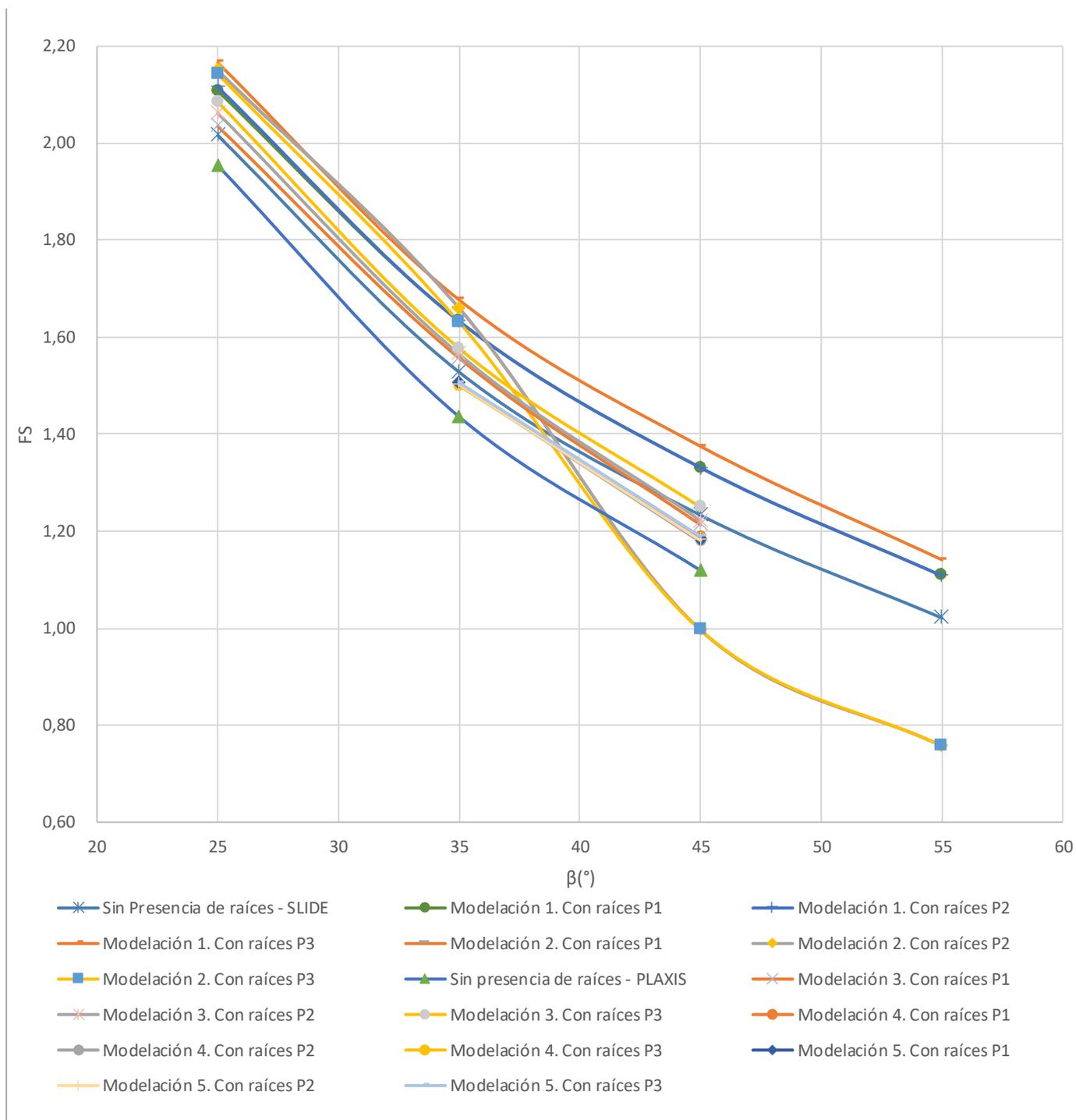
FACTOR DE SEGURIDAD - CON NF																	
Ángulo de inclinación del talud (°)	Modelos SLIDE						Modelos Plaxis										
	Sin raíces	Modelación 1			Modelación 2			Sin raíces	Modelación 3			Modelación 4			Modelación 5		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
25	1,53	1,58	1,62	1,65	1,63	1,63	1,63	1,47	1,52	1,57	1,58	1,51	1,53	1,52	1,50	1,53	-
35	1,22	1,30	1,30	1,33	1,34	1,34	1,31	1,04	1,10	1,11	1,13	-	-	1,06	1,06	1,06	-
45	1,00	1,10	1,10	1,12	0,77	0,77	0,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	0,84	0,92	0,92	0,93	0,72	0,72	0,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tipos de modelación:

- Modelación 1: Incremento de la cohesión – Slide.
- Modelación 2: Raíces como anclajes – Slide.
- Modelación 3: Incremento de la cohesión – Plaxis.
- Modelación 4: Raíces como anclajes – Plaxis.
- Modelación 5: Raíz individual – Plaxis.

Posiciones de las raíces:

- P1: Pendiente.
- P2: Pendiente + pie.
- P3: Corona + pendiente + pie.



**Figura 132.** Comparativo de los resultados del Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, obtenidos de las modelaciones 1, 2, 3, 4 y 5. Condición sin nivel freático.

