

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS TALUDES
DEL SECTOR OCCIDENTAL DE LA LOMA DEL PEYÉ, CASCO URBANO DE
CARTAGENA.**



JAIRO ALFONSO FONSECA PÉREZ

JORGE ANDRÉS RUIZ ARBOLEDA

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS

2015

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS TALUDES
DEL SECTOR OCCIDENTAL DE LA LOMA DEL PEYÉ, CASCO URBANO DE
CARTAGENA.**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN: GEOTECNIA, MATERIALES, VÍAS, TRANSITO
Y TRANSPORTE (GEOMAVIT)**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS DE GEOAMENAZAS EN CASCOS
URBANOS Y RURALES.**

INVESTIGADORES:

JAIRO ALFONSO FONSECA PÉREZ

JORGE ANDRÉS RUIZ ARBOLEDA

Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil

DIRECTOR

Guilliam Barboza Miranda

Ingeniero Civil, MSc. Geotecnia

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS



NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Jurado

MSc., Ramón Torres Ortega

Firma del Jurado

Esp., Modesto Barrios Fontalvo

Cartagena de Indias D. T. y C., ____ de _____ de 2015



DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Primeramente expresamos nuestro más grande agradecimiento a Dios, el creador de todo y por medio de quien hemos podido cumplir este tan anhelado sueño.

A nuestra familia fuente de apoyo constante e incondicional en toda la vida y más aún en nuestros duros años de carrera profesional; y en especial queremos expresar el más grande agradecimiento a nuestras madres las ya que sin su ayuda nos hubiera sido imposible culminar esta carrera.

A todos los docentes y compañeros de la Universidad de Cartagena del Programa de Ingeniería Civil, que contribuyeron en nuestra formación profesional para tener un mejor futuro, y en especial a la Ingeniera Cindy Contreras Pérez quien con su amistad desinteresada y calidad humana nos ayudó a llevar a cabo este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	21
ABSTRACT	24
INTRODUCCIÓN	25
1. MARCO DE REFERENCIA	30
1.1. MARCO TEÓRICO	30
1.1.1. Factor de seguridad	31
1.1.2. Superficie de falla.....	31
1.1.3. Tipos de deslizamientos en masa.	32
1.1.4. Métodos de equilibrio límite	34
1.1.5. Software Slide®.	42
1.2. ANTECEDENTES	42
2. OBJETIVOS	45
2.1. GENERAL	45
2.2. ESPECÍFICOS	45
3. ALCANCE.....	46
3.1. DELIMITACIÓN ESPACIAL	46
3.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL.....	48
3.3. ALCANCE DEL PROYECTO.....	48
4. METODOLOGÍA	53
4.1. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	55
4.1.1. Revisión bibliográfica de los antecedentes de los estudios realizados concernientes a la estabilidad de laderas en la Loma del Peyé.....	55
4.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.	56

4.2.1.	Topografía	56
4.2.2.	Geología y Geomorfología	57
4.2.3.	Hidrogeología	57
4.2.4.	Geotecnia y Sismicidad	57
4.3.	MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	57
4.4.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LA MODELACIÓN DEL SOFTWARE SLIDE® V.5	58
4.4.1.	Inspección Visual.	60
4.5.	CATEGORIZACIÓN DE CONDICIONES DE INESTABILIDAD.....	60
4.6.	DISEÑO CONCEPTUAL DE OBRAS DE MITIGACIÓN	60
5.	RESULTADOS.....	61
5.1.	ANÁLISIS DE LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	61
5.1.1.	Análisis de información de los antecedentes de los estudios realizados concernientes a la estabilidad de laderas en la Loma del Peyé	63
5.2.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.	64
5.2.1.	Topografía.	64
5.2.2.	Geología de área de estudio.....	67
5.2.3.	Geomorfología.....	77
5.2.4.	Hidrogeología	81
5.2.5.	Geotecnia y Sismicidad	82
5.3.	MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	98
5.4.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LA MODELACIÓN EN EL SOFTWARE SLIDE® V.5.....	100
5.4.1.	Mecanismos de falla	101
5.4.2.	Modelación en Software Slide® v.5	102



5.5.	CATEGORIZACIÓN DE CONDICIONES DE INESTABILIDAD.....	110
5.6.	DISEÑO CONCEPTUAL DE OBRAS DE MITIGACIÓN	114
5.6.1.	Inspección Visual.	115
5.6.2.	Obras de contención	118
5.6.3.	Obras de Bioingeniería.....	118
6.	CONCLUSIONES	122
7.	RECOMENDACIONES	124
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
	ANEXOS	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Falla de un talud.....	30
Figura 2. Superficie de falla en un talud.	32
Figura 3. Deslizamientos en suelos blandos.	32
Figura 4. Deslizamiento rotacional típico.	33
Figura 5. Deslizamiento Traslacional.	34
Figura 6. Fuerzas que actúan sobre la dovela.	37
Figura 7. El Método de las dovelas para suelos con ϕ' y c'	38
Figura 8. Diagrama para determinar el factor f_0 .- método de Janbu	39
Figura 9. Paralelismo de las fuerzas entre dovelas en el método de Spencer.	41
Figura 10. Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método de Spencer.	41
Figura 11. Loma del Peyé en años 80.	43
Figura 12. Localización de la ciudad de Cartagena de Indias y sector de estudio.....	46
Figura 13. Localización del área de estudio en la loma del Peyé.	47
Figura 14. Localidades pertenecientes de la loma del Peyé.....	48
Figura 15. Áreas Estudiadas (verde y rojo), área a estudiar (amarillo).....	50
Figura 16. Esquema metodológico aplicado en el desarrollo del estudio.	54
Figura 17. Esquema metodológico aplicado para el uso del software Slide® V.5.....	59
Figura 18. Plano topográfico del área de estudio.....	66
Figura 19. Afloramiento de las Arcillolitas limosas al sur del área de estudio.....	68
Figura 20. Detalles del afloramiento anterior. Izquierda: fracturas verticales con rellenos de yeso, orientación NS. Derecha: Estratificación horizontal de los estratos.....	68
Figura 21. Afloramiento de Areniscas arcillosas de grano fino, costado oriental de la loma del Peyé, por fuera del área de Estudio.	69
Figura 22. Afloramiento de arenas sueltas de grano fino a medio con concreciones arenosas calcáreas.	70
Figura 23. Limolitas arcillosas en el costado occidental del cerro.	71
Figura 24. Limolitas arcillosas en el costado oriental del cerro.....	72

Figura 25. Contacto entre caliza coralina ligeramente cementada de color crema amarillento, sobre limos calcáreos y margas de poca dureza.....	73
Figura 26. Detalles del afloramiento anterior. Contacto caliza coralina sobre limos calcáreos.....	73
Figura 27. Caliza margosa con fragmentos de corales, muy blanda, aspecto terroso sobre limolitas arcillosas en el costado occidental de cerro.	74
Figura 28. Corte geológico donde se ilustra la falla de dirección NW con inclinación al NE identificada en el área de estudio.	75
Figura 29. Plano Geológico del Área de Estudio.....	76
Figura 30. Plano de Geomorfología del área de estudio.	78
Figura 31. Mapa de pendientes de la zona de estudio.....	80
Figura 32. Valor del coeficiente de presión intersticial, r_u , para distintas posiciones del nivel freático en un talud de suelo.....	81
Figura 33. Localización Sondeos de Rotoperforación HQ y SPT ejecutados en el sector norte del área de estudio.....	84
Figura 34. Localización Sondeos de Rotoperforación HQ y SPT ejecutados en el sector sur del área de estudio.	85
Figura 35. Análisis sísmico pseudo-estático de equilibrio límite para falla circular	97
Figura 36. Localización de los perfiles estratigráficos trazados.	99
Figura 37. Categorización de la estabilidad de los taludes en el área de estudio, CS-CNA.	111
Figura 38. Categorización de la estabilidad de los taludes en el área de estudio, CS-SNA.	112
Figura 39. Categorización de la estabilidad de los taludes en el área de estudio, SS-CNA.	113
Figura 40. Localización de zonas con problemas de erosión pluvial (color café).	114
Figura 41. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas 10°25'39.71"N, 75°31'4.41"O.....	115
Figura 42. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas 10°25'30.13"N, 75°31'12.12"O.....	116

Figura 43. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas 10°25'27.97"N, 75°31'12.12"O.....	116
Figura 44. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas 10°25'25.50"N, 75°31'5.95"O.....	117
Figura 45. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas 10°25'25.52"N, 75°31'6.60"O.....	117
Figura 46. Detalle de Muro de contención recomendado para mitigación del Riesgo en laderas de Loma del Peyé.....	118
Figura 47. Superposición de mapa con problemas de erosión (zonas cafés) y mapa SS-CNA	120
Figura 48. Localización de obras conceptuales para mitigación del riesgo (líneas azules).	121

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Métodos de análisis de Estabilidad de Taludes.....	35
Tabla 2. Condiciones generales de los métodos, y parámetros utilizados.	51
Tabla 3. Clasificación de los factores de seguridad	59
Tabla 4. Información recopilada basada en el análisis de estabilidad de taludes.	62
Tabla 5. Información recopilada en los estudios realizados sobre la loma del Peyé.	63
Tabla 6. Características del BM de referencia.	65
Tabla 7. Coordenadas planas y profundidad de perforaciones ejecutadas por el método de Rotoperforación.....	85
Tabla 8. Coordenadas planas y profundidad de perforaciones ejecutadas por el método SPT.	86
Tabla 9. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por CI AMBIENTAL S.A.S., Pozo PC-1.	89
Tabla 10. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por CI AMBIENTAL S.A.S., Pozo PC-2.	90
Tabla 11. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por CI AMBIENTAL S.A.S., Pozo PC-4.	91
Tabla 12. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por CI AMBIENTAL S.A.S., Pozo PC-5.	92
Tabla 13. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por la Universidad de Cartagena a las muestras de suelo obtenidas por Roto-perforación.....	93
Tabla 14. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por la Universidad de Cartagena a las muestras obtenidas mediante el Ensayo de Penetración Estándar (SPT). ..	94
Tabla 15. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por la Universidad de Cartagena a las muestras obtenidas mediante el Ensayo de Penetración Estándar (SPT). ..	95
Tabla 16. Descripción de los estratos de suelo, de acuerdo a la geología del área y las perforaciones realizadas.	100
Tabla 17. Valores de parámetros geomecánicos utilizados.	101
Tabla 18. Clasificación de los factores de seguridad	102



Tabla 19. Factores de seguridad previos a la modelación en condición CS-CNA.	103
Tabla 20. Factores de seguridad previos a la modelación en condición CS-SNA.....	105
Tabla 21. Factores de seguridad previos a la modelación en condición SS-CNA.....	107
Sin embargo, la Tabla 22 muestra los factores de seguridad de algunos perfiles analizados mediante los métodos de Equilibrio Límite, los cuales muestran resultados con considerables variaciones entre algunos métodos.....	109
Tabla 23. Variaciones altas de F.S.....	109

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Perfil Estratigráfico N° 1.....	127
Anexo 2. Perfil Estratigráfico N° 2.....	128
Anexo 3. Perfil Estratigráfico N° 3.....	128
Anexo 4. Perfil Estratigráfico N° 4.....	129
Anexo 5. Perfil Estratigráfico N° 5.....	129
Anexo 6. Perfil Estratigráfico N° 6.....	130
Anexo 7. Perfil Estratigráfico N° 7.....	130
Anexo 8. Perfil Estratigráfico N° 8.....	131
Anexo 9. Perfil Estratigráfico N° 9.....	131
Anexo 10. Perfil Estratigráfico N° 10.....	132
Anexo 11. Perfil Estratigráfico N° 11.....	132
Anexo 12. Perfil Estratigráfico N° 12.....	133
Anexo 13. Perfil Estratigráfico N° 13.....	133
Anexo 14. Perfil Estratigráfico N° 14.....	134
Anexo 15. Perfil Estratigráfico N° 16.....	134
Anexo 16. Perfil Estratigráfico N° A-A'	135
Anexo 17. Perfil 1 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	136
Anexo 18. Perfil 1 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	136
Anexo 19. Perfil 1 modelado CS-CNA-Método Ordinario	137
Anexo 20. Perfil 1 modelado CS-CNA-Método de Spencer	137
Anexo 21. Perfil 2 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	138
Anexo 22. Perfil 2 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	138
Anexo 23. Perfil 2 modelado CS-CNA-Método Ordinario	139
Anexo 24. Perfil 2 modelado CS-CNA-Método de Spencer	139
Anexo 25. Perfil 3 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	140
Anexo 26. Perfil 3 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	140
Anexo 27. Perfil 3 modelado CS-CNA-Método Ordinario	141
Anexo 28. Perfil 3 modelado CS-CNA-Método de Spencer	141
Anexo 29. Perfil 4 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	142

Anexo 30. Perfil 4 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	142
Anexo 31. Perfil 4 modelado CS-CNA-Método Ordinario	143
Anexo 32. Perfil 4 modelado CS-CNA-Método de Spencer	143
Anexo 33. Perfil 5 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	144
Anexo 34. Perfil 5 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	144
Anexo 35. Perfil 5 modelado CS-CNA-Método Ordinario	145
Anexo 36. Perfil 5 modelado CS-CNA-Método de Spencer	145
Anexo 37. Perfil 6 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	146
Anexo 38. Perfil 6 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	146
Anexo 39. Perfil 6 modelado CS-CNA-Método Ordinario	147
Anexo 40. Perfil 6 modelado CS-CNA-Método de Spencer	147
Anexo 41. Perfil 7 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	148
Anexo 42. Perfil 7 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	148
Anexo 43. Perfil 7 modelado CS-CNA-Método Ordinario	149
Anexo 44. Perfil 7 modelado CS-CNA-Método de Spencer	149
Anexo 45. Perfil 8 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	150
Anexo 46. Perfil 8 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	150
Anexo 47. Perfil 8 modelado CS-CNA-Método Ordinario	151
Anexo 48. Perfil 8 modelado CS-CNA-Método de Spencer	151
Anexo 49. Perfil 9 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	152
Anexo 50. Perfil 9 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	152
Anexo 51. Perfil 9 modelado CS-CNA-Método Ordinario	153
Anexo 52. Perfil 9 modelado CS-CNA-Método de Spencer	153
Anexo 53. Perfil 10 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	154
Anexo 54. Perfil 10 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	154
Anexo 55. Perfil 10 modelado CS-CNA-Método Ordinario	155
Anexo 56. Perfil 10 modelado CS-CNA-Método de Spencer	155
Anexo 57. Perfil 11 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	156
Anexo 58. Perfil 11 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	156
Anexo 59. Perfil 11 modelado CS-CNA-Método Ordinario	157

Anexo 60. Perfil 11 modelado CS-CNA-Método de Spencer	157
Anexo 61. Perfil 12 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	158
Anexo 62. Perfil 12 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	158
Anexo 63. Perfil 12 modelado CS-CNA-Método Ordinario	159
Anexo 64. Perfil 12 modelado CS-CNA-Método de Spencer	159
Anexo 65. Perfil 13 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	160
Anexo 66. Perfil 13 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	160
Anexo 67. Perfil 13 modelado CS-CNA-Método Ordinario	161
Anexo 68. Perfil 13 modelado CS-CNA-Método de Spencer	161
Anexo 69. Perfil 14 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	162
Anexo 70. Perfil 14 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	162
Anexo 71. Perfil 14 modelado CS-CNA-Método Ordinario	163
Anexo 72. Perfil 14 modelado CS-CNA-Método de Spencer	163
Anexo 73. Perfil 15 modelado CS-CNA-Método de Bishop.....	164
Anexo 74. Perfil 15 modelado CS-CNA-Método de Jambu.....	164
Anexo 75. Perfil 15 modelado CS-CNA-Método Ordinario	165
Anexo 76. Perfil 15 modelado CS-CNA-Método de Spencer	165
Anexo 77. Perfil A N-S modelado CS-CNA-Método de Bishop	166
Anexo 78. Perfil A N-S modelado CS-CNA-Método de Jambu	166
Anexo 79. Perfil A N-S modelado CS-CNA-Método Ordinario	167
Anexo 80. Perfil A N-S modelado CS-CNA-Método de Spencer.....	167
Anexo 81. Perfil A S-N modelado CS-CNA-Método de Bishop	168
Anexo 82. Perfil A S-N modelado CS-CNA-Método de Jambu	168
Anexo 83. Perfil A S-N modelado CS-CNA-Método Ordinario	169
Anexo 84. Perfil A S-N modelado CS-CNA-Método de Spencer.....	169
Anexo 85. Perfil 1 modelado CS-SNA-Método de Bishop	170
Anexo 86. Perfil 1 modelado CS-SNA-Método de Jambu	170
Anexo 87. Perfil 1 modelado CS-SNA-Método Ordinario.....	171
Anexo 88. Perfil 1 modelado CS-SNA-Método de Spencer.....	171
Anexo 89. Perfil 2 modelado CS-SNA -Método de Bishop	172

