

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de estabilidad y permeabilidad de talud con sistema Vetiver mediante
diferentes ensayos de laboratorio y campo

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por
Sulvia Victoria Arlet Matías Juárez
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería civil

Guatemala,
2017

Evaluación de estabilidad y permeabilidad de talud
con sistema Vetiver mediante diferentes ensayos de
laboratorio y campo

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de estabilidad y permeabilidad de talud con sistema Vetiver mediante diferentes ensayos de laboratorio y campo

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por
Sulvia Victoria Arlet Matías Juárez
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería civil

Guatemala,
2017

Vo. Bo. :

(f) 
(Inga. Maria Fernanda Rivas)

Tribunal Examinador:

(f) 
(Ing. Roberto Godo Levensen)

(f) 
(Inga. Maria Fernanda Rivas)

(f) 
(Ing. Alvaro Rubio)

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de diciembre del 2017

PREFACIO

La razón de realizar este trabajo de graduación es debido a la problemática que sufre Guatemala al estar expuesta a variaciones climáticas como tormentas tropicales o huracanes, los cuales causan derrumbes o deslizamientos de taludes en carreteras, laderas, etc. Por lo que se busca una solución inmediata y económica para el control de erosión de suelos y estabilización de taludes, siendo así el *Sistema Vetiver*.

La finalidad de este trabajo de Graduación es comprobar que después de cinco años de haber instalado el Sistema Vetiver este ha mejorado la estabilidad del talud. Además, de evaluar el efecto que este sistema tuvo en la permeabilidad del suelo.

Agradezco a la Universidad del Valle de Guatemala, el apoyo brindado para la realización de este trabajo con la finalidad de encontrar una solución. También, al departamento de Ingeniería Civil por haber prestado sus instalaciones para realizar las pruebas necesarias.

Doy gracias a la Ingeniera María Fernanda Rivas por el asesoramiento en este proyecto. También agradezco el apoyo brindado por el Ingeniero Roberto Godo para la realización del proyecto. De igual manera, al Ingeniero Rene Keilhauer por permitirme tomar las muestras de suelo necesarias en el talud de estudio.

Asimismo, le agradezco a mis padres por el apoyo brindado durante esta investigación. Un especial agradecimiento a Dios por permitirme alcanzar mi objetivo de terminar un camino importante en mi vida tanto personal como profesional.

ÍNDICE GENERAL

PREFACIO	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE CUADROS	xiii
LISTA DE GRÁFICAS.....	xviii
LISTA DE IMÁGENES.....	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS	xxii
GLOSARIO.....	xxiv
RESUMEN.....	xxv
I.INTRODUCCIÓN	1
A. Justificación.....	2
B. Objetivos.....	3
1. General	3
2. Específicos	3
II.MARCO CONCEPTUAL	4
A. TALUD.....	4
B. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES	5
1. Factores que influyen en la estabilidad de taludes.	5
a. Erosión.	5
b. Lluvia.	6
c. Sismo.....	6
d. Aspectos geológicos.....	7
e. Cargas externas.	7
f. Excavaciones y/o rellenos.....	7

g. Condición de presión de poro y vaciado rápido	8
2. Tipo de fallas en taludes	8
a. Deslizamiento superficial (Reptación)	8
b. Falla por rotación	9
c. Falla traslacional	10
d. Falla por flujo	11
e. Falla por licuación	11
3. Métodos de cálculo de estabilidad de taludes	12
a. Factor de seguridad	12
b. Estabilidad de taludes infinitos sin infiltración	13
c. Estabilidad de taludes finitos	16
1) Método de Culmann	16
2) Procedimiento de masa del análisis de estabilidad o método de masa total	19
3) Análisis por dovelas	22
a) Fellenius o método sueco	23
b) Método Bishop	24
c) Morgenstern y Price	26
4. Métodos para estabilización y control de erosión de taludes	27
a. Prevención	27
b. Elusión de la amenaza	27
c. Control	28
d. Estabilización	29
1) Conformación del talud o ladera	29
2) Recubrimiento de la superficie	30
3) Control de agua superficial y subterránea	30
4) Estructuras de contención	31
5) Mejoramiento del suelo	32
e. Bioingeniería para estabilización	33
1) Abatimiento de la pendiente del talud	35
2) Bermas laterales o frontales	35
3) Muros de gaviones	36
C. PERMEABILIDAD E INFILTRACIÓN	36
1. Clasificación del agua presente en suelos	36
2. Ley de Darcy	37

3. Coeficiente de permeabilidad.....	38
4. Determinación del coeficiente de permeabilidad.....	38
a. Ensayos de laboratorio.....	38
b. Ensayos de campo.....	39
D. BOTÁNICA DEL VETIVER.....	40
1. Descripción.....	40
2. Factores que afectan la resistencia del Vetiver.....	43
3. Tensión y fuerza de corte de raíces de Vetiver.....	43
4. Sistema Vetiver.....	44
a. Descripción.....	44
b. Ventajas y desventajas.....	45
c. Combinación con otros sistemas de estabilización.....	46
1) Geomanta.....	46
2) Geotextil.....	48
III. MARCO PRÁCTICO.....	51
A. ENSAYOS DE SUELOS.....	51
1. Justificación de los ensayos.....	51
2. Metodología de ensayos.....	51
B. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DE SUELOS.....	52
1. Justificación de los ensayos.....	52
2. Metodología de ensayos.....	52
a. Ensayo in situ: slug test.....	53
b. Ensayo en laboratorio: permeámetro de carga constante.....	53
C. ENSAYOS A RAÍCES DEL VETIVER.....	55
1. Justificación de los ensayos.....	55
2. Metodología de ensayos.....	55
a. Ensayo a tensión.....	56
b. Ensayo a corte.....	57
D. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD.....	58
1. Método Culmann.....	58
2. Método de procedimiento de masa del análisis de estabilidad o masa total.....	58
3. Método de análisis por dovelas.....	59
a. Fellenius o método sueco.....	59

b. Método Bishop.....	59
c. Morgenstern y Price.....	59
E. MODELO INTEGRADO DE RESISTENCIA DEL SUELO CON EL SISTEMA VETIVER.....	60
IV.RESULTADOS.....	61
A. ENSAYOS DE RAÍCES.....	61
B. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD.....	64
C. MODELO INTEGRADO DE RESISTENCIA DEL SUELO CON EL SISTEMA VETIVER.....	66
D. PERMEABILIDAD DE SUELOS.....	66
1. Permeabilidad utilizando permeámetro de carga constante.....	66
2. Permeabilidad utilizando slug test.....	68
V. DISCUSIÓN.....	70
VI. CONCLUSIONES.....	73
VII. RECOMENDACIONES.....	74
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	75
IX. ANEXOS.....	77
A. ENSAYOS DE SUELOS.....	77
B. RESULTADOS Y PROCESO DE LOS ANÁLISIS DEL TALUD.....	89
1. Análisis de la estabilidad del talud considerando una superficie de falla plana.....	89
a. Análisis del talud con el método de Culmann.....	89
2. Análisis de la estabilidad del talud considerando una superficie de falla circular por el método de análisis total.....	93
a. Análisis de estabilidad de talud por método de masa total.....	93
b. Análisis de estabilidad de talud por método de dovelas.....	97
1) Método de Fellenius.....	97
2) Método Bishop.....	109
3) Método Morgenstern-Price.....	121
C.RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS A LAS RAÍCES DEL VETIVER.....	133
1. Ensayos de tensión.....	133
2. Ensayos de corte.....	136
D.RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD.....	139

1. Ensayo con permeámetro de carga constante	139
2. Slug test	141
E. IMÁGENES.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de un talud natural.....	5
Figura 2. Elementos de un talud artificial	5
Figura 3. Talud por erosión.....	6
Figura 4. Talud expuesto a lluvia.....	6
Figura 5. Fuerzas debido a la gravedad y sismo en un talud	6
Figura 6. Aspectos geológicos que pueden causar falla en talud.....	7
Figura 7. Sobrecarga en la corona del talud	7
Figura 8. Excavación en el pie de talud.....	7
Figura 9. Fuerzas de filtración generadas por cambio de nivel en el embalse.....	8
Figura 10. Falla por deslizamiento superficial	9
Figura 11. Falla Local	9
Figura 12. Falla de pie.....	10
Figura 13. Falla de base	10
Figura 13. Falla traslacional.....	11
Figura 14. Falla por flujo	11
Figura 15. Análisis de un talud infinito (sin infiltración).....	14
Figura 16. Análisis de un talud finito; método de Culman	17
Figura 17. Deslizamiento de una masa de suelo con superficie circular	19
Figura 18. Análisis de taludes en sus suelos homogéneos con $\phi > 0$	20
Figura 19. Superficie de falla circular dividida por dovelas.....	22
Figura 20. Fuerzas presentes en el análisis de dovelas.....	23
Figura 21. Polígono de equilibrio de fuerzas.....	25
Figura 22. Esquema de fuerzas de talud.....	26
Figura 23. Slug Test	53

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Métodos de prevención de la amenaza o riesgo.....	27
Cuadro 2. Métodos de elusión de la amenaza	28
Cuadro 3. Métodos de control de amenaza	29
Cuadro 4. Métodos de conformación del talud para equilibrar fuerzas	29
Cuadro 5. Métodos de recubrimiento de la superficie del talud	30
Cuadro 6. Métodos de control de agua superficial y subterránea	31
Cuadro 7. Métodos de estructuras de contención	32
Cuadro 8. Métodos para mejoramiento del suelo	33
Cuadro 9. Métodos para mejoramiento del suelo	33
Cuadro 10. Ventajas y desventajas de diversos tipos de planta.....	34
Cuadro 11. Componentes de la planta y sus funciones	35
Cuadro 12. Valores del coeficiente de permeabilidad de distintos suelos	38
Cuadro 13. Ensayos de campo para determinar el coeficiente de permeabilidad	40
Cuadro 14. Esfuerzo de tensión de la raíz de diferentes plantas.....	44
Cuadro 15. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Culmann considerando la superficie de falla crítica	64
Cuadro 16.Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Culmann considerando las raíces intersecan la superficie de falla	64
Cuadro 17. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de procedimiento de masa	64
Cuadro 18. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Fellenius.....	65
Cuadro 19. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Bishop.....	65
Cuadro 20. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Morgenstern-Price	65
Cuadro 34. Resultado de análisis de resistencia del suelo con el Sistema Vetiver	66
Cuadro 21. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver antes de la época de lluvia.....	66

Cuadro 22. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geomanto antes de la época de lluvia	66
Cuadro 23. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geotextil antes de la época de lluvia	66
Cuadro 24. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver después de la época de lluvia	67
Cuadro 25. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geomanto después de la época de lluvia	67
Cuadro 26. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geotextil después de la época de lluvia	67
Cuadro 27. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver antes de la época de lluvia	68
Cuadro 28. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geomanto antes de la época de lluvia	68
Cuadro 29. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geotextil antes de la época de lluvia	68
Cuadro 30. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver después de la época de lluvia	68
Cuadro 31. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geomanto después de la época de lluvia	69
Cuadro 32. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geotextil después de la época de lluvia	69
Cuadro 33. Resultado de análisis de contenido de humedad	69
Cuadro 35. Resultado de ensayo de granulometría muestra 1	77
Cuadro 36. Granulometría muestra 1	77
Cuadro 37. Propiedades límites Atterberg muestra 1	78
Cuadro 38. Propiedades de densidad muestra 1	78
Cuadro 39. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 1	78
Cuadro 40. Resultado de ensayo de granulometría muestra 2	79
Cuadro 41. Granulometría muestra 2	79
Cuadro 42. Propiedades límites Atterberg muestra 2	79
Cuadro 43. Propiedades de densidad muestra 2	80
Cuadro 44. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 2	80

Cuadro 45. Resultado de ensayo de granulometría muestra 3	81
Cuadro 46. Granulometría muestra 3	81
Cuadro 47. Propiedades límites Atterberg muestra 2	81
Cuadro 48. Propiedades de densidad muestra 3	82
Cuadro 49. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 3.....	82
Cuadro 50. Resultado de ensayo de granulometría muestra 4	83
Cuadro 51. Granulometría muestra 4	83
Cuadro 52. Propiedades límites Atterberg muestra 4	83
Cuadro 53. Propiedades de densidad muestra 4	84
Cuadro 54. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 4.....	84
Cuadro 55. Resultado de ensayo de granulometría muestra 5	85
Cuadro 56. Granulometría muestra 5	85
Cuadro 57. Propiedades límites Atterberg muestra 5	85
Cuadro 58. Propiedades de densidad muestra 5	86
Cuadro 59. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 5.....	86
Cuadro 60. Resultado de ensayo de granulometría muestra 6	87
Cuadro 61. Granulometría muestra 6	87
Cuadro 62. Propiedades límites de Attenberg muestra 6.....	87
Cuadro 63. Propiedades de densidad muestra 6	88
Cuadro 64. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 6.....	88
Cuadro 65. Resultados del análisis de muestra 1 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular	93
Cuadro 66. Resultados del análisis de muestra 2 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular	94
Cuadro 67. Resultados del análisis de muestra 3 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular	94
Cuadro 68. Resultados del análisis de muestra 4 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular	95

Cuadro 69. Resultados del análisis de muestra 5 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular	95
Cuadro 70. Resultados del análisis de muestra 6 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular	96
Cuadro 71. Resultados de muestra 1 del análisis de las dovelas por el método Fellenius	98
Cuadro 72. Resultados de muestra 2 del análisis de las dovelas por el método Fellenius	100
Cuadro 73. Resultados de muestra 3 del análisis de las dovelas por el método Fellenius	102
Cuadro 74. Resultados de muestra 3 del análisis de las dovelas por el método Fellenius	104
Cuadro 75. Resultados de muestra 5 del análisis de las dovelas por el método Fellenius	106
Cuadro 76. Resultados de muestra 6 del análisis de las dovelas por el método Fellenius	108
Cuadro 77. Resultados de muestra 1 del análisis de las dovelas en el análisis por el método Bishop	110
Cuadro 78. Resultados de muestra 2 del análisis de las dovelas por el método Bishop	112
Cuadro 79. Resultados de muestra 3 del análisis de las dovelas por el método Bishop	114
Cuadro 80. Resultados de muestra 4 del análisis de las dovelas por el método Bishop	116
Cuadro 81. Resultados de muestra 5 del análisis de las dovelas en el análisis por el método Bishop	118
Cuadro 82. Resultados de muestra 6 del análisis de las dovelas por el método Bishop	120
Cuadro 83. Resultados de muestra 1 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price	122
Cuadro 84. Resultados de muestra 2 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price	124
Cuadro 85. Resultados de muestra 3 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price	126
Cuadro 86. Resultados de muestra 4 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price	128
Cuadro 87. Resultados de muestra 5 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price	130
Cuadro 88. Resultados de muestra 6 del análisis de las dovelas en el análisis por el método Morgenstern-Price	132
Cuadro 89. Resumen de datos obtenidos en el año 2012	133
Cuadro 90. Resultados de ensayo de tensión de raíces de Sistema Vetiver	133
Cuadro 91. Resultados de ensayo de tensión de raíces de Sistema Vetiver combinado con geomanta	134
Cuadro 92. Resultados de ensayo de tensión de raíces de Sistema Vetiver combinado con geotextil	135
Cuadro 93. Resultados de ensayo de corte de raíces de Sistema Vetiver combinado	136

Cuadro 94. Resultados de ensayo de corte de raíces de Sistema Vetiver combinado con geomanta.....	137
Cuadro 95. Resultados de ensayo de corte de raíces de Sistema Vetiver combinado con geotextil	138
Cuadro 96. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante antes de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver.....	139
Cuadro 97. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante antes de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geomanta	139
Cuadro 98. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante antes de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geotextil.....	140
Cuadro 99. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver.....	140
Cuadro 100. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geomanta	140
Cuadro 101. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geotextil.....	140
Cuadro 102. Resultados de ensayo Slug test antes de lluvia en tramo de Sistema Vetiver	141
Cuadro 103. Resultados de ensayo Slug test antes de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geomanta..	141
Cuadro 104. Resultados de ensayo Slug test antes de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geotextil ...	141
Cuadro 105. Resultados de ensayo Slug test después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver	141
Cuadro 106. Resultados de ensayo Slug test después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con Geomanto	142
Cuadro 107. Resultados de ensayo Slug test después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con Geotextil.....	142

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfico 1. Número de estabilidad de Taylor para $\phi > 0$	22
Gráfica 2. Resultados de los esfuerzos de tensión vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver	61
Gráfica 3. Resultados de los esfuerzos de tensión vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver con Geomanto	61
Gráfica 4. Resultados de los esfuerzos de tensión vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver con Geotextil	62
Gráfica 5. Resultados de los esfuerzos de corte vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver	62
Gráfica 6. Resultados de los esfuerzos de corte vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver con Geomanto	63
Gráfica 7. Resultados de los esfuerzos de corte vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver con Geotextil	63
Gráfica 8. Curva granulométrica muestra 1	77
Gráfica 9. Curva densidad seca vs. humedad muestra 1	78
Gráfica 10. Círculos de Mohr muestra 1	78
Gráfica 11. Curva granulométrica muestra 2	79
Gráfica 12. Curva densidad seca vs. humedad muestra 2	80
Gráfica 13. Círculos de Mohr muestra 2	80
Gráfica 14. Curva granulométrica muestra 3	81
Gráfica 15. Curva densidad seca vs. humedad muestra 2	82
Gráfica 16. Círculos de Mohr muestra 3	82
Gráfica 17. Curva granulométrica muestra 4	83
Gráfica 18. Curva densidad seca vs. humedad muestra 4	84
Gráfica 19. Círculos de Mohr muestra 4	84
Gráfica 20. Curva granulométrica muestra 5	85
Gráfica 21. Curva densidad seca vs. humedad muestra 5	86

Gráfica 22. Círculos de Mohr muestra 5	86
Gráfica 23. Curva granulométrica muestra 6.....	87
Gráfica 24. Curva densidad seca vs. humedad muestra 6.....	88
Gráfica 25. Círculos de Mohr muestra 6	88
Gráfica 26. Análisis de muestra 1 con el principio de dovelas Fellenius	97
Gráfica 27. Análisis de muestra 2 con el principio de dovelas Fellenius	99
Gráfica 28. Análisis de muestra 3 con el principio de dovelas Fellenius	101
Gráfica 29. Análisis de muestra 4 con el principio de dovelas Fellenius	103
Gráfica 30. Análisis de muestra 5 con el principio de dovelas Fellenius	105
Gráfica 30. Análisis de muestra 6 con el principio de dovelas Fellenius	107
Gráfica 31. Análisis de muestra 1 con el principio de dovelas Bishop.....	109
Gráfica 32. Análisis de muestra 2 con el principio de dovelas Bishop.....	111
Gráfica 33. Análisis de muestra 3 con el principio de dovelas Bishop.....	113
Gráfica 34. Análisis de muestra 4 con el principio de dovelas Bishop.....	115
Gráfica 35. Análisis de muestra 5 con el principio de dovelas Bishop.....	117
Gráfica 36. Análisis de muestra 6 con el principio de dovelas Bishop.....	119
Gráfica 37. Análisis de muestra 1 con el principio de dovelas Morgenstern-Price	121
Gráfica 38. Análisis de muestra 2 con el principio de dovelas Morgenstern-Price	123
Gráfica 39. Análisis de muestra 3 con el principio de dovelas Morgenstern-Price	125
Gráfica 40. Análisis de muestra 4 con el principio de dovelas Morgenstern-Price	127
Gráfica 41. Análisis de muestra 5 con el principio de dovelas Morgenstern-Price	129
Gráfica 42. Análisis de muestra 6 con el principio de dovelas Morgenstern-Price	131
Gráfica 43. Esfuerzo de tensión vs. diámetro de Sistema Vetiver	134
Gráfica 44. Esfuerzo de tensión vs. diámetro de Sistema Vetiver combinado con geomanta	135
Gráfica 45. Esfuerzo de tensión vs. diámetro de Sistema Vetiver combinado con geotextil.....	136

Gráfica 46. Esfuerzo de corte vs. diámetro de Sistema Vetiver	137
Gráfica 47. Esfuerzo de corte vs. diámetro de Sistema Vetiver combinado con geomanta	138
Gráfica 48. Esfuerzo de corte vs. diámetro de Sistema Vetiver combinado con geotextil	139

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Planta Vetiver	40
Imagen 2. Raíces de planta Vetiver	41
Imagen 3. Retoño de planta Vetiver	42
Imagen 4. Sistema Vetiver utilizado en talud	44
Imagen 5. Geomanta Biodegradable y Sistema Vetiver instalado.....	47
Imagen 6. Geomanta sintético instalado.....	47
Imagen 7. Estructura del geotextil tejido.....	49
Imagen 8. Estructura del geotextil no tejido.....	49
Imagen 9. Puntos donde se tomarán muestras del suelo de talud	52
Imagen 10. Ensayo de permeabilidad en laboratorio.....	54
Imagen 11. Instrumentos utilizados en la medición	55
Imagen 12. Extracción de muestras.....	142
Imagen 13. Tramo de talud utilizando Sistema Vetiver	143
Imagen 14. Tramo de talud utilizando Sistema Vetiver combinado con Geomanto	143
Imagen 15. Tramo de talud utilizando Sistema Vetiver combinado con Geotextil	144
Imagen 16. Extracción de muestras.....	144
Imagen 17. Ensayo de permeabilidad en laboratorio.....	144
Imagen 18. Ensayo de tensión en raíces	145
Imagen 19. Ensayo de corte en raíces	145

LISTA DE SÍMBOLOS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS Y ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD

c	Cohesión
c_d	Cohesión efectiva
FS_c	Factor de seguridad con respecto a la cohesión
FS_s	Factor de seguridad con respecto a la resistencia
FS_ϕ	Factor de seguridad con respecto a la fricción
H	Altura del talud
H_{cr}	Altura crítica del talud
L	Longitud horizontal de la masa de suelo estudiado
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
LR	Límite de retracción
m	Número de estabilidad
N_a	Fuerza perpendicular al plano
N_r	Componente normal de la reacción R
O	Centro de giro en una superficie de falla plana
P_n	Fuerzas normales que actúan sobre los lados de la dovela número n+1
P_{n+1}	Fuerzas normales que actúan sobre los lados de la n-ésima dovela
R	Fuerza de reacción con igual magnitud y sentido opuesto del peso
r	Radio de una superficie de falla circular
T_a	Fuerza paralela al plano
T_r	Componente tangencial de R
τ	Esfuerzo cortante
τ_f	Resistencia cortante promedio del suelo
τ_d	Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla
T_r	Componente tangencial de la reacción R, fuerza cortante entre dovelas
W	Peso de la masa de suelo que se desliza
W_n	Peso de la dovela
α	Ángulo entre la línea formada entre los puntos que intersecan la superficie de falla y la del talud, con la horizontal
β	Inclinación de la superficie del talud respecto a la horizontal
γ	Peso específico del suelo
σ'	esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla
Θ	Ángulo de cohesión
ϕ	Ángulo de cohesión
ϕ_d	Ángulo de fricción

RESISTENCIA DE LAS RAÍCES

A	Área de la raíz
D	Diámetro de la raíz
F	Fuerza soportada por la raíz

m	Constante empírica determinada para cada especie vegetal, con base en resultados de laboratorio (ensayos de corte y tensión)
n	Constante empírica determinada para cada especie vegetal, con base en resultados de laboratorio (ensayos de corte y tensión)
T_r	Resistencia a la tensión de la raíz
V	Fuerza cortante de cada raíz
σ	Esfuerzo a tensión
τ	Esfuerzo a corte

PERMEABILIDAD E INFILTRACIÓN

A	Área de sección transversal del filtro
i	Gradiente hidráulico
k	Coefficiente de permeabilidad
Q	Caudal
t	Tiempo en que se acumula el agua
V	Volumen de recipiente que recibe el agua
v	Velocidad de descarga

GLOSARIO

Coefficiente de permeabilidad	Parámetro que permite conocer la resistencia que ofrece el suelo al flujo de un fluido.
Cohesión	Propiedad del suelo que representa la máxima tensión soportada.
Dovela	División del perfil, que comprende el espacio entre dos líneas verticales, la superficie del talud, y la superficie de deslizamiento.
Erosión	Desgaste en la superficie terrestre por agentes externos como sismo, lluvia, viento, etc.
Esfuerzo a corte	Fuerza dividida entre el área de sección paralelamente a un plano.
Esfuerzo de tensión	Fuerza de tensión, que es aplicada a una unidad de área entorno de un punto material elástico, produce una elongación.
Estrato del suelo	Capas de rocas sedimentarias que pueden distinguirse en un terreno.
Fuerza	Capacidad física para actuar sobre un cuerpo, de cierta masa.
Gaviones	Cajones de malla de alambre galvanizado que se rellenan de cantos de roca.
Geomanta	Material geosintético con el objetivo es proteger dicho terreno a los efectos de la escorrentía superficial evitando así la pérdida de suelo y des conformación de taludes y laderas.
Geotextil	Material textil permeable, el cual tiene una estructura plana y se utiliza para el control de erosión de suelo, laderas, división de caminos, etc.
Infiltración	Proceso por el que el agua penetra en el suelo.
Licuación	Incremento en la presión de poro causadas por vibraciones o sismo crítico.
Nivel freático	Lugar geométrico de los puntos donde la presión del agua es igual a la presión atmosférica, es decir, niveles alcanzados por el agua subterránea en pozos de observación.
Pendiente	Inclinación del talud, puede medirse en grados, porcentaje o relación m/l.
Perenne	Plantas y hojas que viven varios años.
Permeabilidad	Propiedad del suelo que permite conocer la capacidad del agua de pasar a través de los poros del suelo.
Talud	Cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal adoptando la posición de forma temporal o permanente.

RESUMEN

Los deslaves en taludes son comunes en Guatemala, en especial en época lluviosa. Para contribuir a su estabilidad, se buscan una variedad de soluciones; entre ellas podría considerarse el *Sistema Vetiver*. Este consiste en la siembra de la planta con este nombre, que por medio de sus raíces forma un muro que evita que las laderas sean propensas a una erosión.

En el año 2012, se implementó el *Sistema Vetiver* en un talud ubicado dentro de la finca “La Concha” en el km 11.5 Carretera a Boca del Monte, Guatemala. Esto con el fin de aumentar su estabilidad y controlar la erosión del terreno. La implementación del sistema se evaluó bajo tres condiciones: *Sistema Vetiver*, *Sistema Vetiver en combinación con geomanta* y *en combinación con geotextil*. Debido al poco tiempo de crecimiento de la planta, no se pudo conocer totalmente el efecto del *Sistema Vetiver* sobre el terreno ya que esta alcanza su desarrollo ideal a los tres años de su siembra.

Para la presente investigación, se busca dar continuidad al proyecto mencionado anteriormente, evaluando la estabilidad de este talud que utilizó el *Sistema Vetiver*, y el efecto que este sistema tuvo durante su desarrollo en la permeabilidad del suelo. Este proyecto, se dividió en dos partes, siendo una la investigación bibliográfica y la otra, estudios de campo y laboratorio. En la primera fase, se estudiaron los métodos de estabilización de taludes, tipo de fallas que pueden ocurrir en ellos, descripción de la planta Vetiver, funcionamiento del *Sistema Vetiver*, y los ensayos necesarios para evaluar la estabilidad y permeabilidad de los taludes. Esto se realiza con el fin de conocer más a detalle sobre el tema seleccionado.

La segunda fase consistió en realizar pruebas de campo y laboratorio para evaluar la permeabilidad y estabilidad del talud. Para ello, se tomaron muestras en dos puntos del talud, siendo la corona y pie de este. Asimismo, para analizar la permeabilidad, se extrajeron muestras antes y después de la época de lluvia. Es importante mencionar, que esto se realizó para cada tramo (solo Vetiver, Vetiver con geomanta y Vetiver con geotextil). Entre las pruebas realizadas para conocer las propiedades del suelo se encuentran: granulometría, límites de Atterberg, Proctor estándar, etc. Para permeabilidad, se utilizó un permeámetro de carga constante y el slug test en campo. Igualmente, se realizaron pruebas en raíces de las plantas de Vetiver para conocer su resistencia y cómo influyen en la estabilidad del talud.

Finalmente, con base en los resultados de laboratorio se realizaron los cálculos de estabilidad y permeabilidad utilizando el programa GeoSlope para análisis de talud y hojas electrónicas Excel. Al finalizar, se compararon los resultados con los obtenidos en el 2012 en cuanto a la estabilidad. Además, se evaluó el efecto que tuvo la permeabilidad en el desarrollo del *Sistema Vetiver*, cinco años después de su implementación.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de suelos es una de las áreas ingeniería civil. Dentro de ella, se encuentra el análisis de aquellas superficies inclinadas respecto a la horizontal y con estructura de suelo o roca, mejor conocidos como taludes. Estos pueden ser naturales o artificiales y, están expuestos a diferentes factores los cuales tienen influencia en su estabilidad.

Existen diferentes métodos para estabilizar un talud, pero la mayoría de ellos son costosos. En la actualidad, se utiliza el *Sistema Vetiver* que ha sido exitosamente utilizado para estabilizar suelos de varios países. La razón de ello no es porque sea innovador y agradablemente para el ambiente, sino también que es útil para cualquier tipo de clima o suelo. Además, este método se puede combinar con otros siendo así el caso de geomanta o geotextiles, que ayudan a fortalecer la barrera para el control de erosión.

En el presente trabajo, se tiene como objetivo analizar la evolución de un talud que se implementó el *Sistema Vetiver* en el año 2012, y el efecto que este sistema tuvo durante su desarrollo en la permeabilidad del suelo. Se realizaron diferentes ensayos de campo y laboratorio mencionados anteriormente.

Para analizar la estabilidad de talud, existen diferentes métodos ya sea tomando una superficie de falla plana o circular. Dentro de los métodos comúnmente utilizados se encuentran: Culmann, procedimiento de masa o método de masa total, análisis de dovelas, los cuales se pueden dividir en Fellenius, Bishop y Morgenstern-Price. En los últimos, se utilizan un programa para analizar con mayor precisión. De igual manera, se estudiará las raíces de las plantas de cada tramo para conocer la evolución de estos a través de los años.

Asimismo, se evalúa el coeficiente de permeabilidad para conocer el movimiento de un flujo a través de un medio poroso con ello ayuda a determinar la resistencia del suelo ante el flujo de fluido. Se realizan diferentes métodos para determinar dicho valor siendo de campo o de laboratorio. Para el primero, se denomina slug test siendo método más rápido y económico. Por otro lado, se encuentra el de laboratorio utilizando un permeámetro de carga constante.

A. Justificación

Guatemala es un país que está altamente expuesto a eventos climáticos como huracanes, inundaciones o depresiones tropicales. Entre algunos de los efectos por estos eventos, se encuentran los derrumbes debido a la inestabilidad de taludes, por lo que en muchos casos también la infraestructura vial se ve afectada. Los daños causados por deslizamientos en el país representan un costo elevado y las formas de estabilizar y controlar la erosión requieren inversiones altas. Por esta razón, se buscan alternativas con el fin de reducir gastos. Para este caso en particular, se escogió el “*Sistema Vetiver*” como propuesta de solución, este método se caracteriza por requerir poca mano de obra y ser favorable al ambiente. Además, su implementación no requiere personal calificado y su mantenimiento no genera altos gastos.

El Vetiver es una planta que puede ayudar en la conservación de suelos, absorción de contaminantes, control de erosión, y conservación y protección de taludes. Guatemala posee poca experiencia en la implementación de prácticas sostenibles; aunque se ha ido mejorando esta situación, no se ha desarrollado completamente, por lo que este sistema es una alternativa positiva para el país para disminuir los daños que causan los deslaves, además de evitar accidentes que cobren vidas humanas o daños en las carreteras que perjudican la comunicación entre las comunidades.

Este sistema ha sido exitosamente utilizado para estabilizar suelos en varios países del mundo como Australia, Centroamérica, China, India, Malasia, entre otros. La razón de ello es no solo por ser un método innovador y amigable para el ambiente, sino también porque puede ser utilizado en cualquier clima como tropical subtropical o mediterráneo. Además, esta planta es no invasora, es decir, que no afectará el crecimiento de las plantas cercanas a ellas. También, es favorable para suelos pobres en nutrientes, erosionables y separables.

Asimismo, el *Sistema Vetiver* permite trabajar con otros productos para el control de erosión de suelos tal es el caso de la geomanta o geotextil. Esto se debe a que estos métodos permiten el alojamiento de tierra vegetal, por lo que al combinarlo con la planta Vetiver refuerza la estabilidad del suelo.

B. Objetivos

1. General

Analizar la evolución de la estabilidad de un talud en el que se implementó el *Sistema Vetiver* en el año 2012, y el efecto que este sistema tuvo durante su desarrollo en la permeabilidad del suelo.

2. Específicos

- Conocer sobre los usos y efectos de la planta Vetiver sobre taludes y los factores externos que influyen en el crecimiento de la planta.
- Analizar la estabilidad del talud mediante diferentes ensayos de laboratorio y campo, y comparar los resultados con los obtenidos en el momento en que se implementó el *Sistema Vetiver*.
- Aplicar diferentes métodos para evaluar la permeabilidad de un talud que utiliza el *Sistema Vetiver*.
- Desarrollar pruebas en raíces de la planta Vetiver para conocer su resistencia y relación con la estabilidad global del talud.

II. MARCO CONCEPTUAL

A. TALUD

Un talud se conoce como cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal adoptando la posición de forma temporal o permanente y con estructura de suelo o de roca (Matteis, 2003). Existen dos tipos:

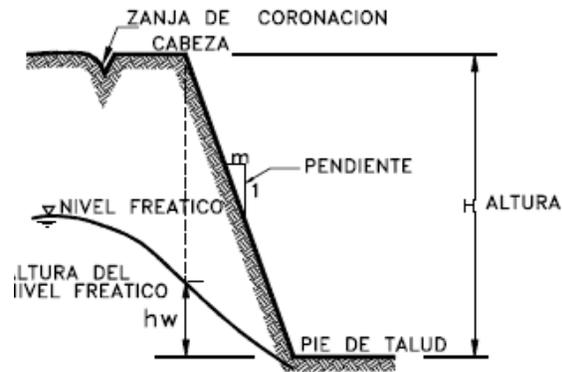
- Naturales: se forman por la naturaleza sin la intervención del hombre, se denominan ladera natural.
- Artificiales: contruidos por el hombre, donde se genera una inclinación en la masa de suelo mediante excavaciones o rellenos, se le denominan taludes (Matteis, 2003).

Su mayor falla ocurre cuando existe un deslizamiento de la masa de suelo, que depende tanto del tiempo y clima del lugar. Asimismo, la erosión puede ser otro problema ya que la superficie se arrastra debido al viento, agua, etc. (Pinto, 2014).

Un talud se caracteriza por varios de sus elementos que lo componen, siendo estos:

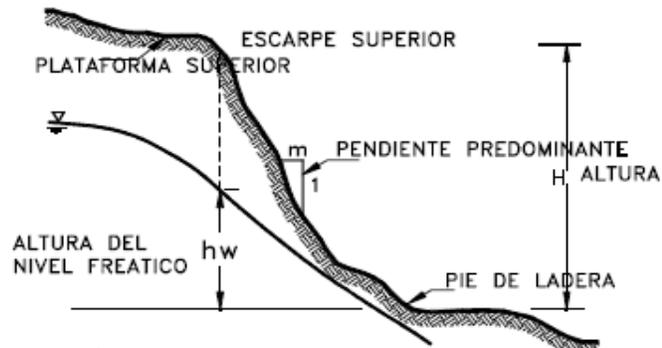
- Pie: sitio donde ocurre un cambio brusco de pendiente en la parte inferior del talud.
- Cabeza o escarpe: sitio donde ocurre un cambio brusco de pendiente en la parte superior del talud,
- Altura: se conoce como la distancia entre el pie y la cabeza. En un talud natural es difícil determinarlo ya que el pie y cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
- Altura de nivel freático: distancia vertical desde el pie del talud hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza
- Pendiente: inclinación del talud, puede medirse en grados, porcentaje o relación $m/1$, en donde, m se refiere a la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical (Suarez Díaz, 1998).

Figura 1. Elementos de un talud natural



(Suarez Díaz, 1998)

Figura 2. Elementos de un talud artificial



(Suarez Díaz, 1998)

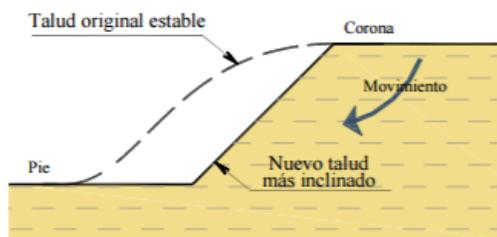
B. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

Estabilidad se refiere a proveer la seguridad a taludes naturales, excavaciones y terraplenes compactados contra una probable falla con la resistencia cortante del suelo. Para asegurar esto, es necesario determinar varios criterios tales la estratificación de suelo y parámetros de resistencia de suelo (Das, 2001).

1. Factores que influyen en la estabilidad de taludes. La inestabilidad de taludes se puede ver influido por varios factores, que causan un incremento en los esfuerzos actuantes o una disminución de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. La mayoría son causadas por la naturaleza o actividades humanas (Montoya Orozco, 2009). Los factores principales que afectan la estabilidad de un talud son:

a. Erosión. Modifica la geometría del talud y con ello, los esfuerzos a los que está sometido, causando cambios bruscos a comparación del talud original (Budhu, 2007).

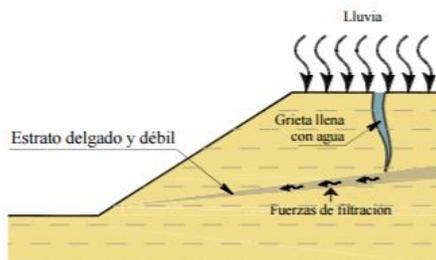
Figura 3. Talud por erosión



(Montoya Orozco, 2009)

b. Lluvia. En época de lluvia, el talud está expuesto a que se sature el suelo que lo conforma, provocando un aumento de peso en la masa, disminución en la resistencia al esfuerzo cortante y erosión de la superficie expuesta. Cuando el talud posee grietas, el agua se introduce en ellas causando que se incremente las fuerzas actuantes o aparición de fuerzas de filtración (Budhu, 2007).

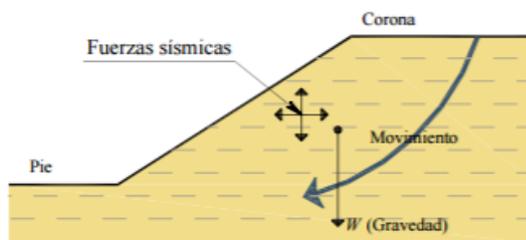
Figura 4. Talud expuesto a lluvia



(Montoya Orozco, 2009)

c. Sismo. El sismo suma fuerzas dinámicas a las estáticas actuantes, provocando esfuerzos cortantes dinámicos que reducen al esfuerzo cortante, debilitando el suelo del talud (Budhu, 2007).

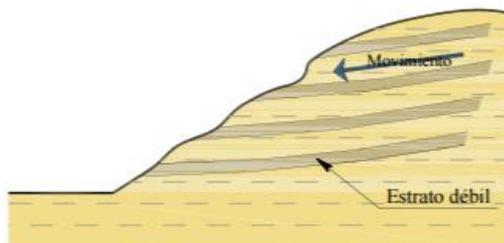
Figura 5. Fuerzas debido a la gravedad y sismo en un talud



(Montoya Orozco, 2009)

d. Aspectos geológicos. Provocados por la naturaleza, suelen no ser detectados durante el levantamiento y exploración del campo, lo cual al no considerarse aumentan la incertidumbre del factor de seguridad. Un ejemplo de ello es un bloque de roca que se deslizo sobre un estrato de arcilla, no detectado (Budhu, 2007).

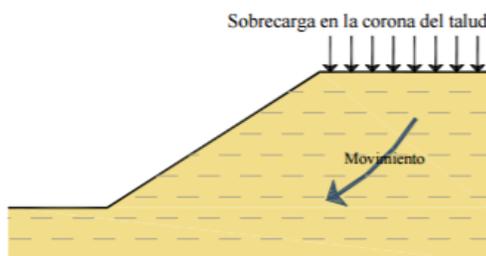
Figura 6. Aspectos geológicos que pueden causar falla en talud



(Montoya Orozco, 2009)

e. Cargas externas. Al agregar cargas a la corona del talud, causan que se incrementen las fuerzas actuantes, lo que provoca una falla si estas no son controladas (Budhu, 2007).

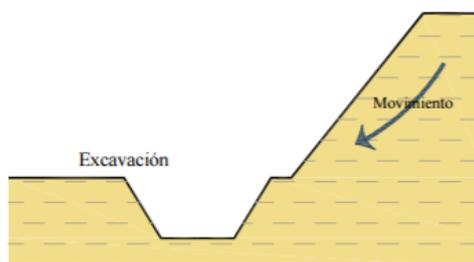
Figura 7. Sobrecarga en la corona del talud



(Montoya Orozco, 2009)

f. Excavaciones y/o rellenos. Las actividades realizadas ya sea en el pie o en la corona del talud, pueden causar la falla modificando los esfuerzos a los que está sometido. Cuando se realiza una excavación al pie del talud, el esfuerzo disminuye, causando un incremento negativo en la presión de poro del suelo, disminuyendo así la resistencia al esfuerzo cortante del suelo (Budhu, 2007).

Figura 8. Excavación en el pie de talud

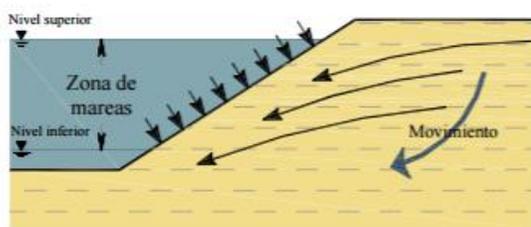


(Montoya Orozco, 2009)

Los taludes realizados con material de un banco de préstamo, requiere compactar los materiales en el sitio, generando un relleno artificial o terraplén. Lo siguiente puede modificar los esfuerzos con los que está diseñado el talud.

g. Condición de presión de poro y vaciado rápido. Si un talud se encuentra cerca de una zona de marea, está sujeto a que los embalses puedan cambiar rápidamente su nivel de agua, causando una reducción de la fuerza lateral que proporciona el agua. Además, el exceso de presión de poro no tiene tiempo de disiparse (Budhu, 2007).