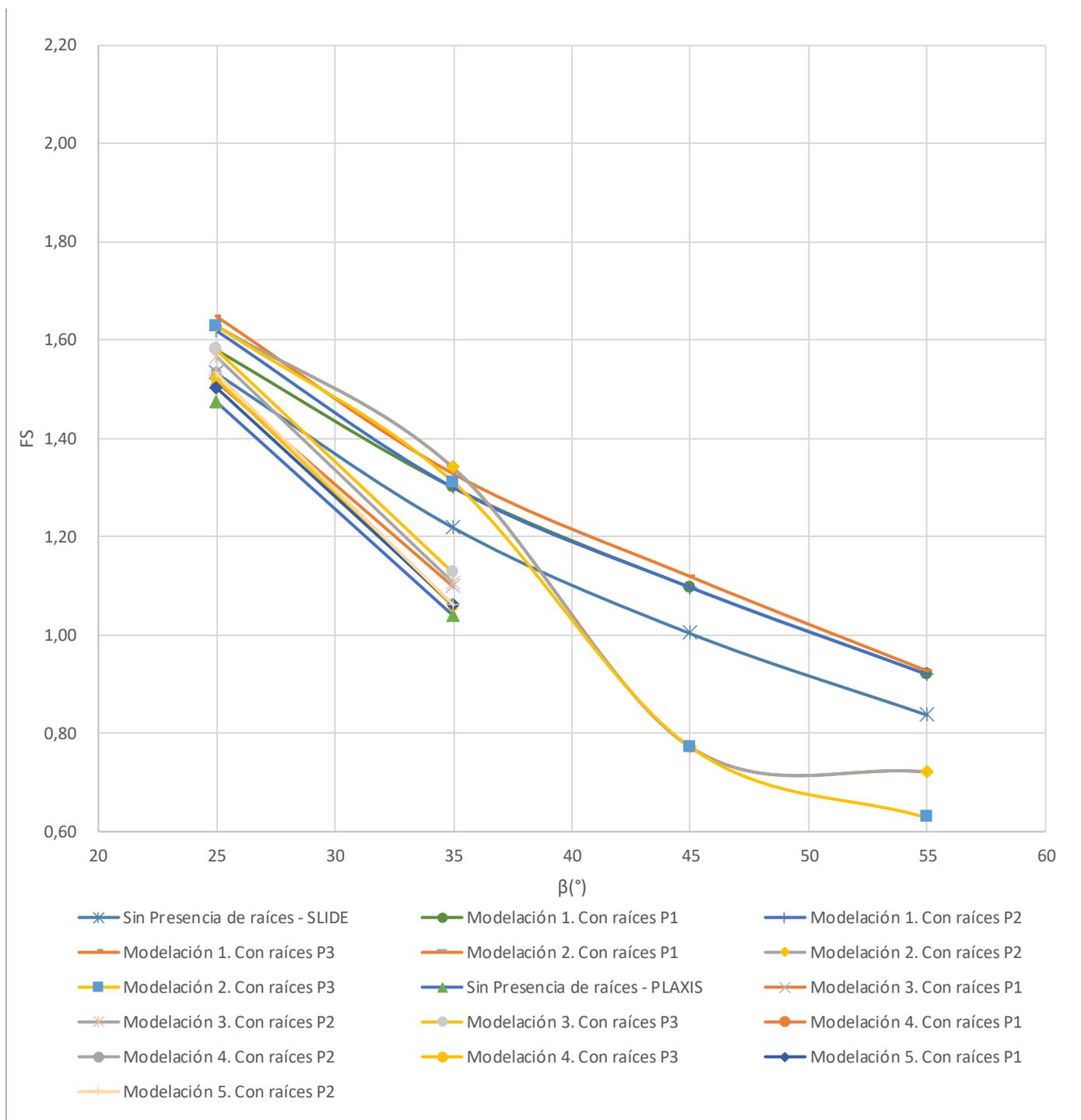


Figura 133. Comparativo de los resultados del Factor de Seguridad en función del ángulo de inclinación del talud, obtenidos de las modelaciones 1, 2, 3, 4 y 5. Condición con nivel freático.

En la Figura 132 y la Figura 133, se puede observar que, a nivel general, los resultados obtenidos en Slide son mayores que los resultados obtenidos en Plaxis, para la condición con nivel freático y sin nivel freático, sin embargo, a pesar de esta diferencia entre los resultados de ambos softwares, los valores se mantienen en un mismo rango de magnitudes, para un mismo ángulo de inclinación del talud y una misma posición de las raíces.

En cuanto a los factores de Seguridad obtenidos en Slide, en las modelaciones del incremento de la cohesión – Slide y las modelaciones de raíces como anclajes – Slide, se puede observar que para ángulos de inclinación del talud de  $25^\circ$  y  $35^\circ$ , los resultados son muy similares, están en el mismo rango de magnitudes, por lo que se podría afirmar que se puede utilizar cualquiera de estos dos tipos de modelaciones para representar taludes de estas características obteniendo resultados similares. Sin embargo, para taludes con ángulos de inclinación superiores a  $35^\circ$ , los resultados varían en una gran proporción, debido a que para taludes con pendientes a  $38^\circ$ , el tipo de modelación de raíces como anclajes – Slide, no es adecuado por las razones mencionadas en el numeral 5.2.1. En consecuencia, para taludes con pendientes superiores a  $35^\circ$ , se debe emplear el tipo de modelación del incremento de la cohesión – Slide, para obtener resultados confiables.

Por otro lado, en los Factores de Seguridad obtenidos en Plaxis, no se observa un cambio tan grande en los resultados de las modelaciones del incremento de la cohesión – Plaxis, raíces como anclajes – Plaxis y modelación de raíces individuales – Plaxis; a nivel general hay muy poca variación en los resultados obtenidos en cada una de las modelaciones para un mismo ángulo de inclinación y una misma posición de la raíz, por lo que se podría afirmar que se puede utilizar cualquiera de estas modelaciones para representar taludes de estas características obteniendo así resultados similares, sin embargo, el hecho de que se puedan comparar pocos resultados en las modelaciones de raíces como anclajes – Plaxis y modelación de raíces individuales – Plaxis, y en especial para la condición con nivel freático, debido a que en los casos en los que el Factor de

Seguridad obtenido en Plaxis es menor a 1, durante el cálculo de las fases, el programa arroja una alerta indicando que el cuerpo del suelo está colapsando por lo que el programa no indica el valor del Factor de Seguridad, como se mencionó anteriormente, resulta ser una gran desventaja y un posible problema.

Comparando los resultados del tipo de modelación del incremento de la cohesión con Slide, y del tipo de modelación del incremento de la cohesión con Plaxis, se puede observar que efectivamente los Factores de Seguridad tienden a ser mayores, pero no existe una diferencia significativa entre ellos, estos valores tienen magnitudes similares (la diferencia entre los resultados es de máximo el 10%), por lo que estos dos tipos de modelaciones pueden ser las que más se destaquen con respecto a los demás. En cada uno de estos tipos de modelación se pueden obtener y determinar parámetros muy importantes como lo es la profundidad de la superficie de falla, en el caso del Slide, y las concentraciones de esfuerzos cortantes y deformaciones para poder predecir y establecer el mecanismo de falla de un determinado talud, en el caso de Plaxis.

Haciendo esta comparación, se pudo evidenciar que independientemente del tipo de modelación realizada, los resultados obtenidos son coherentes y se encuentran en rangos de magnitudes similares, por lo que se puede afirmar que el tipo de modelación del incremento de la cohesión – Slide, y del tipo de modelación del incremento de la cohesión – Plaxis, son los que mejor podrían representar el efecto mecánico de las raíces en la estabilidad de taludes.