Anexo 90. Perfil 2 modelado CS-SNA -Método de Jambu	172
Anexo 91. Perfil 2 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	173
Anexo 92. Perfil 2 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	173
Anexo 93. Perfil 3 modelado CS-SNA -Método de Bishop	174
Anexo 94. Perfil 3 modelado CS-SNA -Método de Jambu	174
Anexo 95. Perfil 3 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	175
Anexo 96. Perfil 3 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	175
Anexo 97. Perfil 4 modelado CS-SNA -Método de Bishop	176
Anexo 98. Perfil 4 modelado CS-SNA -Método de Jambu	176
Anexo 99. Perfil 4 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	177
Anexo 100. Perfil 4 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	177
Anexo 101. Perfil 5 modelado CS-SNA -Método de Bishop	178
Anexo 102. Perfil 5 modelado CS-SNA -Método de Jambu	178
Anexo 103. Perfil 5 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	179
Anexo 104. Perfil 5 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	179
Anexo 105. Perfil 6 modelado CS-SNA -Método de Bishop	180
Anexo 106. Perfil 6 modelado CS-SNA -Método de Jambu	180
Anexo 107. Perfil 6 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	181
Anexo 108. Perfil 6 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	181
Anexo 109. Perfil 7 modelado CS-SNA -Método de Bishop	182
Anexo 110. Perfil 7 modelado CS-SNA -Método de Jambu	182
Anexo 111. Perfil 7 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	183
Anexo 112. Perfil 7 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	183
Anexo 113. Perfil 8 modelado CS-SNA -Método de Bishop	184
Anexo 114. Perfil 8 modelado CS-SNA -Método de Jambu	184
Anexo 115. Perfil 8 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	185
Anexo 116. Perfil 8 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	185
Anexo 117. Perfil 9 modelado CS-SNA -Método de Bishop	186
Anexo 118. Perfil 9 modelado CS-SNA -Método de Jambu	186
Anexo 119. Perfil 9 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	187

Anexo 120. Perfil 9 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	187
Anexo 121. Perfil 10 modelado CS-SNA -Método de Bishop	188
Anexo 122. Perfil 10 modelado CS-SNA -Método de Jambu	188
Anexo 123. Perfil 10 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	189
Anexo 124. Perfil 10 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	189
Anexo 125. Perfil 11 modelado CS-SNA -Método de Bishop	190
Anexo 126. Perfil 11 modelado CS-SNA -Método de Jambu	190
Anexo 127. Perfil 11 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	191
Anexo 128. Perfil 11 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	191
Anexo 129. Perfil 12 modelado CS-SNA -Método de Bishop	192
Anexo 130. Perfil 12 modelado CS-SNA -Método de Jambu	192
Anexo 131. Perfil 12 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	193
Anexo 132. Perfil 12 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	193
Anexo 133. Perfil 13 modelado CS-SNA -Método de Bishop	194
Anexo 134. Perfil 13 modelado CS-SNA-Método de Jambu	194
Anexo 135. Perfil 13 modelado CS-SNA-Método Ordinario.....	195
Anexo 136. Perfil 13 modelado CS-SNA-Método de Spencer.....	195
Anexo 137. Perfil 14 modelado CS-SNA-Método de Bishop	196
Anexo 138. Perfil 14 modelado CS-SNA -Método de Jambu	196
Anexo 139. Perfil 14 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	197
Anexo 140. Perfil 14 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	197
Anexo 141. Perfil 15 modelado CS-SNA -Método de Bishop	198
Anexo 142. Perfil 15 modelado CS-SNA-Método de Jambu	198
Anexo 143. Perfil 15 modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	199
Anexo 144. Perfil 15 modelado CS-SNA -Método de Spencer.....	199
Anexo 145. Perfil A N-S modelado CS-SNA -Método de Bishop.....	200
Anexo 146. Perfil A N-S modelado CS-SNA -Método de Jambu.....	200
Anexo 147. Perfil A N-S modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	201
Anexo 148. Perfil A N-S modelado CS-SNA -Método de Spencer	201
Anexo 149. Perfil A S-N modelado CS-SNA -Método de Bishop.....	202

Anexo 150. Perfil A S-N modelado CS-SNA -Método de Jambu	202
Anexo 151. Perfil A S-N modelado CS-SNA -Método Ordinario.....	203
Anexo 152. Perfil A S-N modelado CS-SNA -Método de Spencer	203
Anexo 153. Perfil 1 modelado SS-CNA -Método de Bishop	204
Anexo 154. Perfil 1 modelado SS-CNA-Método de Jambu	204
Anexo 155. Perfil 1 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	205
Anexo 156. Perfil 1 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	205
Anexo 157. Perfil 2 modelado SS-CNA -Método de Bishop	206
Anexo 158. Perfil 2 modelado SS-CNA -Método de Jambu	206
Anexo 159. Perfil 2 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	207
Anexo 160. Perfil 2 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	207
Anexo 161. Perfil 3 modelado SS-CNA -Método de Bishop	208
Anexo 162. Perfil 3 modelado SS-CNA -Método de Jambu	208
Anexo 163. Perfil 3 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	209
Anexo 164. Perfil 3 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	209
Anexo 165. Perfil 4 modelado SS-CNA -Método de Bishop	210
Anexo 166. Perfil 4 modelado SS-CNA -Método de Jambu	210
Anexo 167. Perfil 4 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	211
Anexo 168. Perfil 4 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	211
Anexo 169. Perfil 5 modelado SS-CNA -Método de Bishop	212
Anexo 170. Perfil 5 modelado SS-CNA -Método de Jambu	212
Anexo 171. Perfil 5 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	213
Anexo 172. Perfil 5 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	213
Anexo 173. Perfil 6 modelado SS-CNA -Método de Bishop	214
Anexo 174. Perfil 6 modelado SS-CNA -Método de Jambu	214
Anexo 175. Perfil 6 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	215
Anexo 176. Perfil 6 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	215
Anexo 177. Perfil 7 modelado SS-CNA -Método de Bishop	216
Anexo 178. Perfil 7 modelado SS-CNA -Método de Jambu	216
Anexo 179. Perfil 7 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	217

Anexo 180. Perfil 7 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	217
Anexo 181. Perfil 8 modelado SS-CNA -Método de Bishop	218
Anexo 182. Perfil 8 modelado SS-CNA -Método de Jambu	218
Anexo 183. Perfil 8 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	219
Anexo 184. Perfil 8 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	219
Anexo 185. Perfil 9 modelado SS-CNA -Método de Bishop	220
Anexo 186. Perfil 9 modelado SS-CNA -Método de Jambu	220
Anexo 187. Perfil 9 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	221
Anexo 188. Perfil 9 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	221
Anexo 189. Perfil 10 modelado SS-CNA -Método de Bishop	222
Anexo 190. Perfil 10 modelado SS-CNA -Método de Jambu	222
Anexo 191. Perfil 10 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	223
Anexo 192. Perfil 10 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	223
Anexo 193. Perfil 11 modelado SS-CNA -Método de Bishop	224
Anexo 194. Perfil 11 modelado SS-CNA -Método de Jambu	224
Anexo 195. Perfil 11 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	225
Anexo 196. Perfil 11 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	225
Anexo 197. Perfil 12 modelado SS-CNA -Método de Bishop	226
Anexo 198. Perfil 12 modelado SS-CNA -Método de Jambu	226
Anexo 199. Perfil 12 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	227
Anexo 200. Perfil 12 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	227
Anexo 201. Perfil 13 modelado SS-CNA -Método de Bishop	228
Anexo 202. Perfil 13 modelado SS-CNA -Método de Jambu	228
Anexo 203. Perfil 13 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	229
Anexo 204. Perfil 13 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	229
Anexo 205. Perfil 14 modelado SS-CNA -Método de Bishop	230
Anexo 206. Perfil 14 modelado SS-CNA -Método de Jambu	230
Anexo 207. Perfil 14 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	231
Anexo 208. Perfil 14 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	231
Anexo 209. Perfil 15 modelado SS-CNA -Método de Bishop	232

Anexo 210. Perfil 15 modelado SS-CNA -Método de Jambu	232
Anexo 211. Perfil 15 modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	233
Anexo 212. Perfil 15 modelado SS-CNA -Método de Spencer.....	233
Anexo 213. Perfil A N-S modelado SS-CNA -Método de Bishop.....	234
Anexo 214. Perfil A N-S modelado SS-CNA -Método de Jambu.....	234
Anexo 215. Perfil A N-S modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	235
Anexo 216. Perfil A N-S modelado SS-CNA -Método de Spencer	235
Anexo 217. Perfil A S-N modelado SS-CNA -Método de Bishop.....	236
Anexo 218. Perfil A S-N modelado SS-CNA -Método de Jambu.....	236
Anexo 219. Perfil A S-N modelado SS-CNA -Método Ordinario.....	237
Anexo 220. Perfil A S-N modelado SS-CNA -Método de Spencer	237

LISTA DE ABREVIATURAS

CS-CNA	Condición con sismo con nivel de agua
CS-SNA	Condición sin sismo con nivel de agua
SS-CNA	Condición con sismo sin nivel de agua
SPT	Standard Penetration Test (Ensayo de Penetración Estándar)
N	Número de Golpes del Ensayo de Penetración Estándar
W_n (%)	Contenido de humedad natural
LL (%)	Límite líquido
LP (%)	Límite plástico
IP (%)	Índice de plasticidad
N° 4 (%)	Tamiz N° 4 (abertura de 4,76 mm)
N° 200 (%)	Tamiz N° 200 (abertura de 0,074 mm)
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
AASHTO	Clasificación de suelos de la American Association of State Highway and Transportation Officials.
G_s	Gravedad específica de los sólidos
γ_t (gr/cm³)	Peso unitario húmedo
γ_d (gr/cm³)	Peso unitario seco
Φ	Ángulo de fricción interna
Φ'_p	Ángulo de fricción interna pico
Φ'_r	Ángulo de fricción interna residual
C (Ton/m²)	Cohesión
C'_p (Kpa)	Cohesión pico
C'_r (Kpa)	Cohesión residual
K	Permeabilidad
E (MN/m²)	Módulo de Elasticidad



- $\sigma'_p(\text{Kg/cm}^2)$ Esfuerzo de preconsolidación
- Cc Índice de compresibilidad
- Cr Índice de expansibilidad

RESUMEN

El análisis de estabilidad de taludes mediante la metodología del Equilibrio Límite está dividido en dos métodos, simplificados y rigurosos. Los métodos simplificados cumplen únicamente el equilibrio de momentos, mientras que los rigurosos consideran el equilibrio de los momentos y las fuerzas. El criterio de estabilidad es determinado por un factor de seguridad como un indicador de amenaza del talud. Las técnicas de equilibrio límite nos proporcionan diferentes métodos para calcular los factores de seguridad, dichos métodos tienen consideraciones diferentes para ser aplicados a un análisis de estabilidad, sin embargo, pueden dar resultados diferentes y en ocasiones contradictorios (Fredlund & Krahn, 1981). La presente investigación consistió en evaluar geotécnicamente la estabilidad de los taludes ubicados en el sector occidental de la Loma del Peyé en la ciudad de Cartagena de Indias, aplicando la metodología del equilibrio límite con ayuda del software Slide® V.5. Se obtuvieron factores de seguridad con los métodos Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Ordinario o Fellenius y Spencer. Una vez determinados los factores de seguridad se hizo un mapa representativo de categorización por nivel de amenaza de la zona de estudio, sujeto a tres condiciones de análisis: CS-CNA, CS-SNA y SS-CNA, además de plantear obras conceptuales para la mitigación del riesgo.

Partiendo de los factores de seguridad calculados por los métodos de *Bhisop* y *Morgenstern*, *Jambu simplificado*, *Ordinario o Fellenius* y *Spencer*, para cada uno de los dieciséis (16) perfiles, encontramos que los métodos siempre y cuando se cumplan las condiciones de equilibrio dan resultados muy parecidos, sin embargo en algunos perfiles obtuvimos grandes variaciones entre estos métodos; hasta del 60% para *Spencer vs Fellenius*. Los métodos *Bhisop* y *Spencer* dan factores de seguridad muy similares entre ellos, lo mismo se observó para los métodos *Jambu* y *Fellenius*. Estos últimos arrojaron resultados más cercanos a un nivel de amenaza más alto en comparación con *Bhisop* y *Spencer*.

Palabras clave: riguroso, equilibrio límite, amenaza, talud, métodos, factores de seguridad, categorización.

ABSTRACT

The slope stability analysis by the limit equilibrium method is divided in two methods, simplified and rigorous. The simplified methods meet only the equilibrium of moments; while rigorous consider the balance of forces and moments. The stability criterion is determined by a safety factor as a threat indicator slope. Limit equilibrium techniques provide us with different methods to calculate the safety factors, these methods have different considerations to be applied to a stability analysis, nevertheless, it may give different results and sometimes contradictory (Fredlund & Krahn, 1981).

The present investigation was to assess the geotechnical slope stability located in the western sector of the Loma del Peyé in the city of Cartagena de Indias, applying the methodology of limit equilibrium using the Slide[®] V.5. Software. Safety factors with Bishop Simplified methods, Janbu Simplified Ordinary or Fellenius and Spencer were obtained. Once certain safety factors became a representative map of categorization by level of threat of the study area, analysis under three conditions: CS-CNA, CS-SNA y SS-CNA, besides raising conceptual works to mitigate risk.

From the safety factors calculated by the methods of *Bishop Simplified methods, Janbu Simplified Ordinary or Fellenius and Spencer*, for each of the sixteen (16) profiles, we obtain that the methods are provided that equilibrium conditions are fulfilled give very similar results, however in some profiles we obtained large variations between these methods, up to 60% for Spencer vs Fellenius. The Bishop and Spencer methods give very similar safety factors, the same was observed for Janbu and Fellenius methods. The latter yielded closest to a higher threat level compared to Spencer and Bishop results.

Keywords: *rigorous, limit equilibrium, threat, slide, methods, safety factors, categorization*

INTRODUCCIÓN

El análisis de estabilidad de taludes durante muchos años se ha realizado utilizando técnicas de equilibrio límite; este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, la superficie de falla y en general parámetros y características geotécnicas del talud. Dependiendo del método utilizado podemos determinar un factor de seguridad propio del análisis y las consideraciones de los mismos. El método de equilibrio límite supone que en caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes equivalen a un factor de seguridad de 1,0.

En la Ingeniería Geotécnica es común definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad obtenido de un análisis matemático de estabilidad; dicho modelo debe tener en cuenta la mayoría de factores que afectan la estabilidad como lo son el ángulo de fricción interna (ϕ), la cohesión del material (c), los pesos unitarios húmedos y secos (γ_t, γ_d), flujos de aguas, entre otros que afectan la estabilidad del talud. Este factor de seguridad se puede determinar a partir de diferentes métodos de equilibrio límite, cada método tiene en cuenta diferentes factores, condiciones de falla y consideraciones geotécnicas del talud.

La cantidad de métodos de equilibrio límite que se utilizan, dan resultados diferentes y en ocasiones, contradictorios los cuales son una muestra de incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad (Salas, 2010); las similitudes y diferencias en los métodos de equilibrio límite son un poco oscuras en gran medida por la falta de uniformidad en la formulación de las ecuaciones de equilibrio, la ambigüedad relativa en las fuerzas cortantes y el desconocimiento de las limitaciones impuestas por las superficies de fallas no circulares (Fredlund & Krahn, 1981).

En el estudio de la estabilidad de taludes, siempre se busca realizar un análisis que permita obtener un factor de seguridad correcto, por lo que es necesario determinar la relación existente entre la geometría del talud, sus propiedades mecánicas, cargas actuantes y las diferentes metodologías que permiten mediante un factor de seguridad, conocer el estado en el cual se encuentra un talud. Una vez determinado un factor de seguridad que se ajuste a

las condiciones del talud, se busca establecer medidas de control y prevención que permitan reducir los niveles de amenaza y riesgo de la zona en cuestión.

En la actualidad se conocen software comerciales, los cuales tienen como base el concepto de equilibrio límite, uno de ellos es el Slide®, en el cual es posible analizar fácilmente problemas de estabilidad de taludes simples y complejos usando varios métodos para calcular el factor de seguridad.

En los últimos años Colombia ha sido golpeada por los fenómenos naturales del Niño y la Niña, razón por la cual el gobierno ha invertido 102.000 millones de pesos en la atención de las emergencias causadas por dichos fenómenos, donde aproximadamente el 29% de los eventos han sido deslizamientos de tierras (Revista Semana, 2011).

Los problemas de estabilidad de taludes en la ciudad de Cartagena han sido causales de inquietud para conocer cuáles son los factores determinantes que contribuyen con grandes pérdidas de patrimonio y humanas; un claro ejemplo de ello han sido los deslizamientos en el barrio San Francisco donde hubo 1.191 familias afectadas por este fenómeno (Camacho, 2011); también en el barrio Paseo Bolívar ubicado en las faldas del cerro de la Popa se presentaron deslizamientos afectando 20 viviendas (Caracol Radio, 2012), además 44 familias ubicadas en las estribaciones de la loma del Marion y el cerro de la Popa tuvieron que abandonar sus casas debido al deslizamiento de tierras producido por las fuertes lluvias de noviembre del 2010 (Tom, 2010).

Este trabajo de investigación pretendió la evaluación del comportamiento geomecánico y la categorización de las condiciones de inestabilidad de los taludes del sector occidental de la Loma del Peyé; una formación perteneciente a las estribaciones del Cerro de La Popa localizada al nororiente de la ciudad de Cartagena de Indias. La Loma del Peyé se encuentra delimitada por la carrera 30 (Avenida La María), al Oeste y al norte, la Calle 45 al sur y la Carrera 34, se encuentra situada entre la Localidad Histórica y del Caribe Norte y la Localidad de La Virgen y Turística, donde se clasificaron las condiciones de inestabilidad de los mismos en el sector seleccionado, teniendo en cuenta los procesos erosivos intensos que han afectado estas laderas durante la época invernal, se han

presentado procesos de remoción en masa tipo deslizamientos y flujos de detritos, así mismo, el vertimiento de aguas residuales por falta de sistema de alcantarillado en un gran porcentaje de la zona y la intervención indebida de los taludes ha provocado que exista un grado de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa (Universidad de Cartagena, 2014), se han realizado estudios en el sector oriental y donde actualmente se encuentra construido el colegio Pies Descalzos, además de esto, la Universidad de Cartagena en convenio con el PNUD, realizó los estudios pertinentes para estudiar la zona occidental.