Figura 9. Fuerzas de filtración generadas por cambio de nivel en el embalse



(Montoya Orozco, 2009)

2. Tipo de fallas en taludes

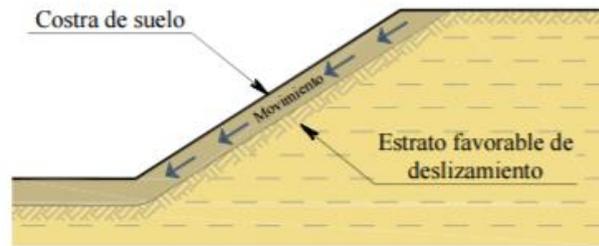
a. Deslizamiento superficial (Reptación). Se define como un proceso continuo y lento de deslizamiento ladera abajo que ocurre en la zona superficial de algunas laderas naturales. Suele ocurrir en grandes áreas de terrenos. El movimiento es causado sin ninguna transición brusca entre la superficie y masa inmóvil más profunda, es decir, que no actúa directamente en la parte interna del talud (Rico & Del Castillo, 2000).

Terzaghi (1948) lo clasifica en dos clases siendo:

- Estacional: afecta la corteza superficial del talud cuyos suelos sufren la influencia del clima en forma de expansiones y contracciones humedecimiento y secado.
- Masivo: afecta a capas del suelo más profundas, no les afecta el clima, siendo factores internos los que afectan el suelo (Terzaghi, 1948).

Se les asocia a estratigrafías cuyo echado está en dirección del talud y su movimiento acelera cuando hay presencia de flujo de agua dentro del talud. La velocidad con la que se mueve esta falla rara vez excede unos centímetros por año (Montoya Orozco, 2009).

Figura 10. Falla por deslizamiento superficial

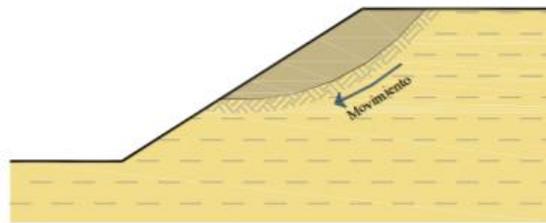


(Montoya Orozco, 2009)

b. Falla por rotación. Son movimientos rápidos que ocurren en los taludes y abarca una masa considerable del suelo que afecta a la geometría del talud. Este tipo de falla puede presentarse como una superficie cilíndrica o concoidal, lo cual es favorable en el momento de establecer un modelo matemático de falla que permite un cálculo numérico. Se puede dividir en varias clases, clasificándose con respecto a la profundidad en que presente la falla y el punto donde esta superficie corta a los planos que forman la geometría externa del talud. Esta clasificación, es la siguiente (Rico & Del Castillo, 2000):

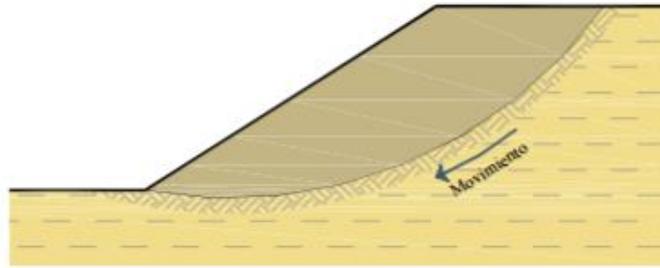
- Falla local: ocurre cuando la superficie de falla corta al plano inclinado del talud entre el hombro y el pie, sin afectar a este último. Al causar un cambio en la geometría del talud, provoca la aparición de fallas subsecuentes que pueden traer consecuencias catastróficas (Rico & Del Castillo, 2000).

Figura 11. Falla Local



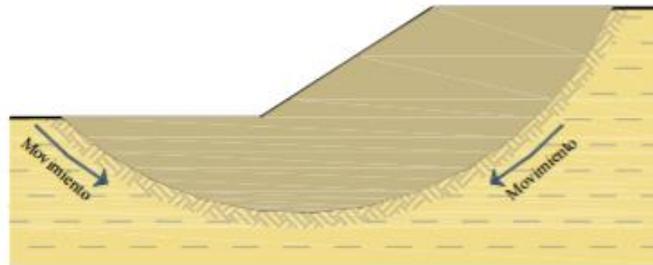
(Montoya Orozco, 2009)

- Falla de pie: consiste en que la superficie de falla tiene salida en las cercanías del pie del talud (Rico & Del Castillo, 2000).

Figura 12. Falla de pie

(Montoya Orozco, 2009)

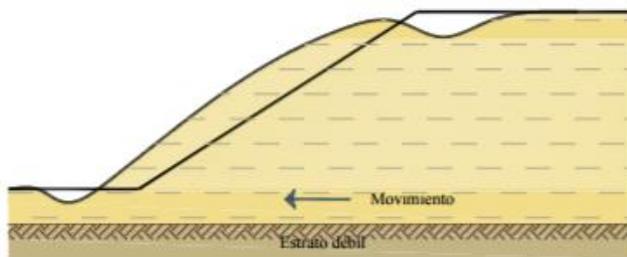
- Falla de base: sucede cuando la superficie de falla corta el plano horizontal que forma la base del talud, representando una falla general de toda la geometría del talud. Se caracteriza por tener una mayor profundidad y está limitado por estratos resistentes (Rico & Del Castillo, 2000).

Figura 13. Falla de base

(Montoya Orozco, 2009)

c. Falla traslacional. Se presenta como un movimiento del cuerpo del talud sobre una superficie relativamente plana asociada a estratos poco resistentes localizada cerca del pie del talud. El movimiento de dicha falla se forma paralelamente a la estratificación de los suelos débiles, los cuales suelen ser arcillas blandas, arenas finas o limos no plásticos. Para que esta falla ocurra, es cuando aumenta la presión de poro en el estrato débil (Rico & Del Castillo, 2000).

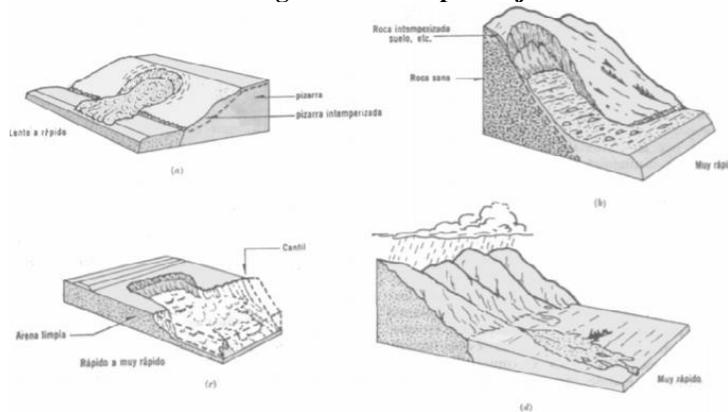
Figura 13. Falla traslacional



(Montoya Orozco, 2009)

d. Falla por flujo. Ocurren de manera instantánea, donde los movimientos y las velocidades que suceden en el talud se debe al comportamiento que presenta un líquido viscoso. Es importante mencionar que esta falla sucede con mayor frecuencia en taludes naturales, donde el material es no consolidado (Rico & Del Castillo, 2000).

Figura 14. Falla por flujo



(Rico & Del Castillo, 2000)

e. Falla por licuación. Se presenta cuando existe una reducción rápida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo causando un colapso en la estructura que forme el talud. Generalmente ocurre en arenas finas susceptibles a un incremento en la presión de poro causadas por vibraciones o sismo crítico (Rico & Del Castillo, 2000).

3. Métodos de cálculo de estabilidad de taludes. Para verificar la seguridad de los taludes naturales o artificiales, se realiza un análisis de estabilidad de taludes. Este proceso implica determinar y comparar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo (Das, 2001).

El análisis de estabilidad incluye la evaluación de variables tales como la estratificación del suelo y sus parámetros de resistencia cortante. La infiltración a través del talud y la selección de una superficie de deslizamiento potencial se agregan a la complejidad del problema (Das, 2001).

Al considerar el problema de la estabilidad de un talud, se puede resolver de distintas maneras. Se estudia taludes infinitos sin infiltración y finitos. En este último, se trabaja ya sea con superficie de falla plana o circularmente cilíndrica, los cuales se pueden hacer por métodos conocidos como Culmann, Bishop o Dovelas.

a. Factor de seguridad. El factor de seguridad se define como la relación entre la resistencia real y los esfuerzos cortantes críticos que son producidos por la falla (Suarez Díaz, 1998). Para analizar la estabilidad de un talud, se debe de determinar el factor de seguridad, el cual se expresa con la siguiente fórmula (Das, 2001):

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

Donde:

FS_s = factor de seguridad con respecto a la resistencia

τ_f = resistencia cortante promedio del suelo

τ_d = esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla (Das, 2001).

La resistencia cortante de un suelo consta de dos componentes, la cohesión y fricción que se expresan como (Das, 2001):

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi \quad (2)$$

Donde:

c = cohesión

ϕ = ángulo de cohesión

σ' = esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla (Das, 2001).

De igual manera, se conoce que (Das, 2001):

$$\tau_d = c_d + \sigma' \tan \phi_d \quad (3)$$

Donde, c_d y ϕ_d se refieren al ángulo de fricción y cohesión efectivo que se desarrolla a lo largo de la superficie potencial de falla. Sustituyendo estas dos ecuaciones en la ecuación (1) obtenemos (Das, 2001):

$$FS_s = \frac{c + \sigma' \tan \phi}{c_d + \sigma' \tan \phi_d} \quad (4)$$

El factor de seguridad se puede introducir de dos maneras, respecto a la cohesión y a la fricción (Das, 2001):

$$FS_c = \frac{c}{c_d} \quad (5)$$

Y

$$FS_\phi = \frac{\phi}{\phi_d} \quad (6)$$

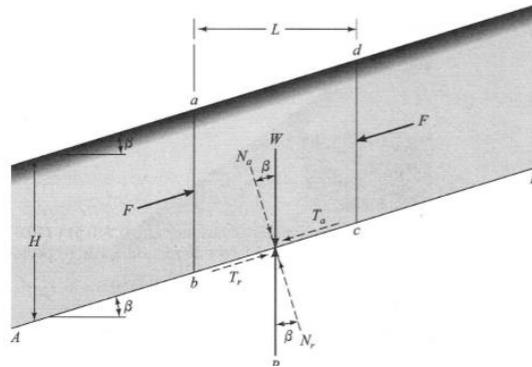
Al comparar las ecuaciones, vemos que el factor de seguridad de cohesión, fricción se vuelve igual con respecto a la resistencia (Das, 2001):

$$FS_c = FS_\phi = FS_s \quad (7)$$

Cuando FS_s es igual a 1, el talud está en un estado de falla incipiente. Un valor de 1.5, es aceptable para el diseño de un talud estable (Das, 2001).

b. Estabilidad de taludes infinitos sin infiltración. Al presentarse un problema de estabilidad, se considera un talud infinito (ver Figura 15). Este se caracteriza por que el H es mucho mayor que la altura del talud (Das, 2001).

Figura 15. Análisis de un talud infinito (sin infiltración)



(Das, 2001)

La resistencia cortante del suelo es (Das, 2001):

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi \quad (8)$$

Para encontrar el factor de seguridad ante una posible falla, se debe evaluar un plano AB a una profundidad H por debajo de la superficie del terreno. La falla del talud ocurrirá debido a un movimiento en el suelo sobre el plano AB de derecha a izquierda (Das, 2001).

Asimismo, se considera un elemento de talud abcd, que tiene una longitud unitaria perpendicular al plano de la sección indicada. Se conoce que las caras verticales ab y cd son iguales y opuestas, se pueden despreciar. Se debe tener en cuenta el peso total de talud de longitud unitaria, el cual se define como (Das, 2001):

$$W = (\text{volumen del elemento del suelo}) * (\text{peso específico del suelo}) = \gamma * L * H \quad (9)$$

El peso se puede dividir en dos elementos siendo (Das, 2001):

- Fuerza perpendicular al plano: $AB = N_a = W \cos \beta = \gamma * L * H * \cos \beta$
- Fuerza paralela al plano: $AB = T_a = W \sin \beta = \gamma * L * H * \sin \beta$ (esta fuerza es la que tiende a causar deslizamiento a lo largo del plano) (Das, 2001).

Por otro lado, se conoce que el esfuerzo normal efectivo σ' y el esfuerzo cortante τ son (Das, 2001):

$$\sigma' = \frac{N_a}{\text{Área de la base}} = \frac{\gamma * L * H * \cos \beta}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma * H * \cos^2 \beta \quad (10)$$

Y

$$\tau = \frac{T_a}{\text{Área de la base}} = \frac{\gamma * L * H * \text{sen}\beta}{\left(\frac{L}{\text{cos}\beta}\right)} = \gamma * L * H * \text{cos}\beta * \text{sen}\beta \quad (11)$$

El suelo proporciona una reacción al peso W que equivale a una fuerza igual y opuesta a R. Evaluando las fuerzas ejercidas, se conoce las componentes normal y tangencial de R respecto al plano AB siendo N_r y T_r (Das, 2001).

$$N_r = R \text{cos}\beta = W \text{cos}\beta \quad (12)$$

$$T_r = R \text{sen}\beta = W \text{sen}\beta \quad (13)$$

El esfuerzo cortante resistente que se desarrolla en la base del elemento se define como (Das, 2001):

$$T_r / (\text{área de la base}) = \gamma H \text{sen}\beta \text{cos}\beta \quad (14)$$

Esta ecuación se sustituye a la ecuación (10) con (3) (Das, 2001):

$$\tau_d = c_d + \gamma * H * \text{cos}^2\beta \tan\phi_d \quad (15)$$

Luego, sustituimos (14) en (15) (Das, 2001):

$$\gamma H \text{sen}\beta \text{cos}\beta = c_d + \gamma * H * \text{cos}^2\beta \tan\phi_d$$

O

$$\frac{c_d}{\gamma H} = \text{cos}^2\beta (\tan\beta - \tan\phi_d) \quad (16)$$

El factor de seguridad se puede relacionar con la resistencia que se ha definido anteriormente, de la siguiente manera (Das, 2001):

$$\tan\phi_d = \frac{\tan\phi}{FS_s} \text{ y } c_d = \frac{c}{FS_s} \quad (17)$$

Sustituyendo las relaciones anteriores en la ecuación (16), obtenemos (Das, 2001):

$$FS_s = \frac{c}{\gamma H \text{cos}^2\beta (\tan\beta)} + \frac{\tan\phi}{\tan\beta} \quad (18)$$

Es importante recordar que para suelos granulares, $c=0$ y el factor de seguridad resulta igual a $\tan\phi / \tan\beta$. Al observar el siguiente resultado, se puede decir que el factor de seguridad es independiente de la altura H y que el talud es estable siempre que $\beta < \phi$. El ángulo ϕ para suelos sin cohesión se llama ángulo de reposo (Das, 2001).

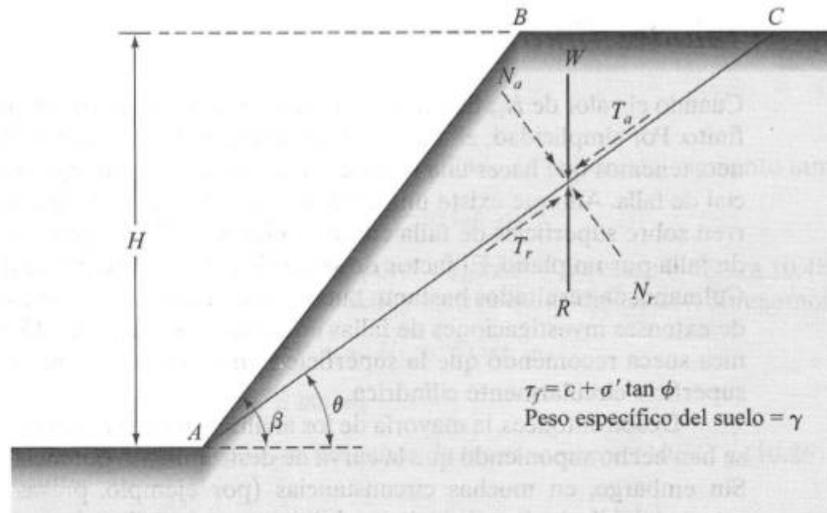
c. Estabilidad de taludes finitos. Se considera un talud finito cuando el valor de H_{cr} tiende a la altura del talud. Al analizar un talud de este tipo, se debe de suponer acerca de la forma general de la superficie potencial de falla. Existe evidencia que confirma que las fallas en taludes ocurren sobre superficies de falla curvas, Culmann aproximó la superficie potencial de falla por un plano. El factor de seguridad, F_s , se calcula usando principios propuestos por Culmann, los resultados son solamente para taludes casi verticales. Después de varias investigaciones, en 1920, una comisión sueca recomendó que la superficie real de deslizamiento sea aproximada por una superficie circularmente cilíndrica (Das, 2001).

Para analizar la estabilidad del talud, se analizan de diferentes maneras. Estas son tres de las metodologías que se utilizan:

1) Método de Culmann. Con este análisis se considera que la superficie de falla es plana, donde el deslizamiento es mayor que la resistencia cortante del suelo. Además, el plano más crítico es aquel que tiene una razón mínima entre el esfuerzo cortante promedio que tiende a causar la falla y la resistencia cortante del suelo (Das, 2001).

En la Figura 16, se observa un talud de altura H elevado a un ángulo β con la horizontal. Asimismo, actúa en un plano de falla AC con ángulo de cohesión máxima θ . Se considera una longitud unitaria perpendicular a la sección del talud, el peso de la cuña $ABC=W$ (Das, 2001):

Figura 16. Análisis de un talud finito; método de Culmann



(Das, 2001)

$$W = \frac{1}{2} * (H) * (\overline{BC}) * (1) * (\gamma) = \frac{1}{2} * (H) * (H \cot \theta - H \cot \beta) * \gamma = \frac{1}{2} * \gamma * (H^2) * \left[\frac{\text{sen}(\beta - \theta)}{\text{sen} \beta \text{sen} \theta} \right] \quad (19)$$

Donde:

H= altura del talud

β = ángulo de elevación del talud

γ = peso específico del suelo

Θ = ángulo de cohesión (Das, 2001).

Las componentes normal y tangencial de W respecto al plano AC (Das, 2001):

Componente normal, Na, se define como (Das, 2001):

$$Na = \frac{1}{2} * \gamma * (H^2) * \left[\frac{\text{sen}(\beta - \theta)}{\text{sen} \beta \text{sen} \theta} \right] * \cos \theta \quad (20)$$

Componente tangencial, Ta, se define como (Das, 2001):

$$Ta = \frac{1}{2} * \gamma * (H^2) * \left[\frac{\text{sen}(\beta - \theta)}{\text{sen} \beta \text{sen} \theta} \right] * \text{sen} \theta \quad (21)$$

El esfuerzo normal y cortante en el plano se definen como (Das, 2001):

$$\sigma' = \text{esfuerzo normal} = \frac{Na}{(AC)(1)} = \frac{Na}{\left(\frac{H}{\text{sen} \theta}\right)} = \frac{1}{2} * \gamma * H * \left[\frac{\text{sen}(\beta - \theta)}{\text{sen} \beta \text{sen} \theta} \right] * \cos \theta * \text{sen} \theta \quad (22)$$

$$\tau = \text{esfuerzo cortante} = \frac{Ta}{(\overline{AC})(1)} = \frac{Ta}{\left(\frac{H}{\text{sen}\theta}\right)} = \frac{1}{2} * \gamma * H * \left[\frac{\text{sen}(\beta-\theta)}{\text{sen}\beta\text{sen}\theta} \right] * \text{sen}^2\theta \quad (23)$$

Conociendo las propiedades del suelo y ángulo de cohesión máxima, se puede calcular el esfuerzo resistente del talud, mediante la siguiente ecuación (Das, 2001):

$$\tau_f = c + \frac{1}{2}\gamma H \left(\frac{\text{sen}(\beta-\theta)}{\text{sen}(\beta)\text{sen}(\theta)} \right) \cos(\theta)\text{sen}(\theta)\tan(\phi) \quad (24)$$

Al igualar las ecuaciones T y T_f, conocemos c_d (Das, 2001):

$$\frac{1}{2} * \gamma * H * \left[\frac{\text{sen}(\beta-\theta)}{\text{sen}\beta\text{sen}\theta} \right] * \text{sen}^2\theta = c_d + \frac{1}{2}\gamma H \left(\frac{\text{sen}(\beta-\theta)}{\text{sen}(\beta)\text{sen}(\theta)} \right) \cos(\theta)\text{sen}(\theta)\tan(\phi) \quad (25)$$

O

$$c_d = \frac{1}{2}\gamma H * \left[\frac{\text{sen}(\beta-\theta) * (\text{sen}\theta - \cos\theta \tan\phi_d)}{\text{sen}\beta} \right] \quad (26)$$

La siguiente expresión (26) es derivada para el plano de falla de prueba AC. Para determinar el plano crítico de falla, usamos el principio de máximos y mínimos (para un valor dado de ϕ_d) para encontrar el ángulo θ en el que la cohesión desarrollada será máxima, esto se logra mediante la derivada de c_d, siendo así (Das, 2001):

$$\frac{\partial c_d}{\partial \theta} = 0 \quad (27)$$

Al ser γ , H y β constantes, se puede reescribir la ecuación (26) siendo (Das, 2001):

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (\text{sen}(\beta - \theta) * (\text{sen}\theta - \cos\theta \tan\phi_d)) = 0 \quad (28)$$

Resolviendo la ecuación anterior, obtenemos el valor crítico de θ (Das, 2001):

$$\theta_{cr} = \frac{\beta + \phi_d}{2} \quad (29)$$

Al sustituir el valor de $\theta = \theta_{cr}$ en la ecuación 26 (Das, 2001):

$$c_d = \frac{\gamma H}{4} * \left(\frac{1 - \cos(\beta - \phi_d)}{\text{sen}(\beta)\cos(\phi_d)} \right) \quad (30)$$

La altura máxima del talud para la cual ocurre el equilibrio crítico se obtiene sustituyendo $c_d=c$ y $\phi_d = \phi$ en la ecuación 4, por lo que (Das, 2001):

$$H = \frac{4Cd}{\gamma} * \left(\frac{\text{sen}(\beta)\text{cos}(\phi_d)}{1-\text{cos}(\beta-\phi_d)} \right) \quad (31)$$

Donde:

H= altura del talud

Cd= cohesión efectiva

ϕ_d = ángulo de fricción

β = ángulo de elevación del talud

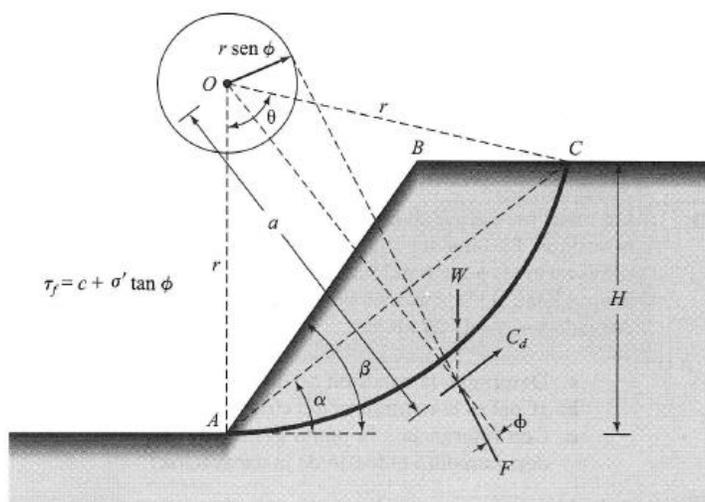
γ = peso específico del suelo (Das, 2001).

Al ser iguales los valores de factor de cohesión y ángulo de fricción, se puede despejar la ecuación anterior en términos de Cd y ϕ_d en la ecuación de altura máxima del talud, obteniendo la siguiente expresión (Das, 2001):

$$H = \frac{4\frac{c}{F.S.S}}{\gamma} * \left(\frac{\text{sen}(\beta)\text{cos}\left(\tan^{-1}\left(\frac{\tan(\phi)}{\tan(\phi_d)}\right)\right)}{1-\text{cos}\left(\beta-\text{cos}\left(\beta-\tan^{-1}\left(\frac{\tan(\phi)}{\tan(\phi_d)}\right)\right)\right)} \right) \quad (32)$$

2) Procedimiento de masa del análisis de estabilidad o método de masa total. En este método la masa de suelo arriba de la superficie de deslizamiento se toma como unitaria. Se utiliza cuando el suelo es homogéneo, aunque no es común en la mayoría de los taludes naturales (Das, 2001).

Figura 17. Deslizamiento de una masa de suelo con superficie circular



(Das, 2001)

La resistencia cortante del suelo está dada por la ecuación (Das, 2001):

$$\tau_f = c + \sigma \tan(\phi) \quad (33)$$

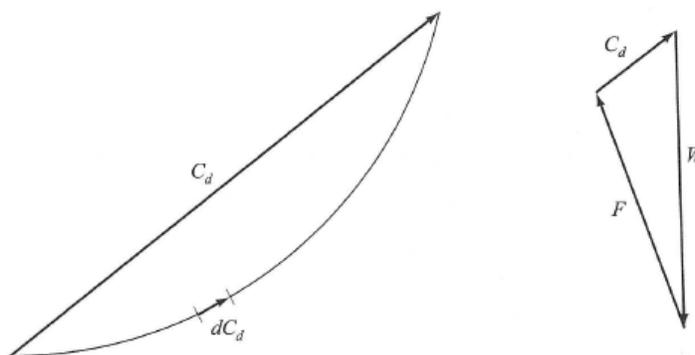
Donde:

c = cohesión

ϕ = ángulo de fricción interna

σ = esfuerzo normal sobre el plano de falla (Das, 2001).

Figura 18. Análisis de taludes en sus suelos homogéneos con $\phi > 0$



(Das, 2001)

Se debe tener en cuenta que la presión de poro es igual 0, AC forma un arco circular de prueba que pasa por la punta del talud, y O es el centro del círculo. Se considera que la una longitud unitaria perpendicular a la sección del talud. El peso de la cuña del suelo $ABC=W= (\text{área de } ABC) (\gamma)$ (Das, 2001).

Por equilibrio de fuerzas, se observa que actúa C_d , que es la resultante de fuerza cohesiva y es igual a la cohesión unitaria desarrollada por la longitud de la cuerda AC, es decir: $C_d = c_d(AC)$. C_d actúa paralelamente a la cuerda AC y a una distancia a desde el centro del círculo O, siendo así (Das, 2001):

$$C_d(a) = c_d(AC)(r) \quad (34)$$

$$a = \frac{c_d(AC)r}{c_d} \quad (35)$$

Asimismo, se toma en cuenta la resultante de las fuerzas normal y de fricción a lo largo de la superficie de deslizamiento, F. Por equilibrio, F debe pasar por el punto de intersección de la línea de acción W y C_d (Das, 2001).

Se supone que la fricción total se encuentra movilizada ($\phi_d = \phi$ o $FS_\phi = 1$) como resultado la línea de acción de F formará un ángulo ϕ con una normal al arco y será entonces una tangente a un círculo con su centro en O y la radio equivale a $r \text{ sen } \phi$. Este círculo se llama círculo de fricción (Das, 2001).

Conociendo las direcciones de W, C_d y F y la magnitud de W se conocen, se dibuja el polígono de fuerzas mostrada en la Figura 18. Por medio del polígono, se determina la magnitud de C_d , la cohesión unitaria se encuentra con la relación $C_d = C_d/AC$ (Das, 2001).

La cohesión máxima desarrollada a lo largo de la superficie crítica se expresa como (Das, 2001):

$$c_d = \gamma H [f(\alpha, \beta, \theta, \Phi)] \quad (36)$$

Para el equilibrio crítico, es decir, $FS_c = FS_\phi = FS_s = 1$, sustituimos $H = H_{cr}$ y $c_d = c$ en la ecuación presentada anteriormente, obteniendo así (Das, 2001):

$$c = \gamma H_{cr} [f(\alpha, \beta, \theta, \Phi)] \quad (37)$$

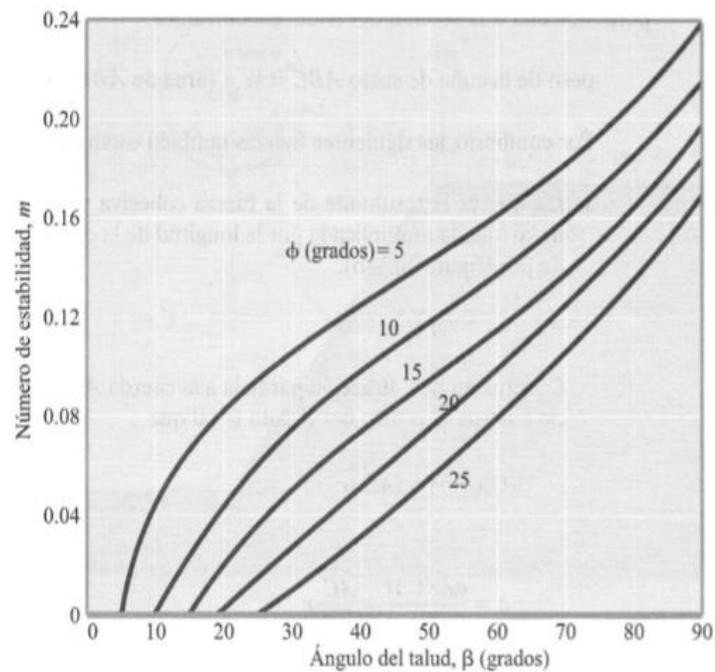
O

$$\frac{c}{\gamma H_{cr}} = [f(\alpha, \beta, \theta, \Phi)] = m \quad (38)$$

Donde m, representa el número de estabilidad (Das, 2001).

En la siguiente gráfica, se relaciona los valores m con ϕ y β . Se grafican los valores del factor de seguridad respecto fricción con el factor de seguridad con respecto a la cohesión. Se traza una línea que pase por ambos puntos. Después, se dibuja otra línea a 45° , saliendo del origen e intersectando con la primera línea ya realizada (Das, 2001).

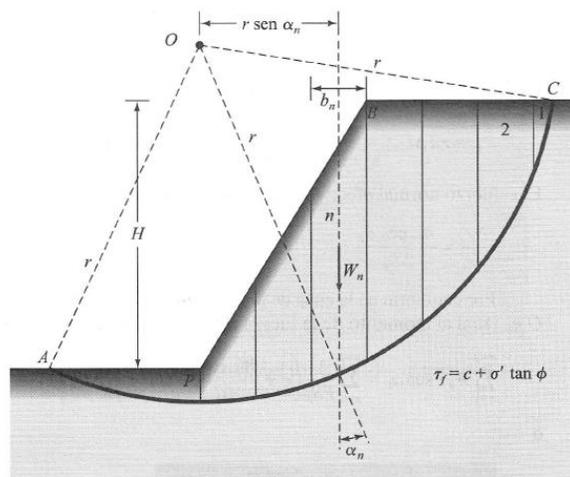
Gráfico 1. Número de estabilidad de Taylor para $\phi > 0$



(Das, 2001)

3) Análisis por dovelas. Para el siguiente procedimiento, el suelo arriba de la superficie de deslizamiento se divide en varias dovelas verticales paralelas, como se puede ver en la Figura 19. La estabilidad de cada dovela dibujada se calcula individualmente. Para esta técnica se toma en cuenta la homogeneidad de los suelos, la presión del agua de poros y el esfuerzo normal a lo largo de la superficie potencial de falla. Es importante mencionar que cada dovela no tiene el mismo ancho (Das, 2001).

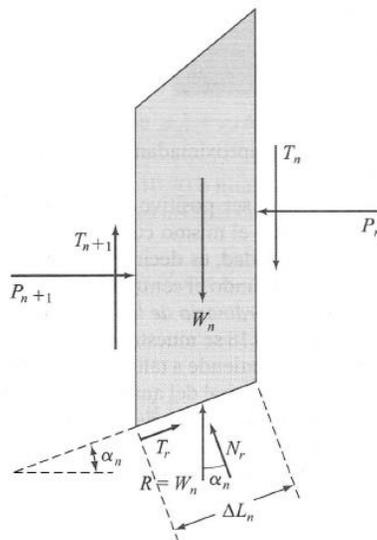
Figura 19. Superficie de falla circular dividida por dovelas



(Das, 2001)

Se considera una longitud unitaria perpendicular a la sección transversal, las fuerzas que actúan sobre una dovela típica (n-ésima dovela) se muestran en la siguiente imagen (Das, 2001).

Figura 20. Fuerzas presentes en el análisis de dovelas



(Das, 2001)

En la Figura 20, W_n representa el peso de la dovela, T_r es la componente tangencial de R , N_r la componente normal de R , P_n y P_{n+1} son las fuerzas normales que actúan sobre los lados de la dovela y T_n y T_{n+1} , son las fuerzas cortantes que actúan sobre la dovela. Por simplicidad se considera que la presión de poro del agua es igual a 0 (Das, 2001).

Para este análisis, se puede realizar diferentes métodos, siendo tres los principales:

a) Fellenius o método sueco. Se basa en el equilibrio de fuerzas sin tomar en cuenta los momentos. Asimismo, se considera fuerzas cortantes y axiales entre las dovelas. Considera únicamente deslizamientos circulares. En el siguiente, no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. La ventaja que es el más utilizado por ser un método simple y la desventaja, es ser muy poco preciso para taludes planos con alta presión de poros (Das, 2001).

Se considera el equilibrio de fuerzas se obtiene (Das, 2001):

$$N_r = W_n \cos(\alpha_n) \quad (39)$$

La fuerza cortante resistente se representa como (Das, 2001):

$$T_r = \tau_d(\Delta L_n) = \frac{1}{FS_s} [c + \sigma' \tan(\phi)] \Delta L_n \quad (40)$$

El esfuerzo normal efectivo σ' se conoce como (Das, 2001):

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos(\alpha_n)}{\Delta L_n} \quad (41)$$

Por el equilibrio de la cuña ABC, se tiene que (Das, 2001):

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n \cos(\alpha_n) = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{FS_s} \left[c + \frac{W_n \cos(\alpha_n) \tan(\phi)}{\Delta L_n} \tan(\phi) \right] (\Delta L_n)(r) \quad (42)$$

Despejando FS_s , se obtiene (Das, 2001):

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c \Delta L_n + W_n \cos(\alpha_n) \tan(\phi))}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin(\alpha_n)} \quad (43)$$

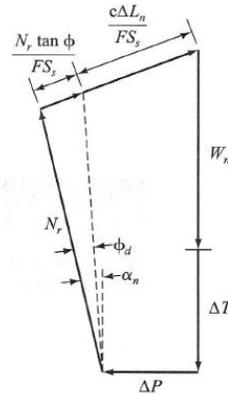
b) Método Bishop. En 1955, Bishop propuso un método en donde el efecto de las fuerzas sobre los lados de cada dovela se toma en cuenta en alguna medida. Para ello, se hace referencia a las Figuras 19 y 20. Se estudia las fuerzas que actúan sobre la n-ésima dovela mostrada en la Figura 20 (Das, 2001).

Se considera que $P_n - P_{n+1} = \Delta P$ y $T_n - T_{n+1} = \Delta T$. Asimismo, escribimos (Das, 2001):

$$T_r = N_r (\tan \phi_d) + c_d \Delta L_n = N_r \left(\frac{\tan \phi}{FS_s} \right) + \frac{c \Delta L_n}{FS_s} \quad (44)$$

En la Figura 21, se muestra el polígono de fuerzas para el equilibrio de la n-ésima (Das, 2001).

Figura 21. Polígono de equilibrio de fuerzas



(Das, 2001)

Al sumar las fuerzas en la dirección vertical se observa que (Das, 2001):

$$W_n + \Delta T = N_r \cos(\alpha_n) + \left[\frac{N_r \tan \phi}{FS_s} + \frac{c\Delta L_n}{FS_s} \right] \text{sen } \alpha_n \quad (45)$$

Despejando N_r , se obtiene la siguiente ecuación (Das, 2001):

$$N_r = \frac{W_n + \Delta T - \frac{c\Delta L_n}{FS_s} \text{sen } \alpha_n}{\cos(\alpha_n) + \frac{\tan \phi \text{sen } \alpha_n}{FS_s}} \quad (46)$$

Por equilibrio, al tomar momentos respecto a O, resulta (Das, 2001):

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \text{sen } \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} T_r \gamma \quad (47)$$

Al sustituir las últimas tres ecuaciones, despejando para FS_s obtenemos (Das, 2001):

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (cb_n + W_n \tan(\phi) + \Delta T \tan(\phi)) \frac{1}{m_\alpha(n)}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \text{sen}(\alpha_n)} \quad (48)$$

Donde:

$$m_\alpha(n) = \cos(\alpha_n) + \frac{\tan(\phi) \text{sen}(\alpha_n)}{FS_s} \quad (49)$$

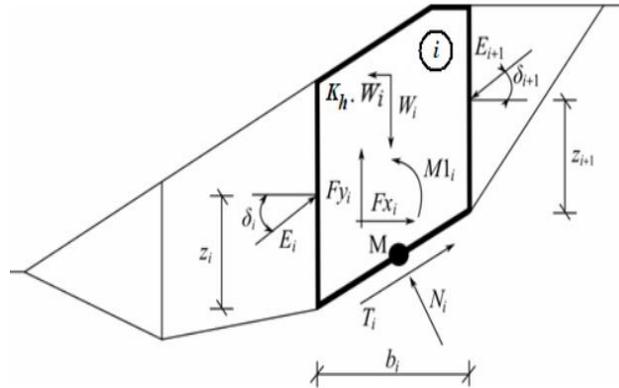
(Das, 2001)

Por simplicidad, si tomamos $\Delta T = 0$, la ecuación se toma como, dando el método simplificado de Bishop que es el más utilizado (Das, 2001).

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (cb_n + W_n \tan(\phi)) \frac{1}{m_\alpha(n)}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \text{sen}(\alpha_n)} \quad (50)$$

c) **Morgenstern y Price.** Método basado en el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales, los cuales se crean dividiendo el suelo. En este análisis, la falla puede ser cualquier forma (FINE, 2012). En la Figura 22, se puede observar las fuerzas que actúan en los bloques individuales.

Figura 22. Esquema de fuerzas de talud



(FINE, 2012)

Es importante mencionar que para calcular el equilibrio límite de las fuerzas y momento de los bloques individuales se asumen los siguientes supuestos:

- Los planos divididos entre bloques son siempre verticales.
- La línea de acción del peso del bloque W_i pasa por el centro del segmento i -th de la superficie de deslizamiento representada por el punto M .
- La fuerza normal N_i actúa en el centro del segmento i -th de la superficie de deslizamiento, en el punto M .
- La inclinación de las fuerzas E_i que actúan entre los bloques es diferente en cada bloque (δ_i) al punto extremo de la superficie de deslizamiento (FINE, 2012).

Al obtener los resultados de las fuerzas en los bloques, se puede calcular el factor de seguridad el cual se expresa en la siguiente expresión (FINE, 2012):

$$FS = \tan(\phi_i) \tan(\delta_{i+1} - \alpha_i) \quad (51)$$

Asimismo, se debe de comprobar el parámetro m_α para prevenir así la inestabilidad numérica, el cual se calcula de la siguiente manera (FINE, 2012):

$$m_\alpha = \cos(\alpha_i) + \frac{\sin(\alpha_i)\tan(\phi_i)}{FS} > 0.2 \quad (52)$$

4. Métodos para estabilización y control de erosión de taludes. Cuando se ha estudiado el talud, donde se ha definido los niveles de amenaza y riesgo, el mecanismo de falla y analizado los factores de equilibrio, se busca realizar un diseño ideal que provea un sistema de prevención de control o estabilización. Existe varias formas para poder resolver el problema y la solución dependen de varios factores técnicos, sociales, económicos, políticos; con una gran cantidad de variables en el espacio y en el tiempo (Suarez Díaz, 1998). Algunos de ellos son:

a. Prevención. Incluye el manejo de la vulnerabilidad, evitando la posibilidad de que se presenten riesgos o amenazas en un área determinada (Suarez Díaz, 1998).

Cuadro 1. Métodos de prevención de la amenaza o riesgo

Método	Ventajas	Desventajas
Disuasión con medidas coercitivas	Son muy efectivas cuando la comunidad está consciente del riesgo y colabora con el estado.	El manejo de los factores socioeconómicos y sociales es difícil.
Planeación del uso de la tierra	Es una solución ideal para zonas urbanas y es fácil de implementar.	No se puede aplicar cuando ya existe el riesgo.
Códigos técnicos	Presenta herramientas precisas para el control y prevención de amenazas.	Se requiere de una entidad que los haga cumplir.
Aviso y Alarma	Disminuye en forma considerable el riesgo cuando es inminente.	Generalmente, se aplica después de ocurrido el desastre.

(Suarez Díaz, 1998)

b. Elusión de la amenaza. Consiste en evitar que los elementos en riesgo sean expuestos a la amenaza de deslizamiento (Suarez Díaz, 1998).

Cuadro 2. Métodos de elusión de la amenaza

Método	Aplicaciones	Limitaciones
Variantes o relocalización del proyecto	Se recomienda cuando existe el riesgo de activar grandes deslizamientos difíciles de estabilizar o existen deslizamientos antiguos de gran magnitud. Puede ser el mejor de los métodos si es económico hacerlo.	Puede resultar costoso y el nuevo sitio o alineamiento puede estar amenazado por deslizamientos.
Remoción total de deslizamientos	Es atractivo cuando se trata de volúmenes pequeños de excavación.	La remoción de los deslizamientos puede producir nuevos movimientos.
Remoción parcial de materiales inestables	Se acostumbra el remover los suelos subsuperficiales inestables cuando sus espesores no son muy grandes.	Cuando el nivel freático se encuentra subsuperficial se dificulta el proceso de excavación.
Modificación del nivel del proyecto o subrasante de una vía	La disminución de la altura de los cortes en un alineamiento de gran longitud puede resolver la viabilidad técnica de un proyecto.	Generalmente, al disminuir la altura de los cortes se desmejoran las características del proyecto.
Puentes o viaductos sobre los movimientos	Muy útil en terrenos de pendientes muy altas.	Se requiere cimentar los puentes sobre suelo estable y las pelotas deben ser capaces de resistir las fuerzas laterales del material inestable.