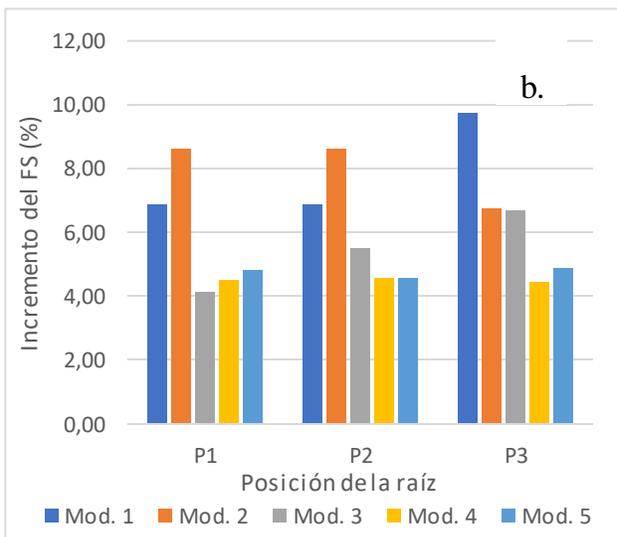
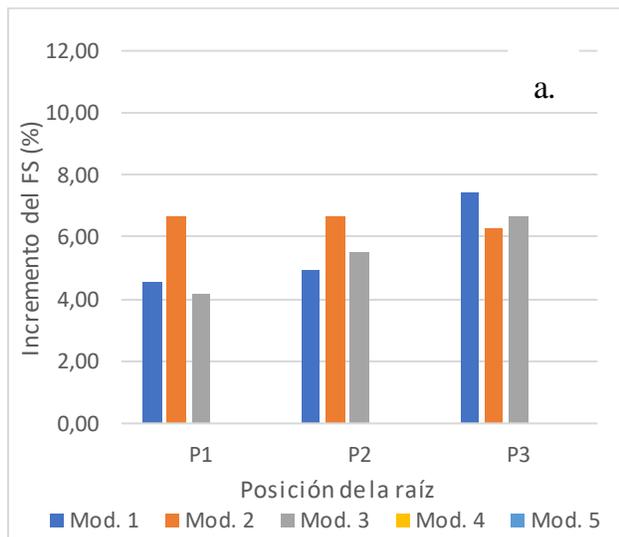
### **5.6.2 Comparación de los incrementos del Factor de seguridad de cada tipo de modelación**

En la Tabla 60 y la Tabla 61, se dan a conocer los incrementos del Factor de Seguridad obtenidos en cada tipo de modelación realizada, para cada ángulo de inclinación del talud y cada posición de la raíz evaluada. Estos incrementos se muestran para la condición sin nivel freático y con nivel

freático. En la Figura 134 y Figura 135, se presentan los incrementos del factor de Seguridad para cada ángulo de inclinación, para así poder comparar el incremento de cada tipo de modelación para las diferentes pendientes del talud. Los resultados de la disminución en los Factores de Seguridad del tipo de modelación de raíces como anclajes - Slide, para ángulos de inclinación mayores a 35° no se graficaron para poder comparar de una mejor manera todos los incrementos de los cinco tipos de modelación.

Tabla 60. Incrementos del Factor de Seguridad de cada tipo de modelación, para cada ángulo de inclinación del talud y cada posición de la raíz, analizada. (Sin nivel freático)

INCREMENTO DEL FS (%) - Sin NF												
Modelación	$\beta = 25^\circ$			$\beta = 35^\circ$			$\beta = 45^\circ$			$\beta = 55^\circ$		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Modelación 1	4,56	4,96	7,44	6,87	6,87	9,75	7,95	7,95	11,52	8,52	8,52	11,75
Modelación 2	6,65	6,65	6,30	8,64	8,64	6,74	-19,22	-19,22	-19,22	-25,86	-25,86	-25,86
Modelación 3	4,15	5,53	6,70	4,15	5,53	6,70	8,40	9,20	11,62	-	-	-
Modelación 4	-	-	-	4,53	4,60	4,46	6,17	5,27	6,08	-	-	-
Modelación 5	-	-	-	4,81	4,60	4,87	5,81	5,54	6,26	-	-	-



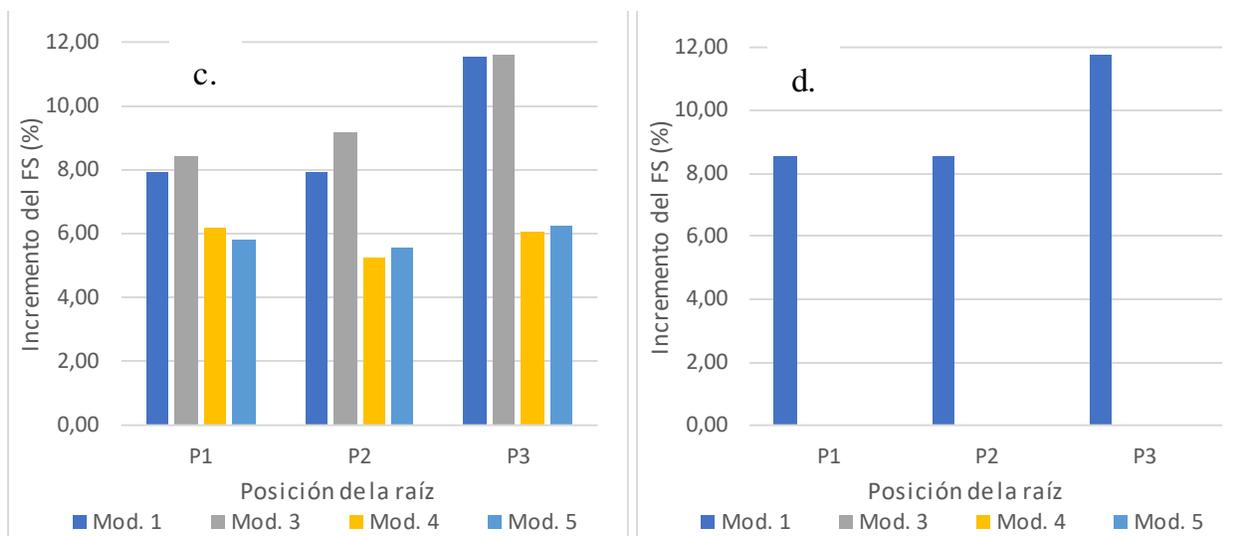
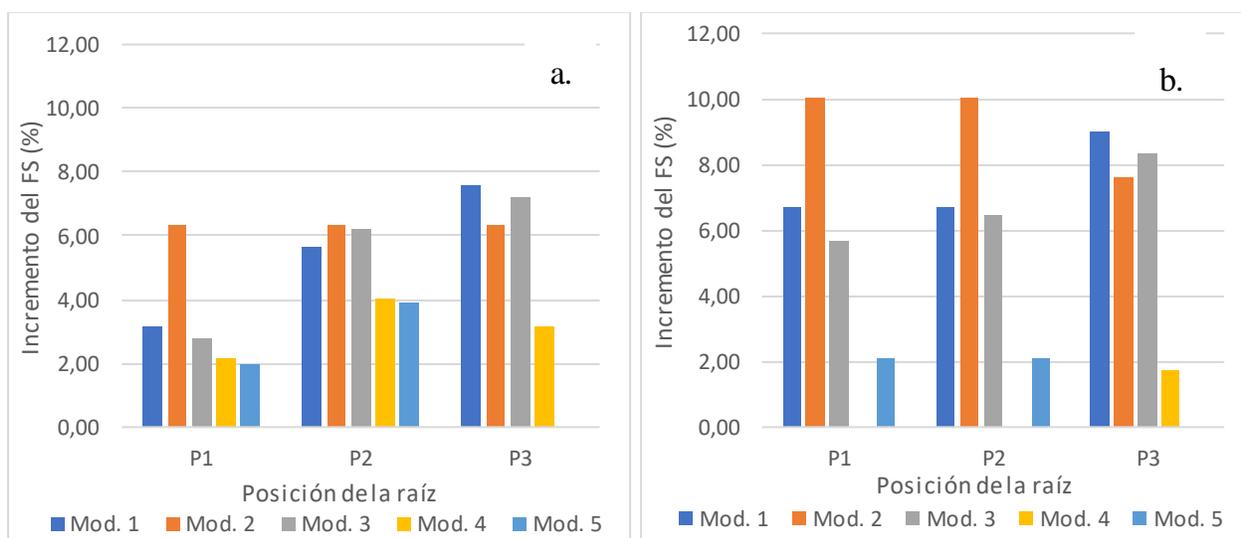


Figura 134. Incrementos del Factor de Seguridad de cada tipo de modelación, para cada ángulo de inclinación del talud analizado. Condición sin nivel freático. a) Talud de 25°, b) Talud de 35°, c) Talud de 45°, d) Talud de 55°.