En el área delimitada donde se llevó a cabo esta investigación, se encuentra un gran porcentaje de viviendas que no poseen sistema de alcantarillado, motivo por el cual las aguas residuales son vertidas directamente sobre el suelo afectando directamente la estabilidad de los materiales de la zona, además las laderas del sector han sido intervenidas de manera incontrolada, provocando esto susceptibilidad a fenómenos denudativos (Universidad de Cartagena, 2014).

La falta del sistema de alcantarillado en un gran porcentaje de viviendas de la zona de estudio, y la intervención en los taludes del factor antrópico de manera incontrolada para construir sus viviendas, ha provocado que exista un grado de susceptibilidad a fenómenos denudativos (Universidad de Cartagena, 2014); en consecuencia, a través del *Acuerdo de subsidio de microcapital realizado entre el PNUD y la Universidad de Cartagena* en el sector occidental de la loma del Peyé, se ha decidido estudiar las zonas que han sido afectadas por el deslizamiento de taludes en el sector de estudio, para dar soluciones técnicas al respecto. Teniendo en cuenta los problemas de inestabilidad de la loma del peyé y las diferencias en los análisis del método de equilibrio límite, se pretendió la siguiente pregunta de investigación: ¿es posible mediante la evaluación del comportamiento geomecánico de los taludes categorizar las condiciones de inestabilidad de los taludes del sector occidental de la Loma del Peyé?

Para el caso de estudio, en la loma del Peyé debido a los procesos erosivos intensos tipo laminar, surcos y cárcavas que han afectado estas laderas, durante la época invernal se presentan procesos de remoción en masa tipo deslizamientos y flujos de detritos. (Guilliam

Barboza Miranda, 2011), en consecuencia, se han realizado estudios en el sector oriental y en el área donde se encuentra actualmente el colegio de la Fundación Pies Descalzos, el consorcio DJU encargado de llevar a cabo los estudios pertinentes en el sector oriental, realizó la evaluación geotécnica dando recomendaciones para la estabilización de los taludes, mientras que el Ingeniero Guilliam Barboza realizó el estudio de suelos y recomendaciones geotécnicas y de estabilización para la construcción del Colegio perteneciente a la Fundación Pies Descalzos.

Debido a lo anteriormente mencionado, es importante realizar los estudios geotécnicos de la zona occidental de la Loma de Peyé, único sector que falta por estudiar, además es importante para nosotros como futuros profesionales de la Ingeniería Civil, a través de los diferentes métodos usados por el equilibrio límite y de acuerdo a las consideraciones de falla que presenta este sector de la ciudad, podamos establecer cuál es el método que más se ajuste a las condiciones geotécnicas de dicha zona, para llevar a cabalidad el objetivo principal de esta investigación.

Consideramos que en conjunto con los estudios del Acuerdo de subsidio de microcapital realizado entre el PNUD y la Universidad de Cartagena en el sector occidental de la Loma del Peyé, y de la mano del director de tesis, se contribuirá a categorizar las condiciones de inestabilidad de taludes del sector para aportar al mejoramiento de la comunidad frente a los fenómenos denudativos y así mismo al desarrollo de la ciudad de Cartagena.

Este proyecto de investigación forma parte de la línea de investigación Análisis de Geoamenazas en Cascos Urbanos y Rurales y el grupo Geotecnia, materiales, vías, tránsito y transporte (GEOMAVIT), en conjunto con la asignatura de Geotecnia del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena.

Finalmente esta investigación se centra en evaluar el comportamiento geomecánico y la categorización de inestabilidad de los taludes del sector occidental de la Loma del Peyé, analizando los diferentes factores de seguridad obtenidos por los métodos de Equilibrio Limite, como lo son el Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Ordinario o Fellenius y Spencer, con ayuda del software Slide®, para analizar la variabilidad de éstos de acuerdo a



los parámetros geotécnicos que son considerados pertinentes para calcular el factor de seguridad y elaborar recomendaciones conceptuales (obras de mitigación) para asegurar la estabilidad de los taludes de la Loma del Peyé.

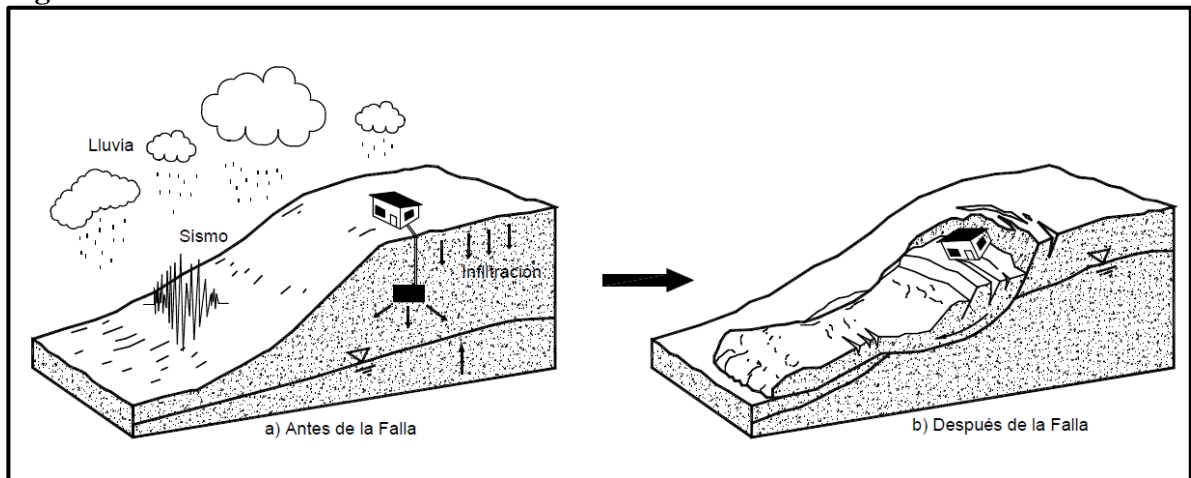
1. MARCO DE REFERENCIA

En el presente capítulo se desarrollan y describen los conceptos, antecedentes y bibliografía relacionada con la estabilidad de taludes, los diferentes métodos para hallar los factores de seguridad. Este capítulo se subdivide en dos grupos, el primero marco teórico y el segundo antecedentes y estado del arte.

1.1. MARCO TEÓRICO

Una superficie de terreno expuesta situada a un ángulo con la horizontal se llama talud o pendiente restringida, y puede ser natural o construido. Si la superficie del terreno no es horizontal, una componente de la gravedad ocasionará que el suelo se mueva hacia abajo, como lo muestra la Figura 1, si la componente de la gravedad es suficientemente grande ocurrirá la falla del talud; es decir, la masa del suelo en la zona se deslizará hacia abajo. La fuerza actuante vence a la fuerza resistente de la resistencia al corte del suelo a lo largo de la superficie de ruptura.

Figura 1. Falla de un talud.



Fuente: Suarez, 2012

El análisis de estabilidad de taludes es conocido como la técnica que estudia la estabilidad o posible inestabilidad de un talud a la hora de realizar un proyecto, o llevar a cabo una obra de construcción, éste implica determinar y comparar el esfuerzo cortante desarrollado a lo

largo de la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo. (Braja M., 2001, pág. 339)

1.1.1. Factor de seguridad: El Factor de Seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla el valor del factor de seguridad está dado por:

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo cortante}} \quad (1)$$

En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes el factor de seguridad es:

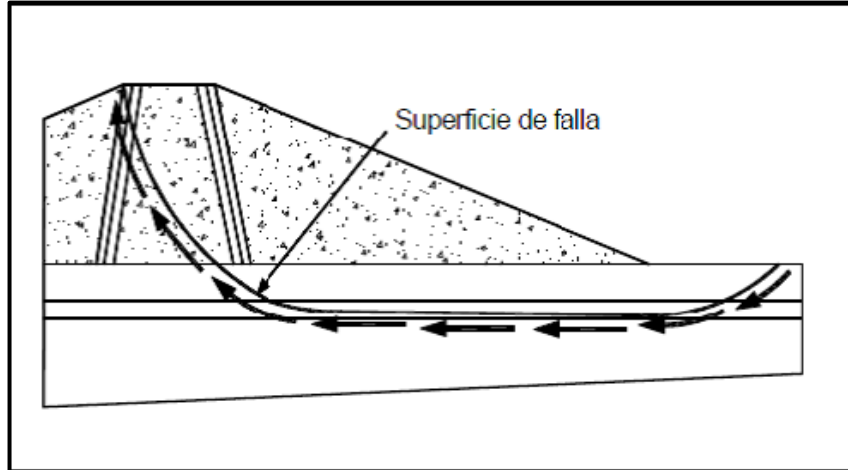
$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento actuante}} \quad (2)$$

El factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla, por lo tanto este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie de falla.

(Suarez, 1998)

1.1.2. Superficie de falla: El término superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o rotura del talud (ver Figura 2). Sin embargo, este deslizamiento o rotura no ocurre a lo largo de esas superficies si el talud es diseñado adecuadamente.

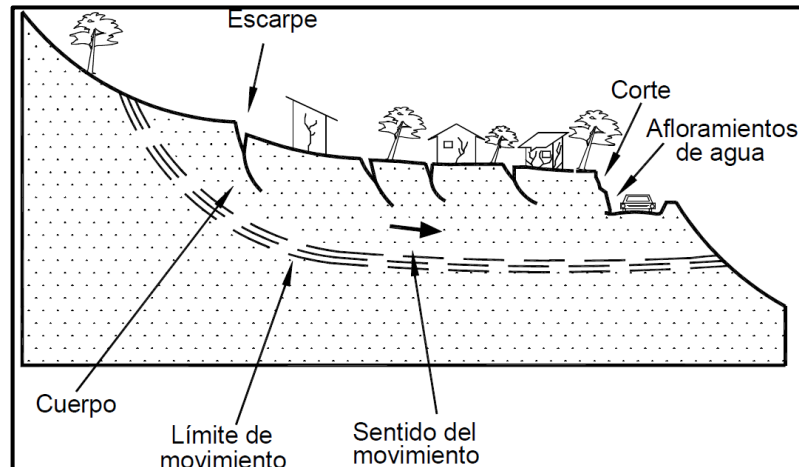
Figura 2. Superficie de falla en un talud.



Fuente: U.S. Corp of Engineers, 2003

1.1.3. Tipos de deslizamientos en masa: El deslizamiento en masa consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada (ver Figura 3). Los deslizamientos en masa pueden ser de una sola masa coherente que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes.

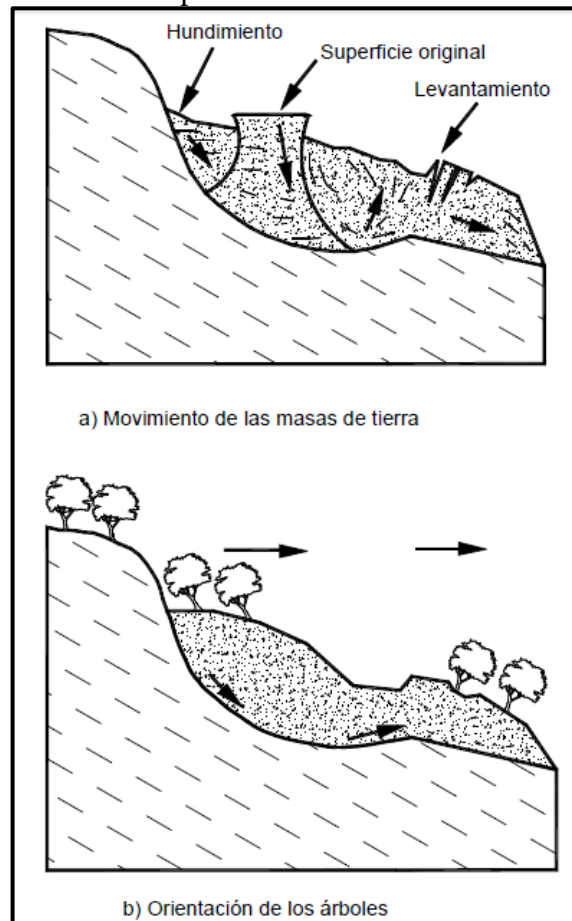
Figura 3. Deslizamientos en suelos blandos.



Fuente: Suarez, 2012

1.1.3.1. Deslizamiento Rotacional: En un deslizamiento rotacional, la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento. El centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto en planta, el deslizamiento de rotación posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, lo cual genera, comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento (Figura 4). La cabeza del movimiento bascula hacia atrás y los árboles se inclinan, de forma diferente, en la cabeza y en el pie del deslizamiento.

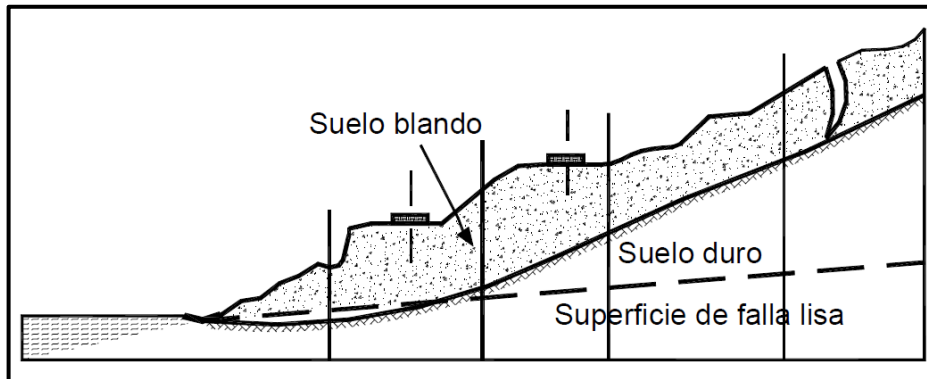
Figura 4. Deslizamiento rotacional típico.



Fuente: Suarez, 2012

1.1.3.2. Deslizamiento Traslacional: En el deslizamiento de traslación la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo (ver Figura 5). En muchos desplazamientos de traslación, la masa se deforma y/o se rompe y puede convertirse en flujo, especialmente en las zonas de pendiente fuerte.

Figura 5. Deslizamiento Traslacional.



Fuente: Suarez, 2012

1.1.4. Métodos de equilibrio límite: El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe Software muy fácil de utilizar. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión. La Tabla 1 indica algunas de las características, los tipos de falla asumidas que tiene cada método usado por el equilibrio límite.

Tabla 1. Métodos de análisis de Estabilidad de Taludes

<i>Método</i>	<i>Superficies de Falla</i>	<i>Equilibrio</i>	<i>Características</i>
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De Fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos
Bishop Simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero, reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbu Simplificado (Janbu 1968)	Cualquier forma de superficie de falla	De Fuerzas	Al igual que Bishop, asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Spencer (1967)	Cualquier forma de superficie de falla	De Fuerzas y Momentos	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.

Fuente: (Suarez Diaz, 1998)

1.1.4.1. Método Ordinario o de Fellenius: Conocido también como método Sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el Factor de Seguridad. Las fuerzas que actúan sobre una dovela son (ver Figura 6):

- El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.
- Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.
- Las fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas, las cuales no son consideradas por Fellenius, pero sí son tenidas en cuenta en otros métodos de análisis más detallados. (Suarez, 1998, pág. 131)

En el caso de infiltraciones constantes, la altura del agua encima del punto medio de la base, se obtiene mediante la construcción de redes de flujo. Alternativamente, las condiciones hidrostáticas podrían ser asumidas por el promedio de los valores de r_u en el talud. Al hacer esto se asume que la altura del agua por encima de la base de cada dovela es una fracción constante de la altura promedio de cada dovela. Si la altura del agua y la altura promedio de las dovelas son iguales, el máximo valor de r_u se convierte en γ_w/γ que es aproximadamente 0,5. Note que la *Fuerza Normal* que actúa en la base es igual a $w(\cos \alpha - r_u \sec \alpha)$. Si el término $\cos \alpha - r_u \sec \alpha$ es negativo, este valor se toma como cero porque el esfuerzo efectivo no puede ser negativo (Aysen, 2002, pág. 374).

El método de Fellenius calcula el Factor de seguridad con la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{\sum [c' b \sec \alpha + (W \cos \alpha - u b \sec \alpha) \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha} \quad (3)$$

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

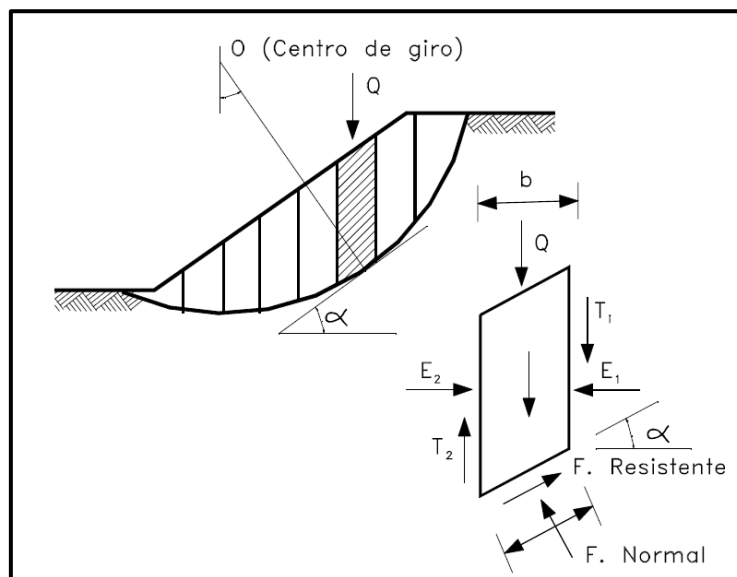
W : Peso total de cada dovela.

u : Presión de poros = $\gamma_w h_w$

b : Ancho total de cada dovela.

c', ϕ : Parámetros de resistencia del suelo.