(Suarez Díaz, 1998)

c. Control. Consiste en controlar la amenaza activa antes de que se produzca el riesgo a personas o propiedades. Generalmente, son estructuras que retienen la masa de movimiento. Se construyen abajo del deslizamiento para detenerlo después de que se ha iniciado (Suarez Díaz, 1998).

Cuadro 3. Métodos de control de amenaza

Método	Ventajas	Desventajas
Bermas	Generalmente son económicas rápidas de construir.	Se requiere un espacio grande a mitad de talud.
Trincheras	Sirven al mismo tiempo para controlar las aguas de lluvia.	Los cantos fácilmente pasan por encima.
Estructuras de retención	Retienen las masas en movimiento.	Se pueden requerir estructuras algo costosas.
Cubiertas de protección	Son uno de los métodos más efectivos para disminuir el resigo en carreteras.	Son muy costosas.

(Suarez Díaz, 1998)

d. Estabilización. Para alcanzar una estabilización de un talud, se consideran varios factores entre ellos:

- Determinar el sistema o la combinación de sistemas de estabilización más apropiados, teniendo en cuenta las circunstancias que esta el talud estudiado.
- Diseñar en detalle el sistema a emplear, incluyendo planos y especificaciones de diseño.
- Instrumentación y control durante y después de la estabilización (Suarez Díaz, 1998).

Los principales sistemas de estabilización son los siguientes:

1) Conformación del talud o ladera. Buscan lograr un equilibrio de masas, reduciendo las fuerzas que producen el movimiento (Suarez Díaz, 1998).

Cuadro 4. Métodos de conformación del talud para equilibrar fuerzas

Método	Ventajas	Desventajas
Remoción de materiales de la cabeza del talud	Muy efectivo en la estabilización de deslizamientos rotacionales.	En movimientos muy grandes las masas a remover tendrían una gran magnitud.
Abatimiento de la pendiente	Efectivo especialmente en suelos friccionantes.	No es viable económicamente en taludes de gran altura.
Terraceo de la superficie	Además de la estabilidad al deslizamiento, permite construir obras para controlar la erosión.	Cada terraza debe ser estable independientemente.

(Suarez Díaz, 1998)

2) Recubrimiento de la superficie. Métodos que buscan de impedir la infiltración o la ocurrencia de fenómenos superficiales de erosión o refuerzan el suelo más subsuperficial. Generalmente, consisten en elementos impermeabilizantes como el concreto o elementos que refuercen la estructura superficial del suelo como la cobertura vegetal (Suarez Díaz, 1998).

Cuadro 5. Métodos de recubrimiento de la superficie del talud

Método	Ventajas	Desventajas
Recubrimiento de la superficie del talud	El recubrimiento ayuda a controlar la erosión.	Se debe garantizar la estabilidad del recubrimiento.
Conformación de la superficie	Puede mejorar las condiciones del drenaje superficial y facilitar el control de erosión.	Su efecto directo sobre la estabilidad es generalmente, limitado.
Sellado de grietas superficiales	Disminuye la infiltración de agua.	Las grietas pueden abrirse nuevamente y se requiere mantenimiento por períodos importantes de tiempo.
Sellado de juntas y discontinuidades	Disminuye la infiltración de agua y presiones de poro en las discontinuidades.	Puede existir una gran cantidad de discontinuidades que se requiere sellar.
Cobertura vegetal, árboles, arbustos y pastos	Representan una alternativa ambientalmente excelente.	Pueden requerir mantenimiento para su establecimiento.

(Suarez Díaz, 1998)

3) Control de agua superficial y subterránea. Sistemas tendientes a controlar el agua y sus efectos, disminuyendo fuerzas que producen movimiento y/o aumentando las fuerzas resistentes (Suarez Díaz, 1998).

Cuadro 6. Métodos de control de agua superficial y subterránea

Método	Ventajas	Desventajas
Canales superficiales para control de escorrentía	Se recomienda construirlos como obra complementaria en la mayoría de los casos. Generalmente, las zanjas se construyen arriba de la corona del talud.	Se deben construir estructuras para la entrega de las aguas y disipación de energía
Subdrenes de zanja	Muy efectivos para estabilizar deslizamientos poco profundos en suelos saturado subsuperficialmente.	Poco efectivos para estabilizar deslizamientos profundos o deslizamientos con nivel freático profundo.
Subdrenes horizontales de penetración	Muy efectivos para interceptar y controlar aguas subterráneas relativamente profundas.	Se requieren equipos especiales de perforación y su costo puede ser alto.
Galerías o túneles de subdrenaje	Efectivos para estabilizar deslizamientos profundos en formaciones con permeabilidad significativa y aguas subterráneas.	Muy costos.
Pozos profundos de subdrenaje	Útiles en deslizamientos profundos con aguas subterráneas. Efectivos para excavaciones no permanentes.	Su uso es limitado debido a la necesidad de operación y mantenimiento permanente.

(Suarez Díaz, 1998)

4) Estructuras de contención. Consisten en métodos que colocaran fuerzas externas al movimiento aumentando las fuerzas resistentes, sin disminuir las actuantes. Se caracterizan por ser obras generalmente masivas, donde el peso de la estructura es un factor importante y es común colocar estructuras ancladas en las cuales la fuerza se transmiten al deslizamiento por medio de un cable o varilla de acero. Es importante mencionar que cada estructura se debe diseñar de acuerdo con el comportamiento particular (Suarez Díaz, 1998).

Cuadro 7. Métodos de estructuras de contención

Método	Ventajas	Desventajas
Relleno o berma de roca o suelo en la base del deslizamiento.	Efectivos en deslizamientos no muy grande especialmente en los rotacionales actuando como contrapeso.	Se requiere una cimentación competente para colocar el relleno.
Muros de contención convencionales, de tierra armada, etc.	Útiles para estabilizar masas relativamente pequeñas.	Se requiere una buena calidad de cimentación. Son poco efectivos en taludes de gran altura.
Pilotes	Son efectivos en movimientos poco profundos, en los cuales existe suelo debajo de la superficie de falla que sea competente para permitir el hincado y soporte de los pilotes.	No son efectivos en deslizamientos profundos o cuando aparece roca o suelo muy duro debajo de la superficie de falla. Poco efectivos en deslizamientos rotacionales.
Anclajes o pernos	Efectivos en roca, especialmente cuando es estratificada.	Se requieren equipos especiales y son usualmente costosos.
Pantallas ancladas	Útiles como estructuras de contención de masas de tamaño pequeño a mediano.	Existen algunas incertidumbres sobre su efectividad en algunos casos, especialmente cuando hay aguas subterráneas y son generalmente costosas.

(Suarez Díaz, 1998)

5) Mejoramiento del suelo. Consiste en una serie de métodos que ayudan a aumentar la resistencia del suelo. Entre ellos, incluye procesos físicos y químicos que aumentan la cohesión y/o la fricción de la mezcla suelo-producto estabilizante o del suelo modificado. Las obras pueden ser temporales o permanentes de acuerdo con el método utilizado (Suarez Díaz, 1998).

Cuadro 8. Métodos para mejoramiento del suelo

Método	Ventajas	Desventajas
Inyecciones o uso de químicos	Endurecen el suelo y pueden cementar la superficie de falla.	La disminución de permeabilidad puede ser un efecto negativo.
Magmaficación	Convierte el suelo en roca utilizando rayos especiales desarrollados por la industria espacial.	Su utilización en la actualidad es solamente para uso experimental.
Congelación	Endurece el suelo al congelarlo.	Efectos no permanentes.
Electro-osmosis	Reducen el contenido de agua.	Utilización para estabilización no permanente.
Explosivos	Fragmenta la superficie de falla.	Su efecto es limitado y puede tener efectos negativos.

(Suarez Díaz, 1998)

e. Bioingeniería para estabilización. La estabilización de taludes por el uso combinado de vegetación y elementos estructurales adicionales trabajando juntos, se le conoce como “Estabilización Biotecnológica de taludes”. Pastos y plantas diseñadas con el propósito de producir refuerzo del suelo se pueden plantar junto con muros de contención o sistemas estructurales de estructura abierta, en forma de grilla, con espacios para el crecimiento de vegetación. De igual manera, se ha utilizado mantos orgánicos o mantos sintéticos junto con la vegetación conformando una protección integral contra la erosión. Generalmente, estos materiales se van degradando conforme la planta crece y se establecen en forma permanente (Suarez Díaz, 1998).

Cuadro 9. Métodos para mejoramiento del suelo

Categoría	Descripción
Vegetación convencional.	Siembra por semillas, estolones o macetas.
Plantas maderables utilizadas como refuerzo.	Estacas vivas y colchones de maleza.
Estructuras con vegetación.	Gaviones, estructuras de llantas usadas, muros criba, geomallas y revestimientos sintéticos.

(Suarez Díaz, 1998)

La utilización de trinchos utilizando estacas vegetales y de muro criba con maderas y ramas de maleza representan soluciones muy interesantes. La biotecnología por sus características ambientales es atractiva para la estabilización de taludes (Suarez Díaz, 1998).

Para conocer que especie vegetal utilizar se debe acudir a expertos forestales. El tipo de vegetación se selecciona conforme a las condiciones del suelo y el sitio, incluyendo disponibilidad de agua, nutrientes, PH, clima, regulaciones gubernamentales (Suarez Díaz, 1998). Algunas plantas utilizadas son:

Cuadro 10. Ventajas y desventajas de diversos tipos de planta

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedades para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles de establecer en las riberas de ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Arbustos	Variedades para escoger. Existen especies que se reproducen poro estaca. Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer.
Árboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.

(Suarez Díaz, 1998)

Para analizar los fenómenos del efecto de la vegetación sobre el suelo se necesita conocer las características de la vegetación, en el ambiente natural estudiado. Entre los factores que se deben de estudiar es: volumen y densidad de follaje, tamaño, ángulo de inclinación y aspereza de las hojas, entre otros (Suarez Díaz, 1998).

El tipo de vegetación, tanto en el talud como en la parte de arriba de él es un parámetro importante en la estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales: determina el contenido de agua en la superficie y, da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces (Suarez Díaz, 1998).

Es importante mencionar que cada parte de una planta cumplen funciones específicas desde el punto de vista geotécnica (Suarez Díaz, 1998). En la siguiente tabla, se observa cada una de ellas.

Cuadro 11. Componentes de la planta y sus funciones

Parte de la planta	Función
Raíz	Anclaje, absorción, conducción y acumulación de líquidos.
Tallo	Soporte, conducción y producción de nuevos tejidos.
Hojas	Fotosíntesis, transpiración.

(Suarez Díaz, 1998)

1) Abatimiento de la pendiente del talud. Al disminuir la pendiente del talud, el círculo de falla se hace más largo y profundo, aumentando en esta forma el factor de seguridad. Este se logra mediante el corte o relleno en el talud (Suarez Díaz, 1998).

Es económicamente posible en taludes de poca altura, pero no es posible para los de mayor altura, debido al aumento exagerado de volumen en la tierra de corte con el aumento de la altura. En ocasiones, no es posible el abatimiento por relleno debido a la falta de espacio en el pique del talud (Suarez Díaz, 1998).

Se debe tener en cuenta el tipo de suelo, ya que, si el terreno del talud es friccionante, se puede tender su pendiente y mejorar su permanencia. En suelos puramente cohesivos, como algunas arcillas, la estabilidad del talud depende de la altura de dicho talud, y al cambiar la inclinación se mejora un poco y en otras veces, no hay cambio significativo. En suelos con cohesión y fricción, cuando se tiende el talud, se aumenta la estabilidad en general (Juárez & Rico, 1987).

2) Bermas laterales o frontales. Son masas de suelo generalmente del mismo del talud, que se colocan en el lado exterior de dicho talud con el fin de aumentar la estabilidad (Juárez & Rico, 1987).

Una berma es capaz de aumentar la estabilidad de los taludes debido a que su propio peso, en la parte que queda hacia fuera de la vertical que pasa por el centro del círculo de falla, disminuye el momento motor. Asimismo, se aumenta el momento resistente al incrementar la longitud del arco de falla por efecto de la propia berma. Además, se redistribuyen los esfuerzos cortantes que se producen en el terreno de cimentación. La presencia de la berma hace que la distribución de esfuerzos sea más favorable y que un volumen de terreno de cimentación ayude a resistir estos esfuerzos (Juárez & Rico, 1987).

3) Muros de gaviones. Los gaviones son cajones de malla de alambre galvanizado que se rellenan de cantos de roca. Se emplean tres tipos de mallas diferentes, hexagonales o de triple torsión, electrosoldada y elaborada simple. Las canastas de gavión se colocan unas sobre otras tratando de traslapar lo mejor posible las unidades para darle cierta rigidez que requiere el muro (Suarez Díaz, 1998).

La ventaja de trabajar con este tipo de muro es por su facilidad de construir y mantener y utilizar los cantos y piedras disponibles del sitio. Asimismo, es una estructura flexible y puede tolerar asentamientos diferenciales mayores que otro tipo de muros y es fácil de demoler o reparar. Su principal problema es que las mallas pueden presentar corrosión en suelos ácidos (de pH menor a 6) (Suarez Díaz, 1998).

C. PERMEABILIDAD E INFILTRACIÓN

Uno de los factores que afectan la estabilidad de taludes es la lluvia, corriente de agua o hielos, lagos y mares; los cuales pueden producir modificaciones en la humedad y presión de poros afectando la resistencia del suelo, además, de inundaciones, al producir saturación repentina, incremento en las presiones de poro y erosión. Este tipo de agua se clasifica como agua de infiltración (Das, 2001).

La permeabilidad es una propiedad del suelo que permite conocer la capacidad del agua de pasar a través de los poros del suelo. Depende de varios factores tales como:

- Viscosidad del suelo
- Distribución del tamaño de los poros
- Distribución granulométrica
- Relación de vacíos
- Grado de saturación del suelo (Das, 2001).

1. Clasificación del agua presente en suelos. En el suelo existe agua retenida para los ecosistemas terrestres. Esta se puede dividir en diferentes clases siendo:

- Agua de infiltración: agua procedente de las precipitaciones que comienza a ser absorbida y moverse hacia el interior del suelo. Conforme siga lloviendo o regando el suelo de agua, esta va ocupando todos los poros y se va moviendo hacia abajo por el perfil del suelo (Ibáñez, 2006).
- Agua de gravitación: La que se mueve por los poros a mayor tamaño (macroporos de más de 10 micras de diámetro) es arrastrada por la fuerza de la gravedad. En el caso, de que llueve mucho o los riegos son excesivos, atraviesa el perfil del suelo hasta llegar a las capas freáticas profundas. En el caso de tener obstáculos, como una capa impermeable en los horizontes

inferiores del suelo y si la pendiente es menor o nula, se forma una capa de agua suspendida temporal (Ibáñez, 2006). Existe dos tipos de flujo:

- Flujo lento: tarda varios días en descender a través de los macroporos de menor tamaño (entre 10-50 micras)
 - Flujo rápido: drena durante las primeras horas a través de las grietas y poros más grandes (mayores a 50 micras) (Ibáñez, 2006).
- Agua retenida: cuando ya ha drenada el agua de gravitación, el suelo presenta humedad o capacidad de retención de agua. Esta se queda en los poros más pequeños y se encuentra retenida por las fuerzas de adsorción que aparecen entre las partículas y las delgadas capas de agua que se encuentra en estos microporos (Ibáñez, 2006). Se puede dividir en dos:
 - Agua capilar: el agua retenida por el suelo que es absorbida por las raíces de las plantas.
 - Agua ligada: esta forma una capa fina alrededor de las partículas del suelo y está unidas a ellas que no puede ser aprovechada por las plantas (Ibáñez, 2006).

2. Ley de Darcy. En 1856, Henri Philibert Darcy presentó una ecuación empírica para la velocidad de descarga del agua a través de suelos saturados; se basa en las observaciones de Darcy, relativas al flujo de agua a través de arenas limpias y se expresa por (Das, 2001):

$$v = k * i \quad (53)$$

Donde:

- v= velocidad de descarga
- k= coeficiente de permeabilidad (cm/seg)
- i= gradiente hidráulico (Das, 2001)

Mediante la Ley de Darcy, se puede conocer el flujo de agua a través de medios porosos del suelo. Utilizando la ecuación de continuidad $Q=v*A$, la cual se puede expresar nuevamente al sustituir la ecuación (53) (Das, 2001):

$$Q = k * i * A \quad (54)$$

Donde:

- k= coeficiente de permeabilidad (cm/seg)
- i= gradiente hidráulico
- A= sección transversal del filtro (cm²) (Das, 2001)

3. Coeficiente de permeabilidad. El coeficiente de permeabilidad se conoce como la constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso (Bowles, 1980), es decir, que es un parámetro que permite conocer la resistencia que ofrece el suelo al flujo de un fluido. Puede ser influenciado por la relación de vacíos, ya que el suelo al ser comprimido causa que el volumen ocupado por sus elementos sea variable. Por otro lado, si el volumen de vacíos disminuye, la permeabilidad también. Asimismo, la temperatura del suelo, estructura, estratificación y tamaño de la partícula son factores que afectan esta propiedad (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006). En el Cuadro 12, se observan algunos valores típicos del coeficiente de permeabilidad de distintos suelos:

Cuadro 12. Valores del coeficiente de permeabilidad de distintos suelos

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje	Bueno				Pobre				Prácticamente impermeable			
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada				Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			
				Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. ^d								
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.											
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.											
Determinación indirecta de k		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.				Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.			
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.								Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia			

(Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)

4. Determinación del coeficiente de permeabilidad.

a. Ensayos de laboratorio. Para determinar el coeficiente de permeabilidad existen diferentes ensayos de laboratorio entre ellos:

- Permeámetro de carga constante

Consiste en permitir el flujo de agua a través de una muestra, donde los niveles de agua a la entrada y salida del permeámetro son constantes. Funciona bajo la diferencia entre niveles de agua, perdiendo así carga. El agua a la salida es recogida en una probeta graduada y la cantidad de descarga se denomina Q (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006).

- Permeámetro de carga variable

La cantidad que agua que fluye a través del suelo se mide de forma indirecta por medio de la caída del nivel de agua en un tubo recto colocado sobre la muestra y el tiempo transcurrido (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006).

- Aparato Triaxial

Permite medir la permeabilidad de suelos no saturados en laboratorio. Con él, se puede determinar y comparar el esfuerzo cortante más probable de falla en la resistencia cortante del suelo. Esto se logra, mediante varios ciclos de secado y mojado de la muestra, la cual se coloca en un plato de saturación cerámico. Este ciclo se realiza hasta lograr un cambio de volumen de agua y que la presión de poro haya disminuido (Goh, Rahardjo, & Leong, 2015).

b. Ensayos de campo. Por otro lado, se encuentran los ensayos in situ, los cuales son:

- Ensayos de carga variable.

Se utilizan cuando la permeabilidad del suelo es baja, para así determinar el nivel de agua, tal es caso en limos o arcillas. Existen dos clases:

- Carga variable decreciente

- La perforación se llena de agua, la cual se filtrará hacia el suelo. Las tasas de cambio del nivel superficial de agua se observan al medir el cambio de profundidad del nivel de agua debajo de la perforación con intervalos de 5 minutos hasta que la diferencia entre las dos lecturas sea despreciable (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006).

- Carga variable creciente

- Consiste en dejar fluir el agua dentro del pozo perforado, midiendo la tasa de cambio del nivel del agua a medida que asciende, hasta que este valor sea muy pequeño. Los intervalos de tiempo son de cinco minutos (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006).

- Ensayo de carga constante

Este método consiste en que el agua que se agrega a la perforación realizada sea a proporción suficiente para mantener un nivel de agua constante cercano o al borde del agujero por un periodo de diez minutos. El agua que se añade debe de medirse utilizando un intervalo de cinco minutos, hasta que la cantidad de agua ingresada sea constante (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006).

- Slug Test

Este método consiste en medir el nivel de agua, utilizando un cilindro plástico, el cual se sumerge bajo el nivel freático hasta lograr el equilibrio. Se retira, tomando el tiempo en que se recupera el nivel de agua y se calcula dicha tasa de recuperación (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006).

Cuadro 13. Ensayos de campo para determinar el coeficiente de permeabilidad

Método	Suelo de aplicación	Norma por seguir
Ensayo de carga variable	Perforaciones y pozos	-
Ensayo de carga constante	Perforaciones y pozos	-
Slug Test	Suelos profundos	ASTM D4044

(Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)

D. BOTÁNICA DEL VETIVER

1. Descripción. Vetiveria Zizanioides es una gramínea herbácea perenne con una vida útil de cien años. Su origen proviene de la India donde se conoce con el nombre khus hindu o khus khus. Existen aproximadamente diez o doce especies que se encuentran en las regiones tropicales del mundo (Perea & Duran, 2012). Para el sistema Vetiver en conservación de suelos, se utilizan tres: Vetiveria Zizanioides, V. Nigritana y V. Nemoralis (Agrodesierto, 2015).

Al mencionar Vetiver, se conoce como una planta gramínea sin tallo aparente. Forma matas o macollas muy densas que van engordando y creciendo sin ser invasivas como otras hierbas. No tiene, ni desarrolla, rizomas o estolones. Su crecimiento es rápido, forma en poco tiempo matas muy densas. Los cultivares más conocidos y cultivados alcanzan los dos metros de alto en menos de seis meses (Branken & Truong, 2000).

Imagen 1. Planta Vetiver



(Varghese, 2014)

Se caracteriza por tener raíces ramificadas y esponjosas que alcanzan hasta tres metros de profundidad, y se pueden formar nuevas raíces a partir de nodos cuando están bajo tierra. Su tallo es erguido con una altura de 0.5-1.5 metros, son rígidos y enhiestos que pueden mantenerse firmes hasta en un flujo de agua relativamente profundo. Las hojas son rígidas, largas y angostas. Además, tienen 75 centímetros de largo y 8 milímetros de ancho (Perea & Duran, 2012).

Imagen 2. Raíces de planta Vetiver



(Varghese, 2014)

El Vetiver posee raíces cuya fuerza innata permite penetrar a través de cualquier tipo de suelo o capas de rocas, incluso pueden perforar capas asfálticas. Su resistencia a la tracción es excelente, estudios realizados muestran que puede ser de 40 a 120 MPa (Perea & Duran, 2012).

Asimismo, el Vetiver es una planta que soporta distintas condiciones climáticas. Toleran prolongadas sequías, incendios, inundaciones, inmersiones y temperaturas extremas de -15°C a 55°C (Perea & Duran, 2012). Además, puede resistir un amplio rango de pH, creciendo con acidez en el suelo de 3.3 y alcalinidad de 11 (Branken & Truong, 2000). También, poseen un alto nivel de tolerancia a herbicidas y plaguicidas.

Para llevar a cabo la multiplicación del Vetiver, se realiza un proceso de división de pata y micropogación. Esta consiste que en un vivero de planta se puede producir varios retoños por hectárea por año. De cada tallo se puede producir 25 a 50 nuevos en unos seis meses, dependiendo siempre de las condiciones climáticas, riegos o precipitaciones y calidad de suelo. Los retoños se podan, dejando 10 cm de tallo y unas raíces de máximo de 5 cm. Estas raíces se utilizan como anclaje en la nueva plantación, esto se debe a que las raíces nuevas brotan directamente de la base del pseudotallo. Es importante mencionar que los retoños se deben almacenar en un lugar que impidan que se sequen y enviarse al lugar de plantación en bolsas o recipientes de plásticos cerrados herméticamente (Agrodesierto, 2015).

Imagen 3. Retoño de planta Vetiver



(Elaboración propia, 2017)

La planta Vetiver puede tener varias utilidades las principales son:

- Barrera contra la erosión de suelos
- Cortavientos
- Barrera anti-fuego
- Barrera para control de avalanchas de agua
- Barrera visual y acústica
- Barrera anti contaminación atmosférica
- Delimitación de áreas diversas
- Creación de presas de tierra de bajo coste
- Prevención de desastres naturales
- Mantenimiento de taludes de tierra
- Control de sedimentos
- En barrancos, pendientes y taludes, para conservación del agua y sustrato
- Formación de bancales vivos y naturales
- Prevención de corrimientos de tierras y desastres naturales
- Control contaminación del agua, eficiente en la absorción de N, P, Hg, Cd y Pb (Hengchaovanich & Nilaweera, 1996).

2. Factores que afectan la resistencia del Vetiver. Existen varios factores externos que pueden afectar el crecimiento y desarrollo de la planta Vetiver, siendo los siguientes:

- El Vetiver es muy tolerante a varias situaciones de clima y suelo. Sin embargo, no tolera la sombra puesto que reduce su crecimiento y en casos extremos, puede llegar a eliminar el Vetiver en el largo plazo. Por lo que se recomienda que crezca en espacio abiertos y libres de malezas, siendo necesario el control de malezas en la etapa de establecimiento.
- Planeaciones cercanas a árboles, puesto que estos son muy densos y las raíces grandes, y el Vetiver no puede competir con ellos.
- Plagas y enfermedades.
- Termitas, o animales que se ven atraídos por partes secas de las plantas y sus nidos, y forman montículos que sofocan a la planta (Perea & Duran, 2012).

3. Tensión y fuerza de corte de raíces de Vetiver. La fuerza de tensión de las raíces de Vetiver se incrementa con una reducción en el diámetro de las raíces, es decir, que mientras más finas sean estas proporcionan mayor resistencia que las raíces gruesas. La fuerza de tensión de las raíces del Vetiver para un rango de diámetro de 0.2-2.2 mm, varía entre 40-180 MPa. Asimismo, el esfuerzo de tensión promedio de diseño es de 75 MPA para diámetros de 0.7-0.8 mm que se puede comparar con un sexto del acero blando (Hengchaovanich, 1998).

En cuanto a la prueba de corte, se ha encontrado que el crecimiento de las raíces de dos años puede aumentar la resistencia al corte de suelo un 39%. Igualmente, cabe mencionar que mientras el sistema de raíces sea denso y masivo del Vetiver ofrece mayor incremento de corte por unidad de concentración de fibra a comparación de las raíces de los árboles. En ocasiones, las raíces de las plantas pueden atravesar el plano de una superficie potencial de corte en un perfil de suelo, distorsión de la zona de corte desarrollándose en tensión en las raíces (Hengchaovanich, 1998).

Cuadro 14. Esfuerzo de tensión de la raíz de diferentes plantas

Nombre botánico	Nombre común	Fuerza de tensión (MPa)
<i>Salix spp</i>	Sauce	9-36
<i>Populus spp</i>	Poplars	5-38
<i>Alnus spp</i>	Alisos	4-74
<i>Pseudotsuga spp</i>	Abeto de Douglas	19-61
<i>Acer sacharinum</i>	Arce plateado o Arce del azúcar	15-30
<i>Tsuga heterophylla</i>	Hemlock occidental o Tsuga Hemlock	27
<i>Vaccinum spp</i>	Arándano	16
	Cebada	15-31
<i>Hordeum Vulgare</i>	Pastos, Hierbas	2-20
	Musgos	2-7 kPa
<i>Chrysopogon zizaniodes</i>	Pasto Vetiver	40-120 (promedio 75)

(Truong & Tan, 2009)

4. Sistema Vetiver

a. Descripción. El *Sistema Vetiver* es un método con muchos beneficios en especial en ingeniería. Su principal función es estabilizar taludes y evitar que el agua de escorrentía se lleve partículas de tierra. Esto se debe a que las plantas crecen en un enredo espeso y sus raíces se sumergen 4 metros al suelo, esto ayuda a formar una pared que evita que las laderas propensas a la erosión se desprendan. Este sistema ya ha sido utilizado en varias partes del mundo como es el caso de Costa Rica, Venezuela, Colombia, etc. (Hengchaovanich, 1998).

Imagen 4. Sistema Vetiver utilizado en talud



(Elaboración propia, 2017)

El método tarda seis meses a tres años en alcanzar su crecimiento ideal, esto dependiendo de los factores externos del ambiente en que se rodean. La época de siembra puede ser variable, aunque se recomienda realizarlo en época de lluvia para mantener la humedad del suelo. Su plantación consiste en realizar un agujero con la ayuda de una barra de hierro que se clava y se mueve ligeramente de un lado a otro. También, se puede realizar con una máquina subsoladora o un arado. Se recomienda que la planta se siembre cuando ya esté enraizada en vivero, para que se adapte más rápido. Para que su plantación sea más eficiente, se siembran a cada 10 a 15 cm de distancia y la cantidad de plantas depende de la pendiente del terreno (Hengchaovanich, 1998).

La planta Vetiver forman barreras vivas extremadamente versátiles y resistentes. Esto se debe a la raíz que es casi imposible de cortar con las manos, puesto que debajo de la barrera se forma otra subterránea, formada por una densa red de raíces que llegan hasta los 5 metros de profundidad blindando así el terreno. Detrás de dichas barreras, se forma una capa de sedimentos que forma un suelo de alta fertilidad, calidad y humedad del sustrato en la zona (Perea & Duran, 2012).

En cuanto al mantenimiento del sistema, se debe mantener un riego constante, en especial el primer mes, con el objeto de garantizar el enraizamiento de la planta. Se puede utilizar cualquier tipo de abono o fertilizante para incrementar el desarrollo y velocidad de crecimiento en barreras recién establecidas, sin embargo, no es necesario abonar. Asimismo, se recomienda que no crezcan plantas cercanas para evitar que estas compitan con el Vetiver por los nutrientes y humedad (Perea & Duran, 2012).

b. Ventajas y desventajas. El Sistema Vetiver como cualquier método tiene sus ventajas y desventajas, las cuales se presenta a continuación:

Ventajas

- ✓ Es perenne y requiere un mínimo de mantenimiento.
- ✓ No compite con las plantas para cuya protección se la utiliza. Los cercos de vetiver han demostrado que no causan efectos negativos a los cultivos alimentarios plantados en su vecindad, sino que hasta puede aumentarlos.
- ✓ Es de bajo costo y fácil de plantar, así como de eliminar, requiriendo de poca mano de obra.
- ✓ Crece en cualquier tipo de suelo incluyendo arenas, esquistos, suelos de grava e incluso suelos tóxicos debido a su contenido de aluminio.
- ✓ Crece en una amplia variedad de climas, llegando a sobrevivir en la nieve y escarcha.
- ✓ Los cercos de vetiver bien desarrollados reducen el escurrimiento y aumentan la disponibilidad de agua subterránea. El flujo de corrientes mejora durante la estación seca gracias al sistema de conservación de la humedad in situ mediante cercos.

- ✓ El *Sistema Vetiver* es una manera natural, ambientalmente amigable de controlar erosión y estabilizar los terrenos. Tiene una mejor apariencia a comparación de otros métodos utilizados como estructuras de concreto y de roca (Banco Mundial, 1995).

Desventajas

- × Intolerancia a condiciones de la sombra, la cual afecta el crecimiento de la planta, incluso en condiciones extremas puede llegar a eliminar el Vetiver.
- × El *Sistema Vetiver* es efectivo solo cuando forman una barrera densa. Los huecos entre las plantas deben ser replantados a tiempo.
- × Es difícil plantar y regar vegetación en pendientes muy inclinadas y altas.
- × El Vetiver requiere que se cuide del ganado durante sus fases de establecimiento ya que pueden consumirlo (Hengchaovanich, 1998).

c. Combinación con otros sistemas de estabilización. El Vetiver puede trabajar con otros productos los cuales sirven para el control de la erosión en los taludes, los principales son los siguientes:

1) Geomanta. La geomanta son utilizados para cubrir un terreno expuesto a erosión. Su objetivo es proteger dicho terreno a los efectos de la escorrentía superficial evitando así la pérdida de suelo y desconformación de taludes y laderas (Castro, 2013).

Para instalarlo, no requiere de mano de obra calificada ni equipos especializados. Para asegurar su éxito de colocación, se debe preparar el suelo, donde se remueva todas las rocas, raíces, vegetación o cualquier obstáculo que pueda evitar el contacto del manto con la superficie del suelo. Posteriormente, se compacta el área y en caso necesario, excavar una zanja de 30x15 cm en la corona del talud, para anclar el talud. Luego, posicionar el manto dentro de la zanja, anclarlo con grapas previamente hechas de hierro de construcción, colocar el suelo de relleno y compactarlo (Castro, 2013).

Se caracterizan por ser mantos fabricados para uso en la superficie del suelo que pueden ser temporales (biodegradables) o permanentes (fibras sintéticas) (Castro, 2013). Sus características se presentan a continuación:

- Biodegradables

Formado por fibras naturales generalmente encerrado entre dos mallas sintéticas de abertura amplia. Se caracteriza por resistir los agentes erosivos mientras se biodegrada, integrándose finalmente al suelo. Asimismo, permite el paso de la luz solar, facilitando la germinación o el desarrollo de la planta. Además, permite retener y liberar humedad, generando un microclima entre el suelo y geomanta (Castro, 2013).

Imagen 5. Geomanta biodegradable y Sistema Vetiver instalado



(Castro, 2013)

- Sintéticos

Es una malla sintética de apariencia natural, color verde, que protege la superficie del suelo de la erosión producida por eventos naturales como el caso de la lluvia y vientos, ofreciendo a su vez sombrero parcial y almacenamiento de calor para favorecer el crecimiento de la vegetación. Se ha diseñado para mantener el suelo orgánico en su lugar, hasta que la vegetación se establezca (Castro, 2013).

Imagen 6. Geomanta sintético instalado



(Castro, 2013)

Con base a lo anterior, la geomanta en general permite el alojamiento de tierra vegetal con alguna mezcla de semillas de pastos, quedando atrapada entre dichas capas. Una vez que se gesta la vegetación las raíces de pasto quedan atoradas entre las capas de la geo manta de esta forma es que la vegetación logra realizar el trabajo de control de erosión en el talud (López Jimeno, Gómez Prieto, García Bermúdez, & Llopis Trillo, 2002).

El *Sistema Vetiver* se caracteriza por proteger la superficie de las pendientes, así como su estabilidad. Al utilizar, geo mantos brinda una mayor protección reduciendo las posibilidades de fracaso del *Sistema Vetiver*, el cual puede ser causado ya sea por escorrentía e inestabilidad del talud. Para asegurar esto, se debe de colocar de manera correcta los geomantas considerando esté bien compactada el área, se remueva todas

las rocas, raíces, vegetación o cualquier obstáculo que pueda evitar el contacto del manto con la superficie del suelo (Castro, 2013).

Las ventajas del uso de la geomanta son:

- Bajo costo.
- Producto enrollable de fácil y rápida instalación.
- Protección inmediata después de su instalación en ausencia de vegetación.
- Alta resistencia ante las fuerzas hidrodinámicas de talud y canales.
- Evita la saltación que ocasionan las gotas de lluvia cuando impactan el suelo.
- Elimina abrasión de los agentes erosivos sobre el suelo.
- Controla la escorrentía reduciendo la velocidad del flujo del agua.
- Impide el desprendimiento de la masa del suelo superficial (Castro, 2013).

2) Geotextil. El geotextil es un material textil permeable, el cual tiene una estructura plana y se utiliza para el control de erosión de suelo, laderas, división de caminos, etc. Se caracterizan por ser capas filtrantes en los cuales se encuentran superadas las desventajas de los filtros de arena y de los agregados pétreos, ya que estos son fabricados con ciertas propiedades hidráulicas específicas y de retención de tierra, esto depende del tipo de suelo que se quiera proteger (López Jimeno, Gómez Prieto, García Bermúdez, & Llopis Trillo, 2002).

La mayor parte de los geotextiles disponibles en el mercado se fabrican ya sea con poliéster o polipropileno. Este último material se caracteriza por ser más ligero que el agua (gravedad específica de 0.9), resistente y muy durable. Los filamentos de polipropileno y las fibras del mismo material se usan en la manufactura de geotextiles no tejido y tejidos (López Jimeno, Gómez Prieto, García Bermúdez, & Llopis Trillo, 2002).

Por otro lado, los filamentos de poliéster poseen una alta resistencia. Es más pesado que el agua y tiene excelentes propiedades de deslizamiento, además es compatible con los materiales naturales más comunes (López Jimeno, Gómez Prieto, García Bermúdez, & Llopis Trillo, 2002).

Para instalarlo, se debe preparar el suelo, donde se remueva todo obstáculo que pueda causar desnivel y cause que el material no tenga contacto con el suelo. Se recomienda, realizar una zanja para anclar la malla, a una distancia no menor a 1 metro del borde del talud, de 20 cm de ancho por 20 cm de profundidad, pero esto puede variar según el diseño del talud de estudio. Se fija en el interior de la zanja con estacas o piquetas de sujeción. Luego, se rellena la zanja compactándola para aumentar resistencia. Una vez colocada y asegurada el geotextil, se desenrolla directamente sobre la superficie. Se recomienda que los rollos se solapen

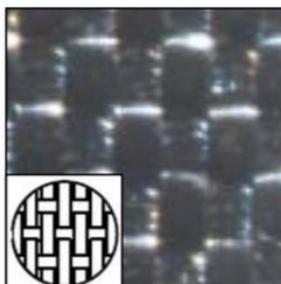
entre 10 y 20 cm, y se debe colocar las piquetas a una distancia de 1 metro. Por último, se descarga y compacta el material de agregado (TEX DELTA, 2012).

Existen dos tipos de geotextil siendo:

- Tejidos

Se utilizan varios tipos de fibras para variar los patrones de tejido en las telas geotextiles. Una fibra de multifilamentos finos, continuos que se unen al torcer o mezclar las hebras. Un multifilamento es único. Una fibra de película cortada es una hebra plana, tipo cinta que se obtiene al cortar una película polimérica extruida. Cintas fibriladas se obtienen al separar y torcer las películas extruidas (Soto, 2009).

Imagen 7. Estructura del geotextil tejido

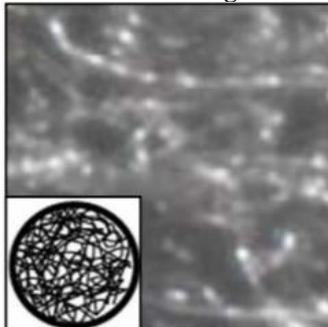


(Soto, 2009)

- No tejidos

Se fabrican a partir de varios procesos. Los geotextiles se producen, frecuentemente, mediante la combinación de dos tipos de procesos diferentes. El primero es la formación de fibra donde se obtiene, o un filamento continuo o una fibra principal (corta), distribuidos al azar en capas sobre una banda en movimiento para forma una especie de “panal”. Las hebras se unen mediante el agujado, calandrado térmico u otras procesos o combinaciones para entrelazar las fibras (Soto, 2009).

Imagen 8. Estructura del geotextil no tejido



(Soto, 2009)

Las ventajas de utilizar el geotextil son:

- Es una alternativa económica comparada con métodos constructivos.
- Son versátiles, flexibles, resistentes y se adaptan a las irregularidades de las superficies y condiciones donde se colocan.
- Su manejo y aplicación es fácil y rápido, no requiriendo de equipo especializado.
- Tiene una variedad de aplicaciones en la construcción y aumenta la vida útil de las instalaciones como estabilización de taludes o subrasante (López Jimeno, Gómez Prieto, García Bermúdez, & Llopis Trillo, 2002).

La combinación de Vetiver con geotextil proporciona una cubierta protectora estable sobre la superficie del suelo, en especial con pendientes extremas. Además, permite un mayor control de los procesos erosivos y estabilización de taludes y laderas. Asimismo, evita el arrastre de las plantas de Vetiver y fertilizantes que se puedan aplicar (Corzo, 2013).

III. MARCO PRÁCTICO

Para analizar la evolución de la estabilidad de un talud en el que se implementó el *Sistema Vetiver*, en el año 2012, y el efecto que este sistema tuvo durante su desarrollo en la permeabilidad del suelo, se visitó el área de estudio. Este se encuentra ubicado dentro de una finca llamada “La Concha” en el km 11.5 Carretera a Boca del Monte. En la visita, se observó que se encontraba cerca de un río, el cual en época de lluvia sube el caudal llegando a afectar el terreno. Sin embargo, el talud ha podido amortiguar dichos efectos. Es importante mencionar que este se encuentra dividido en tres tramos siendo: únicamente el *Sistema Vetiver*, combinación con geotextil y con geomanta. Para alcanzar el objetivo, se realizaron varias pruebas in situ y laboratorio obteniendo así los resultados necesarios.

A. ENSAYOS DE SUELOS

1. Justificación de los ensayos. Para conocer las características actuales del suelo y así evaluar si ellas han tenido efecto en el crecimiento de la planta Vetiver, se realizó varios ensayos. Con los resultados obtenidos por medio de ensayos de laboratorio, se genera una caracterización del terreno. Para dichas pruebas, es necesario realizar una extracción de muestras inalteradas de suelo que serán evaluadas.

2. Metodología de ensayos. Al tener preparadas las muestras, se llevan al laboratorio para llevar a cabo los ensayos correspondientes, resultados que se muestra en Anexo A. Las pruebas realizadas fueron:

- **Granulometría**
Se determina la proporción en que participan los granos del suelo, de acuerdo con el tamaño de ellos mediante un análisis con cribado.
- **Límites de Atterberg**
Se conoce la consistencia de suelo con contenidos de agua variable. Para ello, se evaluará el contenido límite líquido utilizando el instrumento llamado cuchara de Casa Grande. También, la prueba del límite plástico, el cual se amasa una muestra con la palma de la mano hasta disolverlo.
- **Prueba de Proctor estándar**
Se determina el peso volumétrico máximo y la humedad óptima del suelo.

- Ensayo Triaxial

Se conoce los parámetros del suelo y la relación esfuerzo-deformación a través de la determinación de esfuerzo cortante. Consiste en colocar una muestra cilíndrica de suelo dentro de una membrana de caucho, el cual se coloca en una cámara especial y se le aplica una fuerza o presión.

B. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DE SUELOS

1. Justificación de los ensayos. Uno de los factores que afectan la estabilidad de un talud es la permeabilidad de los suelos. Este parámetro puede afectar la resistencia e incrementa las presiones de poro y erosión. Mediante la permeabilidad, se puede conocer como el agua atraviesa los poros del suelo, y como este soporta el efecto de ella.