Tabla 61. Incrementos del Factor de Seguridad de cada tipo de modelación, para cada ángulo de inclinación del talud y cada posición de la raíz analizada. (Con nivel freático)

INCREMENTO DEL FS (%) - Con NF												
Modelación	$\beta = 25^\circ$			$35^\circ$			$45^\circ$			$55^\circ$		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Modelación 1	3,13	5,68	7,57	6,73	6,73	9,03	9,37	9,37	11,57	9,92	9,92	10,75
Modelación 2	6,33	6,33	6,33	10,02	10,02	7,64	-23,03	-23,03	-23,03	-13,86	-13,86	-24,97
Modelación 3	2,78	6,24	7,19	5,68	6,45	8,37	-	-	-	-	-	-
Modelación 4	2,17	4,00	3,19	-	-	1,73	-	-	-	-	-	-
Modelación 5	1,97	3,93	-	2,12	2,12	-	-	-	-	-	-	-



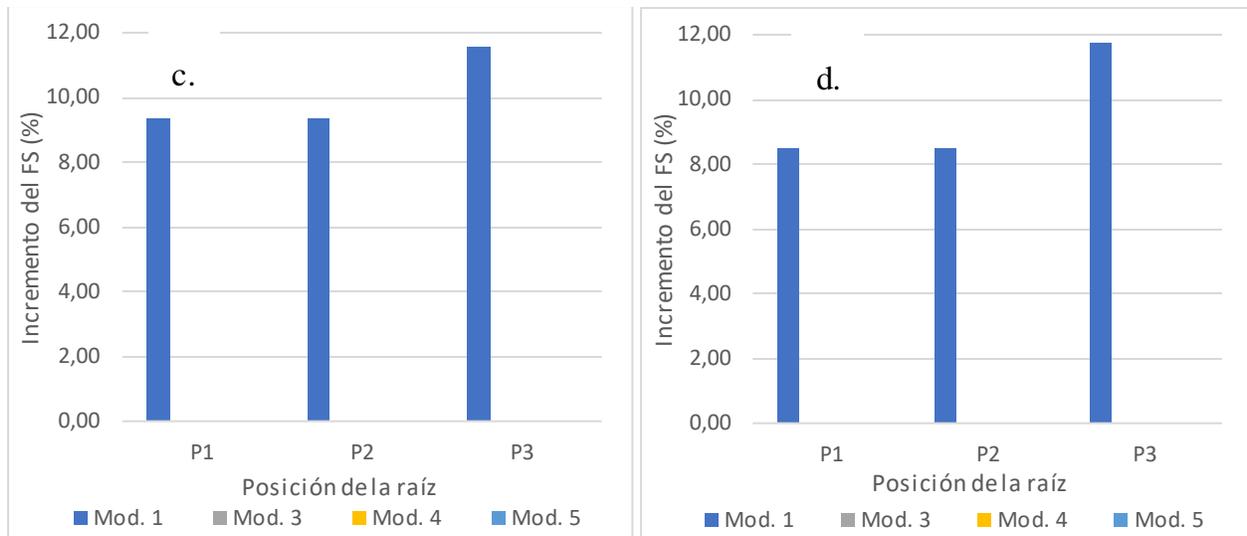


Figura 135. Incrementos del Factor de Seguridad de cada tipo de modelación, para cada ángulo de inclinación del talud analizado. Condición sin nivel freático. a) Talud de 25°, b) Talud de 35°, c) Talud de 45°, d) Talud de 55°.

En la Figura 134 y la Figura 135, se puede observar que los incrementos más bajos del Factor de Seguridad se obtienen en las modelaciones de raíces como anclajes – Plaxis y modelación de la raíz individual – Plaxis, alcanzando valores máximos de 6%, y, por el contrario, los incrementos más altos se obtienen con el tipo de modelación del incremento de la cohesión – Slide, alcanzando valores cercanos al 12% y algunos datos específicos del tipo de modelación del incremento de la cohesión – Plaxis, donde también se obtuvieron incrementos cercanos al 12%. Con los resultados de estas dos Figuras, se puede evidenciar que, a nivel general, los incrementos del Factor de Seguridad son similares en cuanto a magnitud, y como se mencionó en el numeral anterior, los resultados del tipo de modelación del incremento de la cohesión – Slide y el incremento de la cohesión – Plaxis, que son los más destacados, tienden a ser similares. Hay unos casos en que con ciertos ángulos de inclinación del talud uno de los dos presenta valores mayores con respecto al otro, pero en general, se mantiene esta tendencia.

Por último, como se ha mencionado anteriormente, los resultados obtenidos de los incrementos del factor de seguridad generado por la presencia de las raíces, de cada una de las cinco modelaciones, son muy similares a los resultados obtenidos por varios autores en diferentes

investaciones, los cuales ya se han citado, como es el caso de Chok et al., (2004); Gentile et al., (2010); Sambasivarao, (2015), entre otros.

## **5.7 Análisis Paramétrico**

Se realizó un análisis paramétrico para evaluar el efecto de la variación de los parámetros de resistencia del suelo (cohesión y ángulo de fricción), en los resultados del Factor de Seguridad, profundidad de la superficie de falla y en el mecanismo de falla de un talud reforzado con raíces.

Para realizar este análisis, se tomó de referencia el tipo de modelación del incremento de la cohesión - Slide y el tipo de modelación del incremento de la cohesión – Plaxis, ya que estas son las modelaciones que mejor representan el efecto de las raíces por las razones ya mencionadas en el numeral anterior, y adicional a esto, con estos tipos de modelaciones, se puede calcular el Factor de Seguridad por dos métodos diferentes, se puede identificar la profundidad de la superficie de falla y se puede analizar el mecanismo de falla mediante el análisis de las concentraciones de esfuerzos cortantes y deformaciones.

Las variables y parámetros que se manejaron para realizar los modelos, se mencionan en el numeral 4.10. En la Tabla 62, se muestran los modelos y parámetros utilizados en cada uno de ellos.

Como se mencionó anteriormente, para cada uno de estos modelos, se obtuvo el Factor de Seguridad mediante el método de Bishop (Slide) y el método de elementos finitos (Plaxis), se determinó profundidad de la superficie de falla y se analizó el mecanismo de falla.