Figura 6. Fuerzas que actúan sobre la dovela.



Fuente: (Suarez Diaz, 1998)

1.1.4.2. Método de Bishop Simplificado: Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las Dovelas. La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método.

Este método asume que para cada dovela $x_1 = x_2$, pero $E_1 \neq E_2$. Estas suposiciones son consideradas para hacer este método más preciso que el método de Fellenius. Usualmente se realiza un incremento del 5% al 20% en el factor de seguridad por encima del de Fellenius. Refiriéndonos a la Figura 7 escribiendo la fuerza de equilibrio vertical (en orden, eliminando E_1 y E_2), una ecuación para N' puede ser hallada y sustituida en la ecuación x, sabiendo que $l = b / \cos \alpha$ y $ub = wr_u$, obtenemos:

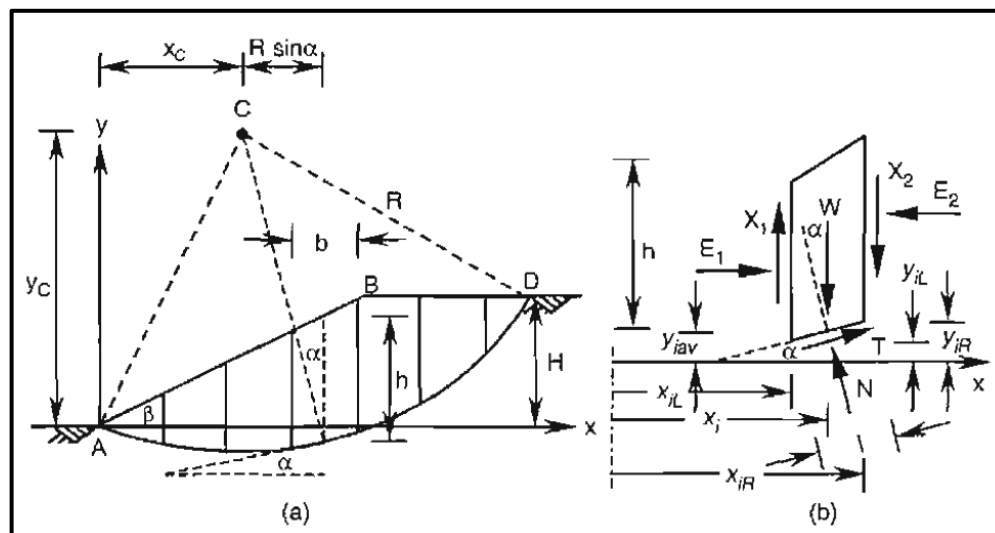
$N' = (w - ul - c'l \sin \alpha / F) / (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi' / F)$, con esto obtenemos:

$$F.S. = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} (w \sin \alpha)} \sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{c' b + w(l - r_u) \tan \phi'}{m_\alpha} \right] \quad (4)$$

Donde $m_\alpha = \cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi' / F$

La ecuación (4) no es lineal en F y se resuelve por las iteraciones de punto fijo. Un valor inicial para F es tomado al azar (ligeramente mayor al obtenido por el Método de Fellenius) y es sustituido en los términos apropiados de la Ecuación (4) para computar un nuevo valor de F . este procedimiento es repetido hasta que la diferencia entre el valor de F asumido y computado sea insignificante. Normalmente la convergencia es rápida y sólo se requieren de 2 o 3 iteraciones. El procedimiento es repetido para el número de posibles fallas para localizar la superficie de falla crítica con el menor factor de seguridad. (Aysen, 2002, pág. 375)

Figura 7. El Método de las dovelas para suelos con ϕ' y c' .



Fuente: (Aysen, 2002)

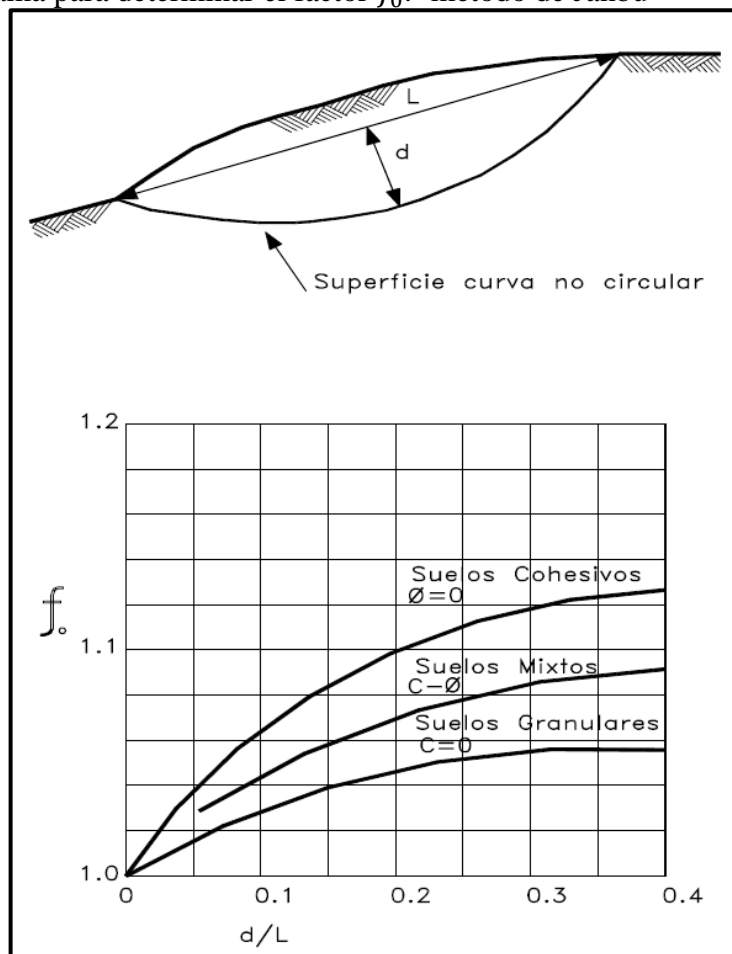
1.1.4.3. Método de Janbu Simplificado: Janbú (1973) presenta un método de Dovelas para superficies de falla curvas, no circulares.

De acuerdo con Janbú (ecuación modificada):

$$F.S. = \frac{f_0 \sum \left\{ [c'b + (W - ub) \tan \phi] \frac{1}{\cos ma} \right\}}{\sum (W \tan \alpha)} \quad (5)$$

Donde f_0 depende de la curvatura de la superficie de falla (ver Figura 8).

Figura 8. Diagrama para determinar el factor f_0 .- método de Janbu



Fuente: (Suarez Diaz, 1998)



Método de Spencer: El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación (ver Figura 9).

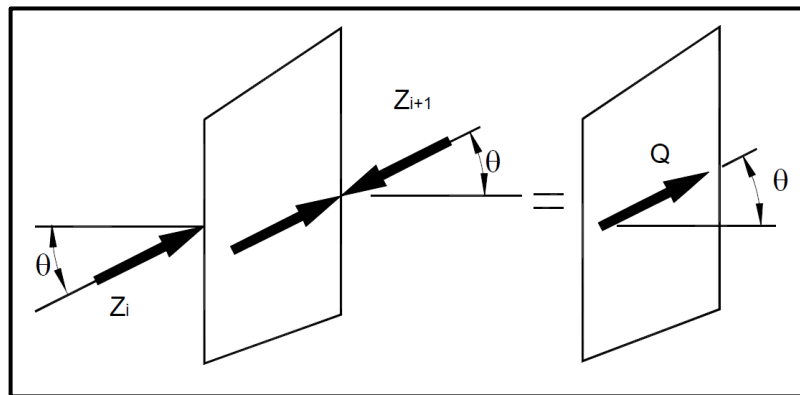
La inclinación específica de estas fuerzas entre partículas, es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Spencer inicialmente propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender fácilmente a superficies no circulares.

Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad F y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas θ (ver Figura 9 y Figura 10).

Para resolver las ecuaciones F y θ , se utiliza un sistema de ensayo y error donde se asumen los valores de estos factores (en forma repetitiva) hasta que se alcanza un nivel aceptable de error.

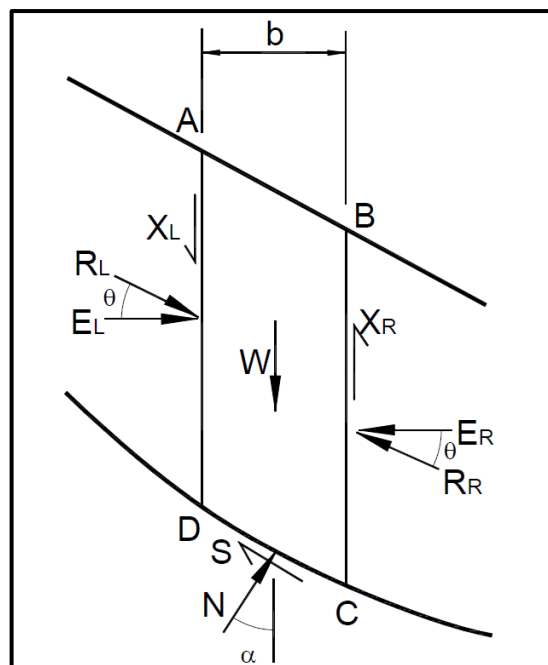
Una vez se obtienen los valores de F y θ se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad. (Duncan J.M. & Wright S. G., 2005, pág. 297).

Figura 9. Paralelismo de las fuerzas entre dovelas en el método de Spencer.



Fuente: Suarez, 2012

Figura 10. Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método de Spencer.



Fuente: Suarez, 2012

1.1.5. Software Slide®: El software Slide® creado por Rocscience Inc., usa la teoría de equilibrio límite para calcular el factor de seguridad de taludes de suelo, el software es ampliamente utilizado para el análisis de estabilidad de taludes en 2D usando herramientas CAD basadas en una interfaz gráfica. La formulación comprensiva de Slide® hace posible analizar fácilmente problemas de estabilidad de taludes simples y complejos usando varios métodos para calcular el factor de seguridad. Dependiendo el método a usar, el programa requiere como datos de entrada algunos parámetros como pesos específicos secos y húmedos (γ_t, γ_d), Angulo de fricción interna (ϕ) y cohesión de los materiales (c), además del análisis de aguas subterráneas mediante el método del coeficiente de presión de poros ($R_u = \frac{u}{\sigma_v}$), donde (u) es la presión de poros, y (σ_v) el esfuerzo total vertical del suelo a una profundidad dada (z). Tales datos se obtendrán de los estudios realizados por la Universidad de Cartagena. Con el software Slide® podemos analizar los problemas simples y complejos para una variedad de superficies de falla, condiciones del suelo, métodos de análisis y condiciones de carga.

Este programa es una herramienta muy útil para resolver problemas de estabilidad de taludes. Su interface permite un fácil manejo del mismo, lo que permite al modelador visualizar sencillamente el problema que se presenta.

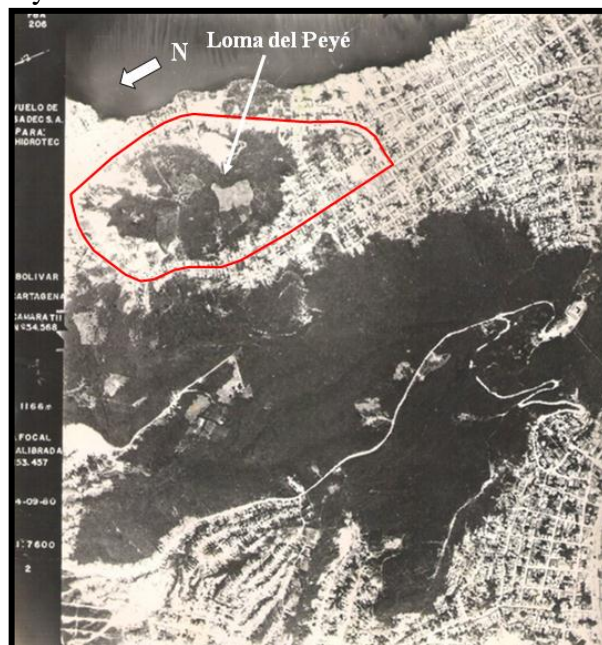
1.2. ANTECEDENTES

Sobre la Loma del Peyé se han hecho estudios socio-ambientales desde principios de la década de los 90, pero apenas sólo hasta entrado el presente siglo se comenzaron a definir estudios relacionados con los fenómenos denudativos, tal vez por su poca afectación en esa época y porque aún no se había incluido la recuperación de este cerro en el Plan de Ordenamiento Territorial. A continuación se presenta un esbozo de lo que han sido las diferentes investigaciones relacionadas con la Loma del Peyé.

Hacia los años 80 se tomaron unas fotografías aéreas en donde se puede visualizar la extensa y copiosa vegetación de la Loma del Peyé (ver Figura 11), no se percibía

asentamiento de la población en la parte alta y muy poca en la parte baja. De igual forma se ve una antigua cantera en donde se extraía material para la construcción.

Figura 11. Loma del Peyé en años 80.



Fuente: Hidroconsultores Ltda., 2009

En la década de los 90 se observó un crecimiento de la población en la Loma, producto de los desplazamientos forzados por la violencia que azotaba al país, esto conllevó a la pérdida de la cobertura vegetal, al mismo tiempo ocasionando la desestabilización de la loma.

En el año 2000, Ingeominas a través de la Subdirección de Amenazas Geoambientales, realizó, un estudio llamado “Zonificación Geotécnica y Aptitud y Uso del Suelo en el Casco Urbano de Cartagena”. La investigación se fundamentó en el análisis y mapeo de las características litológicas, geomorfológicas, geotécnicas, drenajes naturales y cobertura vegetal del terreno, con el fin de identificar y evaluar los problemas geológicos potenciales de la ciudad y sugerir el uso más apropiado del suelo.

Este estudio contribuyó en la elaboración y complementación del Plan de Ordenamiento Territorial que desarrolló el Distrito de Cartagena de Indias.



Al siguiente año, se expidió el Decreto 977 de 2001 (Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias), en el cual se contempla la problemática en el sector de la Loma del Peyé, visualizado globalmente dentro del cerro de la Popa y se dan los lineamientos para su intervención por medio de un Macroproyecto (Distrito de Cartagena, 2001). Adicionalmente menciona las problemáticas que se presentan en el sector debido a los deslizamientos ocasionados en las temporadas invernales.

A principios de 2009 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial comenzó a desarrollar el proyecto de Recuperación Integral de la Loma del Peyé en el sector oriental, como piloto para desarrollar el Macroproyecto de la Popa, propuesto a inicios de 2008 por la administración local en el plan Por Una Sola Cartagena. El estudio geológico y geotécnico se le adjudicó al Consorcio DJU a través de la empresa DQ Ingeniería, originaria de la ciudad de Bogotá.

En el año 2011 el Ingeniero Guilliam Barboza Miranda realizó el estudio de suelos y recomendaciones geotécnicas y de estabilización para la construcción del Colegio perteneciente a la Fundación Pies Descalzos.

Actualmente el *Acuerdo de subsidio de microcapital realizado entre el PNUD y la Universidad de Cartagena* en el sector occidental de la loma del Peyé el cual tiene como objeto el “Fortalecimiento de las capacidades institucionales para la gestión del riesgo y el mejoramiento de los medios de vida de la comunidad vulnerable frente a fenómenos de remoción en masa, asentada en el sector denominado Lomas del Peyé, casco urbano de Cartagena, departamento de Bolívar”, será donde obtendremos la información geotécnica, topográfica y geológica, para llevar a cabo esta investigación.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Evaluar geotécnicamente la estabilidad de los taludes del sector occidental de la loma del Peyé en la ciudad de Cartagena de Indias, mediante el análisis de los Factores de Seguridad por los métodos de Equilibrio Límite usando el software Slide®, con la finalidad de categorizar las condiciones de inestabilidad de los taludes del sector en estudio.