Para determinar el efecto de la permeabilidad del suelo se realizaron diferentes ensayos. Entre ellos, se encuentra el ensayo con un permeámetro de carga constante y el de Slug Test. Ambos utilizados para obtener los parámetros y con los resultados obtenidos, se evaluará el efecto que tienen en la estabilidad y se comparará que método se ajusta mejor para evaluar el Sistema Vetiver.

2. Metodología de ensayos. Para realizar cada ensayo, se realizó un muestreo a cada tramo del talud: solo Vetiver, Vetiver con geomanta y Vetiver con geotextil. Asimismo, el lugar de muestra se centra en dos puntos, siendo la corona y pie de este (Ver Imagen 9). Cabe destacar que, para obtener un mejor factor de permeabilidad, se extraerá muestras antes y después de la época de lluvia, siendo un periodo comprendido por los meses de mayo a julio. Finalmente, cabe destacar que la geometría se asumirá con la misma topografía registrada en el año 2012.

Imagen 9. Puntos donde se tomarán muestras del suelo de talud



(Elaboración propia, 2017)

a. Ensayo in situ: slug test. Entre los ensayos realizados, se encuentra el slug test. Se caracteriza por ser un método que mide rápidamente el nivel de agua. Se utilizó un tubo de PVC, el cual se sumerge en agujeros hechos en los puntos mencionados donde se toman la muestra del suelo. Luego, se retira causando que el nivel freático decaiga, se tomó el tiempo en que se recupera el nivel de agua en el pozo y se calcula la tasa de recuperación. Con este valor, se calcula el coeficiente de permeabilidad utilizando la ley de Darcy. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$k = \frac{V \cdot i}{t \cdot A} \quad (56)$$

Donde:

k= coeficiente de permeabilidad (cm/seg)

V= volumen de recipiente que recibe el agua (cm³)

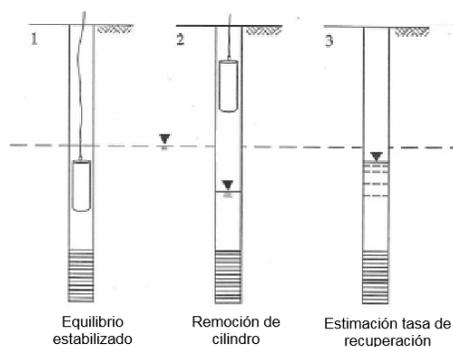
t= tiempo en que se acumula agua (seg)

i= gradiente hidráulico

A= sección transversal del filtro (cm²)

En la Figura 23, se puede observar cómo se realiza el ensayo de slug test.

Figura 23. Slug Test



(Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)

b. Ensayo en laboratorio: permeámetro de carga constante. Por otro lado, se encuentra el ensayo de permeámetro de carga constante para suelos no saturados. Este se realizó en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Ingeniería Civil. Se montó el equipo a utilizar, que se observa en la Imagen 10. Es importante mencionar que antes de armar, se pesó el cilindro graduado donde se colocará la muestra.

Imagen 10. Ensayo de permeabilidad en laboratorio

(Elaboración propia, 2017)

Posteriormente, se coloca la muestra dentro del cilindro graduado y se compacta el suelo en tres capas iguales. Luego, se coloca el papel filtrante entre el disco y la muestra, esto con el fin de evitar que partículas queden atrapadas en el interior de los poros del disco. Después, la membrana de caucho se coloca sobre la muestra estando en el pedestal y la tapa superior para evitar fugas. Se toma el peso de la muestra y luego, se orienta las tuberías de entradas y salida convenientemente para la recolección de agua y saturación iniciales, permitiendo que fluya el agua por un tiempo.

En el momento que se conecte la entrada de agua, se utilizara un recipiente de 1000 ml para recibir el agua a la salida del permeámetro. Se abre la válvula de entrada y salida, y se registra el tiempo para acumular entre 800 a 850 ml de agua manteniendo una carga constante. Al finalizar, se registró el tiempo y la temperatura del agua. Se repitió una vez más las mediciones con la muestra.

A partir de los datos, se calcula el coeficiente de permeabilidad utilizando la ley de Darcy. La ecuación utilizada es la (56).

C. ENSAYOS A RAÍCES DEL VETIVER

1. Justificación de los ensayos. La planta Vetiver se caracteriza por tener raíces ramificadas que pueden alcanzar una gran longitud de hasta nueve metros. Estas son un elemento importante en la estabilidad del talud ya que sus raíces permiten formar una pared que evita que las laderas propensas a la erosión se desprendan. Para determinar el efecto que tienen estas en la estabilidad de talud, se realizaron ensayos de tensión y corte a las raíces para comprobar el comportamiento y tendencia de los valores de esfuerzos a corte y tensión con respecto al diámetro de la raíz.

Para realizar una comparación correcta, se utilizaron los mismos métodos de ensayo realizados en el año 2012. Con base en ellos, se analiza el comportamiento de las raíces.

2. Metodología de ensayos. Se realizó un muestreo al azar, de cada tramo estudiado para realizar los ensayos de tensión y corte. Al momento de sacar las muestras, fue necesario excavar alrededor de cada planta, para que las raíces no fueran afectadas. Asimismo, se tuvo que tener cuidado con la geo manto y geotextil ya que dificultaba la extracción de ellas.

Se midieron los largos y diámetros de todas las raíces de cada planta para comparar el crecimiento de cada tramo que conforman el talud. Asimismo, se realizaron ensayos de tensión y corte a las raíces. Se tomaron 10 raíces de cada planta, teniendo un total de 30 raíces para los ensayos a tensión y 10 para corte en cada uno de los tramos. Las raíces que se seleccionaron debían estar frescas, ya que así no perdían su resistencia y propiedades lo cual distorsionaría los ensayos. Cabe destacar que, en el proceso de selección, no importó el largo ni el diámetro.

Al seleccionar las muestras, se realizaron las mediciones de diámetro y largo de cada una de las raíces. Para ello, se utilizó, un bernier, el cual nos proporcionará valores exactos para los diámetros medidos que son valores menores a 2 mm. En cuanto al largo de los diámetros, se utilizó una regla convencional de 30 cm (ver Imagen 11).

Imagen 11. Instrumentos utilizados en la medición



(Elaboración propia, 2017)

a. Ensayo a tensión. El esfuerzo de tensión hace referencia a la fuerza por unidad de área en el entorno de un punto material sobre la superficie de un cuerpo. Las cuerdas permiten transmitir dichas fuerzas de un cuerpo, las cuales producen una elongación. La tensión mecánica se expresa en unidades de fuerza por unidades de área (N/m^2).

El siguiente ensayo se realizó en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Ingeniería Civil, utilizando el mismo concepto a los ensayos de tensión que se utilizan para analizar las varillas de acero. Para llevar a cabo la prueba, se montó el equipo, el cual está conformado por estos instrumentos:

- Balanza
- Alambre
- Sujetador
- Arena
- Recipiente

El montaje del equipo consistió en colgar una balanza en un marco rígido, utilizando un alambre para así asegurarla y permitiera medir las fuerzas. Luego, con otro alambre se colocó el sujetador para sujetar a la raíz, evitando así que se soltará en el momento de aplicar fuerza. En el otro extremo, se sujetó la raíz al recipiente. Una vez que se estuviera listo el equipo, al recipiente se le iba agregando arena hasta el momento que la raíz se rompiera. Al mismo tiempo se va midiendo mediante la balanza la cantidad de libras que la raíz soportó antes de romperse. La incertidumbre de la balanza es ± 0.5 lb. En la parte de anexos se observa el montaje final del equipo para realizar el ensayo.

Al tener los datos necesarios, siendo el diámetro de cada raíz y la fuerza que soporta cada una. En base a lo siguiente, se calcula el esfuerzo a tensión soportada por la raíz, utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (57)$$

Donde:

σ = esfuerzo a tensión (MPa)

F= fuerza soportada por la raíz (N)

A= área de la raíz (mm^2)

b. Ensayo a corte. El esfuerzo a corte es aquel que actúa paralelamente a un plano, para distinguirlo de los esfuerzos de tensión y compresión los cuales actúan normalmente a un plano. Existe varios tipos de esfuerzos cortantes como cortante horizontal, vertical y de punzonamiento.

Al igual que el ensayo mencionado anteriormente, se usó el Laboratorio de Materiales del Departamento de Ingeniería Civil. Los elementos utilizados para poder llevar a cabo dicha prueba fueron los siguientes:

- Placas metálicas perforadas
- Alambre
- Marco rígido para sujetar el equipo
- Balanza

Generalmente, para este ensayo se corta una barra o un elemento de un material, como es el caso de las raíces. Para ellas, se colocarán entre las placas perforadas las raíces de forma paralela entre ellas y perpendicular al plano de falla, la raíz ensayada se sujeta manualmente hasta estar tensionada para luego aplicar la carga en la placa de en medio hasta llegar a la ruptura. Se le aplica una fuerza hacia abajo jalándola manualmente y para así conocer la cantidad de libras finales que resiste cada raíz. Es importante mencionar que la velocidad con la que se aplica la fuerza es un factor que se debe de tener en cuenta, ya que debe ser lento y no brusca para que esto no influya en la lectura de las mediciones. En la parte de anexos, se observa el montaje final del equipo.

Posteriormente, al obtener los diámetros y fuerzas aplicadas de la raíz, se puede calcular el esfuerzo cortante de la raíz. La expresión que se utiliza para ello es la siguiente:

$$\tau = \frac{V}{2A} \quad (58)$$

Donde:

τ = esfuerzo a corte (MPa)

V= fuerza cortante de cada raíz (N)

A= área de la raíz (mm²)

D. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD.

Para realizar el análisis de estabilidad se utilizaron diferentes métodos los cuales se compararon y así llegar a una conclusión. Asimismo, cabe destacar para poder llevar a cabo los cálculos, se necesitó del ensayo triaxial, donde se obtuvieron los datos necesarios como el círculo de Mohr (ver Anexo A).

1. Método Culmann. Con este análisis se considera que la superficie de falla es plana, donde el deslizamiento es mayor que la resistencia cortante del suelo (Das, 2001). Asimismo, se asume que los factores de seguridad global, con respecto al ángulo de fricción y cohesión son iguales. Al tener en cuenta estas consideraciones, mediante un software para análisis de estabilización de taludes, se resuelve, la ecuación (32), la cual se expresa como:

$$H = \frac{4 \frac{c}{F.S.S}}{\gamma} * \left(\frac{\sin(\beta) \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{\tan(\phi)}{\tan(\phi_d)}\right)\right)}{1 - \cos\left(\beta - \cos\left(\beta - \tan^{-1}\left(\frac{\tan(\phi)}{\tan(\phi_d)}\right)\right)\right)} \right)$$

El valor del factor de seguridad global (FS_s) se obtiene al despejar la ecuación anterior, dando origen así a la siguiente expresión:

$$FS_S := \left[\begin{array}{l} \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) + 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \\ \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) - 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \end{array} \right]$$

2. Método de procedimiento de masa del análisis de estabilidad o masa total. Con este método se puede realizar un análisis del talud considerando una superficie de falla circular. Al igual que el procedimiento anterior, se asume que los factores de seguridad global, con respecto al ángulo de fricción y cohesión son iguales. Se desconoce el valor de c y ϕ_d , por lo que se utiliza la siguiente ecuación y se itera estos valores en una gráfica presentada en el marco práctico:

$$c = m\gamma H \quad (59)$$

Donde:

m = número de estabilidad

γ = peso específico

H = altura del talud

En la gráfica mencionada, se relaciona los valores de c_d y ϕ_d , donde se busca el valor de c_d para cada valor asumido por el ϕ_d . Se ordenan los valores, y se utilizaran para encontrar el factor de seguridad. Por medio del principio de Coulomb se determina el valor de esfuerzo actuante y resistente. Al igual que el primer método, se utilizará un software para obtener los resultados.

3. Método de análisis por dovelas. Este procedimiento se utiliza para analizar una superficie de falla circular. Existen varios métodos, sin embargo, se utilizarán tres siendo:

a. Fellenius o método sueco. Con este método se considera únicamente deslizamientos circulares. Se encuentran los valores geométricos del talud por medio de una gráfica usando el perfil del talud y dibujando la superficie de falla, para así trazar las dovelas. Se dibujan varios centros de giro y superficies de falla con diferentes radios, hasta encontrar el factor de seguridad menor. Se obtiene ΔL_n , W_n y α_n por medio de una gráfica para cada una de las dovelas dibujadas. Se hace una tabla con los valores obtenidos y se resuelve la siguiente ecuación mediante un programa:

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c\Delta L_n + W_n \cos(\alpha_n) \tan(\phi))}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sen(\alpha_n)}$$

b. Método Bishop. De igual manera, se utilizará un programa para realizar el análisis del talud. La ecuación utilizada para encontrar el factor de seguridad local es la siguiente:

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (cb_n + W_n \tan(\phi) + \Delta T \tan(\phi)) \frac{1}{m_\alpha(n)}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sen(\alpha_n)}$$

Donde:

$$m_\alpha(n) = \cos(\alpha_n) + \frac{\tan(\phi) \sen(\alpha_n)}{FS_s}$$

c. Morgenstern y Price. Método basado en el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales, los cuales se crean dividiendo el suelo. En este análisis, la falla puede ser cualquier forma.

Al obtener los resultados de las fuerzas en los bloques, se puede calcular el factor de seguridad el cual se expresa en las expresiones mencionadas en el marco teórico. Se utiliza un programa de software para analizar la estabilidad del talud.

E. MODELO INTEGRADO DE RESISTENCIA DEL SUELO CON EL SISTEMA VETIVER

Para conocer el efecto de las raíces de la planta Vetiver en la masa de suelo, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\tau_t = \frac{(\tau_s * A_s) + (\tau_v * A_v)}{A_s + A_v} \quad (60)$$

Donde:

τ_t = Esfuerzo cortante del sistema

τ_s = Esfuerzo cortante del suelo

τ_v = Esfuerzo cortante de las raíces

A_s = Área del suelo

A_v = Área de las raíces

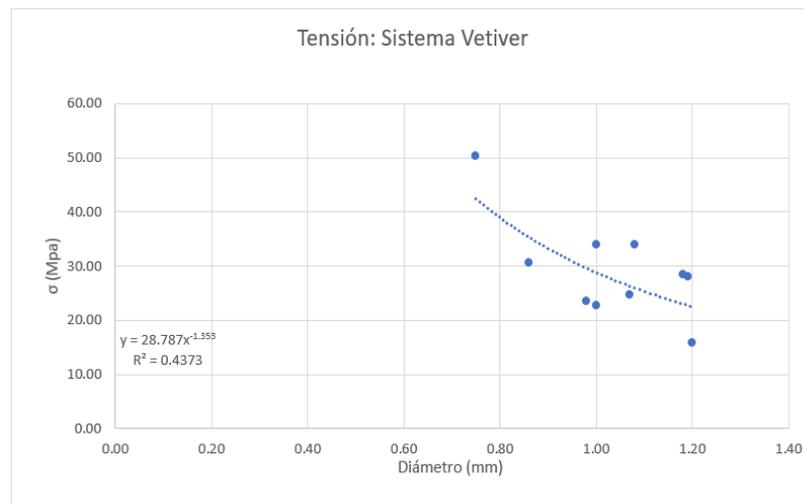
El esfuerzo cortante del suelo se obtendrá de las pruebas realizadas a las muestras de suelo, anteriormente mencionadas. En cuanto a la raíz, los datos se conocen a partir de las pruebas a corte ejecutadas. Asimismo, cabe destacar que se asumirá que alrededor de un 10% del área del suelo está ocupado por las raíces del Vetiver. De igual manera, se calculó el incremento de los esfuerzos cortantes del sistema en base a los resultados obtenidos en el año 2012 (ver Cuadro 89 Anexo B) y los datos de este año.

IV. RESULTADOS

A. ENSAYOS DE RAÍCES

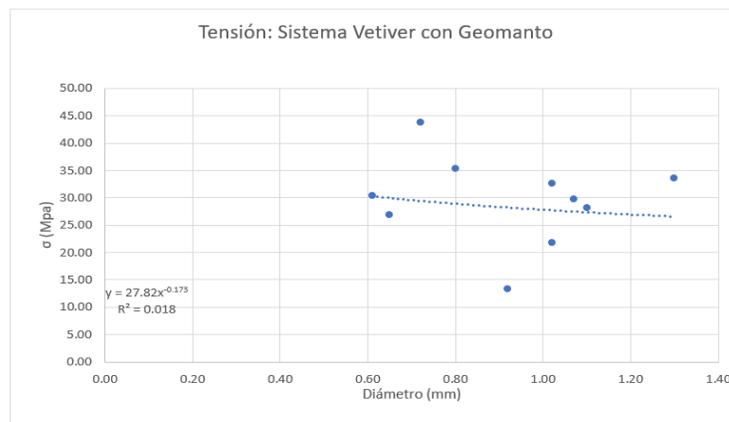
A continuación, se presenta las gráficas de los ensayos a tensión y corte de las raíces para cada uno de los tramos del talud siendo así: solo *Sistema Vetiver*, con geomanto y geotextil. En las primeras tres gráficas se observa el esfuerzo de tensión vs. diámetro. En las siguientes, se ve el esfuerzo de corte de la raíz de la planta vs su diámetro. Asimismo, en cada una de ellas se incluye la línea de tendencia, su ecuación y coeficiente de correlación.

Gráfica 2. Resultados de los esfuerzos de tensión vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver



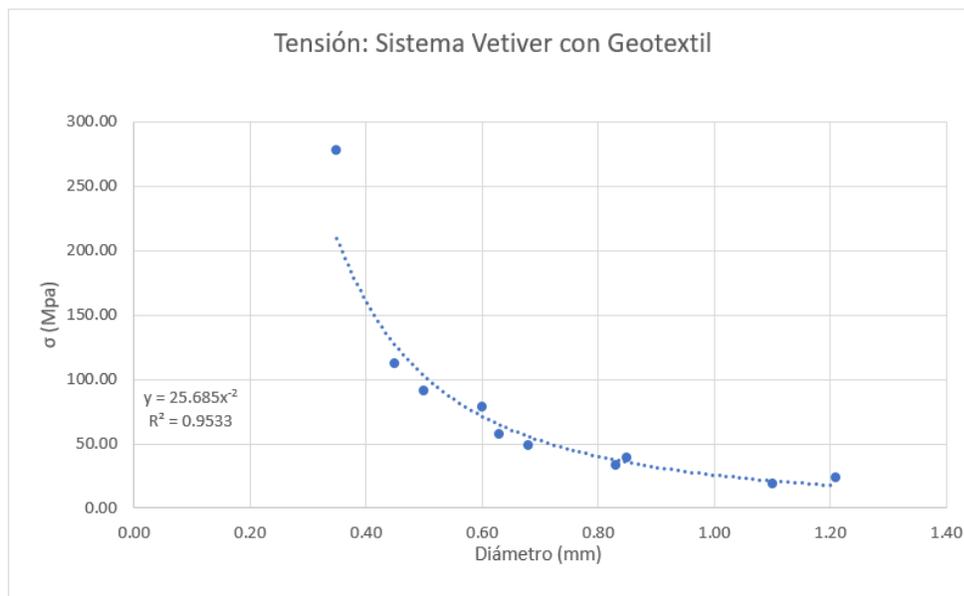
(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 3. Resultados de los esfuerzos de tensión vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver con Geomanto



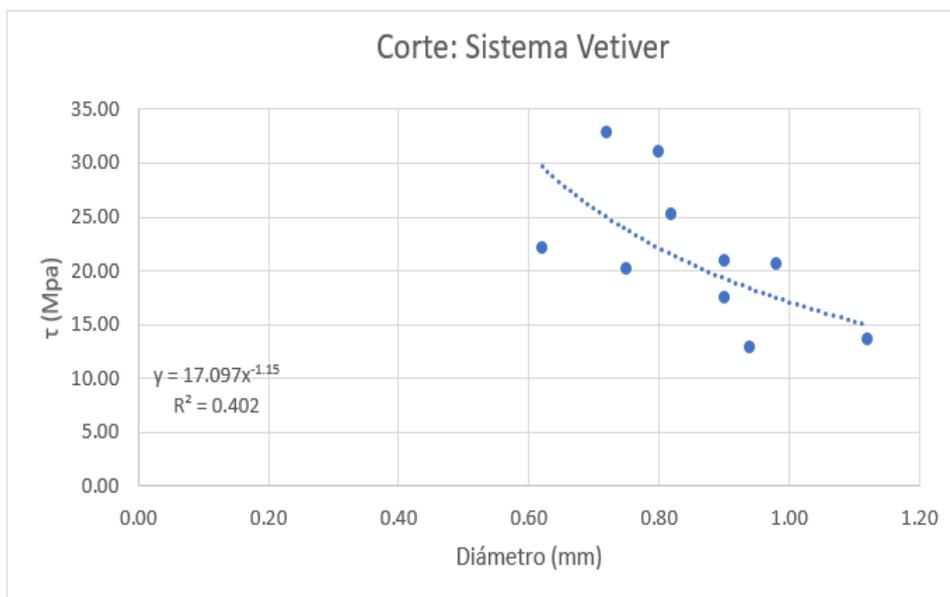
(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 4. Resultados de los esfuerzos de tensión vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver con Geotextil



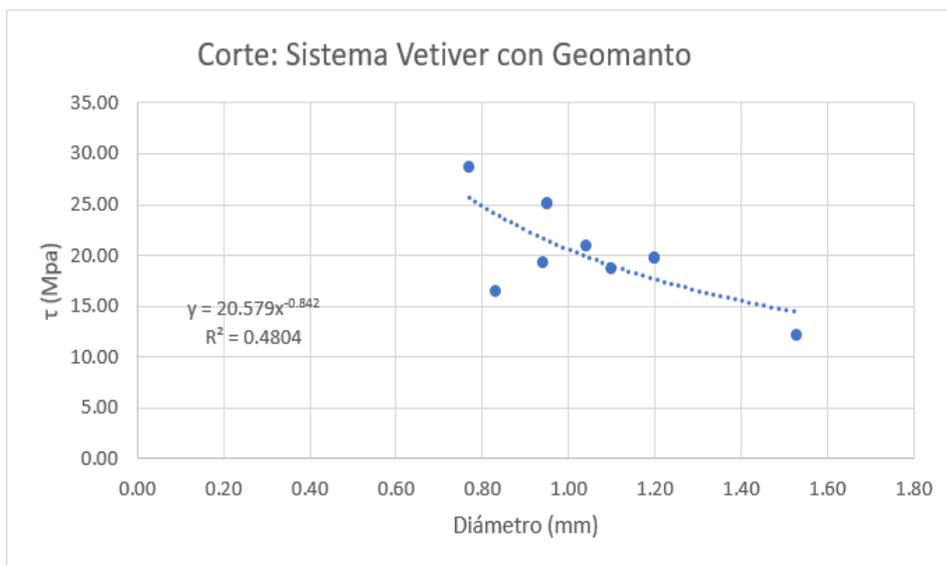
(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 5. Resultados de los esfuerzos de corte vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver



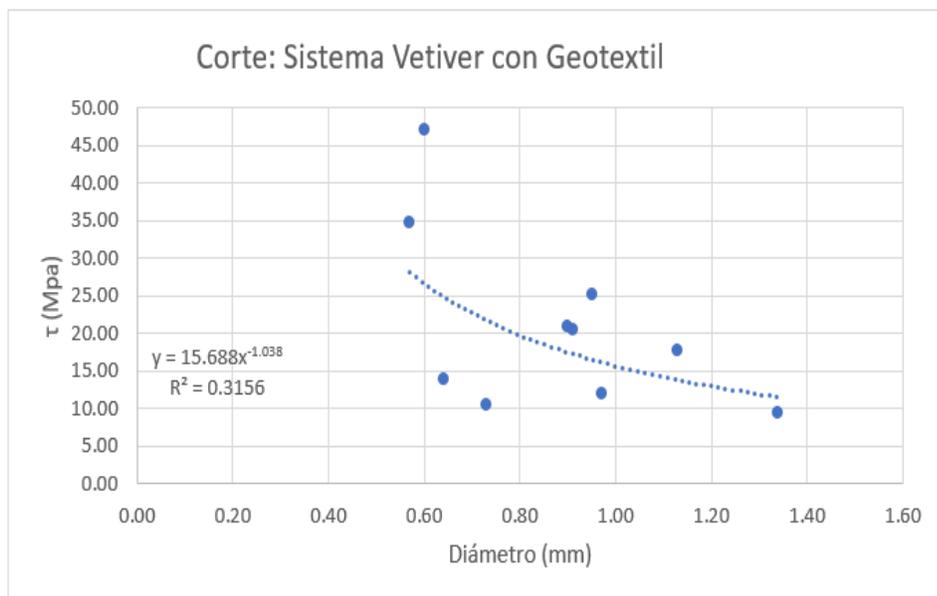
(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 6. Resultados de los esfuerzos de corte vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver con Geomanto



(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 7. Resultados de los esfuerzos de corte vs. diámetro de raíces en tramo de Sistema Vetiver con Geotextil



(Elaboración propia, 2017)

B. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD

En las siguientes tablas, se pueden observar el análisis de estabilidad del talud utilizando diferentes métodos siendo: Culmann, procedimiento de masa, análisis de dovelas por Fellenious, Bishop y Morgenstern-Price. De igual manera, cabe mencionar que los cálculos y diagramas de falla se encuentran en Anexo C.

Cuadro 15. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Culmann considerando la superficie de falla crítica

Muestra	γ (Ton/m ³)	c (Ton/m ²)	Φ (°)	H (m)	β (°)	FSs
1	1.345	1.5	26	2.81	68	3.014
2	1.38	1.7	27	2.43	21	13.546
3	1.448	1.4	26	2.89	25	8.540
4	1.448	1.6	25	2.41	24	6.026
5	1.526	1.8	11	2.43	21	11.500
6	1.429	1.1	16	2.84	24	10.705

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 16. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Culmann considerando las raíces intersecan la superficie de falla

Muestra	γ (Ton/m ³)	c (Ton/m ²)	Φ (°)	H (m)	β (°)	θ (°)	τ_f (Ton/m ²)
1	1.345	1.5	26	2.81	68	66	1.51411
2	1.38	1.7	27	2.43	21	18	1.81866
3	1.448	1.4	26	2.89	25	23	1.47757
4	1.448	1.6	25	2.41	24	22	1.66473
5	1.526	1.8	11	2.43	21	18	1.85006
6	1.429	1.1	16	2.84	24	21	1.16990

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 17. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de procedimiento de masa

Muestra	γ (Ton/m ³)	c (Ton/m ²)	Φ (°)	H (m)	β (°)	c_d (Ton/m ²)	Φ_d (°)	τ_d (Ton/m ²)	τ (Ton/m ²)	FSs
1	1.345	1.5	26	2.81	68	0.65217	11.30435	0.65796	1.51330	2.3
2	1.38	1.7	27	2.43	21	0.29825	4.73684	0.31754	1.80999	5.7
3	1.448	1.4	26	2.89	25	0.31111	5.77778	0.32720	1.47242	4.5
4	1.448	1.6	25	2.41	24	0.45833	6.66667	0.47720	1.14529	2.4
5	1.526	1.8	11	2.43	21	1.20000	7.33333	1.23314	1.84971	1.5
6	1.429	1.1	16	2.84	24	0.31373	4.90196	0.33170	1.69168	5.1

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 18. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Fellenius

Muestra	γ (Ton/m ³)	c (Ton/m ²)	Φ (°)	H (m)	β (°)	Radio (m)	FSs
1	1.345	1.5	26	2.81	68	3.6005657	2.490
2	1.38	1.7	27	2.43	21	6.2643289	5.332
3	1.448	1.4	26	2.89	25	7.5761185	4.176
4	1.448	1.6	25	2.41	24	5.186088	4.293
5	1.526	1.8	11	2.43	21	5.64098	3.941
6	1.429	1.1	16	2.84	24	6.2397158	5.303

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 19. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Bishop

Muestra	γ (Ton/m ³)	c (Ton/m ²)	Φ (°)	H (m)	β (°)	Radio (m)	FSs
1	1.345	1.5	26	2.81	68	3.6005657	2.421
2	1.38	1.7	27	2.43	21	6.26433	5.728
3	1.448	1.4	26	2.89	25	7.5761185	4.282
4	1.448	1.6	25	2.41	24	5.186088	4.419
5	1.526	1.8	11	2.43	21	5.64098	4.111
6	1.429	1.1	16	2.84	24	6.2397158	5.408

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 20. Resultado de análisis de estabilidad del talud por método de Morgenstern-Price

Muestra	γ (Ton/m ³)	c (Ton/m ²)	Φ (°)	H (m)	β (°)	Radio (m)	FSs
1	1.345	1.5	26	2.81	68	5.91118	3.513
2	1.38	1.7	27	2.43	21	6.26433	5.723
3	1.448	1.4	26	2.89	25	7.5761185	4.279
4	1.448	1.6	25	2.41	24	5.186088	4.412
5	1.526	1.8	11	2.43	21	5.64098	4.109
6	1.429	1.1	16	2.84	24	6.2397158	5.404

(Elaboración propia, 2017)

C. MODELO INTEGRADO DE RESISTENCIA DEL SUELO CON EL SISTEMA VETIVER

Cuadro 34. Resultado de análisis de resistencia del suelo con el Sistema Vetiver

Muestra	Tramo	τ_{suelo} (ton/m ²)	τ_{raiz} (Mpa)	τ_{promedio} (ton/m ²)	% de contribución	% de incremento entre 2012-2017
1	Solo Vetiver	1.51	12.82	0.26	8.30%	7.26%
2	Solo Vetiver	1.82	32.77	29.68	17.67%	2.64%
3	Geomanto	1.48	12.10	11.03	8.03%	6.42%
4	Geomanto	1.66	28.66	25.96	16.88%	20.27%
5	Geotextil	1.85	47.19	42.66	25.02%	24.07%
6	Geotextil	1.17	9.46	8.63	7.93%	18.68%

(Elaboración propia, 2017)

D. PERMEABILIDAD DE SUELOS

1. Permeabilidad utilizando permeámetro de carga constante

Cuadro 21. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver antes de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k_{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.0216	0.0199
2	Pie del talud	0.0182	
3	Corona del talud	0.0621	0.0583
4	Corona del talud	0.0545	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 22. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geomanto antes de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k_{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.0233	0.0226
2	Pie del talud	0.0220	
3	Corona del talud	0.1866	0.1637
4	Corona del talud	0.1408	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 23. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geotextil antes de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k_{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.0343	0.0406
2	Pie del talud	0.0469	
3	Corona del talud	0.0186	0.0172
4	Corona del talud	0.0158	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 24. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver después de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k _{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.0524	0.0474
2	Pie del talud	0.0425	
3	Corona del talud	0.1264	0.1355
4	Corona del talud	0.1447	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 25. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geomanto después de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k _{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.0769	0.0791
2	Pie del talud	0.0814	
3	Corona del talud	0.0520	0.0454
4	Corona del talud	0.0389	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 26. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geotextil después de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k _{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.0492	0.0437
2	Pie del talud	0.0381	
3	Corona del talud	0.0236	0.0212
4	Corona del talud	0.0188	

(Elaboración propia, 2017)

2. Permeabilidad utilizando slug test

Cuadro 27. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver antes de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k _{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.9272	0.8720
2		0.8168	
3	Corona del talud	0.9929	1.0665
4		1.1401	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 28. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geomanto antes de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k _{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.8393	0.9452
2		1.0511	
3	Corona del talud	1.1290	1.2617
4		1.3944	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 29. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geotextil antes de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k _{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.9223	1.1828
2		1.4433	
3	Corona del talud	0.9901	0.8784
4		0.7667	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 30. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver después de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k _{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	1.0526	1.0881
2		1.1236	
3	Corona del talud	1.0370	1.0886
4		1.1401	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 31. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geomanto después de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k _{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.9235	1.0002
2		1.0769	
3	Corona del talud	1.2500	1.4315
4		1.6129	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 32. Resultado de análisis de permeabilidad en tramo de Sistema de Vetiver con Geotextil después de la época de lluvia

No. Prueba	Lugar de muestra	k(mm/s)	k _{promedio} (mm/s)
1	Pie del talud	0.9485	1.2978
2		1.6471	
3	Corona del talud	1.3834	1.4782
4		1.5730	

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 33. Resultado de análisis de contenido de humedad

No. Prueba	Tramo	Antes de época de lluvia		Después de época de lluvia		Antes de época de lluvia	Después de época de lluvia
		Peso Seco (kg)	Peso húmedo (kg)	Peso Seco (kg)	Peso húmedo (kg)	% de humedad	% de humedad
1	Solo Vetiver	1.04	1.46	1.18	1.44	40.38%	22.03%
2	Solo Vetiver	1.08	1.48	1.12	1.32	37.04%	17.86%
3	Geomanto	1.12	1.52	1.18	1.54	35.71%	30.51%
4	Geomanto	0.92	1.37	1.04	1.4	48.91%	34.62%
5	Geotextil	1.1	1.49	1.14	1.4	35.45%	22.81%
6	Geotextil	1	1.4	1.08	1.4	40.00%	29.63%

(Elaboración propia, 2017)

V. DISCUSIÓN

En el siguiente trabajo de investigación, se tenía como objetivo principal analizar la evolución de un talud que se implementó el *Sistema Vetiver* en el año 2012, y el efecto que este tuvo durante su desarrollo en la permeabilidad del suelo. Para alcanzar el siguiente fin, se utilizaron diferentes ensayos de laboratorio y campo, obteniendo así los resultados necesarios.

Para evaluar la estabilidad del talud, se utilizaron distintos métodos tomando en cuenta superficies circulares y rectas. Este tipo de análisis se basan en el principio de Coulomb, el cual permite calcular los esfuerzos cortantes presentes en el suelo. Mediante estos procedimientos, se obtuvo el factor de seguridad general, FSs. Al utilizar el análisis de procedimiento de masas, se obtiene también el esfuerzo cortante que se aplica en el talud, así como el que soporta. Al comparar los diferentes métodos de análisis de estabilidad del talud, se observa que el método de dovelas es de mayor precisión, debido a que analiza la superficie de falla en varios elementos, respetando la geometría del sistema. Es importante mencionar, que se realizó un análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, asumiendo que el perfil es homogéneo.

En los diferentes métodos, se buscó el valor más crítico del factor de seguridad, es decir, el menor de ellos. Observando los resultados obtenidos, los factores de seguridad son mayores a 1.5 (valor recomendado), lo que significa que el talud está estable. Además, se nota que ha mejorado de igual manera la resistencia del suelo en los tramos analizados. Hay que tomar en cuenta que los valores también han ido incrementando debido a que las raíces de la planta ya han alcanzado un crecimiento alto a comparación del 2012.

Los resultados obtenidos de los ensayos se limitan al tipo de suelo y geometría del talud estudiado. No es posible generalizar estos resultados para todo tipo de suelo y para taludes de distinta geometría. Asimismo, cabe destacar las condiciones que ha pasado el talud durante estos años afectando su estabilidad; por ejemplo: las plantas han sido atacadas por animales de la zona; se han sembrado otras matas de la planta *Vetiver* en los distintos tramos, y cerca del talud sucedió un incendio.

Para poder relacionar la estabilidad de talud y el *Sistema Vetiver*, se utilizaron relaciones matemáticas aproximadas y se hicieron suposiciones sobre algunos parámetros, con el fin de encontrar un modelo que describa esta relación. Para cada tramo del talud, se determinó el esfuerzo cortante sobre el talud. Con ello se observó que la planta *Vetiver* ha mejorado la resistencia del talud, considerando que ha pasado el tiempo suficiente de crecimiento de la planta. Esto también se puede observar en el porcentaje de contribución de la planta en la estabilidad del talud y en el incremento que ha tenido durante estos años. Al comparar los resultados de cada tramo del talud, puede observarse que el tramo cubierto con geotextil es el de mayor valor. Aunque se esperaba que estos métodos contribuyeran únicamente al control de erosión, colaboro con el crecimiento y anclaje de la raíz al suelo.

Se considera que las suposiciones realizadas introducen un factor de error en los cálculos de estabilidad total. Además de ellos, se encuentran los errores de mediciones y la lectura de datos en los ensayos, factores que también afectan el modelo desarrollado. Sin embargo, se observó que el uso de la planta Vetiver si estabiliza y con condiciones más favorables, los resultados serán de mayor relevancia.

Otro factor que ayuda en la estabilidad del talud es la raíz de la planta del Vetiver. Para evaluar la resistencia de ellas, se realizaron ensayos de tensión y corte. En cada uno, se obtuvo una gráfica general de diámetro vs esfuerzo. Se utilizaron plantas al azar de cada tramo para así analizar de igual manera el sistema de cada uno y conocer cuál es de mayor beneficio. Los resultados se observan en el apartado C de los Anexos.

En los resultados, se observa que la tendencia potencial es evidente para cada caso, los valores de R^2 son menores a 1, es decir, que estos son pocos precisos. La razón de ello es por problemas en los ensayos, ya que no se pudo aplicar la carga necesaria o el observador no reportará correctamente los datos exactos. En algunos casos, se ve que son demasiados bajos esto se debe a las dimensiones de las raíces utilizadas

Cabe destacar, que dentro de las dificultades que se presentaron es que debido al crecimiento de las raíces se rompieron, perjudicando así los valores de mediciones. Asimismo, en los tramos de geotextil o geomanto fue aún más difícil sacar las plantas, ya que al quitarlas se tenía que tener mucho cuidado puesto que el material dificultaba dicha acción y se podía arruinar. También, que conforme se realizaba las pruebas, las raíces van perdiendo sus propiedades y características relacionadas a la humedad, lo cual puede afectar los valores de resistencia obtenidos en los ensayos.

Por otro lado, se encuentra la permeabilidad del talud en los diferentes tramos. Para evaluar este parámetro, se realizaron dos tipos de pruebas: de campo y en laboratorio. El primer análisis, denominado slug test, se caracteriza por ser fácil de realizar y tener un bajo costo, sin embargo, es poco confiable y puede dar respuestas erróneas. Esto se debe a que el tiempo de recuperarse es mayor al que se realiza en el laboratorio. Además, existe la posibilidad de incertidumbre de observación al momento de establecer la altura decreciente. En cuanto a los ensayos de laboratorio, estos fueron más precisos debido a que se trabaja a una altura constante con instrumentos que pueden medir con mayor exactitud los resultados.

Es importante mencionar que, en el análisis, se estudió el talud cuando está expuesto a la época de lluvia y antes de ella. En ellos, se observa que los coeficientes de permeabilidad aumentan conforme se satura el suelo, siendo durante la época de lluvia. Además, se ve que el de menor valor de coeficiente de permeabilidad es del *Sistema Vetiver* combinado con geotextil. Esto se debe a que, en él, el agua absorbe de mejor manera. En cambio, el *Sistema Vetiver* combinado con geomanto es el de mayor coeficiente de permeabilidad ya que el agua se acumula más. De igual manera, cabe destacar que los porcentajes de

humedad antes de lluvia son altos, esto se debe que en los ensayos se necesitó de mayor contenido de agua ya que la muestra estaba más seca que después de lluvia.

Al relacionar estos valores, con la estabilidad se observa que a menor coeficiente de permeabilidad mayor es el factor de seguridad del talud. El tramo combinado con el geotextil se puede observar de mejor manera esta observación. Esto se debe a que retiene de mejor manera los nutrientes del suelo que ayudan al crecimiento de la planta Vetiver.

VI. CONCLUSIONES

- ❖ Se analizó la estabilidad del talud con diferentes métodos considerando superficies de falla plana o circular. Los valores obtenidos en el análisis por dovelas son más semejantes a los reales, ya que analiza la superficie de falla en varios elementos, respetando la geometría del sistema. Asimismo, los factores de seguridad en su mayoría son altos al valor recomendado, demostrando que el talud de estudio es estable.
- ❖ El *Sistema Vetiver* aumentan la disponibilidad de agua subterránea del terreno y reduce el escurrimiento, lo cual afecta la humedad y presión de poros. Para conocer esto, se analiza la permeabilidad para así conocer la capacidad del agua a través de los poros del suelo. En los resultados, se observa que a menor coeficiente de permeabilidad del suelo mayor es la estabilidad en el talud. Por lo que el sistema, controla el agua de los poros de los suelos.
- ❖ Es importante tomar en cuenta, a pesar de tener un único talud, existe variaciones del suelo. Esto se debe a que al pasar de los años ha existido diferentes circunstancias que lo han hecho variar, como sismos, tormentas tropicales, incendios cercanos al talud, etc. Variantes que pueden afectar la resistencia a tensión y corte del *Vetiver*.
- ❖ Después de realizar los ensayos de permeabilidad en las muestras de suelo del talud, se puede concluir que el ensayo de carga constante es más confiable que el de campo denominado Slug Test. Esto se debe a que el tiempo de recuperarse es mayor al que se realiza en el laboratorio.
- ❖ Se encontró que el *Sistema Vetiver* ha mejorado la resistencia del talud a partir de su implementación. Asimismo, se observó que el geotextil y geomanta a pesar de tener como objetivo controlar la erosión, también colabora con el crecimiento y anclaje de la raíz de la planta al suelo. También, cabe destacar que el de mejor desempeño a lo largo de los años fue El *Sistema Vetiver* combinado con geotextil, el cual tiene el mayor factor de seguridad, fuerza de tensión y corte. Esto se debe a que retiene mejor los nutrientes y absorbe mejor el agua.