Tabla 62. Modelos de análisis para realizar el análisis paramétrico.

Modelo	c' (kN/m <sup>2</sup> )	φ' (°)	Observación
1	5	20	Variación del ángulo de fricción del suelo
2	5	25	
3	5	30	
4	5	35	
5	1	30	Variación de la cohesión
6	2	30	
7	3	30	
8	4	30	
9	5	30	

### 5.7.1 Influencia de los parámetros de resistencia en el Factor de Seguridad y la profundidad de la superficie de falla, del suelo reforzado con raíces.

En la Tabla 63, se dan a conocer los resultados del Factor de Seguridad y de la profundidad de la superficie de falla, para los modelos analizados. En la Figura 136 y la Figura 137, se presenta la influencia del ángulo de fricción interna del suelo y la cohesión, en los resultados del Factor de seguridad y de la profundidad de la superficie de falla.

Tabla 63. Resultados del Factor de Seguridad y superficie de falla, de cada uno de los modelos realizados para el análisis paramétrico.

Modelo	c' (kN/m <sup>2</sup> )	φ' (°)	FS sin raíces (Slide)	FS con raíces (Slide)	FS sin raíces (Plaxis)	FS con raíces (Plaxis)	Prof. Sup. Falla (m) - con raíces
1	5	20	0,934	1,045	-	-	2,066
2	5	25	1,078	1,204	1	1,1	1,788
3	5	30	1,233	1,375	1,119	1,249	1,790
4	5	35	1,395	1,552	1,24	1,367	1,546
5	1	30	0,815	1,044	-	-	1,212
6	2	30	0,932	1,129	-	-	1,514
7	3	30	1,037	1,211	-	1,084	1,554
8	4	30	1,138	1,293	-	1,158	1,565
9	5	30	1,233	1,375	1,119	1,249	1,790

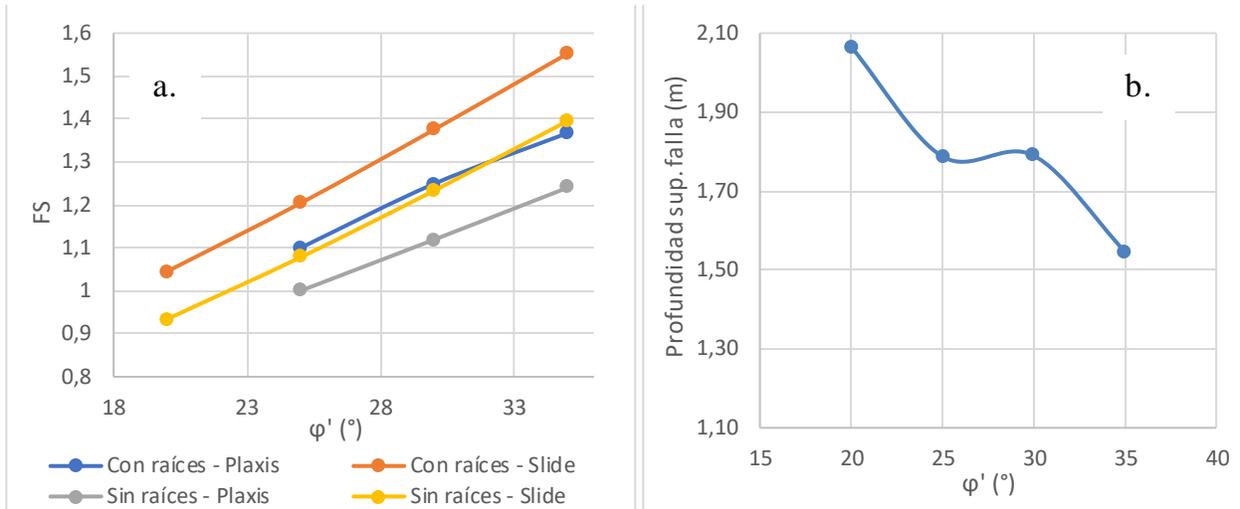


Figura 136. Influencia del ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi'$ ) en los resultados del Factor de Seguridad y de la profundidad de la superficie de falla, para un talud de  $45^\circ$  reforzado con raíces. a) análisis del Factor de Seguridad. b) Análisis de la profundidad de la superficie de falla.

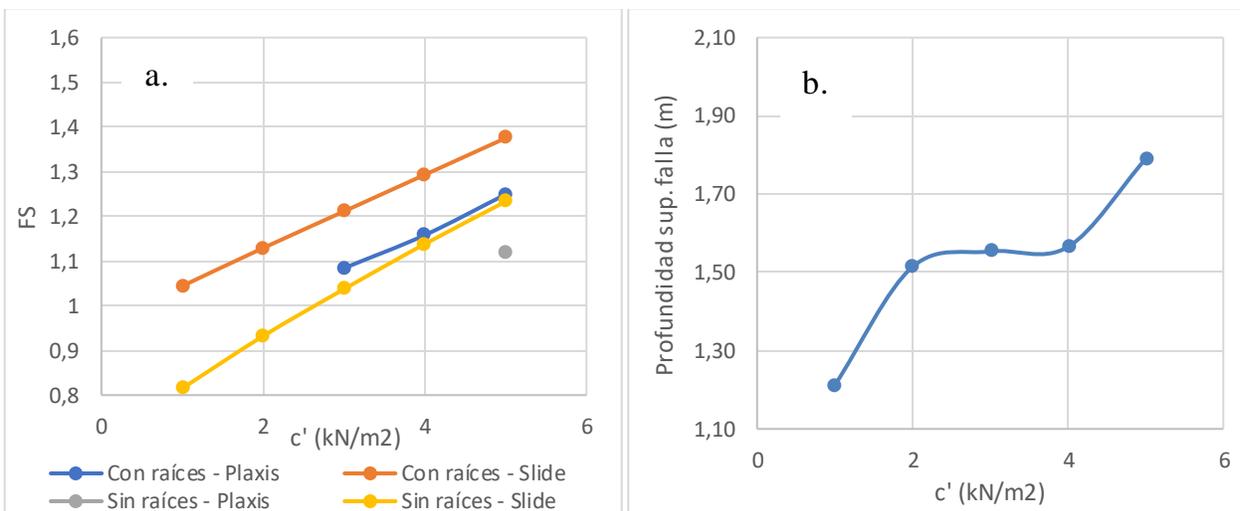


Figura 137. Influencia de la cohesión en los resultados del Factor de Seguridad y de la profundidad de la superficie de falla, para un talud de  $45^\circ$  reforzado con raíces. a) análisis del Factor de Seguridad. b) Análisis de la profundidad de la superficie de falla.