2.2. ESPECÍFICOS

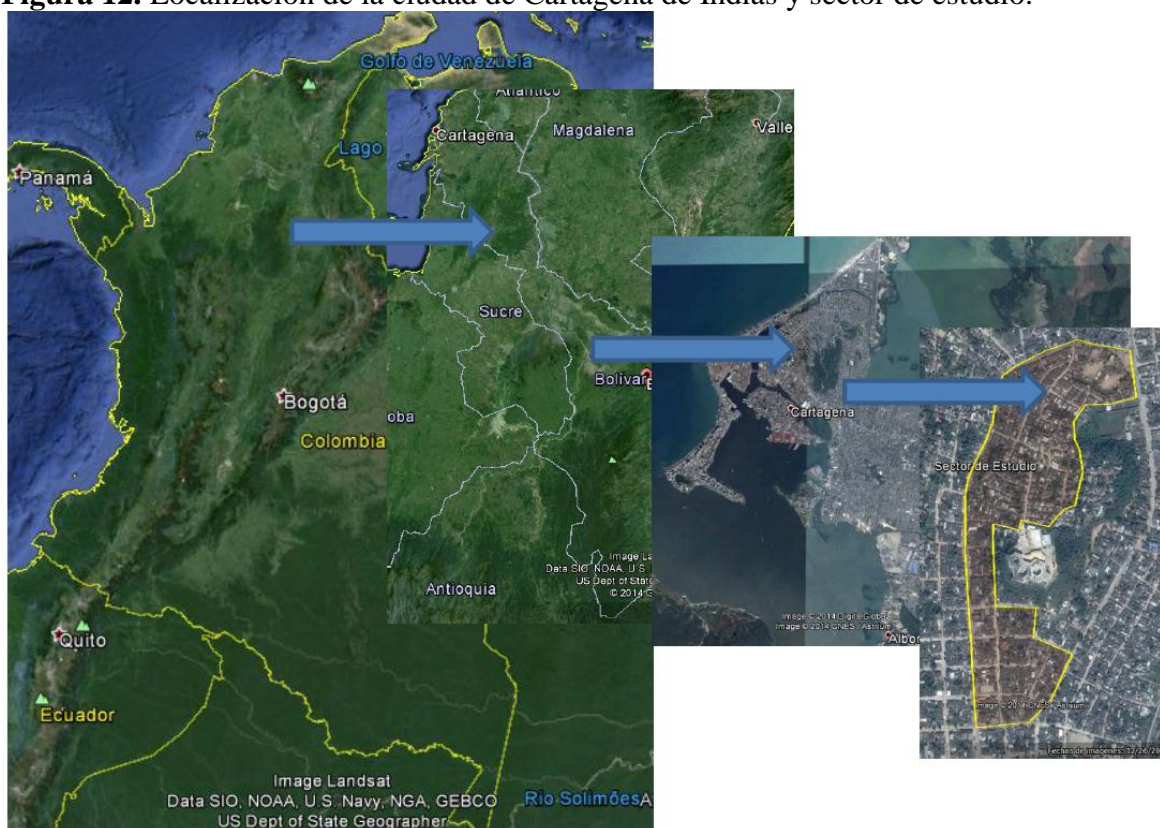
- Caracterizar geológica y geotécnicamente la zona en estudio, mediante los estudios realizados por la Universidad de Cartagena en la Loma de Peyé.
- Identificar posibles mecanismos de falla en los taludes del área en estudio.
- Definir los métodos apropiados para la zona de acuerdo a los tipos de mecanismos de falla identificados previamente.
- Determinar los valores de los parámetros necesarios para aplicar los diferentes métodos de análisis de estabilidad de taludes por equilibrio límite, mediante los estudios realizados por la Universidad de Cartagena en la loma del Peyé.
- Modelar en el software Slide® los taludes definidos, para hallar los diferentes factores de seguridad mediante cada método seleccionado.
- Elaborar recomendaciones conceptuales (obras de mitigación) para asegurar la estabilidad de los taludes del sector en mención.

3. ALCANCE

3.1. DELIMITACIÓN ESPACIAL

Cartagena está localizada al norte del departamento de Bolívar a orillas del mar Caribe. Cartagena limita al oriente con los municipios de Santa Catalina, Clemencia, Santa Rosa, Turbaco y Turbana; al norte y al occidente con el mar Caribe; y al sur con el municipio de Arjona, ver Figura 12 y Figura 13.

Figura 12. Localización de la ciudad de Cartagena de Indias y sector de estudio.

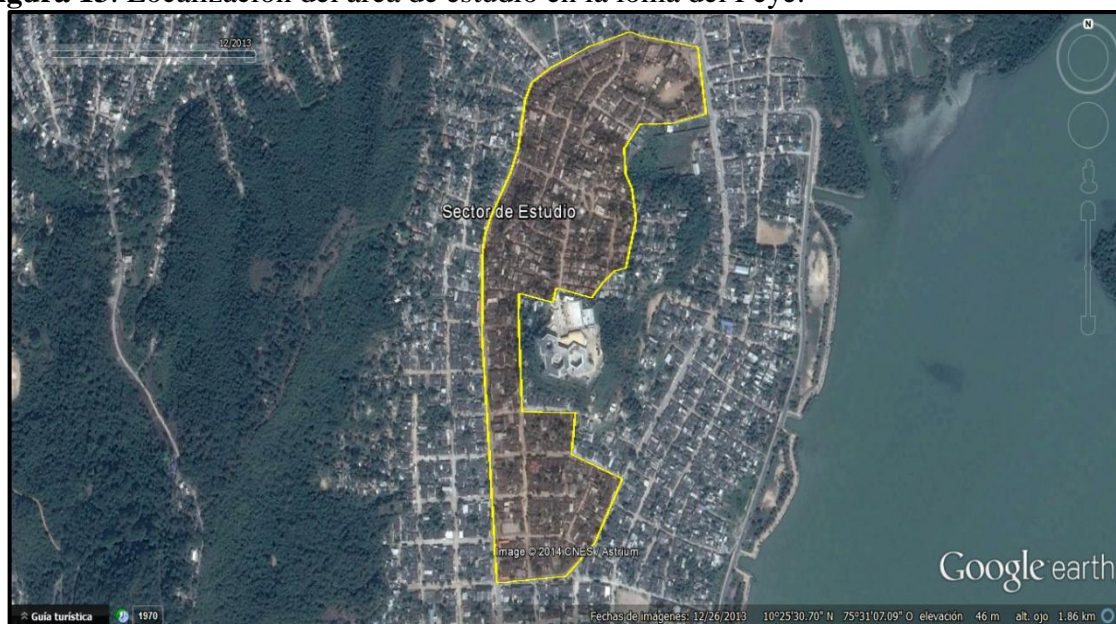


Fuente: Tomado de Google Earth y modificado por los autores, 2014

El área de estudio se localiza al nororiente de la ciudad de Cartagena de Indias, localizada en el centro del litoral Caribe colombiano, en las coordenadas 10° 23' Latitud Norte, 75° 32'

Longitud Oeste. Se emplaza en una formación perteneciente a las estribaciones del Cerro de La Popa conocida como loma del Peyé, la cual se encuentra situada entre la Localidad Histórica y del Caribe Norte y la Localidad de La Virgen y Turística, y administrativamente forma parte de dos Unidades Comuneras de Gobierno, la unidad N° 3 y la N° 4 (ver Figura 14), específicamente en el sector delimitado por la carrera 30 (Avenida La María), al Oeste y al norte, la Calle 45 al sur y la Carrera 34, con un área aproximada de 30.3 hectáreas, el sector se caracteriza por ser una zona vulnerable frente a fenómenos de remoción en masa. (Universidad de Cartagena, 2014)

Figura 13. Localización del área de estudio en la loma del Peyé.



Fuente: Tomado de Google Earth y modificado por los autores, 2014

Figura 14. Localidades pertenecientes de la loma del Peyé.



Fuente: Informe final loma del Peyé-DJU, 2009

3.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL

El proyecto se llevó a cabo durante el primer semestre del año 2015, iniciando en el mes de Febrero, y finalizando a mediados del primer semestre del mismo año, tal como se detalló en el cronograma del anteproyecto presentado.

3.3. ALCANCE DEL PROYECTO

La evaluación del comportamiento geomecánico de los taludes del sector occidental de la loma del Peyé comprendió el análisis de estabilidad de los mismos presentes en el sector por los métodos de equilibrio límite, categorizando las condiciones de inestabilidad de los taludes en mención.

Este estudio se realizó mediante la recopilación de información de los estudios de topografía, geología y laboratorios geotécnicos suministrados por el *Acuerdo de subsidio de microcapital realizado entre el PNUD y la Universidad de Cartagena* en el sector occidental de la loma del Peyé, los cuales permitieron realizar el análisis de estabilidad de los taludes, para su posterior categorización de inestabilidad.

El estudio se limitó a un trabajo experimental, en el cual se categorizaron las condiciones de dichos taludes del sector mencionado mediante el software Slide®, los resultados obtenidos de este proyecto servirán como base para futuras intervenciones que impliquen el análisis de estabilidad de taludes, ya que hasta el momento en la zona occidental de la loma del Peyé no se ha realizado este tipo de estudios relacionados (ver Figura 15)

De acuerdo al grado de inclinación de los taludes, la superficie de falla, parámetros geotécnicos (ver Tabla 2), se procedió a determinar los factores de seguridad por cada método de equilibrio límite.

Teniendo en cuenta la información suministrada por la Universidad de Cartagena, en esta investigación se obtuvieron los factores de seguridad de cada talud, y se categorizaron de acuerdo a las condiciones de inestabilidad. Todo esto se logró modelando cada talud en el software Slide® con la topografía de los taludes, los parámetros mecánicos necesarios, los cual permitieron cumplir a cabalidad los objetivos planteados, además los resultados obtenidos se muestran en tablas, gráficos y/o figuras, que han sido descritas de forma detallada (tanto los cálculos como los análisis correspondientes de los factores de seguridad de cada talud).

Además, entre los alcances de la investigación se contempló el análisis de alternativas para mitigación de riesgos, y el diseño conceptual de obras para mitigarlos, dejando así abierta la posibilidad de ser complementado, o servir de apoyo a futuras investigaciones.

Figura 15. Áreas Estudiadas (verde y rojo), área a estudiar (amarillo).

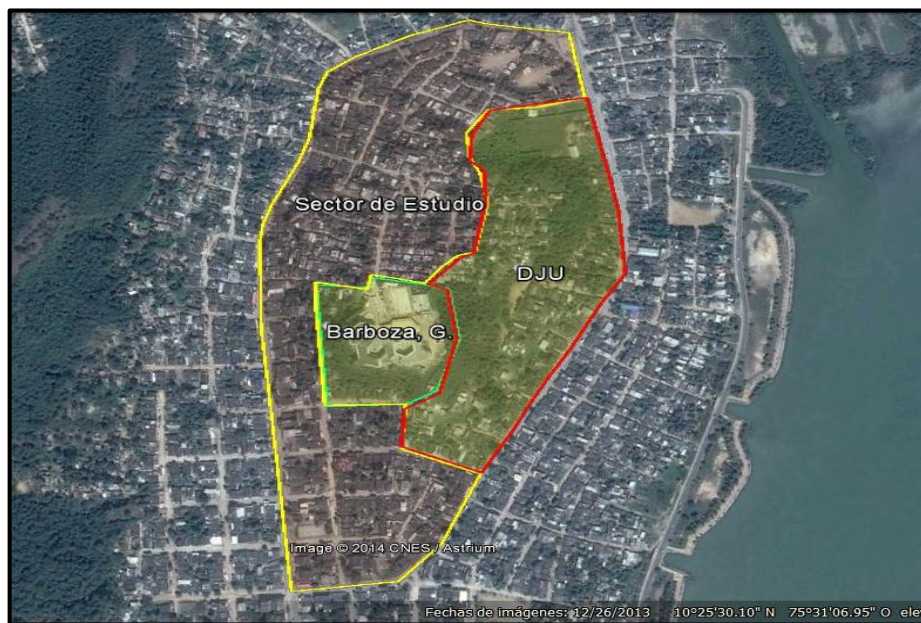


Tabla 2. Condiciones generales de los métodos, y parámetros utilizados.

<i>Autor</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Inclinación del Talud</i>	<i>Método Analítico Utilizado</i>	<i>Superficies de Falla</i>	<i>Características</i>	<i>Observaciones</i>
Bishop y Morgenstern (1960)	c_u, c, ϕ	0-90° 0-90°	$\phi = 0$ Circulo de Fricción	Circulares	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.	Análisis no drenado, taludes secos totalmente
Janbú 1968	c_u, c, ϕ, r_u	0-90°	$\phi = 0$ Janbú GPS	Cualquier forma de superficie de falla	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.

Tabla 2. (Continuación).

<i>Autor</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Inclinación del Talud</i>	<i>Método Analítico Utilizado</i>	<i>Superficies de Falla</i>	<i>Características</i>	<i>Observaciones</i>
Ordinario o de Fellenius	c, ϕ, u	--	--	Circulares	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.	Ordinario o de Fellenius
Spencer	c, ϕ, r_u	0-34°	Spencer	Cualquier forma de superficie de falla	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.	Círculos de pie solamente

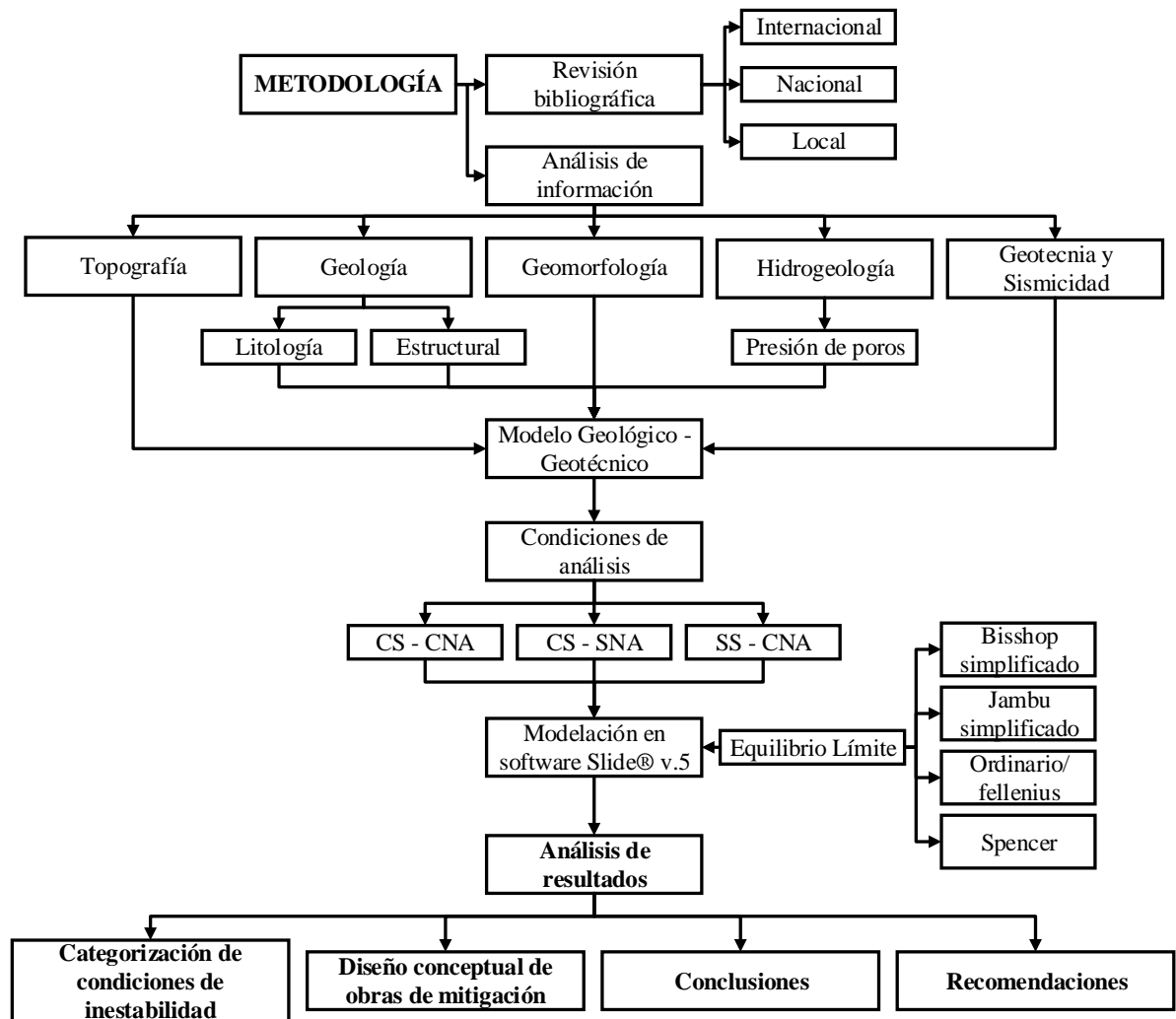
Fuente: Suarez, 2012

4. METODOLOGÍA

El tipo de investigación es de carácter experimental teniendo en cuenta que se elaboró con gran nivel de confiabilidad, relaciones causa-efecto, entre los parámetros geomecánicos utilizados por los diferentes métodos de equilibrio límite y los factores de seguridad obtenidos con ayuda del software Slide®. Estos parámetros geomecánicos requeridos para hallar el factor de seguridad en los taludes del sector occidental de la Loma del Peyé por los diferentes métodos de equilibrio límite, fueron seleccionados del *Acuerdo de subsidio de microcapital realizado entre el PNUD y la Universidad de Cartagena* en el sector occidental de la loma del Peyé, y a partir de éstos se llegaron a conclusiones válidas para categorizar las condiciones de inestabilidad de los mismos.

Esta investigación se desarrolló desde inicios del año 2015 hasta finales de abril del mismo año, considerando los métodos cualitativos como el análisis de la información bibliográfica de los casos de estudio a nivel internacional, nacional y local; a su vez se realizó el análisis de estabilidad de las laderas de la Loma del Peyé. La Figura 16 presenta el esquema de la metodología empleado para el desarrollo del estudio.

Figura 16. Esquema metodológico aplicado en el desarrollo del estudio.