VII. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda continuar el estudio del proyecto para seguir evaluando la resistencia del talud conforme pasa el tiempo, en especial, cuando suceda catástrofes como temblores de gran magnitud, estudiando así el efecto de carga sísmicas en el *Sistema Vetiver*.
- ❖ Para seleccionar el método de estabilización adecuado para un talud, debe realizarse varios estudios de suelo, con el fin de conocer las propiedades de estos y así considerarlos en el momento de diseñar y analizar el talud.
- ❖ Es recomendable, tomar en cuenta los factores del entorno que afectan la estabilidad del talud para poder diseñarlo de mejor manera, y no afectar las propiedades del suelo y de la superficie de falla. Por eso, se debe realizar una investigación previa del suelo y terreno donde se construirá.
- ❖ Se recomienda, investigar otros métodos de control de erosión con los que se pueda combinar el *Sistema Vetiver* para mejorar la resistencia y permeabilidad del talud de estudio, procurando que estos sean favorables al ambiente.
- ❖ Llevar a cabo un análisis de vulnerabilidad sobre el talud de estudio, para conocer a detalle la amenaza de su inestabilidad, que puede causar pérdidas tanto físicas como económicas. Es recomendable, realizarlo antes y después de instalar el talud comparando así los resultados.
- ❖ Se recomienda, estudiar un talud que utilice el *Sistema Vetiver* bajo la influencia distintas fallas conociendo así la capacidad de estabilidad de este método.
- ❖ Realizar otros ensayos de permeabilidad en campo para conocer con mayor precisión este dato y compararlos con los datos obtenidos en laboratorio, analizando de mejor manera este factor.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Agrodesierto. (2015). *Vétiver - Vetiveria zizanioides*. Recuperado el 10 de agosto de 2017, de Agrodesierto: <http://www.agrodesierto.com/vetiver.html>
- Angelone, S., Garibay, M., & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de suelos* (1st ed ed.). Colombia: Universidad Nacional del Rosario.
- Banco Mundial. (1995). *Vetiver, la barrera contra la erosión*. Recuperado el 10 de agosto de 2017, de The Vetiver Network International: http://www.vetiver.org/PUBLICATIONS/TVN_GreenSpan.pdf
- Bowles, J. (1980). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. Bogotá, Colombia: Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.
- Branken, N., & Truong, P. (2000). *Application of Vetiver Grass Technology in the stabilization of road infrastructure in the wet tropical of Australia*. Tailandia.
- Budhu, M. (2007). *Soil mechanics and foundation* (Segunda ed.). New York: John Wiley and Sons.
- Castro, L. (2013). *Vetiver, la barrera contra la erosión*. Recuperado el 10 de agosto de 2017, de The Vetiver Network International: http://www.vetiver.org/PUBLICATIONS/TVN_GreenSpan.pdf
- Corzo, C. (2013). *Protección de taludes con vegetación*. Recuperado el 10 de agosto de 2017, de UMCC: <http://monografias.umcc.cu/monos/2013/Facultad%20de%20Ingenierias/mo13224.pdf>
- Das, B. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Thomson Learning, Inc.
- FINE. (2012). *Morgenstern-Pricev*. Recuperado el 7 de mayo de 2017, de Civil Engineering Software: <http://www.finesoftware.es/ayuda-en-linea/geo5/es/morgenstern-price-01/>
- Goh, S., Rahardjo, H., & Leong, E. (2015). Modification of Triaxial Apparatus for Permeability measurement of unsaturated soils. *Soils And Foundations*, 55, 63-73. Obtenido de *Soils And Foundations*, 55(1), 63-73.: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080614001401>
- Hengchaovanich, D. (1998). *Vetiver grass for slope stabilization and erosion control with particular reference to engineering applications*. Bangkok, Tailandia: Pacific Rim Vetiver Network Office of the Royal Development Project Board.
- Hengchaovanich, D., & Nilaweera, N. (1996). *An assesment of strength properties of Vetiver grass roots in relaion to slope stabilisation*. Tailandia: Proc. First International Veteiver Conf.
- Ibáñez, J. (2006). *EL AGUA DEL SUELO 3: Agua de Infiltración, Agua Gravitacional y Agua Retenida*. Recuperado el 10 de agosto de 2017, de Un Universo invisible bajo nuestros pies: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/05/17/23216>
- Juárez, E., & Rico, A. (1987). *Mecánica de Suelos Tomo II*. México DF: Editorial Limusa, S.A.

- López Jimeno, C., Gómez Prieto, J., García Bermúdez, R., & Llopis Trillo, P. (2002). *Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes* (2 edición ed., Vol. Vol.I). Madrid, España: Cartoné.
- Luque, A. (2012). *Ensayo Triaxial Geotecnia*. Recuperado el 7 de mayo de 2017, de SlideShare: <https://www.slideshare.net/alexluquee/ensayo-triaxial-geotecnia>
- Matteis, Á. (2003). Obtenido de Universidad Nacional de Rosario.: <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>
- Montoya Orozco, A. (2009). *Confiabilidad en la estabilidad de taludes (Maestro en ingeniería)*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Perea, C., & Duran, J. (2012). *Uso del Pasto Vetiver como una Propuesta de Bioingeniería en la Estabilización de Taludes (Especialista en Ingeniería Ambiental)*. Universidad Industrial de Santander.
- Pinto, A. (2014). *Diseño & Construcción*. Recuperado el 11 de febrero de 2017, de <http://ingenieriareal.com/tipos-y-disenos-de-taludes/>
- Rico, A., & Del Castillo, H. (2000). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres* (16 ed.). México: Limusa.
- Rivas, M., Diez Recinos, J., & Alvizures, J. (2012). *Valor Agregado de Especies Forestales- Gramineas y su Aplicación en el Entorno (Licenciados en Ingeniería Civil)*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- Soto, H. (2009). *La aplicación de geosintéticos a terraplenes (Maestro en ingeniería)*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Suarez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos de Taludes en Zonas Tropicales*. Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Terzaghi, K. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley and Sons.
- TEX DELTA. (2012). *Instalación de Geomallas en taludes para evitar erosión*. Recuperado el 15 de diciembre de 2017, de TEX DELTA Nonwovens Tejidos Técnicos: <https://texdelta.com/blog/instalacion-de-geomallas-en-taludes-para-evitar-erosion/>
- Truong, P., & Tan, T. (2009). *Aplicaciones del Sistema Vetiver manual técnico de referencia*. (Primera ed.). Bangkok, Tailandia: The Vetiver Network International.
- Varghese, T. (2014). Cultivation of Vetiver. *1ed, 7*. (J. Kumar, Ed.) Gujarat, India. Recuperado el 14 de junio de 2017, de http://www.vetiver.org/IND_Vetiver_essential%20oil%20prod%20in%20India.pdf

IX. ANEXOS

A. ENSAYOS DE SUELOS

1. Muestra 1: corona del talud solo *Sistema Vetiver*

Descripción: Arena arcillosa color beige

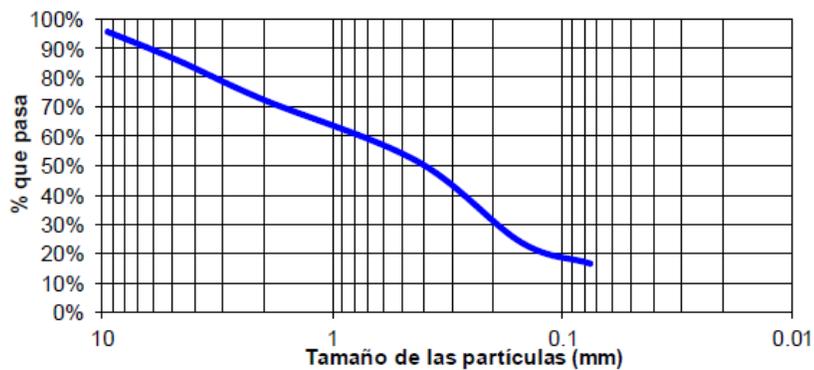
Cuadro 35. Resultado de ensayo de granulometría muestra 1

Peso neto total (g): 633.00						
Tamiz	Tamiz en mm	peso bruto (g)	tara (g)	peso neto (g)	% Acumulado	% Pasa
1 1/2"					0.00	100.00
1"					0.00	100.00
3/4"					0.00	100.00
3/8"	9.52	336.00	307.00	29.00	4.58	95.42
No. 4	4.75	397.00	307.00	90.00	14.22	85.78
No. 10	2	482.50	307.00	175.50	27.73	72.27
No. 40	0.425	616.00	307.00	309.00	48.82	51.18
No. 100	0.15	791.00	307.00	484.00	76.46	23.54
No. 200	0.075	837.00	307.00	530.00	83.73	16.27

Cuadro 36. Granulometría muestra 1

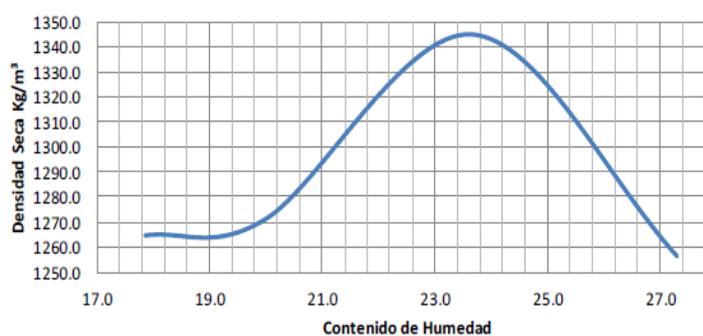
FINOS (%):	16.27
ARENAS (%):	69.51
GRAVAS (%):	14.22

Gráfica 8. Curva granulométrica muestra 1



Cuadro 37. Propiedades límites Atterberg muestra 1

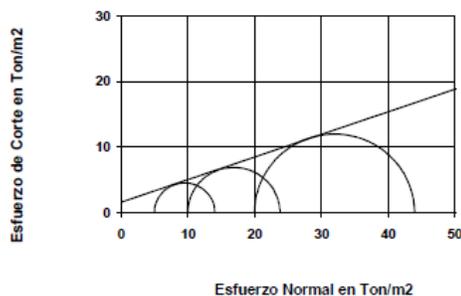
MUESTRA	
L.L. :	48.25
L.P. :	35.38
I.P.:	12.87
W:	17.86
CLASIFICACION	SC

Gráfica 9. Curva densidad seca vs. humedad muestra 1**Cuadro 38. Propiedades de densidad muestra 1**

Descripción del suelo:	Arena arcillosa color beige	
Densidad Seca Máxima:	1345.00 Kg/m ³	83.96 lb/pe ³
% de Humedad Óptima:	23.60	

Cuadro 39. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 1

P.U.H:	1.345 ton//m ³
Cohesión	1.5 ton//m ²
Ángulo de fricción interna	26 °

Gráfica 10. Círculos de Mohr muestra 1

2. Muestra 2: pie del talud solo *Sistema Vetiver*

Descripción: Arena arcillosa color beige

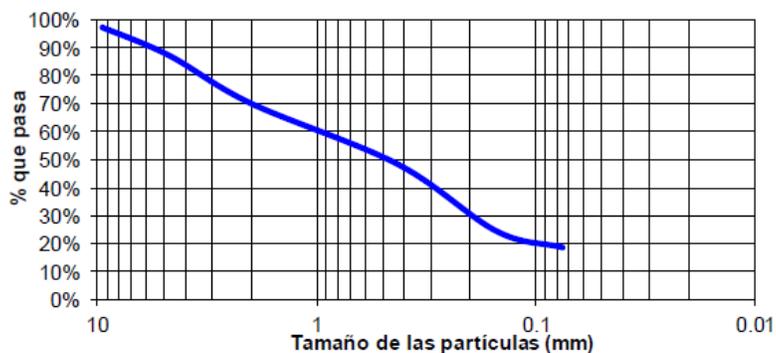
Cuadro 40. Resultado de ensayo de granulometría muestra 2

Peso neto total (g): 603.00						
Tamiz	Tamiz en mm	peso bruto (g)	tara (g)	peso neto (g)	% Acumulado	% Pasa
1 1/2"					0.00	100.00
1"					0.00	100.00
3/4"					0.00	100.00
3/8"	9.52	323.90	307.00	16.90	2.80	97.20
No. 4	4.75	383.60	307.00	76.60	12.70	87.30
No. 10	2	487.30	307.00	180.30	29.90	70.10
No. 40	0.425	618.80	307.00	311.80	51.71	48.29
No. 100	0.15	763.40	307.00	456.40	75.69	24.31
No. 200	0.075	798.40	307.00	491.40	81.49	18.51

Cuadro 41. Granulometría muestra 2

FINOS (%):	18.51
ARENAS (%):	68.79
GRAVAS (%):	12.70

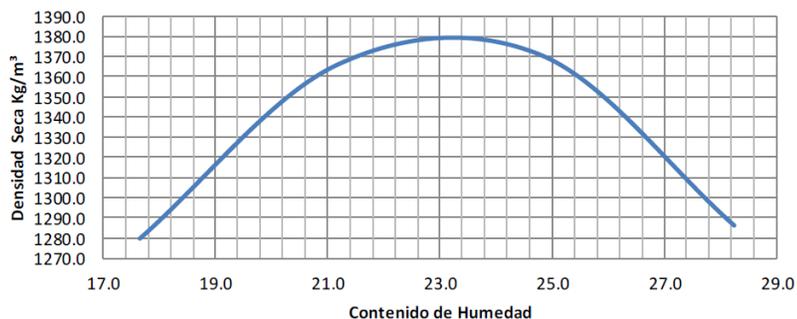
Gráfica 11. Curva granulométrica muestra 2



Cuadro 42. Propiedades límites Atterberg muestra 2

MUESTRA	
L.L.:	43.60
L.P.:	34.08
I.P.:	9.52
W:	17.65
CLASIFICACION	SC

Gráfica 12. Curva densidad seca vs. humedad muestra 2



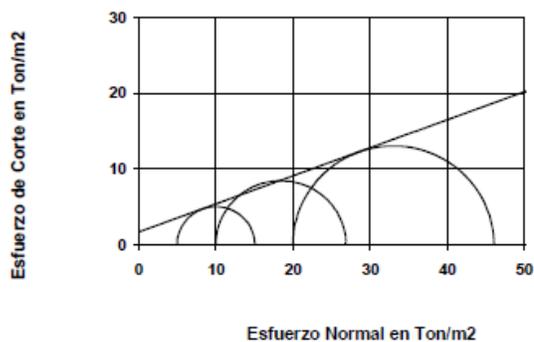
Cuadro 43. Propiedades de densidad muestra 2

Descripción del suelo:	Areana arcillosa color Beige		
Densidad Seca Máxima:	1380.00	Kg/m ³	86.14
% de Humedad Óptima:	23.20		

Cuadro 44. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 2

P.U.H:	1.38 ton//m ³
Cohesión	1.7 ton//m ²
Ángulo de fricción interna	27°

Gráfica 13. Círculos de Mohr muestra 2



3. Muestra 3: corona del talud *Sistema Vetiver* combinado con geomanta

Descripción: Arena arcillosa color beige

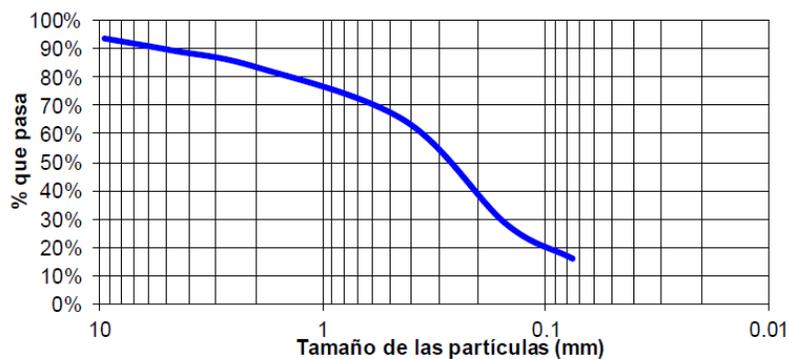
Cuadro 45. Resultado de ensayo de granulometría muestra 3

Peso neto total (g): 710.00						
Tamiz	Tamiz en mm	peso bruto (g)	tara (g)	peso neto (g)	% Acumulado	% Pasa
1 1/2"						
1"						
3/4"						
3/8"	9.52	353.20	307.00	46.20	6.51	93.49
No. 4	4.75	383.00	307.00	76.00	10.70	89.30
No. 10	2	424.20	307.00	117.20	16.51	83.49
No. 40	0.425	559.10	307.00	252.10	35.51	64.49
No. 100	0.15	816.10	307.00	509.10	71.70	28.30
No. 200	0.075	904.10	307.00	597.10	84.10	15.90

Cuadro 46. Granulometría muestra 3

FINOS (%):	15.90
ARENAS (%):	73.39
GRAVAS (%):	10.70

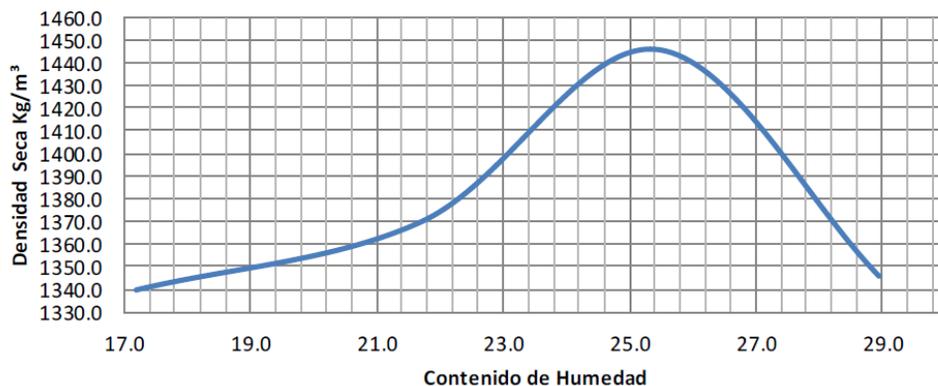
Gráfica 14. Curva granulométrica muestra 3



Cuadro 47. Propiedades límites Atterberg muestra 3

MUESTRA	
L.L. :	46.90
L.P. :	35.72
I.P.:	11.18
W:	17.19
CLASIFICACION	SC

Gráfica 15. Curva densidad seca vs. humedad muestra 2



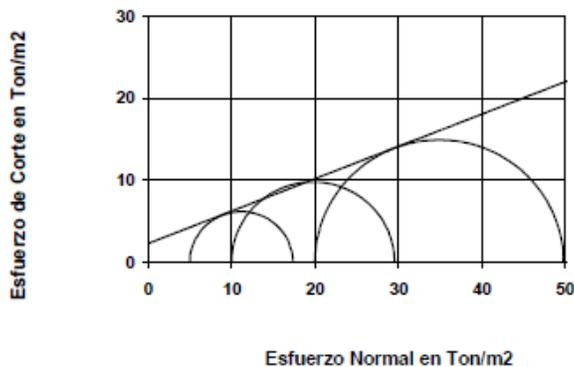
Cuadro 48. Propiedades de densidad muestra 3

Descripción del suelo:	Arena arcillosa color beige		
Densidad Seca Máxima:	1448.00	Kg/m ³	90.39
% de Humedad Óptima:	25.30		

Cuadro 49. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 3

P.U.H:	1.448 ton//m ³
Cohesión	1.4 ton//m ²
Ángulo de fricción interna	26°

Gráfica 16. Círculos de Mohr muestra 3



4. Muestra 4: pie del talud *Sistema Vetiver* combinado con geomanta

Descripción: Arena arcillosa color café

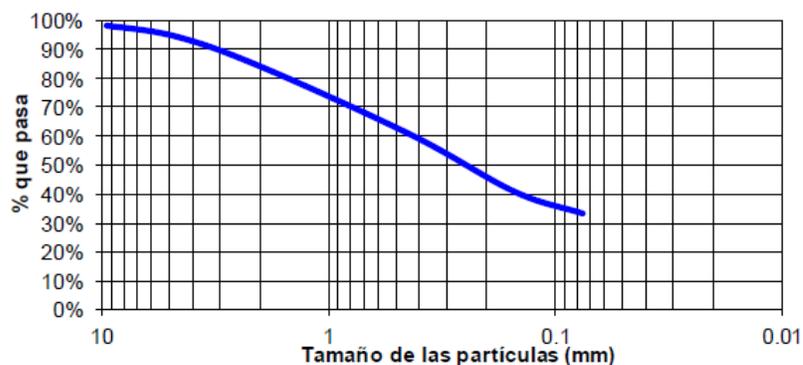
Cuadro 50. Resultado de ensayo de granulometría muestra 4

Peso neto total (g): 1236.00						
Tamiz	Tamiz en mm	peso bruto (g)	tara (g)	peso neto (g)	% Acumulado	% Pasa
1 1/2"						
1"						
3/4"						
3/8"	9.52	330.50	307.00	23.50	1.90	98.10
No. 4	4.75	376.00	307.00	69.00	5.58	94.42
No. 10	2	505.00	307.00	198.00	16.02	83.98
No. 40	0.425	801.00	307.00	494.00	39.97	60.03
No. 100	0.15	1042.00	307.00	735.00	59.47	40.53
No. 200	0.075	1135.50	307.00	828.50	67.03	32.97

Cuadro 51. Granulometría muestra 4

FINOS (%):	32.97
ARENAS (%):	61.45
GRAVAS (%):	5.58

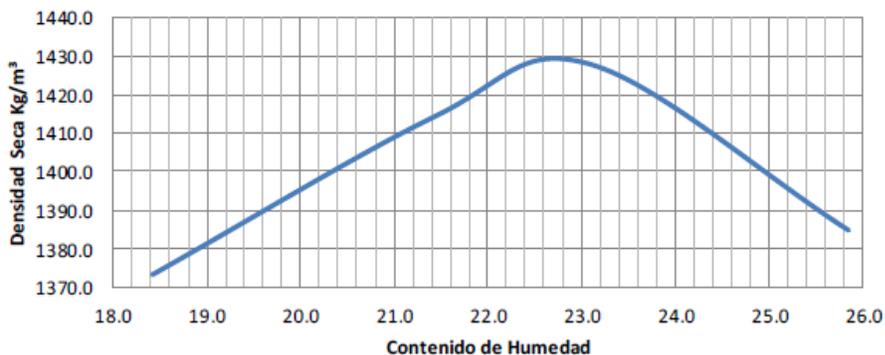
Gráfica 17. Curva granulométrica muestra 4



Cuadro 52. Propiedades límites Atterberg muestra 4

MUESTRA	
L.L.:	58.00
L.P.:	44.22
I.P.:	13.78
W:	18.42
CLASIFICACION	SC

Gráfica 18. Curva densidad seca vs. humedad muestra 4



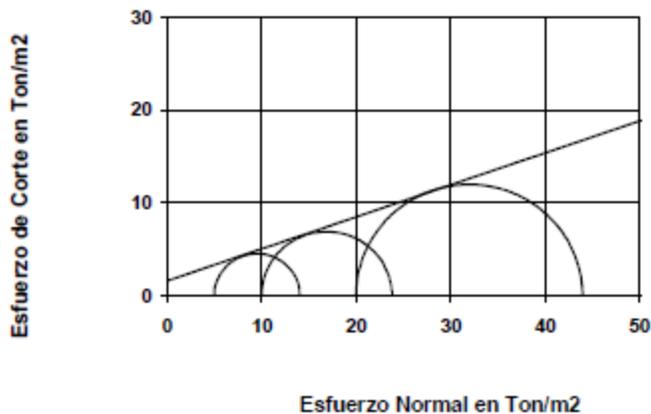
Cuadro 53. Propiedades de densidad muestra 4

Descripción del suelo:	Arena arcillosa color café		
Densidad Seca Máxima:	1429.00	Kg/m ³	89.20 lb/pe ³
% de Humedad Óptima:	22.70		

Cuadro 54. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 4

P.U.H:	1.429 ton//m ³
Cohesión	1.1 ton//m ²
Ángulo de fricción interna	16°

Gráfica 19. Círculos de Mohr muestra 4



5. Muestra 5: corona del talud Sistema Vetiver combinado con geotextil

Descripción: Grava bien graduada arenosa con limo color beige

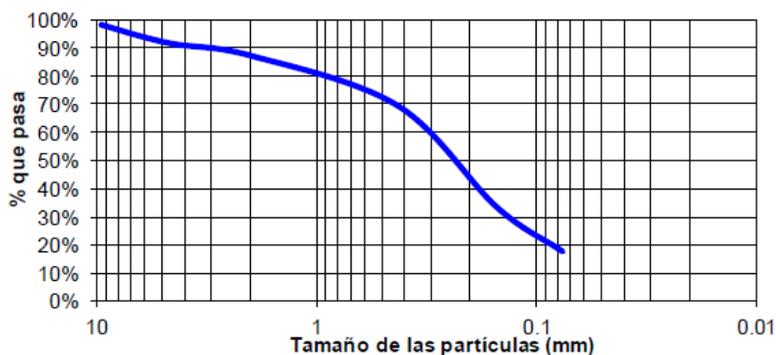
Cuadro 55. Resultado de ensayo de granulometría muestra 5

Peso neto total (g): 1138.00						
Tamiz	Tamiz en mm	peso bruto (g)	tara (g)	peso neto (g)	% Acumulado	% Pasa
1 1/2"					0.00	100.00
1"					0.00	100.00
3/4"					0.00	100.00
3/8"	9.52	327.50	307.00	20.50	1.80	98.20
No. 4	4.75	400.30	307.00	93.30	8.20	91.80
No. 10	2	451.50	307.00	144.50	12.70	87.30
No. 40	0.425	654.10	307.00	347.10	30.50	69.50
No. 100	0.15	1064.90	307.00	757.90	66.60	33.40
No. 200	0.075	1244.70	307.00	937.70	82.40	17.60

Cuadro 56. Granulometría muestra 5

FINOS (%):	17.60
ARENAS (%):	74.20
GRAVAS (%):	8.2

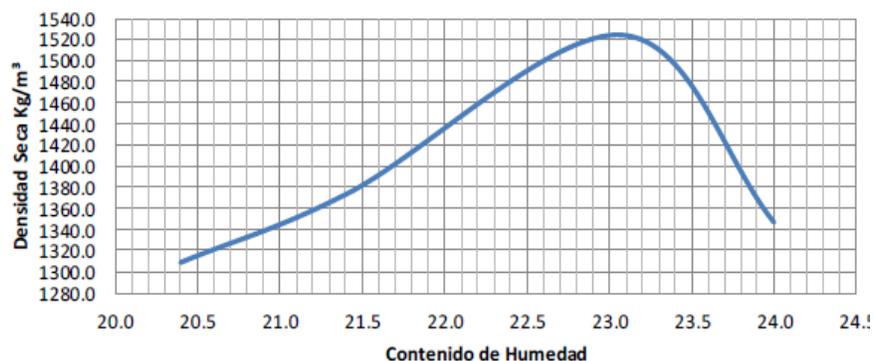
Gráfica 20. Curva granulométrica muestra 5



Cuadro 57. Propiedades límites Atterberg muestra 5

MUESTRA	
L.L.:	48.75
L.P.:	29.93
I.P.:	18.82
W:	17.60
CLASIFICACION	SC

Gráfica 21. Curva densidad seca vs. humedad muestra 5



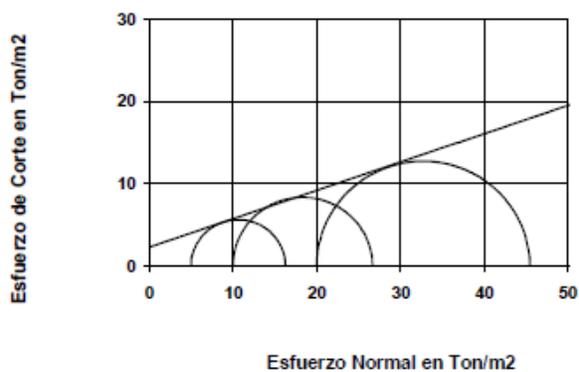
Cuadro 58. Propiedades de densidad muestra 5

Descripción del suelo:	Grava bien graduada arenosa con limo color beige		
Densidad Seca Máxima:	1526.00	Kg/m ³	95.26 lb/pe ³
% de Humedad Óptima:	23.10		

Cuadro 59. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 5

P.U.H:	1.526 ton//m ³
Cohesión	1.8 ton//m ²
Ángulo de fricción interna	11°

Gráfica 22. Círculos de Mohr muestra 5



6. Muestra 6: pie del talud *Sistema Vetiver* combinado con geotextil

Descripción: Arena arcillosa color beige

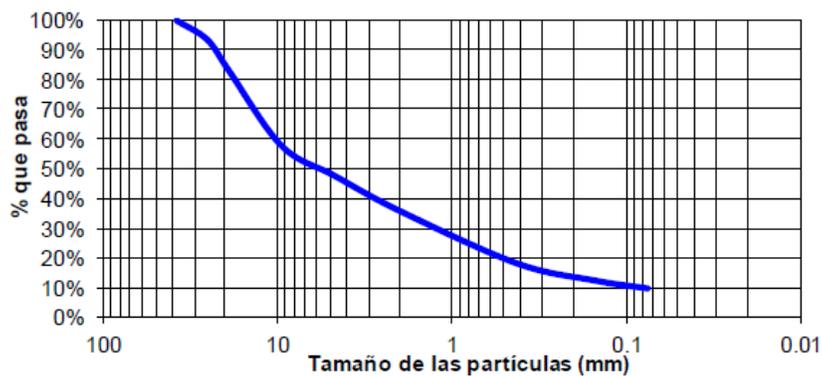
Cuadro 60. Resultado de ensayo de granulometría muestra 6

Peso neto total (g): 2005.00						
Tamiz	Tamiz en mm	peso bruto (g)	tara (g)	peso neto (g)	% Acumulado	% Pasa
1 1/2"	38.1				0.00	100.00
1"	25.4	437.00	307.00	130.00	6.48	93.52
3/4"	19	650.00	307.00	343.00	17.11	82.89
3/8"	9.52	1152.00	307.00	845.00	42.14	57.86
No. 4	4.75	1353.00	307.00	1046.00	52.17	47.83
No. 10	2	1591.00	307.00	1284.00	64.04	35.96
No. 40	0.425	1945.00	307.00	1638.00	81.70	18.30
No. 100	0.15	2062.00	307.00	1755.00	87.53	12.47
No. 200	0.075	2115.00	307.00	1808.00	90.17	9.83

Cuadro 61. Granulometría muestra 6

FINOS (%):	19.78
ARENAS (%):	73.23
GRAVAS (%):	6.99

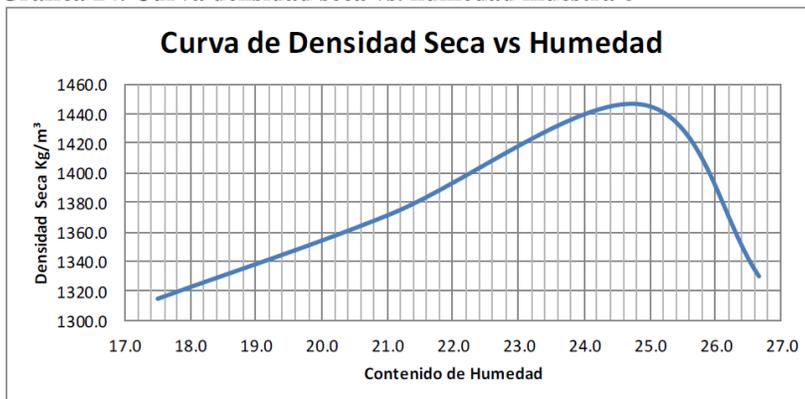
Gráfica 23. Curva granulométrica muestra 6



Cuadro 62. Propiedades límites de Attenberg muestra 6

MUESTRA	
L.L.:	52.10
L.P.:	41.07
I.P.:	11.03
W:	12.46
CLASIFICACION	SC

Gráfica 24. Curva densidad seca vs. humedad muestra 6



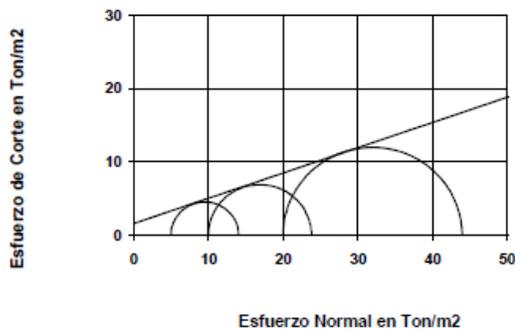
Cuadro 63. Propiedades de densidad muestra 6

Descripción del suelo:	Arena arcillosa color beige		
Densidad Seca Máxima:	1448.00	Kg/m ³	90.39 lb/pe ³
% de Humedad Óptima:	24.70		

Cuadro 64. Propiedades de ensayo compresión triaxial muestra 6

P.U.H:	1.448 ton//m ³
Cohesión	1.6 ton//m ²
Ángulo de fricción interna	25°

Gráfica 25. Círculos de Mohr muestra 6



B. RESULTADOS Y PROCESO DE LOS ANÁLISIS DEL TALUD

1. Análisis de la estabilidad del talud considerando una superficie de falla plana

a. Análisis del talud con el método de Culmann

Muestra 1. Corona del talud con solo *Sistema Vetiver*

$$H = \frac{4 \cdot \frac{C}{FS_S} \cdot \left(\sin(\beta) \cdot \cos \left(\operatorname{atan} \left(\frac{\tan(\phi)}{FS_S} \right) \right) \right)}{\gamma_1 \cdot \left(1 - \cos \left(\beta - \operatorname{atan} \left(\frac{\tan(\phi)}{FS_S} \right) \right) \right)} \xrightarrow{\text{solve, } FS_S} \left[\begin{array}{l} \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) + 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \\ \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) - 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \end{array} \right]$$

$$C := 1.5 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$H := 2.81 \quad \text{m}$$

$$\phi := 26 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.454 \quad \text{radianes}$$

$$\beta := 68 \cdot \frac{\pi}{180} = 1.187 \quad \text{radianes}$$

$$\gamma_1 := 1.345 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$FS_S := \left[\begin{array}{l} \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) + 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \\ \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) - 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \end{array} \right]$$

$$FS_S = \begin{bmatrix} 3.014 \\ -1.337 \end{bmatrix}$$

(Elaboración propia, 2017)

Muestra 2. Pie del talud con solo *Sistema Vetiver*

$$\begin{aligned}
 C &:= 1.7 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} & H &:= 2.43 \quad \text{m} \\
 \phi &:= 27 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.471 \quad \text{radianes} & \beta &:= 21 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.367 \quad \text{radianes} \\
 \gamma_1 &:= 1.38 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

$$FS_S := \left[\begin{array}{l} \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) + 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \\ \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) - 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \end{array} \right]$$

$$FS_S = \begin{bmatrix} 13.546 \\ -0.326 \end{bmatrix}$$

(Elaboración propia, 2017)

Muestra 3. Corona del talud *Sistema Vetiver* combinado con geomanto

$$\begin{aligned}
 C &:= 1.4 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} & H &:= 2.84 \quad \text{m} \\
 \phi &:= 26 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.454 \quad \text{radianes} & \beta &:= 24 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.419 \quad \text{radianes} \\
 \gamma_1 &:= 1.448 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

$$FS_S := \left[\begin{array}{l} \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) + 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \\ \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) - 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \end{array} \right]$$

$$FS_S = \begin{bmatrix} 8.54 \\ -0.232 \end{bmatrix}$$

(Elaboración propia, 2017)

Muestra 4. Pie del talud *Sistema Vetiver* combinado con geomanto

$$\begin{aligned}
 C &:= 1.1 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} & H &:= 2.89 \quad \text{m} \\
 \phi &:= 16 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.279 \quad \text{radianes} & \beta &:= 25 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.436 \quad \text{radianes} \\
 \gamma_1 &:= 1.429 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

$$FS_S := \left[\begin{array}{c} \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) + 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \\ \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) - 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \end{array} \right]$$

$$FS_S = \begin{bmatrix} 6.026 \\ -0.227 \end{bmatrix}$$

(Elaboración propia, 2017)

Muestra 5. Corona del talud *Sistema Vetiver* combinado con geotextil

$$\begin{aligned}
 C &:= 1.6 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} & H &:= 2.41 \quad \text{m} \\
 \phi &:= 25 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.436 \quad \text{radianes} & \beta &:= 24 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.419 \quad \text{radianes} \\
 \gamma_1 &:= 1.448 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

$$FS_S := \left[\begin{array}{c} \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) + 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \\ \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) - 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \end{array} \right]$$

$$FS_S = \begin{bmatrix} 10.705 \\ -0.372 \end{bmatrix}$$

(Elaboración propia, 2017)

Muestra 6. Pie del talud *Sistema Vetiver* combinado con geotextil

$$C := 1.8 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$H := 2.43 \quad \text{m}$$

$$\phi := 11 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.192 \quad \text{radianes}$$

$$\beta := 21 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.367 \quad \text{radianes}$$

$$\gamma_1 := 1.526 \quad \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$FS_S := \begin{bmatrix} \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) + 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \\ \frac{4 \cdot C \cdot \sin(2 \cdot \beta) - 4 \cdot \sqrt{-(C \cdot (2 \cdot C + H \cdot \gamma_1 \cdot \tan(\phi)) \cdot (\cos(2 \cdot \beta) - 1)) + H \cdot \gamma_1 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot H \cdot \gamma_1 - 2 \cdot H \cdot \gamma_1 \cdot \cos(\beta)^2} \end{bmatrix}$$

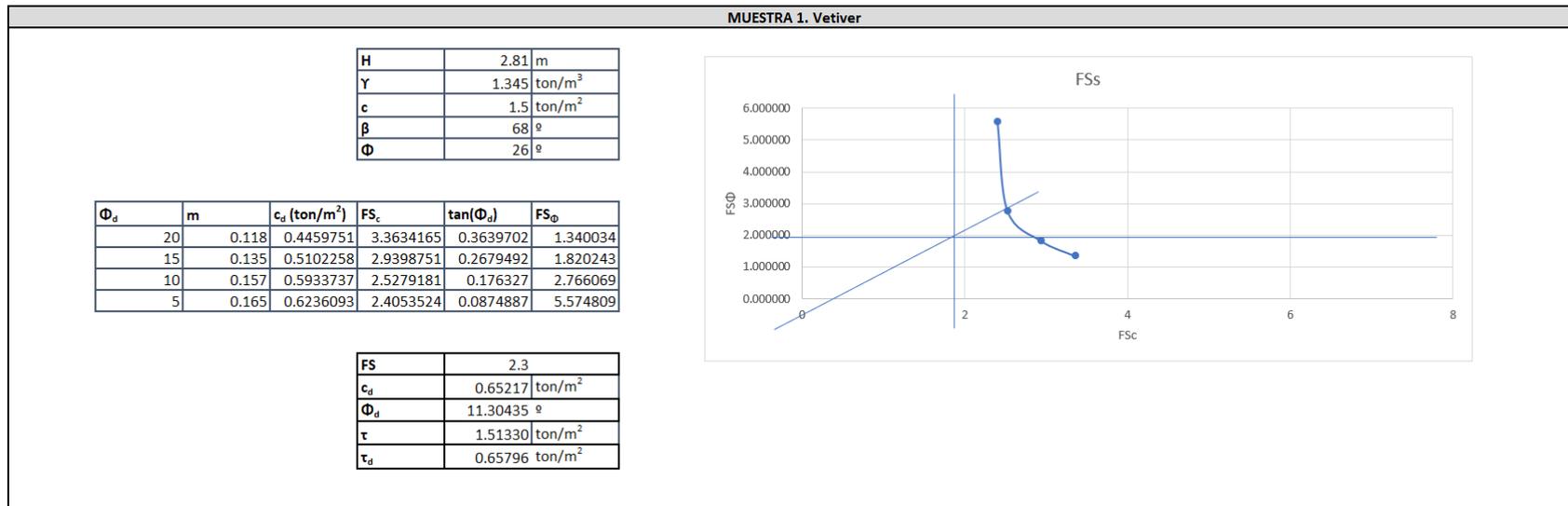
$$FS_S = \begin{bmatrix} 11.5 \\ -0.371 \end{bmatrix}$$

(Elaboración propia, 2017)

2. Análisis de la estabilidad del talud considerando una superficie de falla circular por el método de análisis total

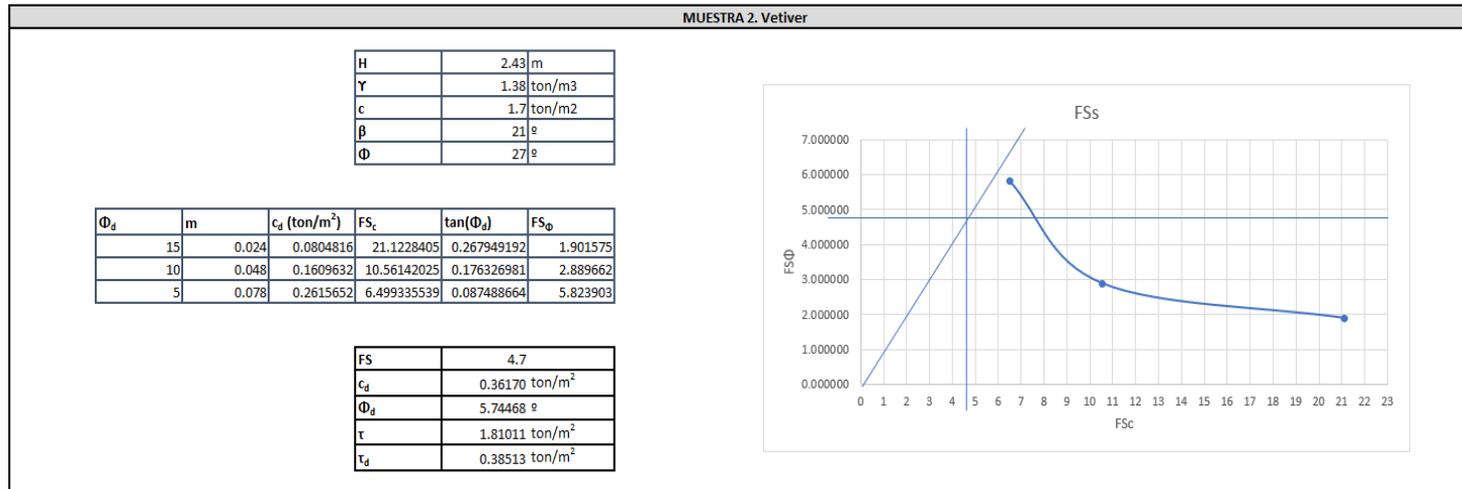
a. Análisis de estabilidad de talud por método de masa total

Cuadro 65. Resultados del análisis de muestra 1 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular



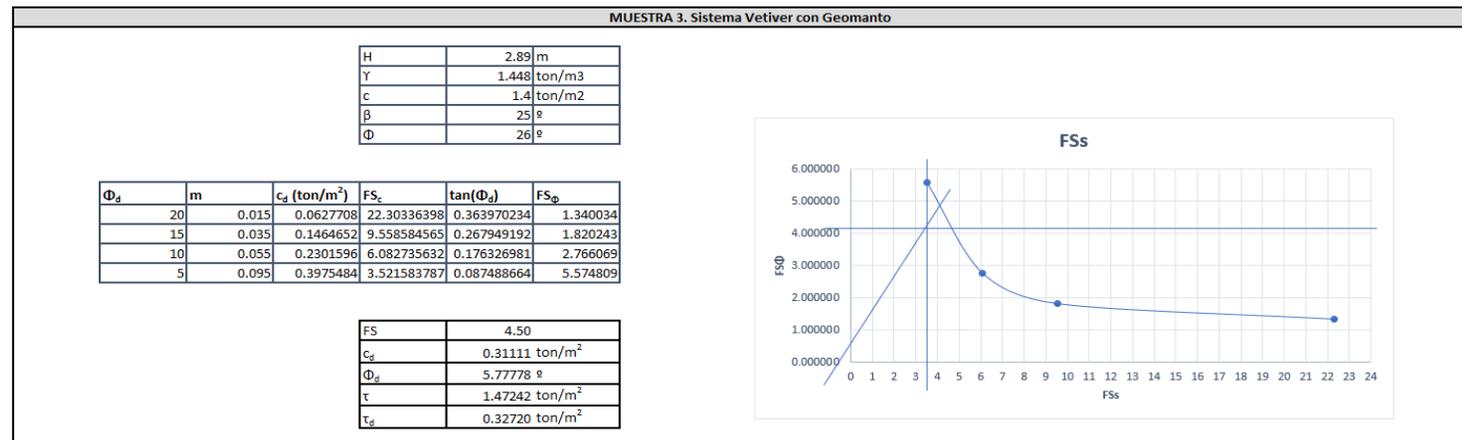
(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 66. Resultados del análisis de muestra 2 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular



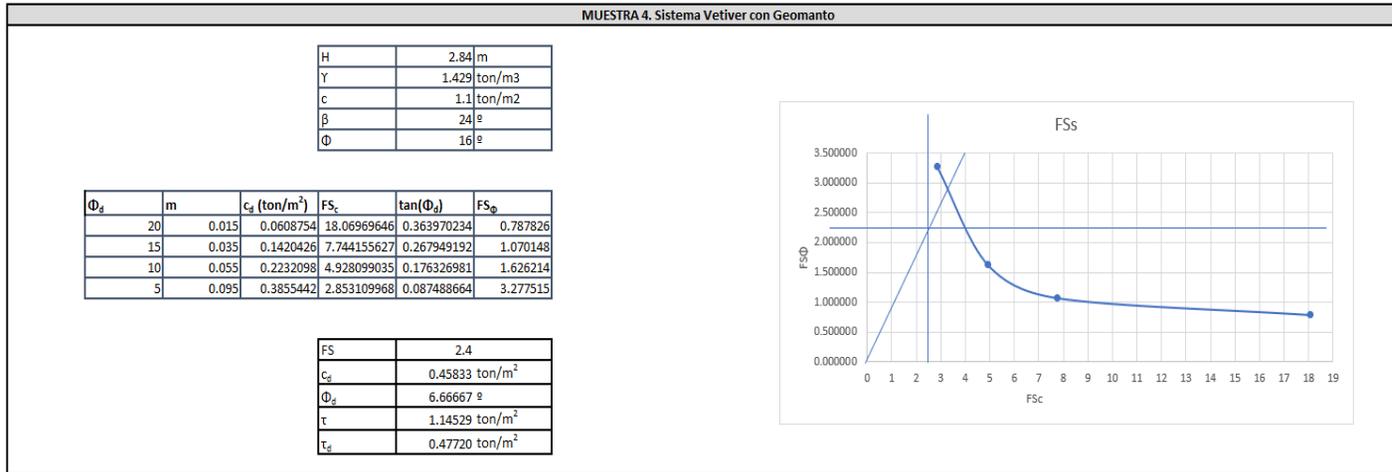
(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 67. Resultados del análisis de muestra 3 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular



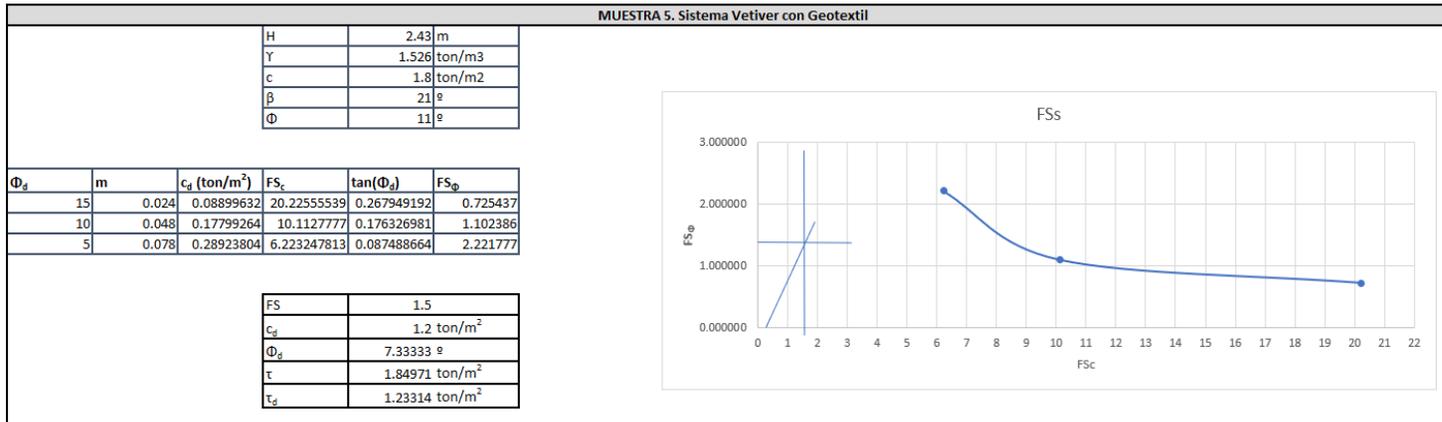
(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 68. Resultados del análisis de muestra 4 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular



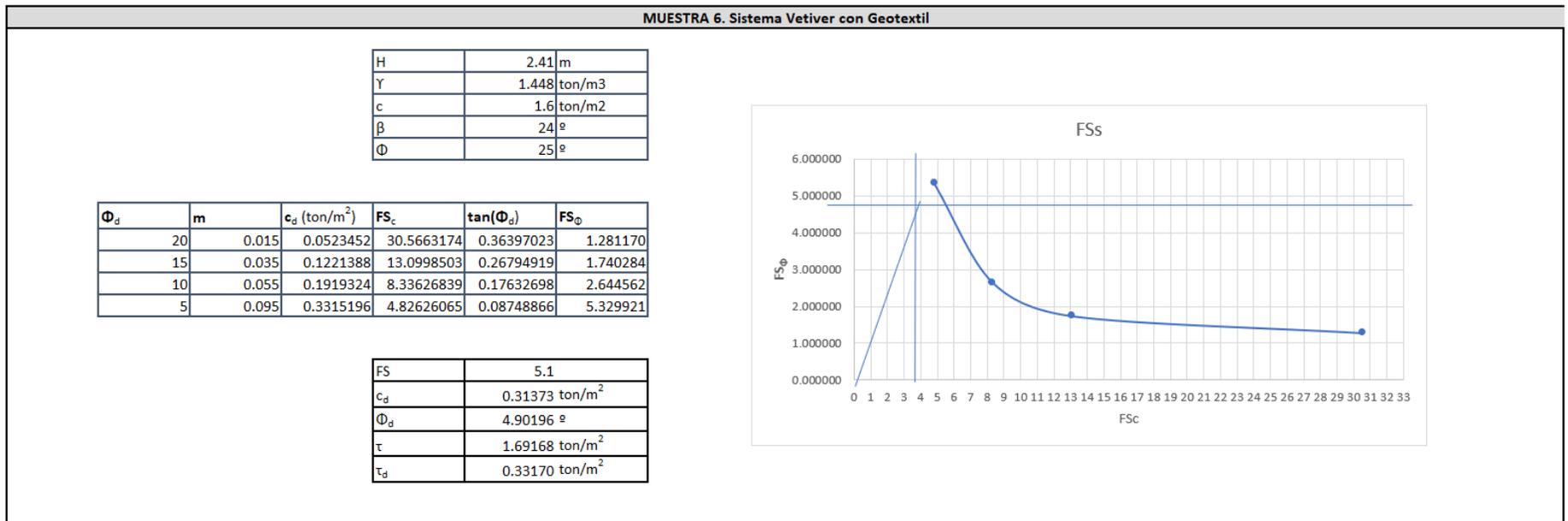
(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 69. Resultados del análisis de muestra 5 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 70. Resultados del análisis de muestra 6 del talud con el método de masa total en una superficie de falla circular



(Elaboración propia, 2017)

b. Análisis de estabilidad de talud por método de dovelas

1) Método de Fellenius

Análisis del talud

Muestra: 1 Corona del Sistema Vetiver
Método de análisis: Ordinario (Fellenius)
Dirección de movimiento: izquierda a derecha
Número de dovelas: 30

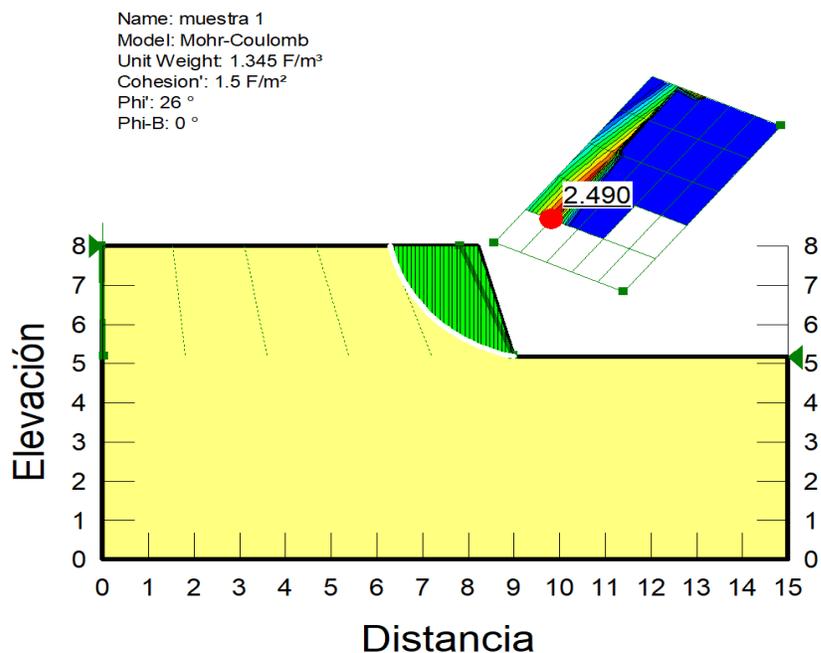
Propiedades del talud

Peso unitario: 1.345 T/m³
Cohesión: 1.5 T/m²
Phi': 26°
Phi-B: 0°
Altura (H): 2.84 m
β: 68°

Resultados del análisis del talud

Radio: 3.6005657 m
Centro de giro: (9.822998; 8.679666) m
Volumen total: 4.2362 m³
Peso total: 5.6976 Ton
Momento resistente total: 30.1096 Ton-m
Momento actuante total: 12.0904 Ton-m
FS: 2.490

Gráfica 26. Análisis de muestra 1 con el principio de dovelas Fellenius



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 71. Resultados de muestra 1 del análisis de las dovelas por el método Fellenius

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	6.332707	7.8159558	0	0.01428384	0.00696669	1.5
2	6.4237944	7.5006096	0	0.07213361	0.03518191	1.5
3	6.5148819	7.2629596	0	0.15363156	0.07493112	1.5
4	6.6059693	7.0658247	0	0.25262513	0.12321351	1.5
5	6.6970568	6.8952542	0	0.36518772	0.17811395	1.5
6	6.7881443	6.744062	0	0.4884526	0.23823425	1.5
7	6.8792317	6.6079393	0	0.62017426	0.3024792	1.5
8	6.9703192	6.4840519	0	0.75851472	0.36995235	1.5
9	7.0614067	6.3704137	0	0.90192376	0.43989761	1.5
10	7.1524941	6.2655678	0	1.0490653	0.51166336	1.5
11	7.2435816	6.168407	0	1.1987694	0.58467888	1.5
12	7.3346691	6.0780663	0	1.3499983	0.65843815	1.5
13	7.4257565	5.9938551	0	1.5018232	0.73248814	1.5
14	7.516844	5.9152114	0	1.6534065	0.80642022	1.5
15	7.6079315	5.8416709	0	1.8039876	0.87986356	1.5
16	7.6990189	5.7728456	0	1.9528735	0.95248005	1.5
17	7.7901064	5.708407	0	2.0994297	1.0239603	1.5
18	7.8811939	5.6480748	0	2.2430738	1.0940202	1.5
19	7.9722813	5.591608	0	2.3832704	1.1623986	1.5
20	8.0633688	5.5387978	0	2.519526	1.2288549	1.5
21	8.1544563	5.4894622	0	2.6513858	1.2931673	1.5
22	8.2443701	5.4439945	0	2.6063332	1.2711936	1.5
23	8.3331103	5.4021773	0	2.3708229	1.1563276	1.5
24	8.4218504	5.3632615	0	2.1135915	1.0308674	1.5
25	8.5105906	5.3271461	0	1.835874	0.89541557	1.5
26	8.5993308	5.2937413	0	1.5389295	0.75058609	1.5
27	8.6880709	5.2629676	0	1.2240402	0.59700429	1.5
28	8.7768111	5.2347544	0	0.89250982	0.43530613	1.5
29	8.8655513	5.2090392	0	0.54566319	0.26613772	1.5
30	8.9542915	5.1857667	0	0.18484507	0.09015497	1.5

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 2 Pie del Sistema Vetiver
Método de análisis: Ordinario (Fellenious)
Dirección de movimiento: izquierda a derecha
Número de dovelas: 30

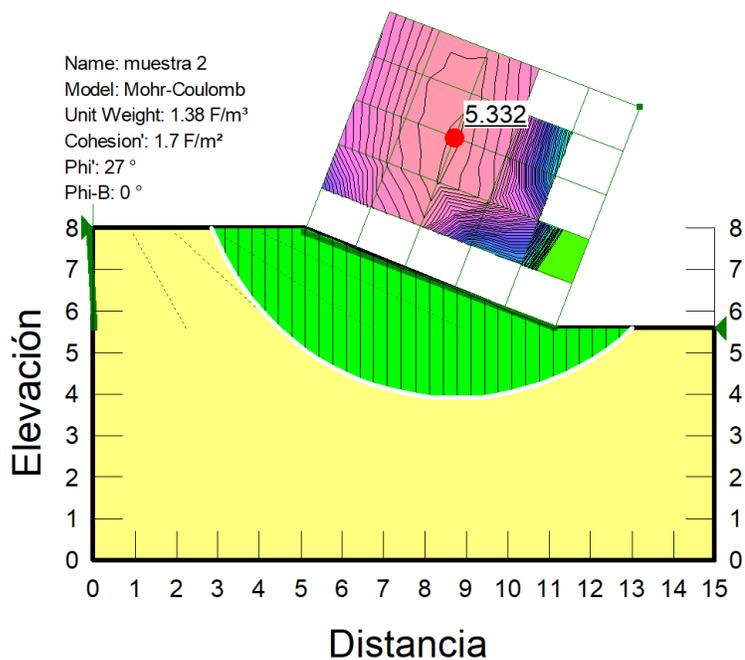
Propiedades del talud

Peso unitario: 1.38 T/m³
Cohesión: 1.7 T/m²
Phi': 27°
Phi-B: 0°
Altura (H): 2.43 m
β: 21°

Resultados del análisis del talud

Radio: 6.2643289 m
Centro de giro: (8.736164; 10.161704) m
Volumen total: 20.8700m³
Peso total: 28.8007 Ton
Momento resistente total: 213.4525 Ton-m
Momento actuante total: 40.0306Ton-m
FS: 5.332

Gráfica 27. Análisis de muestra 2 con el principio de dovelas Fellenius



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 72. Resultados de muestra 2 del análisis de las dovelas por el método Fellenius

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.0168761	7.6370025	0	0.0816958	0.0416261	1.7
2	3.3373567	7.000354	0	0.3522376	0.179474	1.7
3	3.6578373	6.5042136	0	0.7050156	0.3592234	1.7
4	3.9783179	6.0942839	0	1.1104519	0.5658035	1.7
5	4.2987985	5.7458236	0	1.5478325	0.7886601	1.7
6	4.6192791	5.4449427	0	2.001333	1.0197301	1.7
7	4.9397597	5.1828965	0	2.4582899	1.2525613	1.7
8	5.2666667	4.9497641	0	2.8522492	1.4532935	1.7
9	5.6	4.7423672	0	3.1583695	1.6092696	1.7
10	5.9333333	4.5624881	0	3.4208371	1.7430035	1.7
11	6.2666667	4.4075311	0	3.6358859	1.8525764	1.7
12	6.6	4.2755182	0	3.8008457	1.9366276	1.7
13	6.9333333	4.1649274	0	3.9140013	1.9942833	1.7
14	7.2666667	4.0745867	0	3.9744899	2.0251038	1.7
15	7.6	4.0036017	0	3.9822252	2.0290451	1.7
16	7.9333333	3.9513065	0	3.9378408	2.0064301	1.7
17	8.2666667	3.9172301	0	3.8426501	1.957928	1.7
18	8.6	3.9010743	0	3.698618	1.88454	1.7
19	8.9333333	3.9026997	0	3.5083429	1.78759	1.7
20	9.2666667	3.9221203	0	3.2750494	1.668721	1.7
21	9.6	3.9595038	0	3.0025886	1.5298953	1.7
22	9.9333333	4.0151789	0	2.6954485	1.3733996	1.7
23	10.2666667	4.0896504	0	2.3587734	1.2018551	1.7
24	10.6	4.1836229	0	1.998395	1.0182331	1.7
25	10.9333333	4.2980375	0	1.6208761	0.8258776	1.7
26	11.258116	4.4300608	0	1.3179542	0.6715312	1.7
27	11.574348	4.580032	0	1.0854957	0.5530877	1.7
28	11.89058	4.7526402	0	0.8417021	0.4288686	1.7
29	12.206812	4.9501469	0	0.5925887	0.301939	1.7
30	12.523045	5.1755301	0	0.3452354	0.1759062	1.7

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 3 Corona del Talud con Sistema Vetiver y Geomanto
Método de análisis: Ordinario (Fellenious)
Dirección de movimiento: izquierda a derecha
Número de dovelas: 30

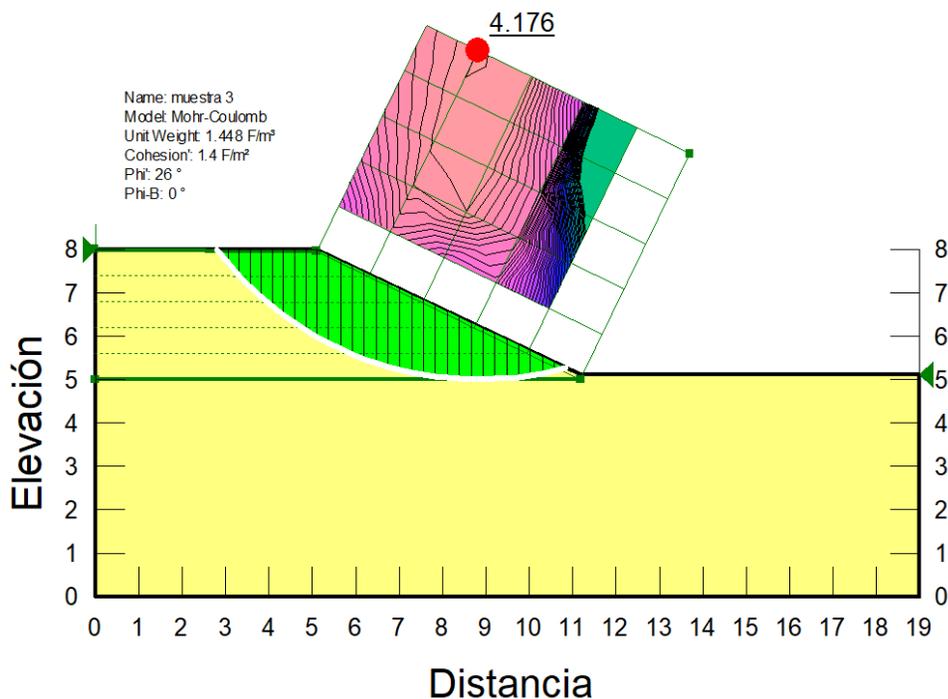
Propiedades del talud

Peso unitario: 1.448T/m³
Cohesión: 1.4 T/m²
Phi': 26°
Phi-B: 0°
Altura (H): 2.89 m
β: 25°

Resultados del análisis del talud

Radio: 7.5761185 m
Centro de giro: (8.83561; 12.57683) m
Volumen total: 10.6669 m³
Peso total: 15.4457 Ton
Momento resistente total: 148.1758 Ton-m
Momento actuante total: 5.4860 Ton-m
FS: 4.176

Gráfica 28. Análisis de muestra 3 con el principio de dovelas Fellenius



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 73. Resultados de muestra 3 del análisis de las dovelas por el método Fellenius

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	2.9260873	7.8404492	0	0.0903616	0.0440723	1.4
2	3.1818417	7.5374313	0	0.2965435	0.1446339	1.4
3	3.4375961	7.2640357	0	0.5243598	0.2557473	1.4
4	3.6933506	7.0158585	0	0.7681809	0.3746669	1.4
5	3.949105	6.7896347	0	1.0231511	0.4990241	1.4
6	4.2048595	6.5828657	0	1.2850262	0.6267491	1.4
7	4.4606139	6.3935913	0	1.5500612	0.7560154	1.4
8	4.7163683	6.2202429	0	1.8149285	0.8851998	1.4
9	4.9721228	6.0615453	0	2.076657	1.0128533	1.4
10	5.236981	5.9117564	0	2.2684987	1.1064207	1.4
11	5.5109429	5.7708827	0	2.3783169	1.1599826	1.4
12	5.7849049	5.6436942	0	2.4648403	1.202183	1.4
13	6.0588668	5.5294481	0	2.5272209	1.232608	1.4
14	6.3328288	5.4275228	0	2.5648737	1.2509725	1.4
15	6.6067907	5.3373968	0	2.5774566	1.2571096	1.4
16	6.8807527	5.2586334	0	2.5648534	1.2509626	1.4
17	7.1547146	5.1908686	0	2.5271596	1.2325781	1.4
18	7.4286766	5.1338014	0	2.464672	1.2021008	1.4
19	7.7026385	5.0871869	0	2.3778788	1.159769	1.4
20	7.9766005	5.0508307	0	2.267453	1.1059107	1.4
21	8.2505624	5.0245844	0	2.1342462	1.0409414	1.4
22	8.5245244	5.0083426	0	1.979285	0.9653618	1.4
23	8.7984863	5.002041	0	1.803767	0.8797559	1.4
24	9.0724482	5.0056546	0	1.6090599	0.784791	1.4
25	9.3464102	5.0191978	0	1.3967005	0.6812164	1.4
26	9.6203721	5.0427241	0	1.1683947	0.5698642	1.4
27	9.8943341	5.0763276	0	0.9260198	0.45165	1.4
28	10.168296	5.1201447	0	0.6716265	0.3275741	1.4
29	10.442258	5.1743571	0	0.4074434	0.1987234	1.4
30	10.71622	5.2391954	0	0.1358819	0.066274	1.4

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 4 Pie del Talud con Sistema Vetiver y Geomanto

Método de análisis: Ordinario (Fellenius)

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.429 T/m³

Cohesión: 1.1T/m²

Phi': 16°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.84 m

β: 24°

Resultados del análisis del talud

Radio: 5.756754 m

Centro de giro: (7.962624; 10.879554) m

Volumen total: 10.1799 m³

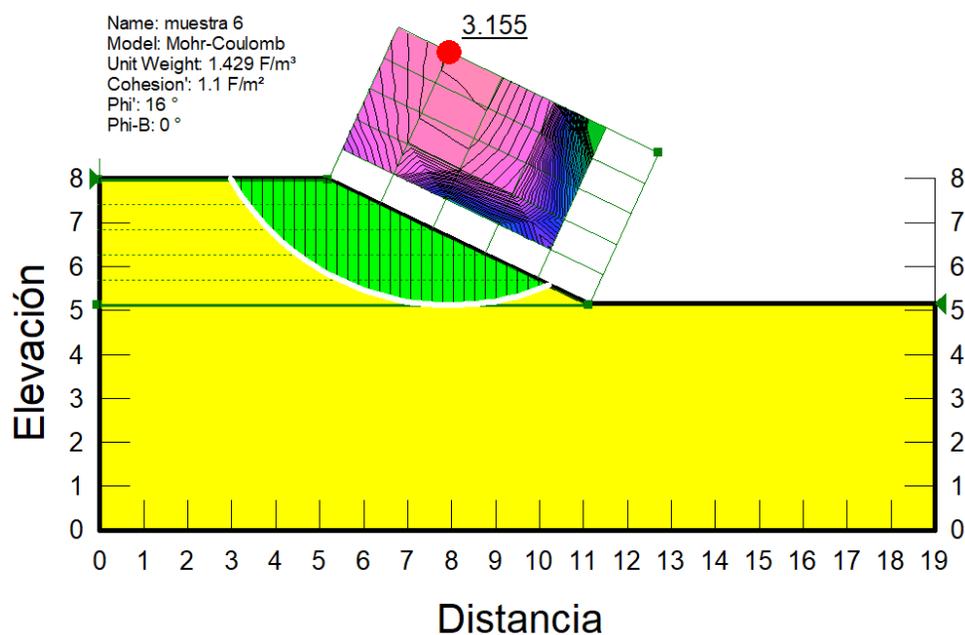
Peso total: 14.5471 Ton

Momento resistente total: 74.6813 Ton-m

Momento actuante total: 23.6670 Ton-m

FS: 3.155

Gráfica 29. Análisis de muestra 4 con el principio de dovelas Fellenius



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 74. Resultados de muestra 3 del análisis de las dovelas por el método Fellenius

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.0984858	7.808842	0	0.0778427	0.022321	1.1
2	3.3398404	7.4547924	0	0.2760822	0.0791653	1.1
3	3.581195	7.1501259	0	0.5102352	0.1463076	1.1
4	3.8225497	6.8833298	0	0.7696572	0.2206957	1.1
5	4.0639043	6.6471456	0	1.0458177	0.2998834	1.1
6	4.3052589	6.4366422	0	1.3316526	0.3818452	1.1
7	4.5466135	6.2482904	0	1.6211858	0.4648675	1.1
8	4.7879681	6.0794662	0	1.9092888	0.5474798	1.1
9	5.0293227	5.9281617	0	2.1915194	0.6284081	1.1
10	5.2706136	5.7928385	0	2.3996715	0.6880947	1.1
11	5.5118409	5.672241	0	2.5211241	0.7229207	1.1
12	5.7530682	5.5653262	0	2.6156346	0.7500212	1.1
13	5.9942955	5.4712803	0	2.6823653	0.7691559	1.1
14	6.2355228	5.3894401	0	2.7208192	0.7801824	1.1
15	6.4767501	5.3192654	0	2.7308117	0.7830477	1.1
16	6.7179774	5.2603183	0	2.7124476	0.7777818	1.1
17	6.9592047	5.2122475	0	2.6661035	0.7644929	1.1
18	7.2004319	5.1747777	0	2.5924135	0.7433626	1.1
19	7.4416592	5.1477005	0	2.492259	0.7146438	1.1
20	7.6828865	5.1308688	0	2.3667598	0.6786575	1.1
21	7.9241138	5.1241926	0	2.2172695	0.6357918	1.1
22	8.1653411	5.1276363	0	2.0453714	0.5865008	1.1
23	8.4065684	5.1412184	0	1.8528775	0.5313041	1.1
24	8.6477957	5.1650112	0	1.6418291	0.4707869	1.1
25	8.889023	5.1991432	0	1.4144999	0.4056013	1.1
26	9.1302502	5.2438026	0	1.1734002	0.3364671	1.1
27	9.3714775	5.2992428	0	0.921285	0.2641742	1.1
28	9.6127048	5.3657895	0	0.6611634	0.1895856	1.1
29	9.8539321	5.4438515	0	0.3963119	0.1136406	1.1
30	10.095159	5.5339346	0	0.1302911	0.0373604	1.1

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 5 Corona del Talud con Sistema Vetiver y Geotextil

Método de análisis: Ordinario (Fellenious)

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.526 T/m³

Cohesión: 1.8 T/m²

Phi': 11°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.43 m

β: 21°

Resultados del análisis del talud

Radio: 5.6409787 m

Centro de giro: (8.562394; 9.449668) m

Volumen total: 20.8437 m³

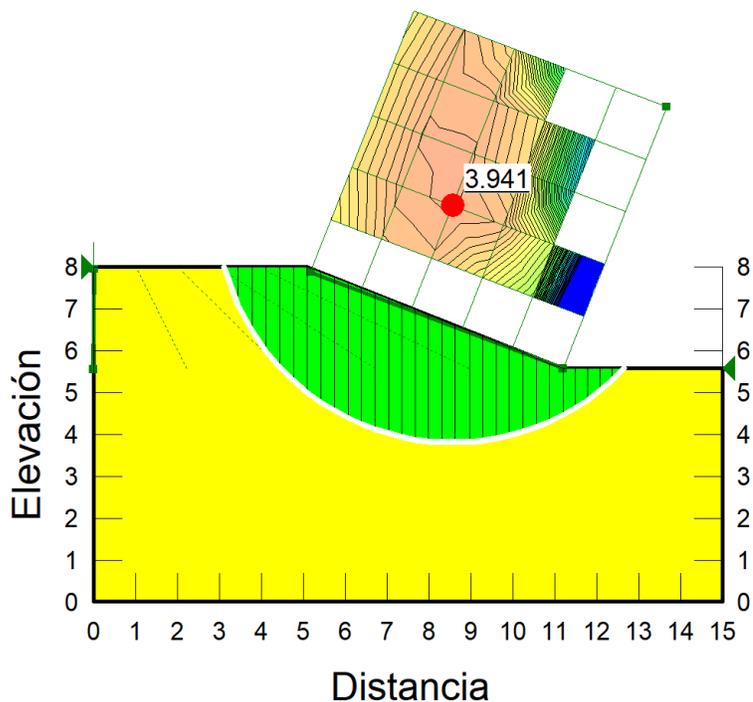
Peso total: 31.8074 Ton

Momento resistente total: 152.4138 Ton-m

Momento actuante total: 38.6731Ton-m

FS: 3.941

Gráfica 30. Análisis de muestra 5 con el principio de dovelas Fellenius



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 75. Resultados de muestra 5 del análisis de las dovelas por el método Fellenius

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.2766317	7.5409606	0	0.0808049	0.0157069	1.8
2	3.6081532	6.7748972	0	0.4219452	0.0820178	1.8
3	3.9396747	6.2298865	0	0.8823666	0.1715147	1.8
4	4.2711962	5.7971538	0	1.4122356	0.2745108	1.8
5	4.6027177	5.4387642	0	1.9793417	0.3847451	1.8
6	4.9342392	5.1357113	0	2.5600868	0.4976305	1.8
7	5.2605263	4.8803041	0	3.0634471	0.5954738	1.8
8	5.5815789	4.6643137	0	3.456394	0.6718549	1.8
9	5.9026316	4.4784348	0	3.7986085	0.7383747	1.8
10	6.2236842	4.3193704	0	4.0847094	0.7939871	1.8
11	6.5447368	4.1846754	0	4.3108475	0.8379439	1.8
12	6.8657895	4.0725089	0	4.4744817	0.8697511	1.8
13	7.1868421	3.9814783	0	4.5742194	0.8891382	1.8
14	7.5078947	3.9105372	0	4.6097012	0.8960352	1.8
15	7.8289474	3.8589181	0	4.5815176	0.8905568	1.8
16	8.15	3.8260869	0	4.4911493	0.872991	1.8
17	8.4710526	3.8117143	0	4.3409273	0.8437908	1.8
18	8.7921053	3.8156586	0	4.134008	0.8035698	1.8
19	9.1131579	3.8379585	0	3.8743632	0.7530999	1.8
20	9.4342105	3.8788353	0	3.5667831	0.6933124	1.8
21	9.7552632	3.9387036	0	3.2168927	0.6253006	1.8
22	10.076316	4.0181939	0	2.831184	0.5503264	1.8
23	10.397368	4.1181871	0	2.4170644	0.4698297	1.8
24	10.718421	4.2398689	0	1.9829268	0.3854419	1.8
25	11.039474	4.3848102	0	1.5382478	0.2990051	1.8
26	11.345737	4.5460406	0	1.1818074	0.2297201	1.8
27	11.637211	4.7235793	0	0.9075037	0.1764009	1.8
28	11.928684	4.9268674	0	0.6315558	0.122762	1.8
29	12.220158	5.1595952	0	0.3626504	0.0704921	1.8
30	12.511632	5.4269261	0	0.1111783	0.0216109	1.8

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 6 Pie del Talud con Sistema Vetiver y Geotextil

Método de análisis: Ordinario (Fellenius)

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.448 T/m³

Cohesión: 1.6 T/m²

Phi': 25°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.41 m

β: 24°

Resultados del análisis del talud

Radio: 6.2397158 m

Centro de giro: (8.07348; 11.80805) m

Volumen total: 7.3223 m³

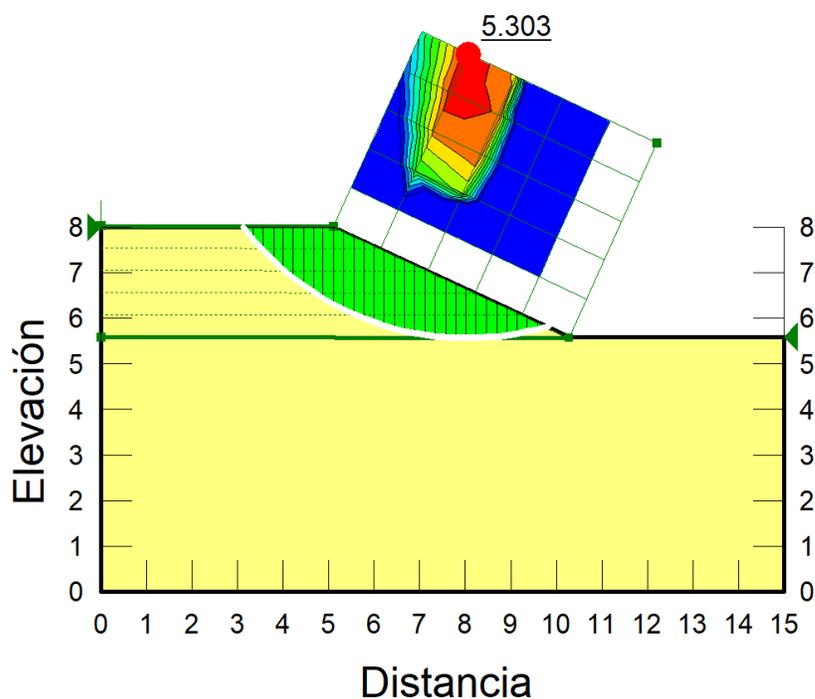
Peso total: 10.6028 Ton

Momento resistente total: 102.9756 Ton-m

Momento actuante total: 19.4180 Ton-m

FS: 5.303

Gráfica 30. Análisis de muestra 6 con el principio de dovelas Fellenius



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 76. Resultados de muestra 6 del análisis de las dovelas por el método Fellenius

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.2399398	7.8658458	0	0.077599	0.036185	1.6
2	3.4587704	7.6113773	0	0.2547255	0.1187805	1.6
3	3.677601	7.3823841	0	0.4501736	0.2099194	1.6
4	3.8964317	7.1750577	0	0.6589126	0.307256	1.6
5	4.1152623	6.9865849	0	0.8766131	0.4087714	1.6
6	4.3340929	6.8148194	0	1.0994999	0.5127052	1.6
7	4.5529235	6.6580821	0	1.3242498	0.6175078	1.6
8	4.7717541	6.5150329	0	1.5479178	0.7218059	1.6
9	4.9905847	6.3845852	0	1.7678824	0.8243771	1.6
10	5.2122141	6.2644713	0	1.9249348	0.8976118	1.6
11	5.4366423	6.1542186	0	2.0096521	0.9371162	1.6
12	5.6610706	6.054831	0	2.0752024	0.9676828	1.6
13	5.8854988	5.965753	0	2.1209697	0.9890244	1.6
14	6.109927	5.8865184	0	2.1465428	1.0009494	1.6
15	6.3343552	5.8167358	0	2.1516997	1.0033541	1.6
16	6.5587835	5.7560778	0	2.1363954	0.9962175	1.6
17	6.7832117	5.7042719	0	2.1007515	0.9795965	1.6
18	7.0076399	5.661094	0	2.0450486	0.9536218	1.6
19	7.2320681	5.626363	0	1.969719	0.9184951	1.6
20	7.4564964	5.5999369	0	1.8753419	0.8744863	1.6
21	7.6809246	5.5817098	0	1.762639	0.8219321	1.6
22	7.9053528	5.5716099	0	1.6324718	0.7612341	1.6
23	8.129781	5.5695974	0	1.4858392	0.6928582	1.6
24	8.3542093	5.5756647	0	1.3238767	0.6173339	1.6
25	8.5786375	5.5898353	0	1.1478562	0.5352541	1.6
26	8.8030657	5.6121649	0	0.9591863	0.4472759	1.6
27	9.0274939	5.6427424	0	0.7594144	0.3541208	1.6
28	9.2519222	5.6816914	0	0.5502289	0.2565759	1.6
29	9.4763504	5.729173	0	0.3334627	0.1554962	1.6
30	9.7007786	5.7853893	0	0.1110983	0.051806	1.6

(Elaboración propia, 2017)

2) Método Bishop

Análisis del talud

Muestra: 1 Corona del Sistema Vetiver
Método de análisis: Bishop
Dirección de movimiento: izquierda a derecha
Número de dovelas: 30

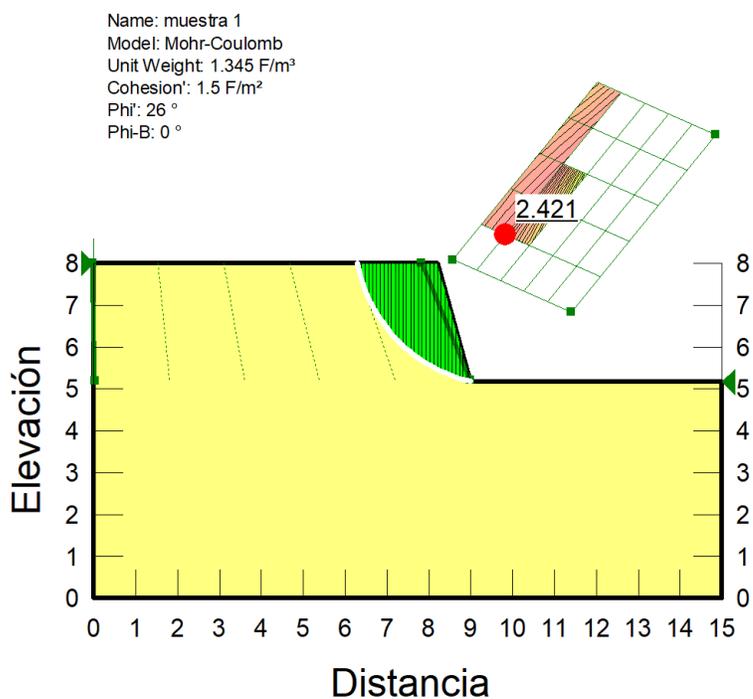
Propiedades del talud

Peso unitario: 1.345 T/m³
Cohesión: 1.5 T/m²
Phi': 26°
Phi-B: 0°
Altura (H): 2.84 m
β: 68°

Resultados del análisis del talud

Radio: 3.6005657 m
Centro de giro: (9.822998; 8.679666) m
Volumen total: 4.2362 m³
Peso total: 5.6976 Ton
Momento resistente total: 29.2674 Ton-m
Momento actuante total: 12.0904 Ton-m
FS: 2.421

Gráfica 31. Análisis de muestra 1 con el principio de dovelas Bishop



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 77. Resultados de muestra 1 del análisis de las dovelas en el análisis por el método Bishop

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	6.332707	7.8159558	0	-1.2437065	-0.6065962	1.5
2	6.4237944	7.5006096	0	-0.7050624	-0.3438819	1.5
3	6.5148819	7.2629596	0	-0.3097421	-0.1510713	1.5
4	6.6059693	7.0658247	0	0.0152618	0.0074437	1.5
5	6.6970568	6.8952542	0	0.2960231	0.1443801	1.5
6	6.7881443	6.744062	0	0.5454837	0.2660502	1.5
7	6.8792317	6.6079393	0	0.7711831	0.3761311	1.5
8	6.9703192	6.4840519	0	0.9779671	0.4769864	1.5
9	7.0614067	6.3704137	0	1.1691675	0.5702411	1.5
10	7.1524941	6.2655678	0	1.3471899	0.6570684	1.5
11	7.2435816	6.168407	0	1.5138383	0.7383483	1.5
12	7.3346691	6.0780663	0	1.670506	0.8147602	1.5
13	7.4257565	5.9938551	0	1.8182948	0.8868417	1.5
14	7.516844	5.9152114	0	1.9580942	0.9550263	1.5
15	7.6079315	5.8416709	0	2.0906333	1.01967	1.5
16	7.6990189	5.7728456	0	2.216519	1.0810685	1.5
17	7.7901064	5.708407	0	2.3362618	1.139471	1.5
18	7.8811939	5.6480748	0	2.4502961	1.1950893	1.5
19	7.9722813	5.591608	0	2.5589946	1.2481051	1.5
20	8.0633688	5.5387978	0	2.6626796	1.2986756	1.5
21	8.1544563	5.4894622	0	2.7616317	1.3469378	1.5
22	8.2443701	5.4439945	0	2.6627178	1.2986942	1.5
23	8.3331103	5.4021773	0	2.3627123	1.1523718	1.5
24	8.4218504	5.3632615	0	2.0542481	1.0019237	1.5
25	8.5105906	5.3271461	0	1.7376314	0.8474995	1.5
26	8.5993308	5.2937413	0	1.413125	0.6892271	1.5
27	8.6880709	5.2629676	0	1.0809538	0.5272164	1.5
28	8.7768111	5.2347544	0	0.7413084	0.3615603	1.5
29	8.8655513	5.2090392	0	0.394349	0.1923369	1.5
30	8.9542915	5.1857667	0	0.040208	0.0196108	1.5