Como se mencionó en el numeral 5.6, los valores del Factor de Seguridad obtenidos por Slide tienden a ser mayores que los de Plaxis pero guardan cierta relación entre ellos. En la Figura 136a y en Figura 137a se puede observar que, para mayores ángulos de fricción del suelo y para mayores valores de cohesión, se obtienen mayores valores del Factor de Seguridad, como era de esperarse, pero lo que es importante observar es que independientemente del valor que tome alguno de los

dos parámetros de resistencia del suelo, el Factor de Seguridad obtenido de los modelos con raíces sigue siendo mayor que el de los modelos sin la presencia de raíces.

En cuanto a la profundidad de la superficie de falla, en la Figura 136b y la Figura 137b, se puede observar que entre mayor sea el ángulo de fricción interna del suelo, menor será la profundidad de la superficie de falla y pasa lo contrario para el caso de la cohesión del suelo; a medida que aumenta la cohesión del suelo, la profundidad de la superficie de falla aumenta.

### **5.7.2 Influencia de los parámetros de resistencia en el mecanismo de falla del suelo reforzado con raíces.**

Para evaluar la influencia de cada uno de los parámetros de resistencia del suelo en el mecanismo de falla del talud, se tomaron los valores máximos de las deformaciones y de los esfuerzos cortantes de cada modelo y de cada una de las cuatro áreas en las que se dividió el talud (valores normalizados).

A continuación, se dan a conocer los resultados de las deformaciones y esfuerzos cortantes máximos de cada uno de los modelos y de las cuatro áreas en las que se dividió el talud, los cuales se muestran en la Tabla 64 y la Tabla 65. En la Figura 99, la Figura 100, la Figura 101 y la Figura 102, se representan los valores normalizados de esfuerzos cortantes y deformaciones de cada modelo, para cada uno de los ángulos de inclinación analizados. Como se mencionó en el numeral 4.8.2, los valores máximos que se tomaron para cada área se obtuvieron teniendo en cuenta la superficie de falla determinada en Slide, del mismo modo que en los análisis que se realizaron en los numerales 5.3.3 y 5.4.3.

Tabla 64. Deformaciones máximas obtenidos para cada área de cada uno de los modelos de análisis

DEFORMACIONES MÁXIMAS									
Modelo	Def. máx modelo	A1		A2		A3		A4	
		Def. Área	Def/Def máx						
1	0,3127	0,0182	0,0581	0,1349	0,4314	0,3127	1,0	0,0222	0,0711
2	0,0196	0,0020	0,1042	0,0061	0,3120	0,0196	1,0	0,0114	0,5828
3	0,0145	0,0020	0,1409	0,0053	0,3645	0,0145	1,0	0,0096	0,6605
4	0,0136	0,0020	0,1454	0,0053	0,3914	0,0136	1,0	0,0099	0,7265
5	0,0293	0,0007	0,0248	0,0057	0,1940	0,0293	1,0	0,0082	0,2786
6	0,0385	0,0026	0,0673	0,0249	0,6469	0,0385	1,0	0,0093	0,2425
7	0,0172	0,0019	0,1118	0,0059	0,3439	0,0172	1,0	0,0105	0,6085
8	0,0138	0,0020	0,1456	0,0053	0,3815	0,0138	1,0	0,0091	0,6607
9	0,0145	0,0020	0,1409	0,0053	0,3645	0,0145	1,0	0,0096	0,6605

Tabla 65. Esfuerzos cortantes máximos obtenidos para cada área de cada uno de los modelos de análisis.

ESFUERZOS MÁXIMOS (kN/m <sup>2</sup> )									
Modelo	Esf. Máx. modelo	A1		A2		A3		A4	
		Esf. Área	Esf/Esf máx						
1	23,60	7,12	0,30	13,61	0,58	23,60	1,0	13,18	0,56
2	23,89	5,80	0,24	14,34	0,60	23,89	1,0	16,67	0,70
3	24,81	5,85	0,24	15,28	0,62	24,81	1,0	19,26	0,78
4	28,16	5,64	0,20	15,30	0,54	28,16	1,0	22,36	0,79
5	19,21	2,17	0,11	9,10	0,47	19,21	1,0	14,19	0,74
6	21,08	3,37	0,16	12,23	0,58	21,08	1,0	15,31	0,73
7	23,62	5,64	0,24	15,17	0,64	23,62	1,0	16,42	0,70
8	24,05	5,72	0,24	15,21	0,63	24,05	1,0	18,14	0,75
9	24,81	5,85	0,24	15,28	0,62	24,81	1,0	19,26	0,78

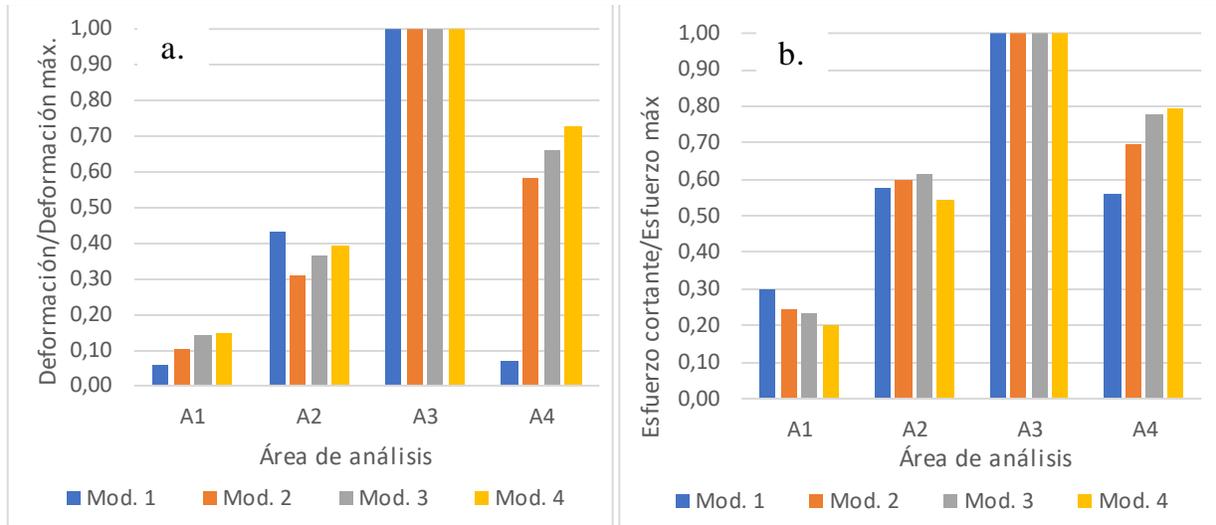


Figura 138. Influencia de la variación del ángulo de fricción del suelo en la relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, en cada área de análisis del talud, para cada uno de los modelos analizados. a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes

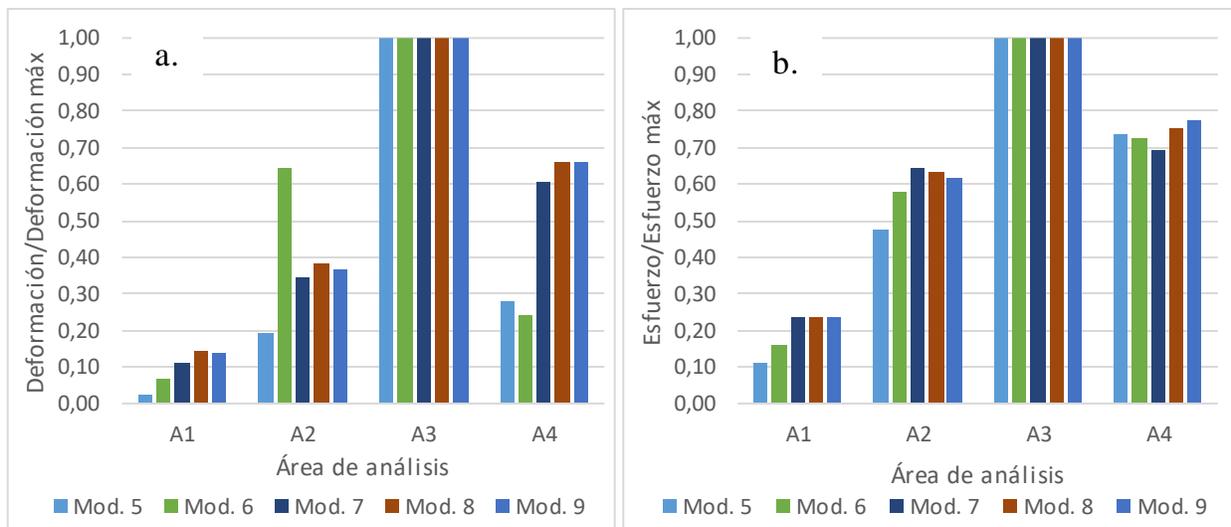


Figura 139. Influencia de la variación de la cohesión del suelo en la relación entre los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada área, con los valores máximos de la deformación y esfuerzo cortante de cada modelo, en cada área de análisis del talud, para cada uno de los modelos analizados. a) Deformaciones, b) Esfuerzos cortantes.

En la Figura 138 y la Figura 139 se puede observar que, en todos los casos, las mayores concentraciones de esfuerzos cortantes y de deformaciones se presentan en el área 3 o en el pie del talud; en esta zona, todas las modelaciones alcanzan su valor máximo. Analizando la variación del ángulo de fricción interno del suelo, se puede evidenciar que a medida que este aumenta, se

incrementan las deformaciones en cada una de las áreas de análisis y en el caso de los esfuerzos cortantes, el incremento del ángulo de fricción del suelo hace que estos disminuyan en la parte superior del talud, pero aumentan en el pie y la base del talud.

En el caso de la cohesión se puede observar un comportamiento similar. La concentración de deformaciones aumenta en todas las áreas a medida que aumenta la cohesión del suelo, y los esfuerzos cortantes aumentan a medida que aumenta la cohesión en la parte superior del talud y en el pie alcanzan su valor máximo; en la base del talud se observa que esta concentración de esfuerzos se mantiene en los mismos rangos de magnitud a pesar de que la cohesión aumente.

## 6 Conclusiones

- Se pudo establecer e identificar que la presencia de las raíces genera un aumento en el Factor de Seguridad del talud. Independientemente del tipo de modelación realizada, los Factores de Seguridad obtenidos de los modelos con presencia de las raíces son mayores que los modelos donde no se tienen en cuenta, y los incrementos en dichos Factores de Seguridad varían en función del tipo de modelación y de las posiciones que ocupan las raíces en los taludes.
- En la mayoría de las modelaciones se pudo observar que la posición 3 de las raíces (corona + pendiente + pie), la cual presenta las raíces en toda la superficie del talud, genera los mayores resultados del factor de seguridad y así mismo, los mayores incrementos.
- Las raíces ubicadas en la zona inclinada del talud y en el pie del talud, contribuyen en gran medida con la disipación y homogenización de las concentraciones de esfuerzos cortantes y deformaciones que se presentan en estas zonas. En el pie del talud siempre se observaron mayores concentraciones de esfuerzos y deformaciones, y se pudo observar cómo las raíces ubicadas en esta zona disipan y desplazan estas concentraciones por debajo de la zona de las raíces.
- La presencia de las raíces hace que la profundidad de la superficie de falla aumente, haciendo que esta se desplace por debajo de la zona de las raíces o simplemente alcance mayores profundidades. Gracias a esto se pueden evitar posibles deslizamientos superficiales que se puedan presentar en un talud.
- A medida que las raíces abarcan mayores superficies en el talud (corona, pendiente y pie del talud), los Factores de Seguridad y la estabilidad del talud en general aumenta. Adicional a esto, las raíces que se localizan en el pie y base del talud juegan un papel fundamental ya que estas ayudan a disipar y homogenizar esas concentraciones de esfuerzos cortantes y

deformaciones que normalmente se presentarán hacia el pie del talud, favoreciendo en gran medida a la estabilidad.

- A medida que aumenta el ángulo de inclinación del talud, los Factores de Seguridad disminuyen, pero, a pesar de esto, siempre se observó un aumento de los Factores de Seguridad de los modelos con raíces con respecto a los modelos sin la presencia de ellas, condición que aplica para los cinco tipos de modelación a excepción del tipo de modelación de las raíces como anclajes – Slide, para ángulos mayores a  $38^\circ$ .
- A medida que aumenta el ángulo de inclinación del talud, los incrementos del Factor de Seguridad son más significativos, comparados con ángulos de inclinación menores, lo que demuestra que este sistema se puede utilizar para taludes con grandes pendientes obteniendo así resultados positivos en cuanto a la estabilidad del talud. Los efectos mecánicos de las raíces se pueden evidenciar más en taludes con mayores pendientes debido a que estos son más inestables.
- Después de comparar y analizar los resultados obtenidos del Factor de Seguridad, profundidad de la superficie de falla, concentraciones de esfuerzos cortantes y deformaciones, se establece que el tipo de modelación numérica que mejor representa el efecto mecánico de las raíces en la estabilidad de taludes son las modelaciones del incremento de la cohesión mediante Slide y la modelación del incremento de la cohesión mediante Plaxis, en las cuales se modificaron las propiedades del suelo, incrementando los valores de cohesión de las diferentes capas que representan la presencia de las raíces en el talud. En el caso del tipo de modelación del incremento de la cohesión - Slide, brinda varias ventajas debido a que la interfaz de programa es sencilla y las modelaciones se pueden desarrollar de manera “fácil” y rápida. Por otro lado, los resultados de los análisis de estabilidad realizados en este software dan a conocer la posible

superficie de falla del modelo, permitiendo calcular así la profundidad de dicha superficie de falla, y adicional a esto, generan valores de Factores de Seguridad que son confiables y coherentes con el resto de resultados. En cuanto al tipo de modelación del incremento de la cohesión - Plaxis, se utilizó este software el cual es una herramienta muy útil para los análisis de estabilidad de taludes debido a que permite identificar los posibles mecanismos de falla que se pueden presentar en un talud determinado bajo unas condiciones específicas, mediante el análisis y comparación de las concentraciones de esfuerzos cortantes y deformaciones. De esta forma, se pueden obtener Factores de Seguridad por medio de dos métodos diferentes, los cuales tienden a ser constantes o de magnitudes similares (la variación fue de máximo 10 %); se puede obtener la localización y profundidad de la superficie de falla y finalmente, se podrían analizar diferentes componentes del mecanismo de falla de un talud analizado, para así poder tomar las mejores medidas y decisiones ante posibles situaciones que se lleguen a presentar.