4.1. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Esta etapa abarca la recopilación de la información secundaria, en estudios realizados a nivel internacional, nacional y local referentes a la aplicación de los métodos de Equilibrio Límite en la estabilidad de taludes, con el fin de contar con la información necesaria para hacer el análisis de estabilidad de taludes.

Lo anterior se llevó a cabo a través de la consulta en las bases de datos indexadas y medios virtuales, tales como páginas web, prensa y literatura referente al estudio, así como toda la información de importancia referente a la justificación del estudio.

La Universidad de Cartagena dentro del acuerdo realizado con el PNUD, realizó estudios de topografía, ensayos in situ SPT y Rotación, los cuales fueron fundamento para llevar a cabo el presente proyecto de investigación.

4.1.1. Revisión bibliográfica de los antecedentes de los estudios realizados concernientes a la estabilidad de laderas en la Loma del Peyé

En esta etapa se realizó la revisión de la bibliografía relacionada con los estudios realizados concernientes a la estabilidad de taludes en la Loma del Peyé con base en estudios realizados por el INGEOMINAS, el Plan de Ordenamiento Territorial donde se contempla la problemática en el sector de la Loma del Peyé, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial en la Recuperación Integral de la Loma del Peyé en el sector oriental, el Ingeniero Guilliam Barboza Miranda con el estudio de suelos y recomendaciones geotécnicas y de estabilización para la construcción del Colegio perteneciente a la Fundación Pies Descalzos, y el *Acuerdo de subsidio de microcapital realizado entre el PNUD y la Universidad de Cartagena* en el sector occidental de la loma del Peyé.

4.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.

Para la realización de esta etapa se analizó y clasificó toda la información suministrada por la Universidad de Cartagena respecto al *Acuerdo de subsidio de microcapital realizado entre el PNUD y la Universidad de Cartagena* en el sector occidental de la loma del Peyé denominado “*Fortalecimiento de las capacidades institucionales para la gestión del riesgo y el mejoramiento de los medios de vida de la comunidad vulnerable frente a fenómenos de remoción en masa, asentada en el sector denominado Lomas del Peyé, casco urbano de Cartagena, departamento de Bolívar*”, y con base en ello se realizó el Análisis de Estabilidad de Taludes, donde luego se caracterizó la zona de estudio y finalmente se diseñaron conceptualmente las obras de mitigación.

4.2.1. Topografía: El levantamiento topográfico se realizó para identificar accidentes, cuerpos de agua, drenajes naturales y obras existentes como canales y muros de contención, además de localizar las viviendas existentes, se definieron curvas de nivel cada 0,50 m, teniendo en cuenta la pendiente de la ladera, se localizaron las vías principales y secundarias de acceso así como las estructuras de drenaje de la zona. Para la realización del levantamiento topográfico se empleó una Estación Total Topcon GTS 239 W, debidamente calibrada y con sus respectivos certificados de calidad. Como elementos auxiliares se empleó un Prisma, un GPS, Cámara Digital, Cita Métrica y demás herramientas menores.

4.2.2. Geología y Geomorfología: Los datos geológicos y geomorfológicos del convenio se dividieron en dos tipos los generales y los locales, los primeros se basaron en la información recopilada por el personal de la Universidad principalmente en las bases de datos del INGEOMINAS, los datos locales son el resultado de la exploración del subsuelo que se desarrolló y de las visitas técnicas realizadas en el transcurso del estudio. Para la elaboración del estudio la fuente primaria se basó en los resultados del estudio local realizados por la Universidad de Cartagena.

4.2.3. Hidrogeología: Con base en los resultados de laboratorio y los registros de perforaciones realizados para los sondeos de SPT y Roto-perforación, se definieron las cotas de aguas freáticas las cuales al ser relacionadas con la Figura 32, nos permitieron obtener el valor de las presiones intersticiales (r_u)

4.2.4. Geotecnia y Sismicidad: De acuerdo a las perforaciones realizadas en el subsuelo del área de estudio por los métodos de SPT y Roto-perforación, se obtuvieron las diferentes muestras, las cuales luego de ser llevadas al laboratorio, permitieron obtener los parámetros geomecánicos necesarios para realizar la modelación en el software Slide[®] v.5.

La información sísmica de la zona proviene de los estudios realizados en 1997 por el INGEOMINAS, y fueron ajustados a la norma sismo resistente vigente en este caso la NSR-10.

4.3. MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

El modelo geológico-geotécnico se determinó a partir de todo el análisis y recopilación de la información obtenida tal cual como lo muestran los literales 5.2.1 al 5.2.5, los cuales luego de haber sido depurados, permitieron realizar el análisis de estabilidad de taludes en el sector occidental de la Loma del Peyé.

4.4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LA MODELACIÓN DEL SOFTWARE SLIDE® V.5

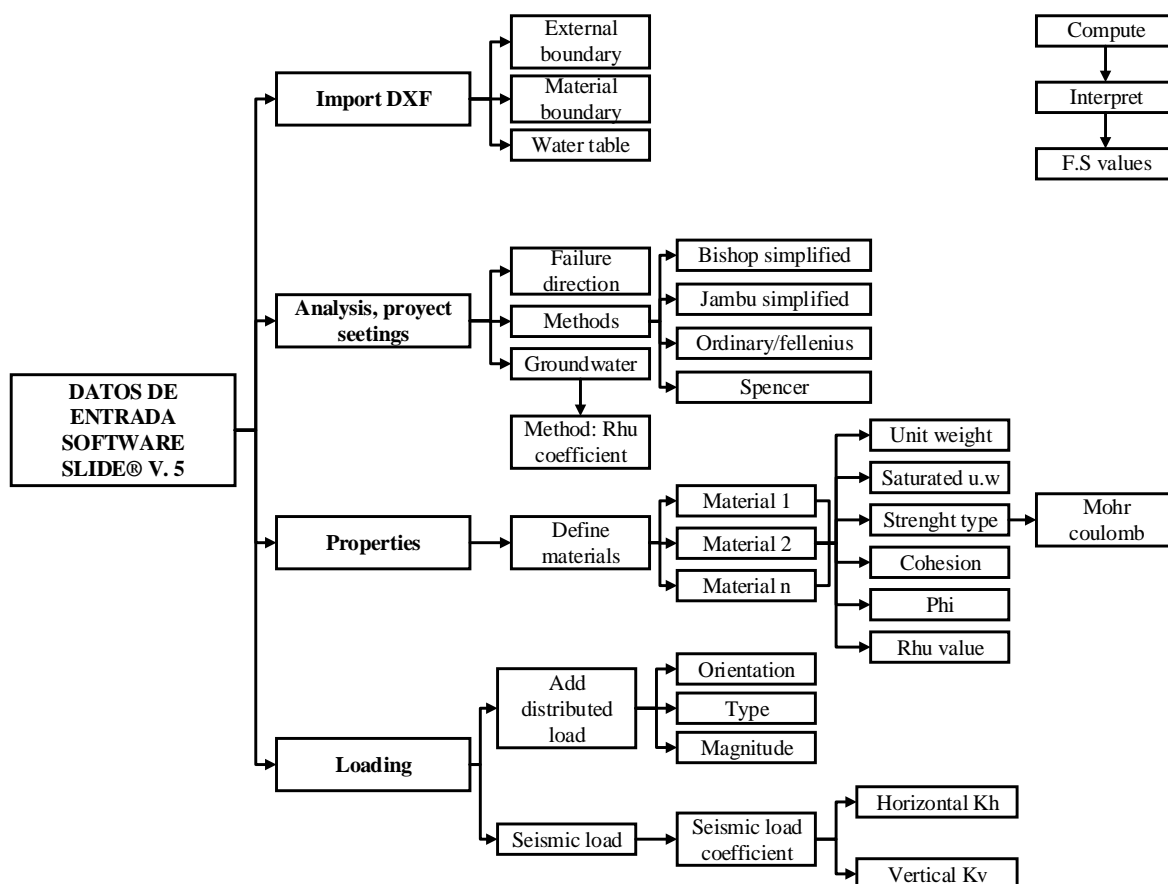
Para poder realizar este análisis, se debió haber cumplido con todos los literales anteriores, para así poder realizar el análisis de estabilidad de taludes.

Antes de realizar la modelación en el software Slide® V.5, se requiere crear en archivos independientes cada perfil ya trazado y creado, realizado de acuerdo a los datos obtenidos en el literal 4.3; por cada perfil se deben crear dos archivos, el primero que contenga el borde externo de todo el perfil a analizar, y el segundo que contenga los bordes internos de la estratigrafía encontrada (ambos archivos se deben encontrar en las mismas coordenadas x, y, z; luego éstos se deben guardar en formato *.dxf* ya que el software sólo permite importar esta clase de archivos).

Luego en el software Slide® V.5, importamos los dos archivos de cada perfil, en el cual, de acuerdo a cada tipo de material encontrado, se introdujo cada parámetro mecánico, las superficies de falla posibles, y se calcularon los Factores de Seguridad.

La Figura 17 muestra el esquema metodológico aplicado para el uso del software Slide® V.5.

Figura 17. Esquema metodológico aplicado para el uso del software Slide[®] V.5.



Una vez obtenidos los factores de seguridad en cada perfil, se clasificaron de acuerdo a Suarez, 1998 (ver Tabla 3) donde se muestra la clasificación de los mismos con respecto al nivel de estabilidad del talud, todo esto con el objeto de poder categorizar las condiciones de inestabilidad de la zona de estudio.

Tabla 3. Clasificación de los factores de seguridad

Factor de Seguridad	Categoría de Inestabilidad	Color
<1,2	Alta	
1,2<F.S.<1,5	Media	
>1,5	Baja	

Fuente: (Suarez Diaz, 1998)

4.4.1. Inspección Visual: se realizó una visita al sector occidental de la Loma del Peyé el día 17 de marzo de 2015, donde se hizo un reconocimiento del área en la cual se desarrolló nuestra investigación, identificando visualmente los tipos de material presentes en la zona, las posibles superficies de falla de los taludes, además de aquellas zonas en las que se encontraron taludes con problemas de erosión pluvial.

4.5. CATEGORIZACIÓN DE CONDICIONES DE INESTABILIDAD

A partir de los factores de seguridad obtenidos en cada perfil, y para cada condición de análisis planteada, se escogió el método de Equilibrio Límite que refleja las condiciones de inestabilidad más críticas en la zona de estudio.

A través del uso del software AutoCAD versión 2015, la herramienta ofimática Microsoft Excel 2013, y la modelación en el software Slide[®] v.5, se procedió a realizar los mapas que muestran la categorización de los taludes del sector occidental de la Loma del Peyé.

4.6. DISEÑO CONCEPTUAL DE OBRAS DE MITIGACIÓN

Una vez categorizada la zona de estudio por las condiciones de inestabilidad (ver Tabla 19 hasta Tabla 18), se plantearon las obras conceptuales de mitigación, teniendo en cuenta que las zonas donde se requieren obras de ingeniería para control de los taludes, protección de los mismos, entre otros, son aquellas zonas en las cuales al ser categorizadas dieron niveles de amenaza altos (color rojo, F.S. <1,1), además aquellas en las que al hacer la inspección visual se encontraron problemas de erosión.

Este diseño comprende el análisis de ingeniería respectivo a la construcción de las estructuras de control del talud, a las recomendaciones generales para la mitigación del riesgo, y ejecución de las obras necesarias.

Se presentan la localización de las obras en los planos obtenidos y recomendaciones pertinentes para el posterior diseño detallado de las obras.

5. RESULTADOS

Con base en la revisión de la información encontrada y suministrada por la Universidad de Cartagena en el *Acuerdo de subsidio de microcapital realizado entre el PNUD y la Universidad de Cartagena* en el sector occidental de la loma del Peyé descritas en el anterior capítulo, se presentan a continuación los resultados y sus análisis respectivos permitiendo obtener como resultado definitivo la categorización de las condiciones de inestabilidad de los taludes del sector en estudio, incluyendo el diseño conceptual de obras de mitigación, así como un análisis comparativo de los resultados arrojados por cada método de Equilibrio Límite.

5.1. ANÁLISIS DE LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

La información tomada para este análisis se fundamenta en la consulta realizada a través de las bases de datos indexadas y medios virtuales, tales como páginas web, prensa y literatura referente al estudio, así como toda la información de importancia referente a la justificación del estudio.

La Tabla 4 muestra la información recopilada basada en el análisis de estabilidad de taludes.

Tabla 4. Información recopilada basada en el análisis de estabilidad de taludes.

NOMBRE DEL DOCUMENTO	AUTOR	AÑO	OBJETIVO DEL DOCUMENTO
<i>A SLOPE STABILITY PROBLEM IN HONG KONG</i>	Dr Evert Hoek	1995	Realización de una extensa revisión sobre la estabilidad de taludes de suelo y roca en el territorio; e identificación de la potencialidad de inestabilidad del mismo.
<i>LIMIT EQUILIBRIUM METHOD BASED ON AN APPROXIMATE LOWER BOUND METHOD WITH A VARIABLE FACTOR OF SAFETY THAT CAN CONSIDER RESIDUAL STRENGTH</i>	Y.M. Cheng, D.Z. Li, L. Li, Y.J. Sun, R. Baker, Y. Yang	2011	Calculo del factor de seguridad de un talud con una superficie de falla determinada mediante un método de equilibrio límite equivalente que satisfaga todas las condiciones de equilibrio excluyendo la función de las fuerzas al deslizamiento.
<i>A COMPARATIVE STUDY OF VARIOUS COMMERCIALY AVAILABLE PROGRAMS IN SLOPE STABILITY ANALYSIS</i>	Wael Alkasawneh, Abdallah I. Husein Malkawi, Jamal Hassan Nusairat, Nermeen Albataineh	2008	Estudiar el efecto de las diferentes técnicas de la determinación de superficies de falla y el factor de seguridad obtenido, usando los métodos de equilibrio límite para la estabilidad de taludes.
<i>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y PROBABILIDAD DE FALLA DE DOS TALUDES DE SUELO TROPICAL EN LA AUTOPISTA MEDELLÍN – BOGOTÁ EN EL TRAMO DE VÍA ENTRE MARINILLA Y SANTUARIO</i>	Luis Javier Escobar Toro & Yamile Valencia González	2012	Evaluar la estabilidad para diferentes inclinaciones, de dos taludes de suelos de origen tropical, ubicados en el km 41+500 y km 49+200 de la autopista Medellín – Bogotá, aplicando métodos probabilísticos, con el fin de determinar el talud de corte más seguro en la ejecución de este tramo de vía
<i>ESTUDIO ESTABILIDAD DE TALUDES, TRAMO COMPRENDIDO ENTRE EL K1+470 Y EL K1+540 VÍA MANIZALES – LA CABAÑA</i>	A. María Castaño M., Álvaro E. Mora, Clemencia Naranjo H., Julia Naranjo R., Luz A. Peralta Q.	2011	Realizar el análisis de estabilidad a un talud que presenta unas condiciones desfavorables haciéndolo vulnerable a un posible movimiento en masa.

5.1.1. Análisis de información de los antecedentes de los estudios realizados concernientes a la estabilidad de laderas en la Loma del Peyé

Partiendo de la los estudios realizados por las diferentes entidades en la Loma del Peyé, se elaboró la Tabla 5 la cual se sintetiza los documentos que se han elaborado sobre la misma.

Tabla 5. Información recopilada en los estudios realizados sobre la loma del Peyé.

NOMBRE DEL DOCUMENTO	AUTOR	OBJETIVO DEL DOCUMENTO
<i>Zonificación Geotécnica y Aptitud y Uso del Suelo en el Casco Urbano de Cartagena</i>	Ingeominas, 2000	Analizar las características litológicas, geomorfológicas, geotécnicas, drenajes naturales y cobertura vegetal del terreno, con el fin de identificar y evaluar los problemas geológicos potenciales de la ciudad y sugerir el uso más apropiado del suelo.
<i>Decreto 977 de 2001 (Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias)</i>	Secretaría de Planeación Distrital de Cartagena, 2001	Crear los lineamientos necesarios para ordenar y el territorio, donde se contempla la problemática de la Loma del Peyé
<i>Recuperación Integral de la Loma del Peyé en el sector oriental, para desarrollar el Macroproyecto de la Popa</i>	Consortio DJU, DQ Ingeniería, 2008	Analizar las condiciones geológico-geotécnicas para la recuperación integral de la Loma del Peyé, sector oriental
<i>EVALUACIÓN GEOTÉCNICA Y DISEÑOS GEOTÉCNICOS E HIDRÁULICOS DE OBRAS DE MITIGACIÓN, EN LAS LADERAS DONDE SE PLANEA CONSTRUIR EL COLEGIO DE LA FUNDACIÓN PIES DESCALZOS, EN LA CIUDAD DE CARTAGENA</i>	Guilliam Barboza Miranda, 2011	Evaluar geotécnicamente el subsuelo donde se proyecta la construcción del Colegio de la Fundación Pies descalzos.

Tabla 4. (continuación)

<p><i>Fortalecimiento de las capacidades institucionales para la gestión del riesgo y el mejoramiento de los medios de vida de la comunidad vulnerable frente a fenómenos de remoción en masa, asentada en el sector denominado Lomas del Peyé, casco urbano de Cartagena, departamento de Bolívar</i></p>	<p>Universidad de Cartagena</p>	<p>Fortalecer las capacidades institucionales para la gestión del riesgo y el mejoramiento de los medios de vida de la comunidad vulnerable frente a fenómenos de remoción en masa, asentada en el sector denominado Lomas del Peyé, casco urbano de Cartagena.</p>
--	-------------------------------------	--

5.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.