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 2 Pie del Sistema Vetiver
Método de análisis: Bishop
Dirección de movimiento: izquierda a derecha
Número de dovelas: 30

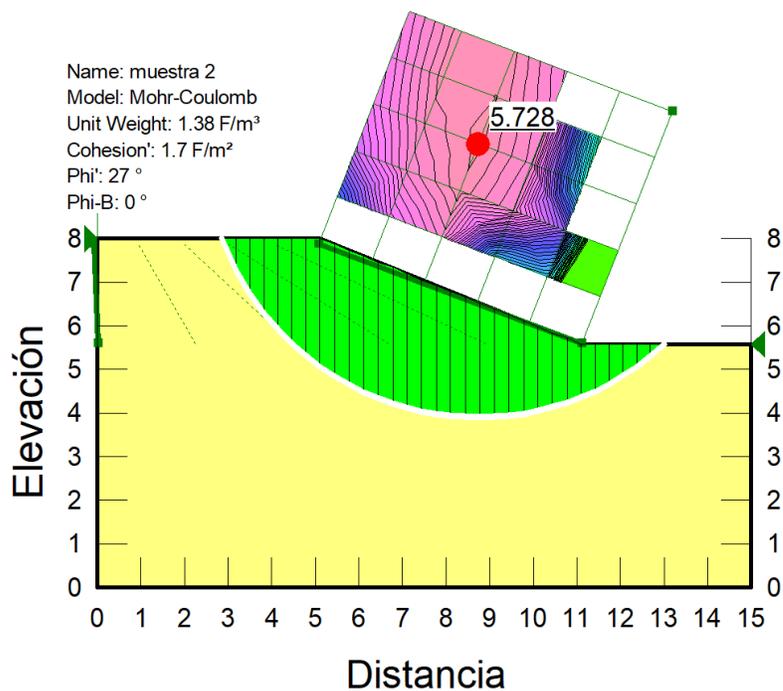
Propiedades del talud

Peso unitario: 1.38 T/m³
Cohesión: 1.7 T/m²
Phi': 27°
Phi-B: 0°
Altura (H): 2.43 m
β: 21°

Resultados del análisis del talud

Radio: 6.2643289 m
Centro de giro: (8.736164; 10.161704) m
Volumen total: 20.8700m³
Peso total: 28.8007 Ton
Momento resistente total: 229.2960 Ton-m
Momento actuante total: 40.0306Ton-m
FS: 5.728

Gráfica 32. Análisis de muestra 2 con el principio de dovelas Bishop



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 78. Resultados de muestra 2 del análisis de las dovelas por el método Bishop

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.0168761	7.6370025	0	-0.1426182	-0.0726676	1.7
2	3.3373567	7.000354	0	0.7576103	0.3860217	1.7
3	3.6578373	6.5042136	0	1.4705085	0.7492615	1.7
4	3.9783179	6.0942839	0	2.067607	1.0534984	1.7
5	4.2987985	5.7458236	0	2.5817799	1.3154826	1.7
6	4.6192791	5.4449427	0	3.0315856	1.54467	1.7
7	4.9397597	5.1828965	0	3.4287532	1.747037	1.7
8	5.2666667	4.9497641	0	3.6995594	1.8850197	1.7
9	5.6	4.7423672	0	3.8463497	1.9598131	1.7
10	5.9333333	4.5624881	0	3.9534284	2.0143724	1.7
11	6.2666667	4.4075311	0	4.0245576	2.0506145	1.7
12	6.6	4.2755182	0	4.0625886	2.0699923	1.7
13	6.9333333	4.1649274	0	4.0697014	2.0736164	1.7
14	7.2666667	4.0745867	0	4.047561	2.0623353	1.7
15	7.6	4.0036017	0	3.9974231	2.0367888	1.7
16	7.9333333	3.9513065	0	3.9202053	1.9974444	1.7
17	8.2666667	3.9172301	0	3.8165351	1.9446217	1.7
18	8.6	3.9010743	0	3.6867805	1.8785085	1.7
19	8.9333333	3.9026997	0	3.5310676	1.7991688	1.7
20	9.2666667	3.9221203	0	3.3492859	1.7065464	1.7
21	9.6	3.9595038	0	3.1410834	1.6004619	1.7
22	9.9333333	4.0151789	0	2.9058497	1.4806044	1.7
23	10.2666667	4.0896504	0	2.6426864	1.346516	1.7
24	10.6	4.1836229	0	2.3503596	1.197568	1.7
25	10.9333333	4.2980375	0	2.0272303	1.0329254	1.7
26	11.258116	4.4300608	0	1.773094	0.9034365	1.7
27	11.574348	4.580032	0	1.5889264	0.8095985	1.7
28	11.89058	4.7526402	0	1.3722074	0.6991746	1.7
29	12.206812	4.9501469	0	1.1193401	0.5703323	1.7
30	12.523045	5.1755301	0	0.8255302	0.4206287	1.7

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 3 Corona del Talud con Sistema Vetiver y Geomanto

Método de análisis: Bishop

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.448T/m³

Cohesión: 1.4 T/m²

Phi': 26°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.89 m

β: 25°

Resultados del análisis del talud

Radio: 7.5761185 m

Centro de giro: (8.83561; 12.57683) m

Volumen total: 10.6669 m³

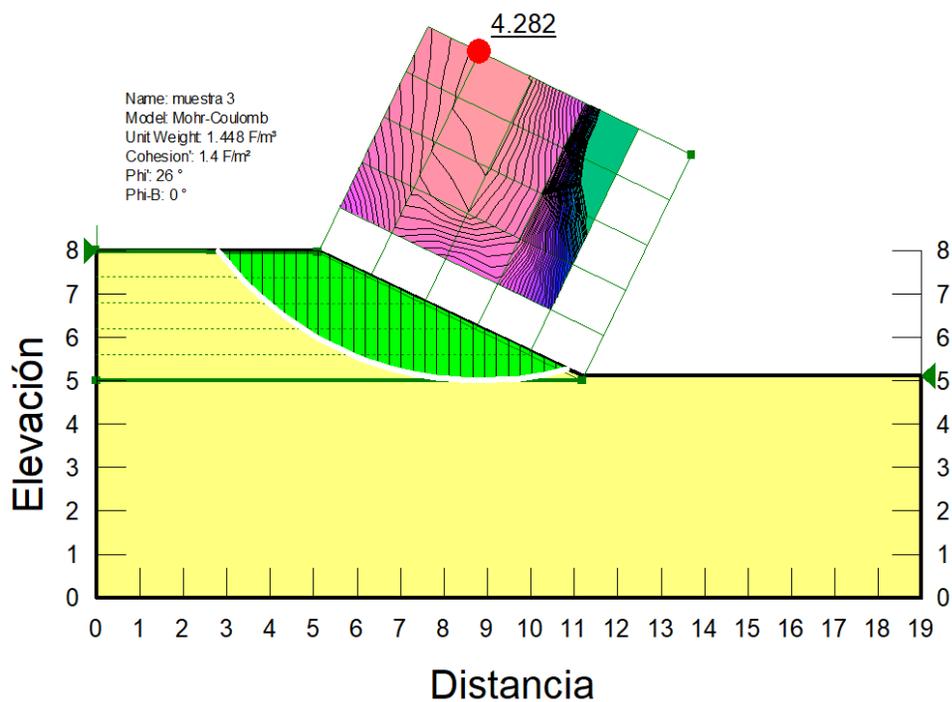
Peso total: 15.4457 Ton

Momento resistente total: 151.9660 Ton-m

Momento actuante total: 35.485973 Ton-m

FS: 4.282

Gráfica 33. Análisis de muestra 3 con el principio de dovelas Bishop



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 79. Resultados de muestra 3 del análisis de las dovelas por el método Bishop

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	2.9260873	7.8404492	0	-0.1548021	-0.075502	1.4
2	3.1818417	7.5374313	0	0.2687505	0.1310784	1.4
3	3.4375961	7.2640357	0	0.6574957	0.3206821	1.4
4	3.6933506	7.0158585	0	1.0158178	0.4954474	1.4
5	3.949105	6.7896347	0	1.3470914	0.6570204	1.4
6	4.2048595	6.5828657	0	1.6539757	0.8066979	1.4
7	4.4606139	6.3935913	0	1.9386064	0.9455215	1.4
8	4.7163683	6.2202429	0	2.2027247	1.0743406	1.4
9	4.9721228	6.0615453	0	2.447768	1.1938562	1.4
10	5.236981	5.9117564	0	2.5938456	1.265103	1.4
11	5.5109429	5.7708827	0	2.6393567	1.2873003	1.4
12	5.7849049	5.6436942	0	2.6647262	1.2996738	1.4
13	6.0588668	5.5294481	0	2.6709316	1.3027004	1.4
14	6.3328288	5.4275228	0	2.6587855	1.2967763	1.4
15	6.6067907	5.3373968	0	2.6289613	1.2822301	1.4
16	6.8807527	5.2586334	0	2.582014	1.2593324	1.4
17	7.1547146	5.1908686	0	2.5183948	1.2283032	1.4
18	7.4286766	5.1338014	0	2.438463	1.1893179	1.4
19	7.7026385	5.0871869	0	2.3424952	1.1425112	1.4
20	7.9766005	5.0508307	0	2.2306914	1.0879809	1.4
21	8.2505624	5.0245844	0	2.1031799	1.0257894	1.4
22	8.5245244	5.0083426	0	1.9600199	0.9559656	1.4
23	8.7984863	5.002041	0	1.8012031	0.8785055	1.4
24	9.0724482	5.0056546	0	1.6266537	0.793372	1.4
25	9.3464102	5.0191978	0	1.4362264	0.7004944	1.4
26	9.6203721	5.0427241	0	1.2297038	0.5997666	1.4
27	9.8943341	5.0763276	0	1.0067913	0.4910449	1.4
28	10.168296	5.1201447	0	0.7671104	0.3741448	1.4
29	10.442258	5.1743571	0	0.51019	0.2488363	1.4
30	10.71622	5.2391954	0	0.2354539	0.1148385	1.4

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 4 Pie del Talud con Sistema Vetiver y Geomanto

Método de análisis: Bishop

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.429 T/m³

Cohesión: 1.1T/m²

Phi': 16°

Phi-B: 0°

Altura (H):2.84 m

β: 24°

Resultados del análisis del talud

Radio: 5.756754 m

Centro de giro: (7.962624; 10.879554) m

Volumen total: 10.1799 m³

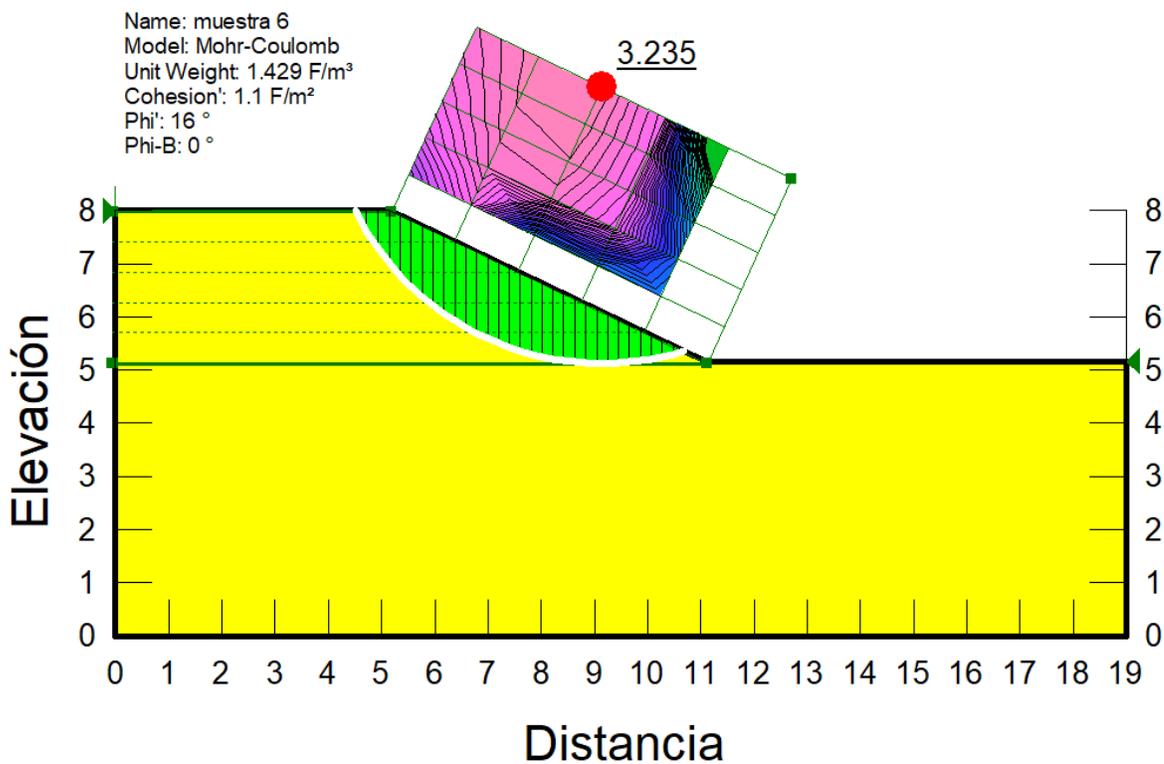
Peso total: 9.3447 Ton

Momento resistente total: 55.2682 Ton-m

Momento actuante total: 17.0860 Ton-m

FS: 3.235

Gráfica 34. Análisis de muestra 4 con el principio de dovelas Bishop



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 80. Resultados de muestra 4 del análisis de las dovelas por el método Bishop

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	4.6126699	7.8052817	0	-0.2910553	-0.0834588	1.1
2	4.827602	7.4482236	0	0.2424217	0.0695133	1.1
3	5.042534	7.1463435	0	0.6980637	0.2001665	1.1
4	5.2525609	6.8899203	0	1.0253067	0.294002	1.1
5	5.4576827	6.6690275	0	1.2361813	0.3544693	1.1
6	5.6628045	6.4718356	0	1.411412	0.4047159	1.1
7	5.8679262	6.2948218	0	1.5563563	0.446278	1.1
8	6.073048	6.1354011	0	1.6749271	0.4802776	1.1
9	6.2781698	5.9916138	0	1.7700794	0.5075621	1.1
10	6.4832916	5.8619363	0	1.8441013	0.5287875	1.1
11	6.6884134	5.7451611	0	1.8988001	0.5444722	1.1
12	6.8935351	5.6403167	0	1.9356241	0.5550313	1.1
13	7.0986569	5.5466128	0	1.9557468	0.5608014	1.1
14	7.3037787	5.4634013	0	1.9601257	0.562057	1.1
15	7.5089005	5.3901484	0	1.9495448	0.559023	1.1
16	7.7140223	5.3264139	0	1.9246461	0.5518834	1.1
17	7.919144	5.2718357	0	1.8859523	0.5407881	1.1
18	8.1242658	5.2261183	0	1.8338845	0.5258579	1.1
19	8.3293876	5.1890239	0	1.7687749	0.507188	1.1
20	8.5345094	5.1603658	0	1.6908767	0.4848511	1.1
21	8.7396312	5.1400035	0	1.6003708	0.458899	1.1
22	8.944753	5.1278389	0	1.497371	0.4293642	1.1
23	9.1498747	5.1238143	0	1.3819264	0.396261	1.1
24	9.3549965	5.1279107	0	1.2540233	0.3595854	1.1
25	9.5601183	5.1401474	0	1.1135841	0.3193151	1.1
26	9.7652401	5.1605826	0	0.9604662	0.2754092	1.1
27	9.9703619	5.1893146	0	0.7944574	0.227807	1.1
28	10.175484	5.2264844	0	0.6152708	0.1764261	1.1
29	10.380605	5.272279	0	0.4225365	0.1211604	1.1
30	10.585727	5.3269368	0	0.2157905	0.0618769	1.1

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 5 Corona del Talud con Sistema Vetiver y Geotextil

Método de análisis: Bishop

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.526 T/m³

Cohesión: 1.8 T/m²

Phi': 11°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.43 m

β: 21°

Resultados del análisis del talud

Radio: 5.6409787 m

Centro de giro: (8.562394; 9.449668) m

Volumen total: 20.8437 m³

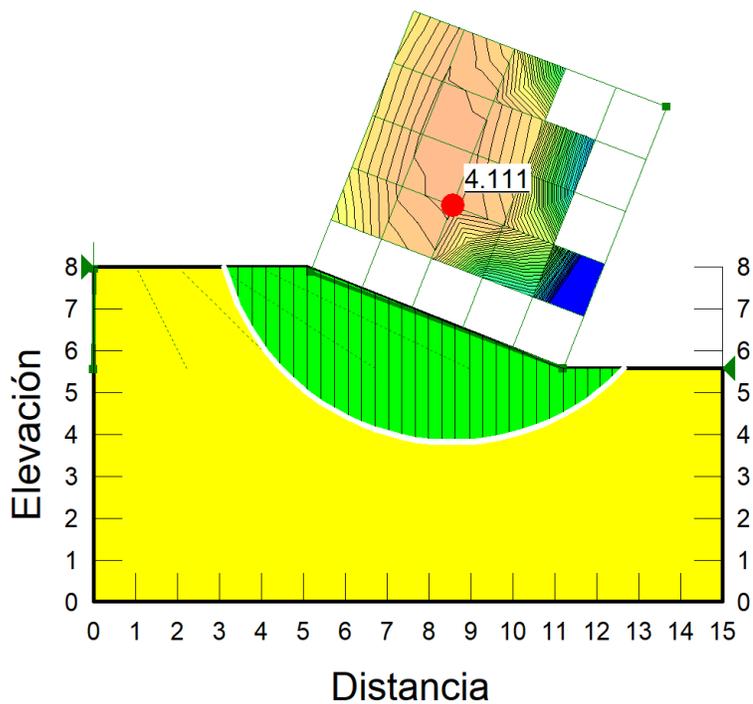
Peso total: 31.8074 Ton

Momento resistente total: 158.9722Ton-m

Momento actuante total: 38.6731Ton-m

FS: 4.111

Gráfica 35. Análisis de muestra 5 con el principio de dovelas Bishop



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 81. Resultados de muestra 5 del análisis de las dovelas en el análisis por el método Bishop

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.2766317	7.5409606	0	-0.4528088	-0.0880171	1.8
2	3.6081532	6.7748972	0	0.9732349	0.1891777	1.8
3	3.9396747	6.2298865	0	1.9407712	0.3772477	1.8
4	4.2711962	5.7971538	0	2.6972599	0.5242942	1.8
5	4.6027177	5.4387642	0	3.3211297	0.6455622	1.8
6	4.9342392	5.1357113	0	3.849551	0.7482769	1.8
7	5.2605263	4.8803041	0	4.2030471	0.8169896	1.8
8	5.5815789	4.6643137	0	4.3952931	0.8543584	1.8
9	5.9026316	4.4784348	0	4.5369338	0.8818906	1.8
10	6.2236842	4.3193704	0	4.634055	0.900769	1.8
11	6.5447368	4.1846754	0	4.691123	0.9118619	1.8
12	6.8657895	4.0725089	0	4.7114798	0.9158189	1.8
13	7.1868421	3.9814783	0	4.6976488	0.9131304	1.8
14	7.5078947	3.9105372	0	4.6515334	0.9041665	1.8
15	7.8289474	3.8589181	0	4.5745466	0.8892018	1.8
16	8.15	3.8260869	0	4.4676988	0.8684327	1.8
17	8.4710526	3.8117143	0	4.3316542	0.8419883	1.8
18	8.7921053	3.8156586	0	4.1667666	0.8099374	1.8
19	9.1131579	3.8379585	0	3.973097	0.7722918	1.8
20	9.4342105	3.8788353	0	3.7504167	0.7290072	1.8
21	9.7552632	3.9387036	0	3.4981951	0.6799803	1.8
22	10.076316	4.0181939	0	3.2155719	0.6250439	1.8
23	10.397368	4.1181871	0	2.9013085	0.5639572	1.8
24	10.718421	4.2398689	0	2.5537135	0.4963916	1.8
25	11.039474	4.3848102	0	2.1705305	0.4219084	1.8
26	11.345737	4.5460406	0	1.8610527	0.361752	1.8
27	11.637211	4.7235793	0	1.6265601	0.3161713	1.8
28	11.928684	4.9268674	0	1.3550151	0.2633883	1.8
29	12.220158	5.1595952	0	1.0416067	0.2024678	1.8
30	12.511632	5.4269261	0	0.6797584	0.1321317	1.8

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 6 Pie del Talud con Sistema Vetiver y Geotextil

Método de análisis: Bishop

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.448 T/m³

Cohesión: 1.6 T/m²

Phi': 25°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.41 m

β: 24°

Resultados del análisis del talud

Radio: 6.2397158 m

Centro de giro: (8.07348; 11.80805) m

Volumen total: 7.3223 m³

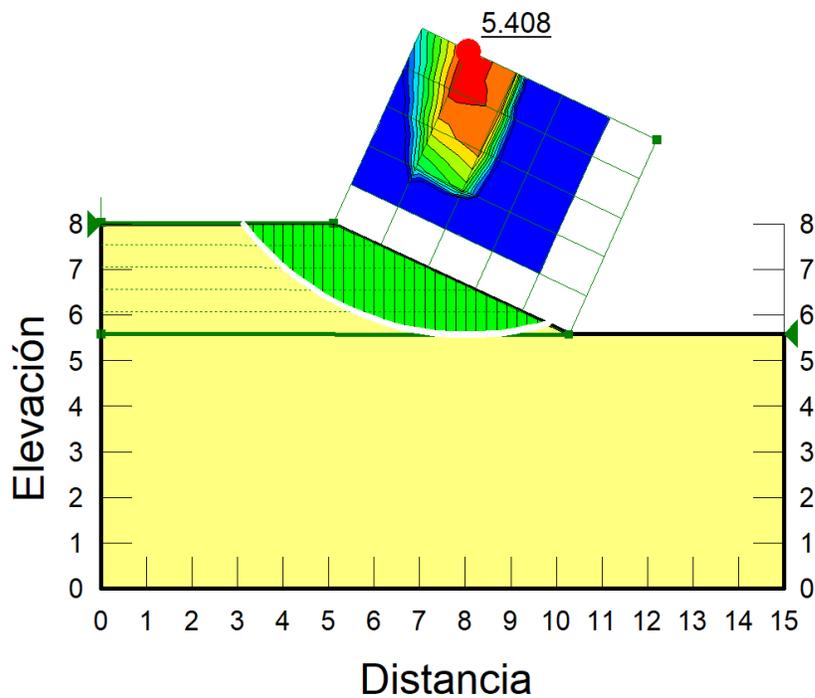
Peso total: 10.6028 Ton

Momento resistente total: 105.0078 Ton-m

Momento actuante total: 19.4180 Ton-m

FS: 5.408

Gráfica 36. Análisis de muestra 6 con el principio de dovelas Bishop



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 82. Resultados de muestra 6 del análisis de las dovelas por el método Bishop

No. Dovelas	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.2399398	7.8658458	0	-0.1523711	-0.0710518	1.6
2	3.4587704	7.6113773	0	0.2168526	0.10112	1.6
3	3.677601	7.3823841	0	0.5530881	0.2579092	1.6
4	3.8964317	7.1750577	0	0.8608668	0.4014288	1.6
5	4.1152623	6.9865849	0	1.1436011	0.5332699	1.6
6	4.3340929	6.8148194	0	1.4039339	0.6546651	1.6
7	4.5529235	6.6580821	0	1.6439585	0.7665904	1.6
8	4.7717541	6.5150329	0	1.8653616	0.8698324	1.6
9	4.9905847	6.3845852	0	2.069522	0.965034	1.6
10	5.2122141	6.2644713	0	2.1876853	1.0201344	1.6
11	5.4366423	6.1542186	0	2.2195452	1.0349909	1.6
12	5.6610706	6.054831	0	2.2352112	1.0422961	1.6
13	5.8854988	5.965753	0	2.2354674	1.0424156	1.6
14	6.109927	5.8865184	0	2.2209678	1.0356543	1.6
15	6.3343552	5.8167358	0	2.1922568	1.0222662	1.6
16	6.5587835	5.7560778	0	2.1497852	1.0024613	1.6
17	6.7832117	5.7042719	0	2.0939216	0.9764117	1.6
18	7.0076399	5.661094	0	2.0249625	0.9442555	1.6
19	7.2320681	5.626363	0	1.943139	0.9061006	1.6
20	7.4564964	5.5999369	0	1.848622	0.8620266	1.6
21	7.6809246	5.5817098	0	1.7415263	0.812087	1.6
22	7.9053528	5.5716099	0	1.6219126	0.7563103	1.6
23	8.129781	5.5695974	0	1.4897894	0.6947002	1.6
24	8.3542093	5.5756647	0	1.3451127	0.6272364	1.6
25	8.5786375	5.5898353	0	1.1877853	0.5538734	1.6
26	8.8030657	5.6121649	0	1.0176549	0.4745403	1.6
27	9.0274939	5.6427424	0	0.8345105	0.3891386	1.6
28	9.2519222	5.6816914	0	0.6380778	0.2975406	1.6
29	9.4763504	5.729173	0	0.4280132	0.1995859	1.6
30	9.7007786	5.7853893	0	0.203895	0.0950778	1.6

(Elaboración propia, 2017)

3) Método Morgenstern-Price

Análisis del talud

Muestra: 1 Corona del Sistema Vetiver
Método de análisis: Morgenstern- Price
Dirección de movimiento: izquierda a derecha
Número de dovelas: 30

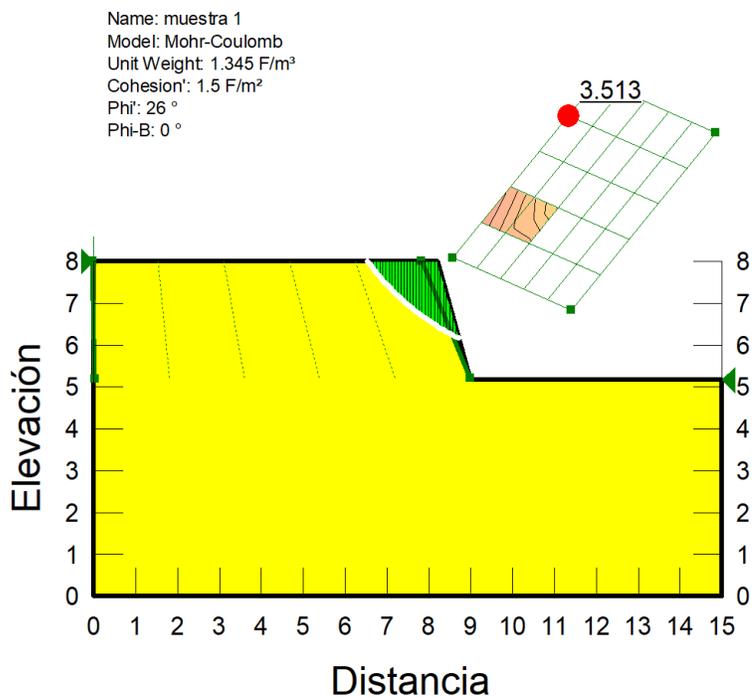
Propiedades del talud

Peso unitario: 1.345 T/m³
Cohesión: 1.5 T/m²
Phi': 26°
Phi-B: 0°
Altura (H): 2.84 m
β: 68°

Resultados del análisis del talud

Radio: 5.9111794 m
Centro de giro: (11.32633; 11.469664) m
Volumen total: 1.8541 m³
Peso total: 2.4937 Ton
Momento resistente total: 31.0903 Ton-m
Momento actuante total: 8.8488 Ton-m
FS: 3.513

Gráfica 37. Análisis de muestra 1 con el principio de dovelas Morgenstern-Price



Cuadro 83. Resultados de muestra 1 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	6.5766471	7.9513005	0	-0.3267313	-0.1593575	1.5
2	6.6487961	7.8559073	0	-0.0725242	-0.0353724	1.5
3	6.7209452	7.7643758	0	0.10090564	0.04921497	1.5
4	6.7930942	7.6764259	0	0.22678404	0.11060996	1.5
5	6.8652432	7.5918137	0	0.32303996	0.15755711	1.5
6	6.9373922	7.5103248	0	0.40012196	0.19515252	1.5
7	7.0095412	7.43177	0	0.46450608	0.22655475	1.5
8	7.0816902	7.3559809	0	0.52041824	0.25382493	1.5
9	7.1538393	7.2828073	0	0.57073961	0.27836831	1.5
10	7.2259883	7.2121141	0	0.61750853	0.30117904	1.5
11	7.2981373	7.1437796	0	0.66224509	0.32299851	1.5
12	7.3702863	7.0776937	0	0.70632082	0.34449568	1.5
13	7.4424353	7.0137562	0	0.75121925	0.36639411	1.5
14	7.5145843	6.9518759	0	0.79795741	0.38918983	1.5
15	7.5867334	6.8919693	0	0.84687867	0.41305033	1.5
16	7.6588824	6.8339597	0	0.89847073	0.43821345	1.5
17	7.7310314	6.7777769	0	0.95358413	0.46509406	1.5
18	7.8031804	6.7233559	0	1.013194	0.49416774	1.5
19	7.8753294	6.6706367	0	1.0782907	0.52591753	1.5
20	7.9474784	6.6195639	0	1.1498841	0.56083596	1.5
21	8.0196275	6.5700858	0	1.2290243	0.59943518	1.5
22	8.0917765	6.5221547	0	1.3168069	0.64224962	1.5
23	8.1639255	6.475726	0	1.4143576	0.68982827	1.5
24	8.2370586	6.4301645	0	1.4062345	0.68586639	1.5
25	8.3111758	6.3854698	0	1.269378	0.61911701	1.5
26	8.385293	6.342236	0	1.1040231	0.53846807	1.5
27	8.4594103	6.3004264	0	0.90258168	0.4402185	1.5
28	8.5335275	6.2600068	0	0.65706118	0.32047015	1.5
29	8.6076447	6.2209451	0	0.35954345	0.17536106	1.5
30	8.6817619	6.1832111	0	0.00294939	0.00143851	1.5

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 2 Pie del Sistema Vetiver
Método de análisis: Morgenstern- Price
Dirección de movimiento: izquierda a derecha
Número de dovelas: 30

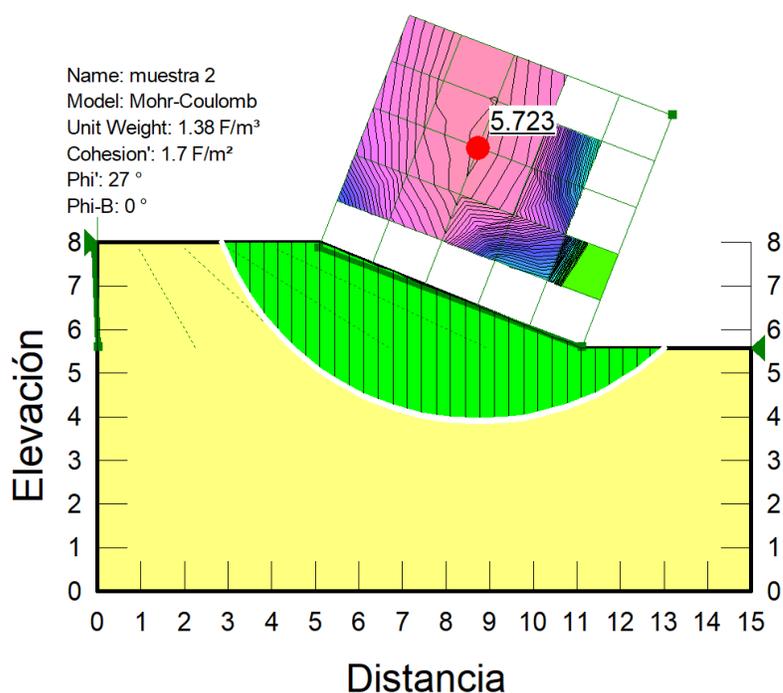
Propiedades del talud

Peso unitario: 1.38 T/m³
Cohesión: 1.7 T/m²
Phi': 27°
Phi-B: 0°
Altura (H): 2.43 m
β: 21°

Resultados del análisis del talud

Radio: 6.2643289 m
Centro de giro: (8.736164; 10.161704) m
Volumen total: 20.8700m³
Peso total: 28.8007 Ton
Momento resistente total: 229.0916 Ton-m
Momento actuante total: 40.0306Ton-m
FS: 5.723

Gráfica 38. Análisis de muestra 2 con el principio de dovelas Morgenstern-Price



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 84. Resultados de muestra 2 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.0168761	7.6370025	0	-0.134239	-0.0683982	1.7
2	3.3373567	7.000354	0	0.7382342	0.3761491	1.7
3	3.6578373	6.5042136	0	1.3931343	0.7098374	1.7
4	3.9783179	6.0942839	0	1.9251401	0.9809079	1.7
5	4.2987985	5.7458236	0	2.3774326	1.2113624	1.7
6	4.6192791	5.4449427	0	2.7742167	1.413534	1.7
7	4.9397597	5.1828965	0	3.1306115	1.5951262	1.7
8	5.2666667	4.9497641	0	3.3804704	1.7224357	1.7
9	5.6	4.7423672	0	3.5277641	1.7974856	1.7
10	5.9333333	4.5624881	0	3.6513057	1.8604332	1.7
11	6.2666667	4.4075311	0	3.7534392	1.9124728	1.7
12	6.6	4.2755182	0	3.8351793	1.9541215	1.7
13	6.9333333	4.1649274	0	3.8964914	1.9853615	1.7
14	7.2666667	4.0745867	0	3.9364874	2.0057405	1.7
15	7.6	4.0036017	0	3.9535793	2.0144493	1.7
16	7.9333333	3.9513065	0	3.9456131	2.0103903	1.7
17	8.2666667	3.9172301	0	3.9100002	1.9922446	1.7
18	8.6	3.9010743	0	3.8438556	1.9585422	1.7
19	8.9333333	3.9026997	0	3.7441494	1.9077394	1.7
20	9.2666667	3.9221203	0	3.607872	1.8383026	1.7
21	9.6	3.9595038	0	3.4322112	1.748799	1.7
22	9.9333333	4.0151789	0	3.2147319	1.6379877	1.7
23	10.2666667	4.0896504	0	2.9535485	1.5049081	1.7
24	10.6	4.1836229	0	2.6474722	1.3489545	1.7
25	10.9333333	4.2980375	0	2.2961163	1.1699297	1.7
26	11.258116	4.4300608	0	2.0076133	1.0229301	1.7
27	11.574348	4.580032	0	1.7854298	0.9097219	1.7
28	11.89058	4.7526402	0	1.523369	0.7761953	1.7
29	12.206812	4.9501469	0	1.2215541	0.6224129	1.7
30	12.523045	5.1755301	0	0.8802272	0.4484981	1.7

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 3 Corona del Talud con Sistema Vetiver y Geomanto

Método de análisis: Morgenstern- Price

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.448T/m³

Cohesión: 1.4 T/m²

Phi': 26°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.89 m

β: 25°

Resultados del análisis del talud

Radio: 7.5761185 m

Centro de giro: (8.83561; 12.57683) m

Volumen total: 10.6669 m³

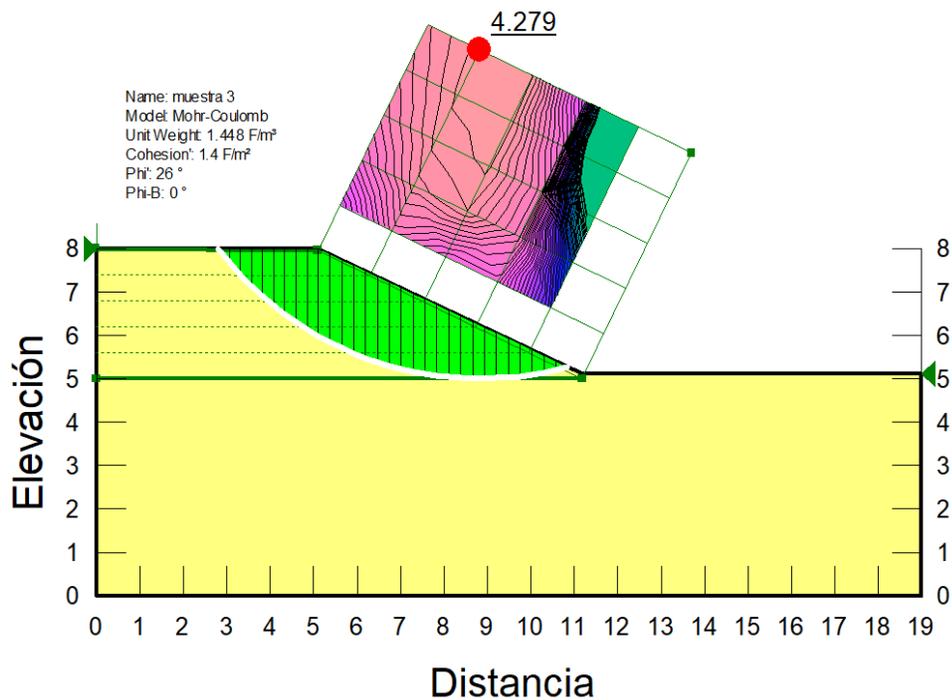
Peso total: 15.4457 Ton

Momento resistente total: 151.8361 Ton-m

Momento actuante total: 35.4860 Ton-m

FS: 4.272

Gráfica 39. Análisis de muestra 3 con el principio de dovelas Morgenstern-Price



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 85. Resultados de muestra 3 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	2.9260873	7.8404492	0	-0.1434274	-0.0699542	1.4
2	3.1818417	7.5374313	0	0.2821909	0.1376337	1.4
3	3.4375961	7.2640357	0	0.6510031	0.3175155	1.4
4	3.6933506	7.0158585	0	0.9771526	0.4765892	1.4
5	3.949105	6.7896347	0	1.270813	0.6198169	1.4
6	4.2048595	6.5828657	0	1.5395536	0.7508905	1.4
7	4.4606139	6.3935913	0	1.7891289	0.8726165	1.4
8	4.7163683	6.2202429	0	2.0239582	0.9871504	1.4
9	4.9721228	6.0615453	0	2.2474297	1.0961447	1.4
10	5.236981	5.9117564	0	2.3882974	1.1648505	1.4
11	5.5109429	5.7708827	0	2.4461006	1.193043	1.4
12	5.7849049	5.6436942	0	2.4937842	1.2162998	1.4
13	6.0588668	5.5294481	0	2.5309193	1.2344118	1.4
14	6.3328288	5.4275228	0	2.5566085	1.2469413	1.4
15	6.6067907	5.3373968	0	2.5695527	1.2532546	1.4
16	6.8807527	5.2586334	0	2.5681213	1.2525564	1.4
17	7.1547146	5.1908686	0	2.550433	1.2439293	1.4
18	7.4286766	5.1338014	0	2.5144513	1.2263798	1.4
19	7.7026385	5.0871869	0	2.4580983	1.1988947	1.4
20	7.9766005	5.0508307	0	2.3793857	1.160504	1.4
21	8.2505624	5.0245844	0	2.2765589	1.1103519	1.4
22	8.5245244	5.0083426	0	2.1482464	1.0477698	1.4
23	8.7984863	5.002041	0	1.9936032	0.9723453	1.4
24	9.0724482	5.0056546	0	1.8124317	0.883982	1.4
25	9.3464102	5.0191978	0	1.6052661	0.7829406	1.4
26	9.6203721	5.0427241	0	1.3734039	0.6698538	1.4
27	9.8943341	5.0763276	0	1.1188755	0.5457121	1.4
28	10.168296	5.1201447	0	0.8443461	0.4118151	1.4
29	10.442258	5.1743571	0	0.5529561	0.2696947	1.4
30	10.71622	5.2391954	0	0.2481124	0.1210125	1.4

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 4 Pie del Talud con Sistema Vetiver y Geomanto