- La presencia de las raíces genera un incremento en el Factor de Seguridad, independientemente del valor que tengan los parámetros de resistencia del suelo (ángulo de fricción interna y cohesión). Con esto se puede afirmar que este tipo de modelación numérica utilizado para modelar el efecto mecánico de las raíces en la estabilidad de taludes, puede ser utilizado en un gran número de suelos que tengan diferentes parámetros de resistencia al corte, obteniendo resultados positivos.

### **Recomendaciones Futuras**

Realizar mediante modelación física, los mismos modelos con las mismas variables y parámetros empleados en el presente trabajo de investigación, para comprobar si se logran obtener resultados similares.

## 7 Bibliografía

- Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., & Zocco, A. (2005). Root strength and root area ratio of forest species in lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil*, 278(1–2), 11–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0605-4>
- Cheng, H., Yang, X., Liu, A., Fu, H., & Wan, M. (2003). *A Study on the Performance and Mechanism of Soil-reinforcement by Herb Root System*. 384–390.
- Chok, Y., Kaggwa, W., Jaksa, M., & Griffiths, D. (2004). Modelling the effects of vegetation on stability of slopes. *Australia-New ...*, February, 391–397. <http://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/handle/2440/29278>
- D'Souza, D. N., Choudhary, A. K., Basak, P., & Shukla, S. K. (2019). Assessment of Vetiver Grass Root Reinforcement in Strengthening the Soil Donal. *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, 14, 135–142. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7>
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Wemans, K., De Baerdemaeker, J., & Muys, B. (2008). Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil*, 305(1–2), 207–226. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9553-0>
- Eab, K. H., Likitlersuang, S., & Takahashi, A. (2015). Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation. *Soils and Foundations*, 55(5), 1270–1281. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.025>
- Faisal, H. A., & Normaniza, O. (2008). Shear strength of a soil containing vegetation roots. *Soils and Foundations*, 48(4), 587–596. <https://doi.org/10.3208/sandf.48.587>
- Fan, C. C., & Lai, Y. F. (2014). Influence of the spatial layout of vegetation on the stability of slopes. *Plant and Soil*, 377(1–2), 83–95. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1569-9>

- Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S. B., Fourcaud, T., Dumail, J.-F., & Van Beek, R. (2005). The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, 278: 1-9. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5593-5>
- Gentile, F., Elia, G., & Elia, R. (2010). Analysis of the stability of slopes reinforced by roots. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 138, 189–200. <https://doi.org/10.2495/DN100171>
- Hengchaovanich, D., & Nilaweera, N. S. (1996). *An assessment of strenght properties of Vetiver grass roots in relation to slope stabilization*. 153–158. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-71095-0\\_11028](https://doi.org/10.1007/978-3-540-71095-0_11028)
- Herrera, J. (2015a). *Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con pasto vetiver (chrysopogon zizanioides) en la vía neiva-vegalarga departamento del huila* [Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2013.0625>
- Herrera, J. (2015b). *Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con Vetiver*. 1–8.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (1998). *Manual de Estabilidad de Taludes*. Geotecnia Vial. Bogotá
- Kokutse, N., Fourcaud, T., Kokou, K., Neglo, K., & Lac, P. (2006). 3D Numerical Modelling and Analysis of the Influence of Forest Structure on Hill Slopes Stability. *Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*, 561–567.
- Kokutse, N. K., Temgoua, A. G. T., & Kavazović, Z. (2016). Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects. *Ecological Engineering*, 86(November 2004), 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.005>
- Lin, D. G., Huang, B. S., & Lin, S. H. (2010). 3-D numerical investigations into the shear strength

- of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability. *Ecological Engineering*, 36(8), 992–1006. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.005>
- Machado, L., Holanda, F. S. R., Da Silva, V. S., Maranduba, A. I. A., & Lino, J. B. (2015). Contribution of the root system of vetiver grass towards slope stabilization of the São Francisco River. *Semina: Ciências Agrárias*, 36(4), 2453–2463. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n4p2453>
- Méndez, L., Rojas, W., Torres, J., Torres, R., Rada, M., & Calderas, R. (2014). Resistencia a la tracción del sistema radicular del vetiver (vetiveria zizanioides) plantado en un suelo granular. *Estabilidad de Taludes*, 42, 165–169.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10 – Título H, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010
- Miranda Muñoz, R. (2016). *Revisión Panorámica del uso del Pasto Vetiver en Restauración de Taludes como Técnica de Bioingeniería del Suelo*. (Vol. 1). Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- O’Loughlin, C.L., Effectiveness of introduced forest vegetation for protecting against landslides and erosion in New Zealand’s steepplands. Proc. Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability, Honolulu, Hawaii, 1984.
- Rocscience. (2020). Slide 2. Recuperado de <https://www.rocscience.com/software/slide2>
- Sambasivarao, K. V. (2015). *Quantifying the role of vegetation in slope stability* [National Institute of Technology]. <https://doi.org/10.1097/00004691-199709000-00001>
- Suarez, J. (2001a). Control de erosión en zonas tropicales, capítulo 8. In *Control de erosión en zonas tropicales* (Issue 13, pp. 253–289).
- Suarez, J. (2001b). Control de erosión en zonas tropicales, capítulo 9. In *Control de erosión en*

*zonas tropicales* (Vol. 1, pp. 291–348).

Teerawattanasuk, C., Maneecharoen, J., Bergado, D. T., Voottipruex, P., & Lam, L. G. (2014).

Root strength measurements of Vetiver and Ruzi grasses. *Lowland Technology International*, 16(2), 71–80. [https://doi.org/10.14247/lti.16.2\\_71](https://doi.org/10.14247/lti.16.2_71)

The Vetiver Network International. Proven & green environmental solutions. Recuperado de

<http://www.vetiver.org/>

Truong, P. (2008). *Vetiver System for Infrastructure Protection*. 1–11.

Truong, P., Tan, T., & Pinnars, E. (2008). *Aplicaciones del Sistema Vetiver. Manual técnico de referencia*. [www.vetiver.org](http://www.vetiver.org)

Wellmann Castellanos, H. G. H. (2017). *Análisis para la reducción de riesgos utilizando el pasto vetiver en el talud ubicado en el parque ecológico Las Ardillas*. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Wu, T. H., McKinnell, W. P., & Swanston, D. N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 16, 19–33.

Wu, T. H., & Watson, A. (1998). In situ shear tests of soil blocks with roots. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(4), 579–590. <https://doi.org/10.1139/t98-027>

Wu, Tien H. (2013). Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. *Canadian Geotechnical Journal*, 274(November 2012), 259–274. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0160>