A continuación se muestra el análisis y clasificación de la información obtenida para llevar a cabo el presente estudio.

5.2.1. Topografía: La zona de estudio comprende un área de importancia de 19,5 ha, de acuerdo con la base cartográfica a escala 1:2000. Para la complementación de la topografía general de la zona, se tomó en información en campo correspondiente a viviendas, accidentes del relieve, escarpes, cárcavas, área de filtraciones y posibles cursos del agua de escorrentía, generando curvas de nivel cada 0,50m, además de las estructuras existentes como gaviones, muros de contención, áreas pavimentadas y toda la infraestructura existente como alcantarillado, postes, etc. El estudio topográfico se complementó con el levantamiento de las vías internas y lotes habitados dentro del área de trabajo, tomando niveles en la vía de drenaje principal, hasta el punto indicado como adecuado para la descarga final y segura de la escorrentía que se pretende encausar aguas arriba. El detalle planimétrico y altimétrico especificó el levantamiento de los paramentos de las viviendas, los niveles de los principales accidentes orográficos, los linderos externos de las viviendas, las vías existentes y demás detalles importantes requeridos como parte fundamental del estudio (Universidad de Cartagena, 2014).

5.2.1.1. Levantamiento Planimétrico: Se realizó el levantamiento perimetral del área y los taludes existentes. El levantamiento se amarró al Datum Oficial de Colombia Magna Sirgas, especificando el origen definido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se localizaron todos aquellos elementos que se consideraron relevantes en el estudio.

5.2.1.2. Levantamiento Altimétrico: Se realizó el levantamiento altimétrico del área de estudio en mención, para determinar las cotas del terreno. Se definieron los principales accidentes topográficos, en especial los escarpes que definen la geomorfología del área.

5.2.1.3. Puntos de referencia topográfica: Teniendo en cuenta que los datos e información topográfica del área debe estar georeferenciada y soportada sobre coordenadas planas, el equipo de levantamiento tomó como punto de referencia del levantamiento el BM 569 de Aguas de Cartagena S.A. ESP. La toma de datos en el área de estudio se inició con la radiación de los puntos correspondientes a las vías de cerramiento perimetral de la zona, detallando el nivel de piso de cada vivienda; y luego detallando los accidentes, obras civiles existentes y demás elementos de relevancia para el presente estudio.

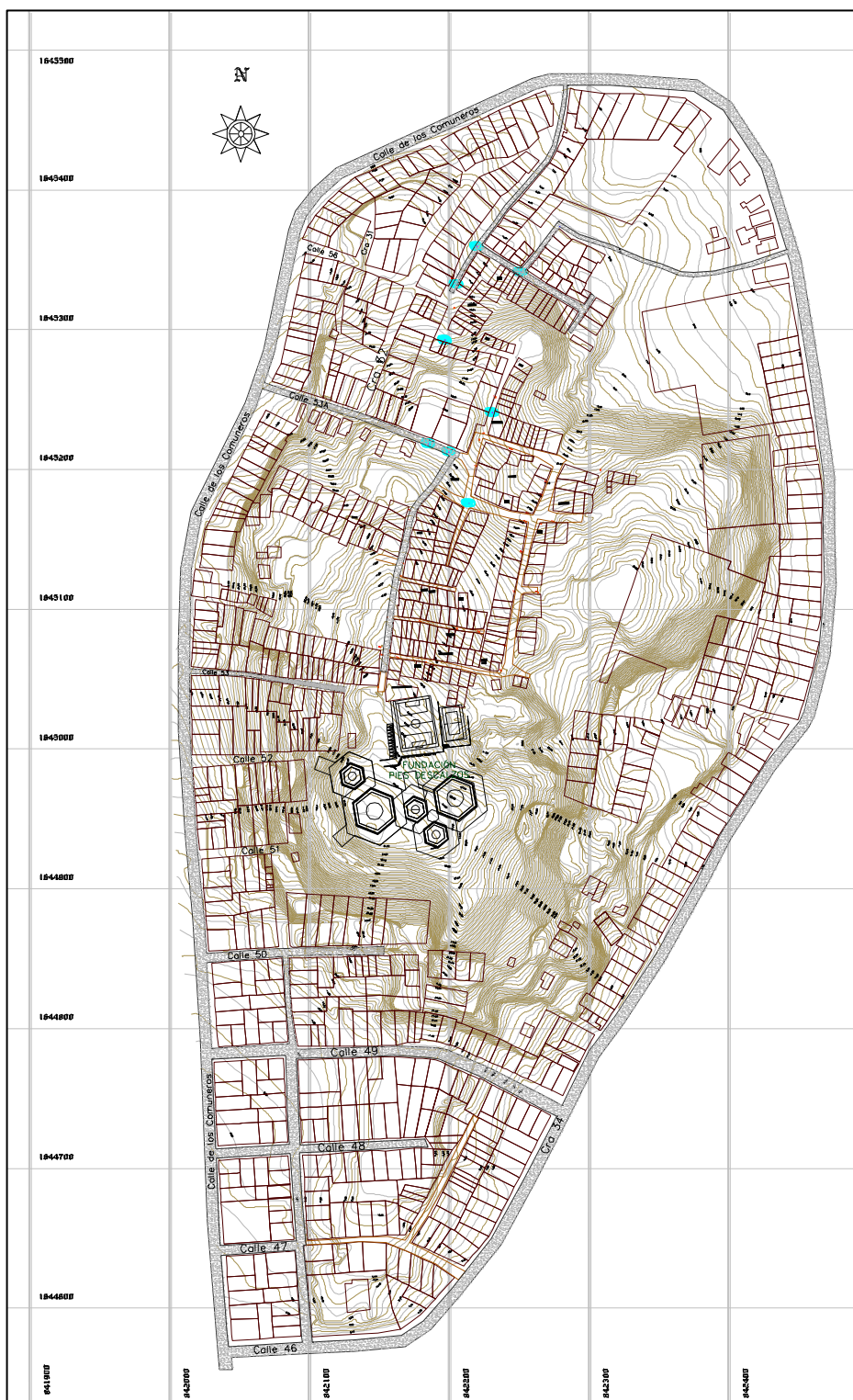
Tabla 6. Características del BM de referencia.

BM	BARRIO	DIRECCIÓN	LOCALIZACIÓN	NUEVA COTA	REFERENCIA
569	La María	Carrera 34 No.48-64 Sector Los Corales	Esquina en andén lado izquierdo paramento casa	3.968 m	No hay referencia

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

La Figura 18 muestra la topografía del área de estudio.

Figura 18. Plano topográfico del área de estudio



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

5.2.2. Geología de área de estudio: Las actividades de campo del componente geológico, se iniciaron con una fase de reconocimiento del trabajo de cartografía a escala 1:2.000 de la Loma del Peyé. Dentro de las labores de campo adelantadas por el componente geológico durante el desarrollo del estudio, además del reconocimiento general del área, estuvo la recolección de información litológica y estructural georeferenciada, de acuerdo con la base topográfica complementada por la Universidad de Cartagena. Así mismo, se realizó el inventario de los afloramientos de roca existentes en la geoforma, lo que permitió la descripción de la estratigrafía de los materiales presentes en el área de estudio.

5.2.2.1. Litología: El área de estudio, con una extensión aproximada de 18 ha limitadas al borde occidental y los extremos norte y sur de la Loma del Peyé, está casi en su totalidad cubierta por una secuencia litológica que hace parte de la Formación La Popa (Qpp), principalmente de la interfase entre la base del miembro superior calcáreo y el techo del miembro detrítico inferior, tomando como referencia la Columna Estratigráfica general de esta Formación publicada por el Ingeominas en el año 2001. La siguiente es la secuencia estratigráfica general de base a techo en el área de estudio:

- **Arcillolitas Limosas Inferiores.** Ocupan un amplio sector al sur del área, presentando un suave relieve con pocas pendientes localizadas especialmente hacia el borde suroriental, donde se observaron los mejores afloramientos de la unidad. Se componen principalmente de arcillolitas limosas en capas gruesas de aspecto masivo y homogéneo, con intercalaciones y lentes de arenas de grano fino y frecuentes planos de fracturas rellenas con venas de yeso de hasta 7.0 cm de espesor (ver Figura 19).

En general, se presentan de color pardo amarillento en superficie, a gris oscuro en la roca fresca y de consistencia firme a compacta. Las fracturas son esencialmente verticales y presentan dos tendencias predominantes: NS y EW (ver Figura 20). Dado el carácter masivo y homogéneo y el grado de compactación de este nivel, dentro del área de estudio no se observan afectaciones por fenómenos de erosión ni de remoción de masas. En general, en los afloramientos tiende a mostrar cierto grado de estabilidad, aún en taludes verticales.

Figura 19. Afloramiento de las Arcillolitas limosas al sur del área de estudio.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

Figura 20. Detalles del afloramiento anterior. Izquierda: fracturas verticales con rellenos de yeso, orientación NS. Derecha: Estratificación horizontal de los estratos.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

- **Areniscas de grano fino.** Afloran en el costado oriental de la Loma del Peyé, por fuera del área de estudio, razón por la cual no fueron ampliamente revisadas. Están conformadas esencialmente por gruesos bancos de más de 5.0 - 6.0 metros de espesor de

areniscas de grano fino a conglomerático, de color amarillo pardusco, con presencia de estratificación cruzada a gran escala (ver Figura 21)

Figura 21. Afloramiento de Areniscas arcillosas de grano fino, costado oriental de la loma del Peyé, por fuera del área de Estudio.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

Se trata de arenas friables poco cementadas, muy susceptibles a la erosión por aguas de escorrentías y eventuales deslizamientos por saturación. Sin embargo, estos fenómenos no pudieron ser evidenciados durante los recorridos efectuados, ni en los afloramientos de este nivel al oriente del cerro.

- **Limolitas arcillosas y arenas sueltas.** Es el cuerpo de mayor representatividad en el área de estudio, ocupando la parte central, el norte y las faldas del costado occidental del cerro. Están conformadas por limolitas arcillosas de color pardo a café amarillento, ocasionalmente con presencia de carbonatos lixiviados provenientes de los niveles calcáreos superiores. Hacia la parte superior presenta un nivel de arenas sueltas de grano medio con intercalaciones compactas de cemento calcáreo, que afloran en el sector comprendido entre los Pozos P-1 y P-4 (Rotación 1 y 4) (ver Figura 22)

Figura 22. Afloramiento de arenas sueltas de grano fino a medio con concreciones arenosas calcáreas.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

La parte media e inferior adquieren un mayor contenido limo-arcilloso en una sucesión monótona de arcillolitas grises algo plásticas y limolitas parduscas en capas de 1,0 –5,0 cm, con intercalaciones de areniscas arcillosas pardo amarillentas de grano muy fino del mismo espesor. Esta estratificación es más frecuente en el costado occidental del cerro, donde por sectores se observan así mismo, diaclasas verticales con planos preferentemente N20°E, N70°W, NS y N24°W (ver Figura 23).

Figura 23. Limolitas arcillosas en el costado occidental del cerro.



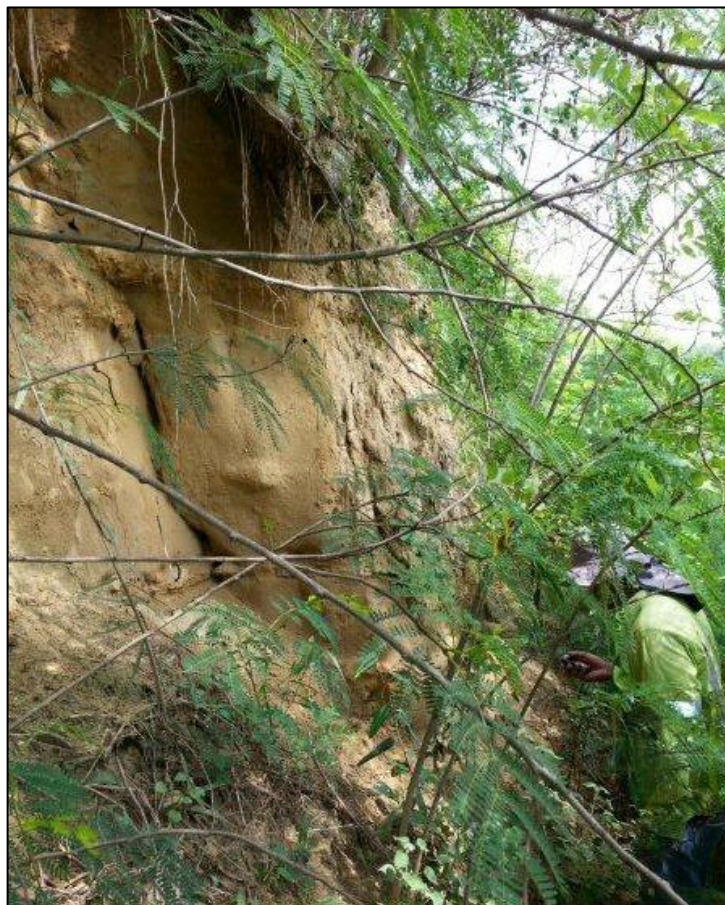
Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

Hacia el costado oriental del cerro, por fuera del área de estudio, estas limolitas arcillosas adquieren un aspecto masivo y homogéneo con estratificación subhorizontal suavemente inclinada hacia el W, generando una mayor estabilidad de los taludes existentes.

Dependiendo de la litología y el grado de compactación y cementación de los estratos que lo componen, este nivel presenta diversos grados de respuesta a los fenómenos de erosión y deslizamientos. Las arenas sueltas del techo del nivel, están localmente afectadas por la erosión superficial y pequeños deslizamientos en algunos puntos aislados.

Por su parte, las limolitas arcillosas muestran una ligera tendencia al desprendimiento y caídas de pequeños segmentos en algunos sectores de la pendiente occidental del área. Esta condición es contraria a la pendiente oriental donde el cuerpo muestra mayor compactación y menos planos de fracturas y de estratificación (ver Figura 24).

Figura 24. Limolitas arcillosas en el costado oriental del cerro.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

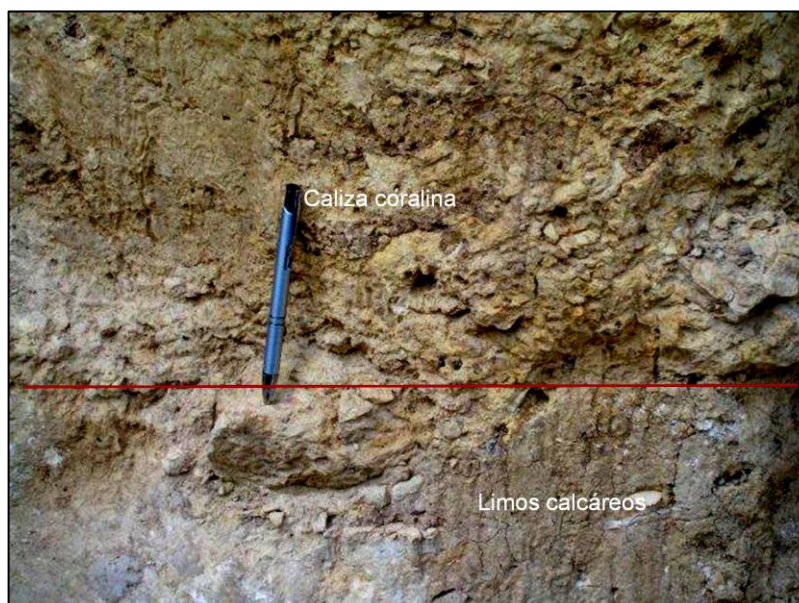
- **Arcillas calcáreas, Margas y Calizas margosas.** Constituyen el nivel superior de la secuencia estratigráfica reconocida en el área de estudio, aflorando en una delgada franja en la parte central y más alta del cerro en los alrededores del colegio y el Pozo P-2 (Rot 2). Está conformado principalmente por calizas coralinas poco compactas en la parte superior, margas y arcillas plásticas calcáreas, éstas últimas de color gris con abundantes fragmentos coralinos con tintes grises y amarillentos (ver Figura 25 y Figura 26).

Figura 25. Contacto entre caliza coralina ligeramente cementada de color crema amarillento, sobre limos calcáreos y margas de poca dureza.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

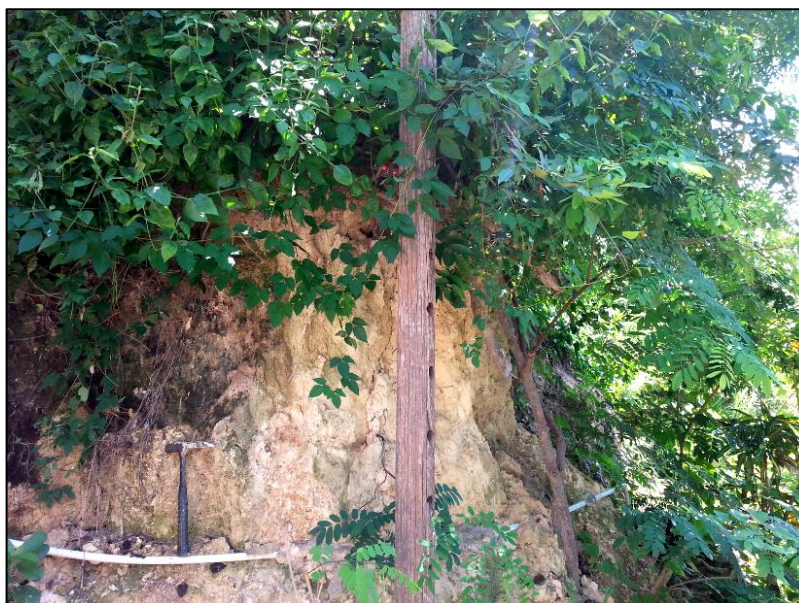
Figura 26. Detalles del afloramiento anterior. Contacto caliza coralina sobre limos calcáreos.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

Hacia el costado occidental del cerro, dentro de la zona de estudio y donde se presentan las mayores pendientes del terreno, es más notoria la presencia de margas y calizas margosas con fósiles coralinos, las cuales están en contacto con las limolitas arcillosas inferiores, formando todo el conjunto taludes con alta inestabilidad debido a la poca compactación de ambos niveles (ver Figura 27).