Método de análisis: Morgenstern- Price

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.429 T/m³

Cohesión: 1.1T/m²

Phi': 16°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.84 m

β: 24°

Resultados del análisis del talud

Radio: 5.756754 m

Centro de giro: (7.962624; 10.879554) m

Volumen total: 6.5394 m³

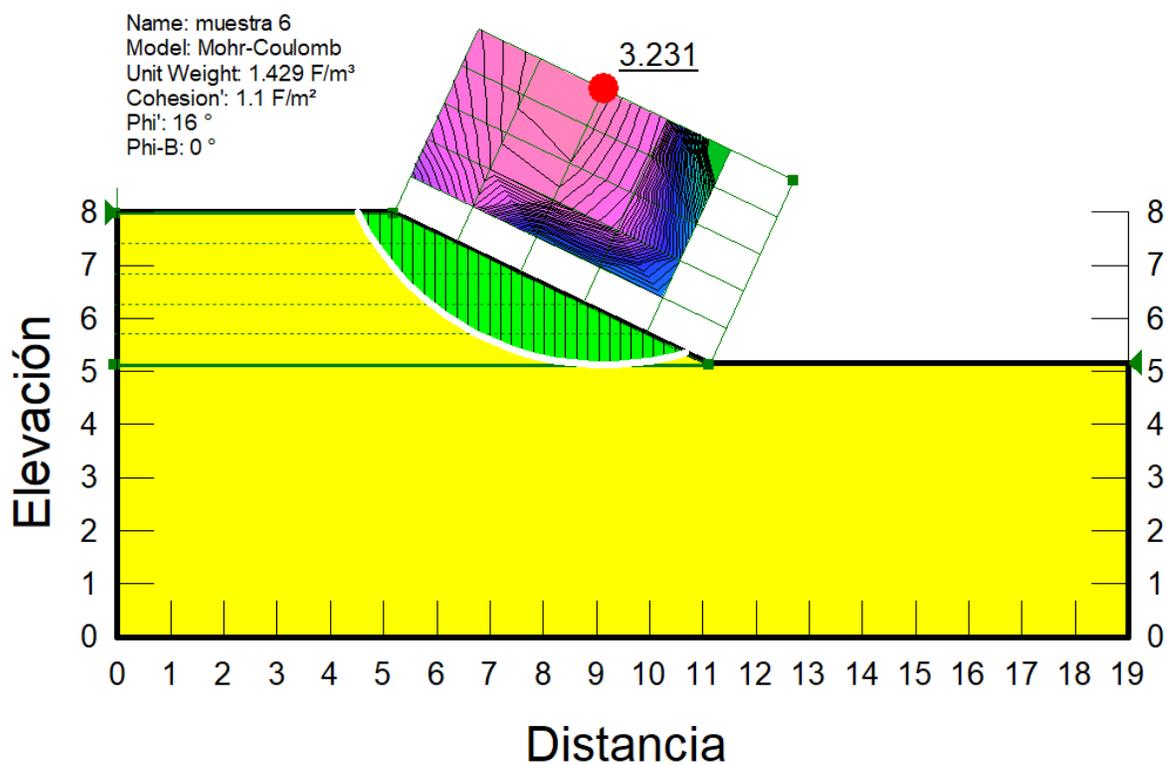
Peso total: 9.3447 Ton

Momento resistente total: 55.1996 Ton-m

Momento actuante total: 17.0860 Ton-m

FS: 3.231

Gráfica 40. Análisis de muestra 4 con el principio de dovelas Morgenstern-Price



Cuadro 86. Resultados de muestra 4 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	4.6126699	7.8052817	0	-0.2689109	-0.077109	1.1
2	4.827602	7.4482236	0	0.2629367	0.0753959	1.1
3	5.042534	7.1463435	0	0.6777352	0.1943374	1.1
4	5.2525609	6.8899203	0	0.956733	0.2743388	1.1
5	5.4576827	6.6690275	0	1.1273333	0.3232576	1.1
6	5.6628045	6.4718356	0	1.2687613	0.3638115	1.1
7	5.8679262	6.2948218	0	1.388486	0.398142	1.1
8	6.073048	6.1354011	0	1.4914852	0.4276765	1.1
9	6.2781698	5.9916138	0	1.5810841	0.4533686	1.1
10	6.4832916	5.8619363	0	1.6594368	0.4758359	1.1
11	6.6884134	5.7451611	0	1.7278174	0.4954437	1.1
12	6.8935351	5.6403167	0	1.7868042	0.5123579	1.1
13	7.0986569	5.5466128	0	1.8364041	0.5265804	1.1
14	7.3037787	5.4634013	0	1.8761417	0.537975	1.1
15	7.5089005	5.3901484	0	1.9051322	0.5462879	1.1
16	7.7140223	5.3264139	0	1.9221497	0.5511676	1.1
17	7.919144	5.2718357	0	1.9257	0.5521856	1.1
18	8.1242658	5.2261183	0	1.9141046	0.5488607	1.1
19	8.3293876	5.1890239	0	1.8856005	0.5406872	1.1
20	8.5345094	5.1603658	0	1.8384562	0.5271688	1.1
21	8.7396312	5.1400035	0	1.7711026	0.5078555	1.1
22	8.944753	5.1278389	0	1.6822725	0.4823839	1.1
23	9.1498747	5.1238143	0	1.5711387	0.4505168	1.1
24	9.3549965	5.1279107	0	1.4374363	0.4121782	1.1
25	9.5601183	5.1401474	0	1.2815543	0.3674798	1.1
26	9.7652401	5.1605826	0	1.1045823	0.3167339	1.1
27	9.9703619	5.1893146	0	0.9082975	0.2604501	1.1
28	10.175484	5.2264844	0	0.6950897	0.1993138	1.1
29	10.380605	5.272279	0	0.4678253	0.1341467	1.1
30	10.585727	5.3269368	0	0.2296612	0.0658543	1.1

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 5 Corona del Talud con Sistema Vetiver y Geotextil

Método de análisis: Morgenstern- Price

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.526 T/m³

Cohesión: 1.8 T/m²

Phi': 11°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.43 m

β: 21°

Resultados del análisis del talud

Radio: 5.6409787 m

Centro de giro: (8.562394; 9.449668) m

Volumen total: 20.8437 m³

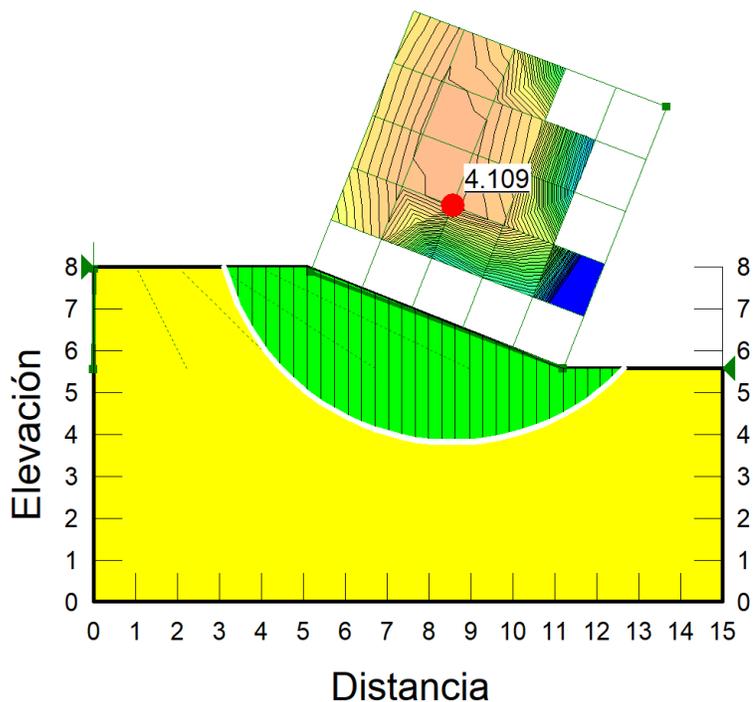
Peso total: 31.8074 Ton

Momento resistente total: 158.8891 Ton-m

Momento actuante total: 38.6731Ton-m

FS: 4.109

Gráfica 41. Análisis de muestra 5 con el principio de dovelas Morgenstern-Price



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 87. Resultados de muestra 5 del análisis de las dovelas por el método Morgenstern-Price

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.2766317	7.5409606	0	-0.4321719	-0.0840057	1.8
2	3.6081532	6.7748972	0	0.9594949	0.1865069	1.8
3	3.9396747	6.2298865	0	1.856963	0.360957	1.8
4	4.2711962	5.7971538	0	2.5408454	0.4938903	1.8
5	4.6027177	5.4387642	0	3.1005546	0.6026868	1.8
6	4.9342392	5.1357113	0	3.5784925	0.6955885	1.8
7	5.2605263	4.8803041	0	3.9037586	0.7588138	1.8
8	5.5815789	4.6643137	0	4.0904218	0.7950975	1.8
9	5.9026316	4.4784348	0	4.2426198	0.8246818	1.8
10	6.2236842	4.3193704	0	4.3650008	0.8484702	1.8
11	6.5447368	4.1846754	0	4.460196	0.8669743	1.8
12	6.8657895	4.0725089	0	4.5293626	0.8804189	1.8
13	7.1868421	3.9814783	0	4.5725359	0.8888109	1.8
14	7.5078947	3.9105372	0	4.5888781	0.8919875	1.8
15	7.8289474	3.8589181	0	4.5768718	0.8896538	1.8
16	8.15	3.8260869	0	4.5344856	0.8814147	1.8
17	8.4710526	3.8117143	0	4.4593274	0.8668054	1.8
18	8.7921053	3.8156586	0	4.3487956	0.8453202	1.8
19	9.1131579	3.8379585	0	4.2002301	0.816442	1.8
20	9.4342105	3.8788353	0	4.011064	0.7796719	1.8
21	9.7552632	3.9387036	0	3.7789701	0.7345574	1.8
22	10.076316	4.0181939	0	3.5019948	0.6807188	1.8
23	10.397368	4.1181871	0	3.1786674	0.6178704	1.8
24	10.718421	4.2398689	0	2.8080719	0.5458339	1.8
25	11.039474	4.3848102	0	2.3898667	0.464543	1.8
26	11.345737	4.5460406	0	2.0417277	0.3968717	1.8
27	11.637211	4.7235793	0	1.7676732	0.3436009	1.8
28	11.928684	4.9268674	0	1.4527371	0.2823835	1.8
29	12.220158	5.1595952	0	1.0959134	0.213024	1.8
30	12.511632	5.4269261	0	0.695798	0.1352494	1.8

(Elaboración propia, 2017)

Análisis del talud

Muestra: 6 Pie del Talud con Sistema Vetiver y Geotextil

Método de análisis: Morgenstern- Price

Dirección de movimiento: izquierda a derecha

Número de dovelas: 30

Propiedades del talud

Peso unitario: 1.448 T/m³

Cohesión: 1.6 T/m²

Phi': 25°

Phi-B: 0°

Altura (H): 2.41 m

β: 24°

Resultados del análisis del talud

Radio: 6.2397158 m

Centro de giro: (8.07348; 11.80805) m

Volumen total: 7.3223 m³

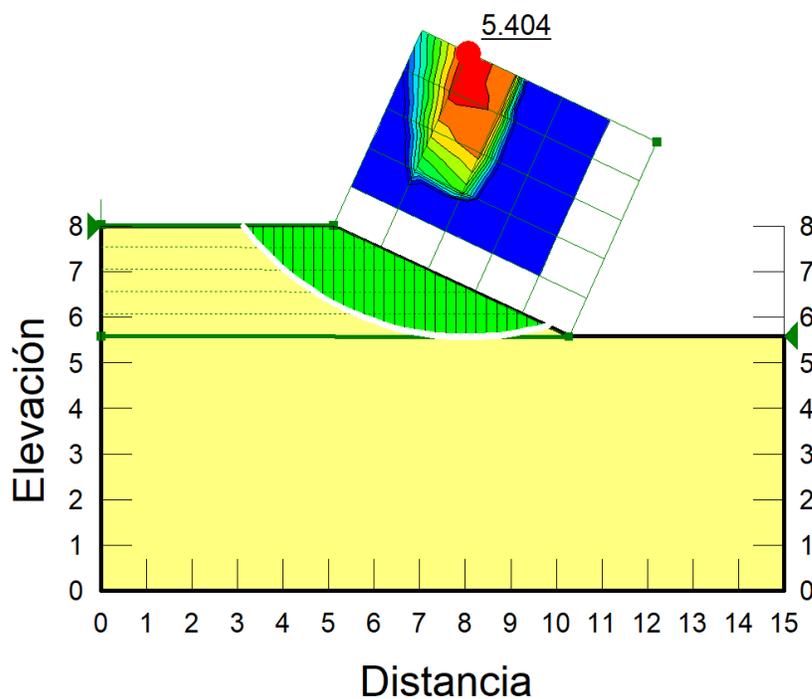
Peso total: 10.6028 Ton

Momento resistente total: 104.9393 Ton-m

Momento actuante total: 19.4180 Ton-m

FS: 5.404

Gráfica 42. Análisis de muestra 6 con el principio de dovelas Morgenstern-Price



(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 88. Resultados de muestra 6 del análisis de las dovelas en el análisis por el método Morgenstern-Price

No. Dovela	X (m)	Y (m)	PWP (F/m ²)	Esfuerzo normal en la base (Ton/m ²)	Fuerza de fricción (Ton/m ²)	Fuerza de cohesión (Ton/m ²)
1	3.2399398	7.8658458	0	-0.1420555	-0.0662416	1.6
2	3.4587704	7.6113773	0	0.2300605	0.107279	1.6
3	3.677601	7.3823841	0	0.5506033	0.2567505	1.6
4	3.8964317	7.1750577	0	0.8325281	0.3882142	1.6
5	4.1152623	6.9865849	0	1.085044	0.5059644	1.6
6	4.3340929	6.8148194	0	1.314933	0.6131633	1.6
7	4.5529235	6.6580821	0	1.5273	0.7121917	1.6
8	4.7717541	6.5150329	0	1.7260253	0.8048588	1.6
9	4.9905847	6.3845852	0	1.9140488	0.8925356	1.6
10	5.2122141	6.2644713	0	2.029411	0.9463299	1.6
11	5.4366423	6.1542186	0	2.072085	0.9662291	1.6
12	5.6610706	6.054831	0	2.1059522	0.9820216	1.6
13	5.8854988	5.965753	0	2.130672	0.9935487	1.6
14	6.109927	5.8865184	0	2.1455635	1.0004927	1.6
15	6.3343552	5.8167358	0	2.1496588	1.0024023	1.6
16	6.5587835	5.7560778	0	2.1417597	0.998719	1.6
17	6.7832117	5.7042719	0	2.1205006	0.9888057	1.6
18	7.0076399	5.661094	0	2.0844207	0.9719813	1.6
19	7.2320681	5.626363	0	2.0320465	0.9475588	1.6
20	7.4564964	5.5999369	0	1.9619847	0.9148885	1.6
21	7.6809246	5.5817098	0	1.8730216	0.8734043	1.6
22	7.9053528	5.5716099	0	1.7642235	0.822671	1.6
23	8.129781	5.5695974	0	1.6350317	0.7624278	1.6
24	8.3542093	5.5756647	0	1.4853413	0.692626	1.6
25	8.5786375	5.5898353	0	1.3155548	0.6134533	1.6
26	8.8030657	5.6121649	0	1.1266028	0.5253435	1.6
27	9.0274939	5.6427424	0	0.9199225	0.4289669	1.6
28	9.2519222	5.6816914	0	0.697395	0.3252006	1.6
29	9.4763504	5.729173	0	0.4612411	0.2150803	1.6
30	9.7007786	5.7853893	0	0.2138848	0.0997361	1.6

(Elaboración propia, 2017)

3. Análisis de estabilidad del talud en el año 2012

Cuadro 89. Resumen de datos obtenidos en el año 2012

Muestra	Tramo	Culmann	Proceso de Masa	Dovelas			% de contribución
				Newmark	Bishop	Morgenstern-Price	
1	Solo Vetiver	11.27	5.75	5.93	6.14	6.11	1.04%
2	Solo Vetiver	6.43	3.50	3.61	3.36	3.35	15.03%
3	Geomanto	1.29	3.31	1.31	1.37	1.40	1.61%
4	Geomanto	6.43	3.50	3.61	3.36	3.35	37.15%
5	Geotextil	12.96	5.50	5.53	5.92	5.91	0.95%
6	Geotextil	49.66	11.00	16.59	17.13	17.19	26.61%

(Rivas, Diez Recinos, & Alvizures, 2012)

C. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS A LAS RAÍCES DEL VETIVER

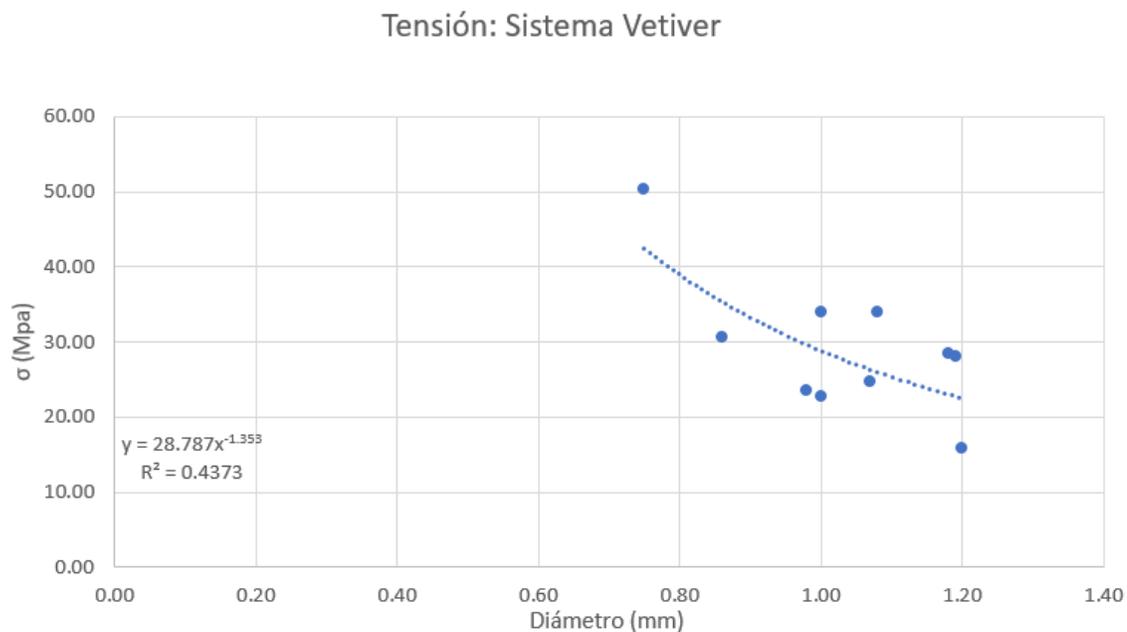
1. Ensayos de tensión

Cuadro 90. Resultados de ensayo de tensión de raíces de Sistema Vetiver

No. de muestra	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Carga soportada (lb)	Área (mm ²)	Carga soportada (N)	σ (Mpa)
1.00	1.00	80.00	6.00	0.79	26.69	33.98
2.00	1.18	75.00	7.00	1.09	31.14	28.47
3.00	1.20	55.00	4.00	1.13	17.79	15.73
4.00	1.07	55.00	5.00	0.90	22.24	24.73
5.00	0.98	70.00	4.00	0.75	17.79	23.59
6.00	1.00	45.00	4.00	0.79	17.79	22.65
7.00	1.08	40.00	7.00	0.92	31.14	33.99
8.00	0.86	40.00	4.00	0.58	17.79	30.63
9.00	0.75	40.00	5.00	0.44	22.24	50.34
10.00	1.19	60.00	7.00	1.11	31.14	27.99
Promedio					23.57	29.21
Máximo					31.14	50.34
Mínimo					17.79	15.73
Desviación Estandar					5.95	9.26

(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 43. Esfuerzo de tensión vs. diámetro de Sistema Vetiver



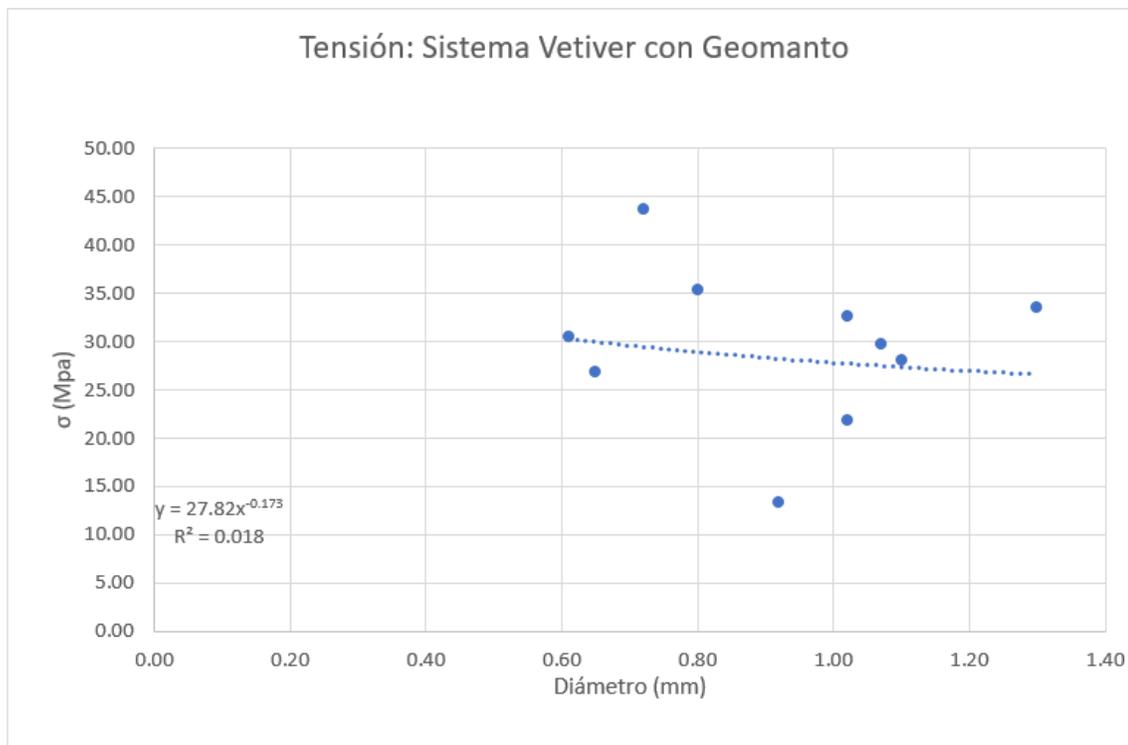
(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 91. Resultados de ensayo de tensión de raíces de Sistema Vetiver combinado con geomanta

No. de muestra	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Carga soportada (lb)	Área (mm ²)	Carga soportada (N)	σ (Mpa)
1.00	1.10	200.00	6.00	0.95	26.69	28.08
2.00	1.30	100.00	10.00	1.33	44.48	33.51
3.00	0.61	75.00	2.00	0.29	8.90	30.44
4.00	1.02	100.00	4.00	0.82	17.79	21.77
5.00	1.02	120.00	6.00	0.82	26.69	32.66
6.00	0.80	125.00	4.00	0.50	17.79	35.40
7.00	0.65	110.00	2.00	0.33	8.90	26.81
8.00	0.72	110.00	4.00	0.41	17.79	43.70
9.00	0.92	90.00	2.00	0.66	8.90	13.38
10.00	1.07	50.00	6.00	0.90	26.69	29.68
Promedio					20.46	29.54
Máximo					44.48	43.70
Mínimo					8.90	13.38
Desviación Estandar					11.13	8.11

(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 44. Esfuerzo de tensión vs. diámetro de Sistema Vetiver combinado con geomanta



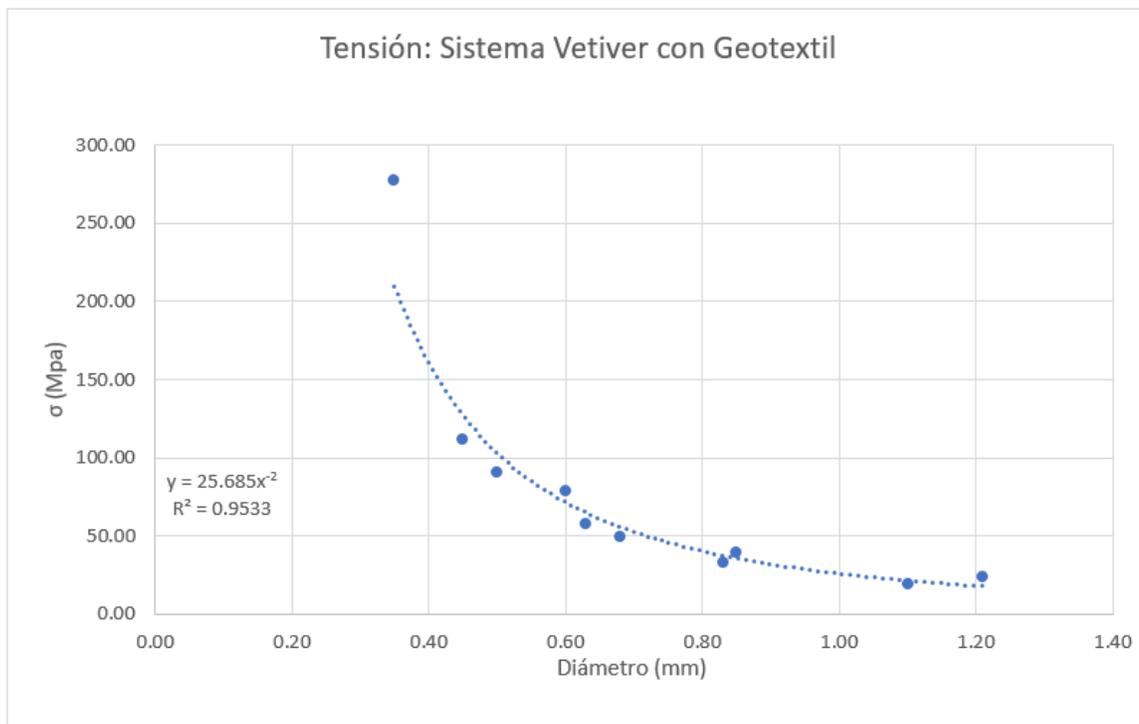
(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 92. Resultados de ensayo de tensión de raíces de Sistema Vetiver combinado con geotextil

No. de muestra	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Carga soportada (lb)	Área (mm ²)	Carga soportada (N)	σ (Mpa)	
1.00	0.83	60.00	4.00	0.54	17.79	32.88	
2.00	0.85	60.00	5.00	0.57	22.24	39.19	
3.00	0.50	90.00	4.00	0.20	17.79	90.61	
4.00	0.60	40.00	5.00	0.28	22.24	78.66	
5.00	0.68	55.00	4.00	0.36	17.79	48.99	
6.00	0.45	40.00	4.00	0.16	17.79	111.87	
7.00	1.21	60.00	6.00	1.15	26.69	23.21	
8.00	1.10	40.00	4.00	0.95	17.79	18.72	
9.00	0.63	45.00	4.00	0.31	17.79	57.08	
10.00	0.35	40.00	6.00	0.10	26.69	277.39	
					Promedio	20.46	77.86
					Máximo	26.69	277.39
					Mínimo	17.79	18.72
					Desviación Estandar	3.75	76.30

(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 45. Esfuerzo de tensión vs. diámetro de Sistema Vetiver combinado con geotextil



(Elaboración propia, 2017)

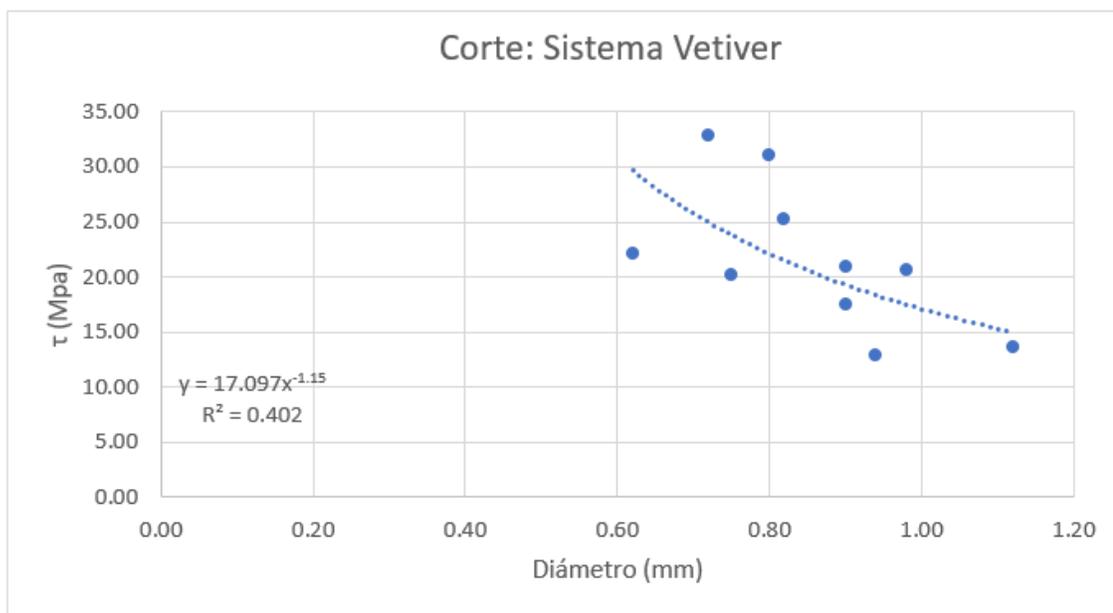
2. Ensayos de corte

Cuadro 93. Resultados de ensayo de corte de raíces de Sistema Vetiver combinado

No. de raíz	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Carga soportada (lb)	Área (mm ²)	Carga soportada (N)	τ (Mpa)
1.00	0.90	280.00	6.00	0.64	26.69	20.98
2.00	0.82	220.00	6.00	0.53	26.69	25.27
3.00	1.12	150.00	6.00	0.99	26.69	13.54
4.00	0.94	160.00	4.00	0.69	17.79	12.82
5.00	0.75	280.00	4.00	0.44	17.79	20.14
6.00	0.98	200.00	7.00	0.75	31.14	20.64
7.00	0.72	110.00	6.00	0.41	26.69	32.77
8.00	0.80	130.00	7.00	0.50	31.14	30.97
9.00	0.62	150.00	3.00	0.30	13.34	22.10
10.00	0.90	120.00	5.00	0.64	22.24	17.48
Promedio					24.02	21.67
Máximo					31.14	32.77
Mínimo					13.34	12.82
Desviación Estandar					6.00	6.57

(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 46. Esfuerzo de corte vs. diámetro de Sistema Vetiver



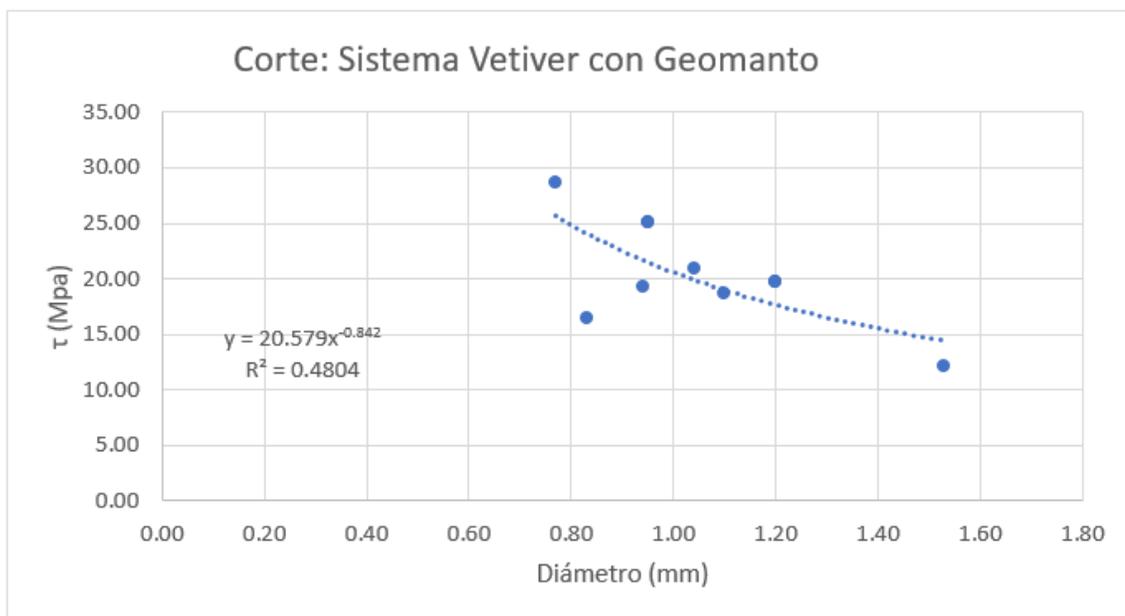
(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 94. Resultados de ensayo de corte de raíces de Sistema Vetiver combinado con geomanta

No. de raíz	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Carga soportada (lb)	Área (mm ²)	Carga soportada (N)	τ (Mpa)
1.00	1.20	300.00	10.00	1.13	44.48	19.66
2.00	1.20	124.00	10.00	1.13	44.48	19.66
3.00	0.95	240.00	8.00	0.71	35.58	25.10
4.00	0.95	120.00	8.00	0.71	35.58	25.10
5.00	1.04	320.00	8.00	0.85	35.58	20.94
6.00	1.53	320.00	10.00	1.84	44.48	12.10
7.00	0.77	310.00	6.00	0.47	26.69	28.66
8.00	0.94	340.00	6.00	0.69	26.69	19.23
9.00	0.83	230.00	4.00	0.54	17.79	16.44
10.00	1.10	210.00	8.00	0.95	35.58	18.72
Promedio					34.69	20.56
Máximo					44.48	28.66
Mínimo					17.79	12.10
Desviación Estandar					8.85	4.74

(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 47. Esfuerzo de corte vs. diámetro de Sistema Vetiver combinado con geomanta



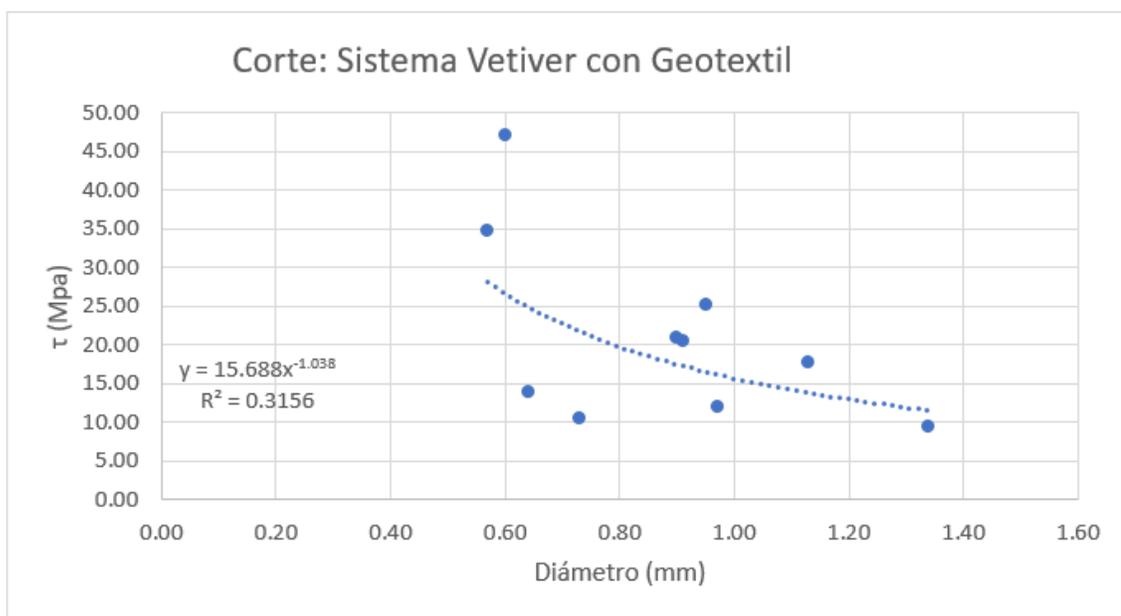
(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 95. Resultados de ensayo de corte de raíces de Sistema Vetiver combinado con geotextil

No. de raíz	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Carga soportada (lb)	Área (mm ²)	Carga soportada (N)	τ (Mpa)
1.00	0.57	190.00	4.00	0.26	17.79	34.86
2.00	0.64	180.00	2.00	0.32	8.90	13.83
3.00	0.97	220.00	4.00	0.74	17.79	12.04
4.00	0.91	160.00	6.00	0.65	26.69	20.52
5.00	0.95	160.00	8.00	0.71	35.58	25.10
6.00	1.34	140.00	6.00	1.41	26.69	9.46
7.00	0.90	180.00	6.00	0.64	26.69	20.98
8.00	1.13	170.00	8.00	1.00	35.58	17.74
9.00	0.73	190.00	2.00	0.42	8.90	10.63
10.00	0.60	200.00	6.00	0.28	26.69	47.19
Promedio					23.13	21.23
Máximo					35.58	47.19
Mínimo					8.90	9.46
Desviación Estandar					9.56	11.92

(Elaboración propia, 2017)

Gráfica 48. Esfuerzo de corte vs. diámetro de Sistema Vetiver combinado con geotextil



(Elaboración propia, 2017)

D. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

1. Ensayo con permeámetro de carga constante

Cuadro 96. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante antes de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver

Sistema Vetiver									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidráulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	810.00	650.00	84.50	1.246	11.60	79.359	0.0022	0.0216
2	Pie del talud	810.00	771.00	84.50	1.051	11.60	79.359	0.0018	0.0182
3	Corona del talud	800.00	223.00	84.50	3.587	11.60	79.359	0.0062	0.0621
4	Corona del talud	800.00	254.00	84.50	3.150	11.60	79.359	0.0054	0.0545

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 97. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante antes de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geomanta

Sistema Vetiver con Geomanto									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidráulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	800.00	594.00	84.50	1.347	11.60	79.359	0.0023	0.0233
2	Pie del talud	800.00	629.00	84.50	1.272	11.60	79.359	0.0022	0.0220
3	Corona del talud	820.00	76.00	84.50	10.789	11.60	79.359	0.0187	0.1866
4	Corona del talud	830.00	102.00	84.50	8.137	11.60	79.359	0.0141	0.1408

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 98. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante antes de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geotextil

Sistema Vetiver con geotextil									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	810.00	409.00	84.50	1.980	11.60	79.359	0.0034	0.0343
2	Pie del talud	800.00	295.00	84.50	2.712	11.60	79.359	0.0047	0.0469
3	Corona del talud	800.00	746.00	84.50	1.072	11.60	79.359	0.0019	0.0186
4	Corona del talud	800.00	878.00	84.50	0.911	11.60	79.359	0.0016	0.0158

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 99. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver

Sistema Vetiver									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	800.00	264.00	84.50	3.030	11.60	79.359	0.0052	0.0524
2	Pie del talud	800.00	326.00	84.50	2.454	11.60	79.359	0.0042	0.0425
3	Corona del talud	840.00	115.00	84.50	7.304	11.60	79.359	0.0126	0.1264
4	Corona del talud	820.00	98.00	84.50	8.367	11.60	79.359	0.0145	0.1447

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 100. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geomanta

Sistema Vetiver con Geomanto									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	800.00	180.00	84.50	4.444	11.60	79.359	0.0077	0.0769
2	Pie del talud	800.00	170.00	84.50	4.706	11.60	79.359	0.0081	0.0814
3	Corona del talud	800.00	266.00	84.50	3.008	11.60	79.359	0.0052	0.0520
4	Corona del talud	800.00	356.00	84.50	2.247	11.60	79.359	0.0039	0.0389

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 101. Resultados de ensayo con permeámetro de carga constante después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geotextil

Sistema Vetiver con geotextil									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	800.00	281.00	84.50	2.847	11.60	79.359	0.0049	0.0492
2	Pie del talud	800.00	363.00	84.50	2.204	11.60	79.359	0.0038	0.0381
3	Corona del talud	800.00	586.00	84.50	1.365	11.60	79.359	0.0024	0.0236
4	Corona del talud	800.00	738.00	84.50	1.084	11.60	79.359	0.0019	0.0188

(Elaboración propia, 2017)

2. Slug test

Cuadro 102. Resultados de ensayo Slug test antes de lluvia en tramo de Sistema Vetiver

Sistema Vetiver									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	1368.11	755.00	30.00	1.812	70.00	45.604	0.093	0.927
2	Pie del talud	1368.11	857.00	30.00	1.596	70.00	45.604	0.082	0.817
3	Corona del talud	1368.11	705.00	30.00	1.941	70.00	45.604	0.099	0.993
4	Corona del talud	1368.11	614.00	30.00	2.228	70.00	45.604	0.114	1.140

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 103. Resultados de ensayo Slug test antes de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geomanta

Sistema Vetiver con Geomanto									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	1368.11	834.00	30.00	1.640	70.00	45.604	0.084	0.839
2	Pie del talud	1368.11	666.00	30.00	2.054	70.00	45.604	0.105	1.051
3	Corona del talud	1368.11	620.00	30.00	2.207	70.00	45.604	0.113	1.129
4	Corona del talud	1368.11	502.00	30.00	2.725	70.00	45.604	0.139	1.394

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 104. Resultados de ensayo Slug test antes de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con geotextil

Sistema Vetiver con geotextil									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	1368.11	759.00	30.00	1.803	70.00	45.604	0.092	0.922
2	Pie del talud	1368.11	485.00	30.00	2.821	70.00	45.604	0.144	1.443
3	Corona del talud	1368.11	707.00	30.00	1.935	70.00	45.604	0.099	0.990
4	Corona del talud	1368.11	913.00	30.00	1.498	70.00	45.604	0.077	0.767

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 105. Resultados de ensayo Slug test después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver

Sistema Vetiver									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	1368.11	665.00	30.00	2.057	70.00	45.604	0.105	1.053
2	Pie del talud	1368.11	623.00	30.00	2.196	70.00	45.604	0.112	1.124
3	Corona del talud	1368.11	675.00	30.00	2.027	70.00	45.604	0.104	1.037
4	Corona del talud	1368.11	614.00	30.00	2.228	70.00	45.604	0.114	1.140

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 106. Resultados de ensayo Slug test después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con Geomanto

Sistema Vetiver con Geomanto									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	1368.11	758.00	30.00	1.805	70.00	45.604	0.092	0.923
2	Pie del talud	1368.11	650.00	30.00	2.105	70.00	45.604	0.108	1.077
3	Corona del talud	1368.11	560.00	30.00	2.443	70.00	45.604	0.125	1.250
4	Corona del talud	1368.11	434.00	30.00	3.152	70.00	45.604	0.161	1.613

(Elaboración propia, 2017)

Cuadro 107. Resultados de ensayo Slug test después de época de lluvia en tramo de Sistema Vetiver combinado con Geotextil

Sistema Vetiver con geotextil									
#Prueba	Lugar de muestra	Volumen de agua extraído (cm ³)	Tiempo (s)	Carga hidraulica (cm)	Caudal (cm ³ /s)	L(cm)	A(cm ²)	k (cm/s)	k (mm/s)
1	Pie del talud	1368.11	738.00	30.00	1.854	70.00	45.604	0.095	0.949
2	Pie del talud	1368.11	425.00	30.00	3.219	70.00	45.604	0.165	1.647
3	Corona del talud	1368.11	506.00	30.00	2.704	70.00	45.604	0.138	1.383
4	Corona del talud	1368.11	445.00	30.00	3.074	70.00	45.604	0.157	1.573

(Elaboración propia, 2017)

E. IMÁGENES

Imagen 12. Extracción de muestras



(Elaboración propia, 2017)

Imagen 13. Tramo de talud utilizando Sistema Vetiver



(Elaboración propia, 2017)

Imagen 14. Tramo de talud utilizando Sistema Vetiver combinado con geomanto



(Elaboración propia, 2017)

Imagen 15. Tramo de talud utilizando Sistema Vetiver combinado con Geotextil



(Elaboración propia, 2017)

Imagen 16. Extracción de muestras



(Elaboración propia, 2017)

Imagen 17. Ensayo de permeabilidad en laboratorio



(Elaboración propia, 2017)

Imagen 18. Ensayo de tensión en raíces



(Elaboración propia, 2017)

Imagen 19. Ensayo de corte en raíces



(Elaboración propia, 2017)