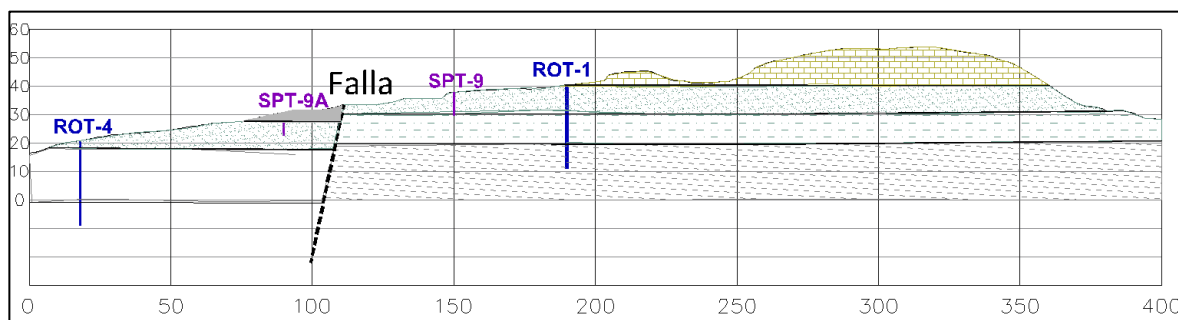
Figura 27. Caliza margosa con fragmentos de corales, muy blanda, aspecto terroso sobre limolitas arcillosas en el costado occidental de cerro.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

5.2.2.2. Estructural: En el caso del área de estudio en la Loma del Peyé, por medio de las perforaciones y sondeos efectuados, se ha identificado una Falla Normal Inferida en la parte central del cerro que está afectando algunos de los niveles. Se trata de una falla de dirección NW con inclinación al NE, la cual involucra los estratos entre los pozos P-1 y P-4 (Rot. 1 y 4), tal como se muestra en la Figura 28, ocasionando entre otros aspectos, el amplio afloramiento del nivel de limolitas arcillosas y la presencia de arcillas calcáreas y calizas coralinas en el sector norte del área.

Figura 28. Corte geológico donde se ilustra la falla de dirección NW con inclinación al NE identificada en el área de estudio.

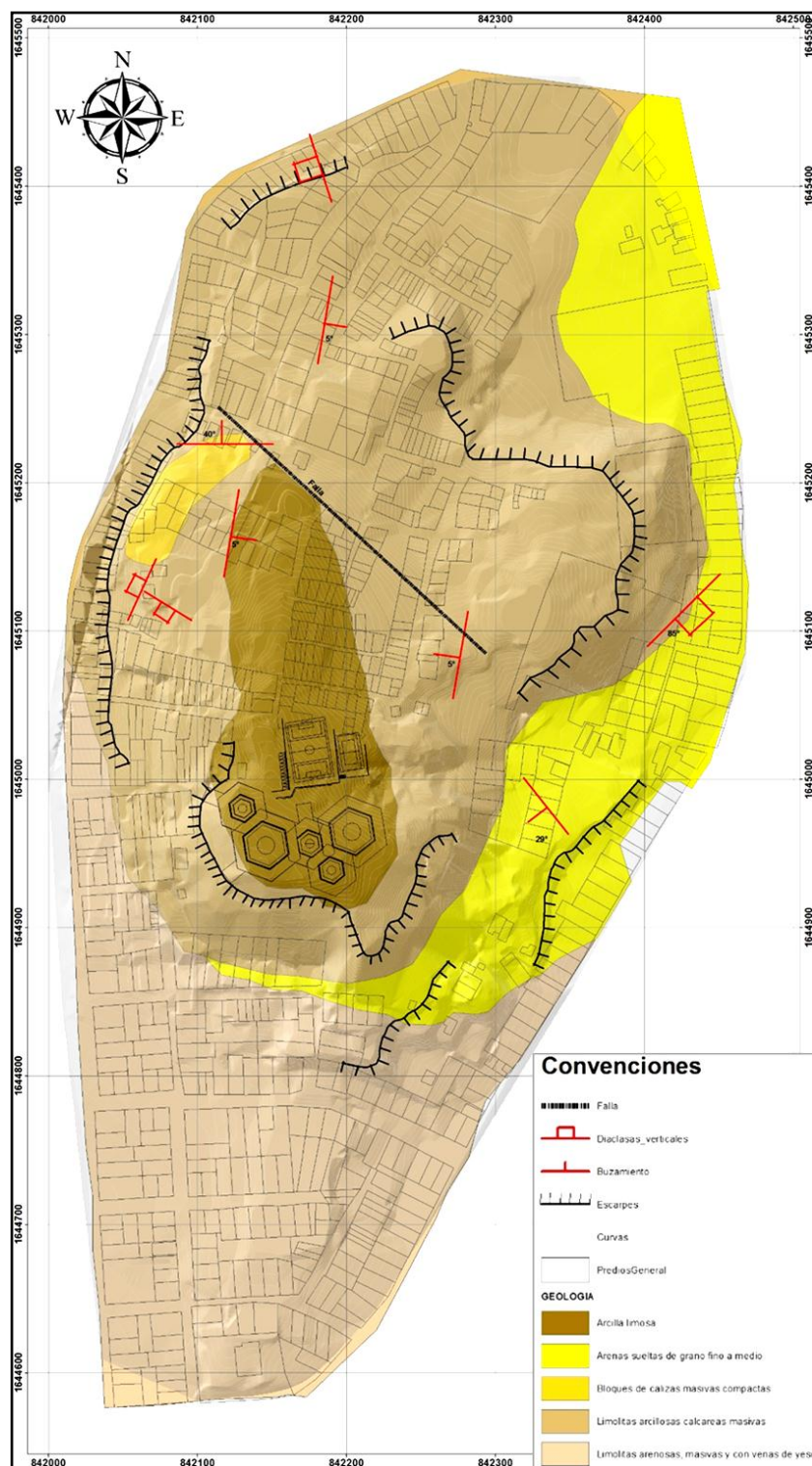


Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

Con la ayuda del Sistema de Información Geográfico ArcGIS se realizó una ambientación de la geología del área de estudio integrada por la parte estructural, la cual se presenta en la Figura 29.

(Universidad de Cartagena, 2014)

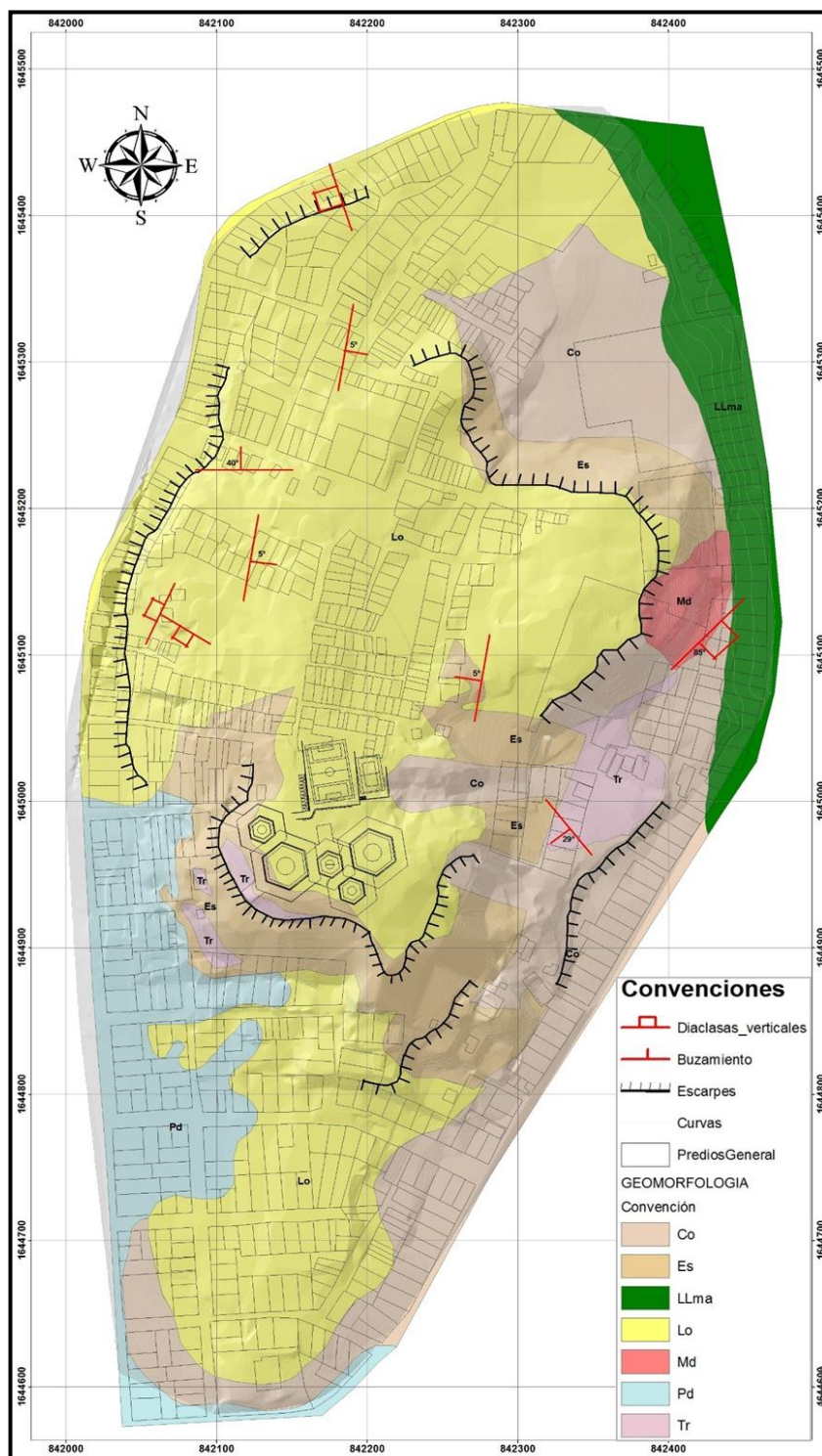
Figura 29. Plano Geológico del Área de Estudio.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

5.2.3. Geomorfología: Geomorfológicamente la Loma del Peyé está conformada por laderas de pendientes mayores de 70 grados y alturas variables entre 10 y 20 metros que conforman los escarpes de antiguas zonas de explotación de materiales de construcción, las cuales han sido invadidas en su parte superior e inferior. Debido a los procesos erosivos intensos tipo laminar, surcos y cárcavas que han afectado estas laderas, durante la época invernal se presentó remoción en masa tipo flujos de detritos y lodos en la zona correspondiente al sector Los Corales. Con base en estudios anteriores, recorridos efectuados en la zona de estudio y tomando como línea base la altimetría del sector, se dividió la caracterización geomorfológica en dos fases; la primera comprendió la identificación de las formas de los relieves existentes, estructurales, denudacionales y de acumulación, y la segunda destacó la identificación espacial y clasificación de los diferentes procesos denudacionales presentes en el área de estudio. En la Loma del Peyé se identificaron las siguientes unidades geomorfológicas como lo son la Lomas (Lo), Coluviones (Co), Terrazas (Tr), Masas deslizadas (Md) y Pedimentos (Pd). La elaboración del mapa de geomorfología, está fundamentado preliminarmente en el mapa de geomorfología a escala 1:10.000 que realizó el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) en el año 2001 en la ciudad de Cartagena y es el producto de los múltiples recorridos realizados al área de estudio y análisis espacial realizado por los autores. La Figura 30 ilustra el mapa de Geomorfología obtenido, el cual fue ambientado en altorrelieve por medio del ArcGIS® 10.1, superpuesto en el plano topográfico.

Figura 30. Plano de Geomorfología del área de estudio.



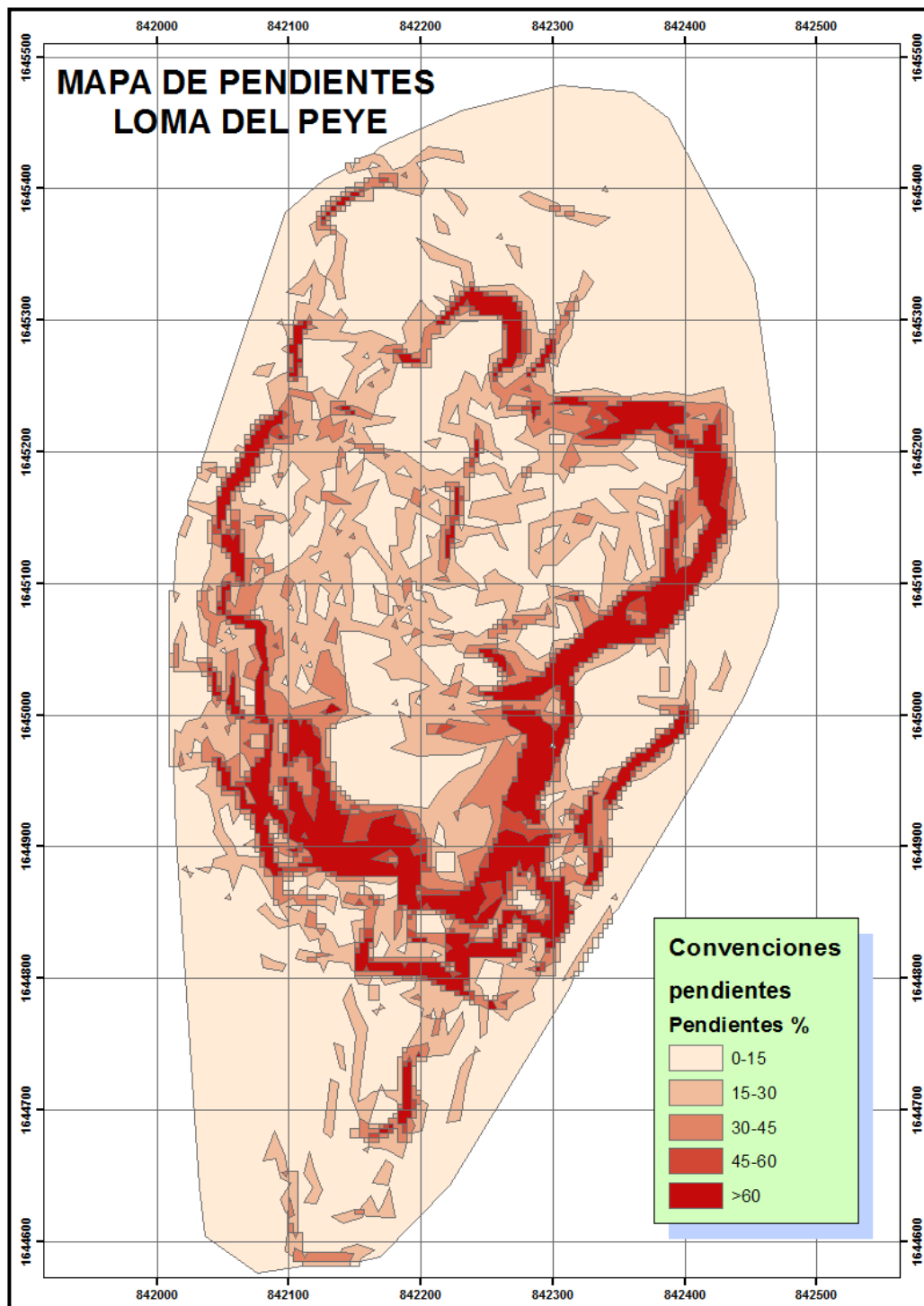
Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

El mapa geomorfológico obtenido destaca la existencia de una alta presencia de escarpes, en los que se presenta la mayoría de los fenómenos denudativos como deslizamientos y flujo de materiales, favorecido en un gran porcentaje por las consecuencias generadas por la presencia y vestigios de antiguas canteras localizadas en la zona. Es de anotar que hay zonas un poco más estables como las Terrazas (Tr) y las Lomas (Lo). En las Llanuras Intermareales (Llia), Llanuras de Manglar Antiguo (LLma) y Coluviones (Co), se presenta una problemática nula a fenómenos denudacionales tipo de remoción en masa, sin embargo en estos sectores pueden presentarse flujos de lodos provenientes de los taludes.

Las áreas donde existe mayor susceptibilidad a fenómenos denudativos son las Masas Deslizadas (Md), que corresponden a aquellos sectores donde se han presentado en el pasado reciente, fenómenos de remoción en masa con deslizamiento rotacional y componentes traslacionales.

En la Figura 31 se ilustra el mapa de pendientes obtenido con base en la información recopilada de la zona de estudio, en donde se puede apreciar de mejor forma la variación en las pendientes tanto en las zonas elevadas como en las zonas de geomorfología plana.

Figura 31. Mapa de pendientes de la zona de estudio.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

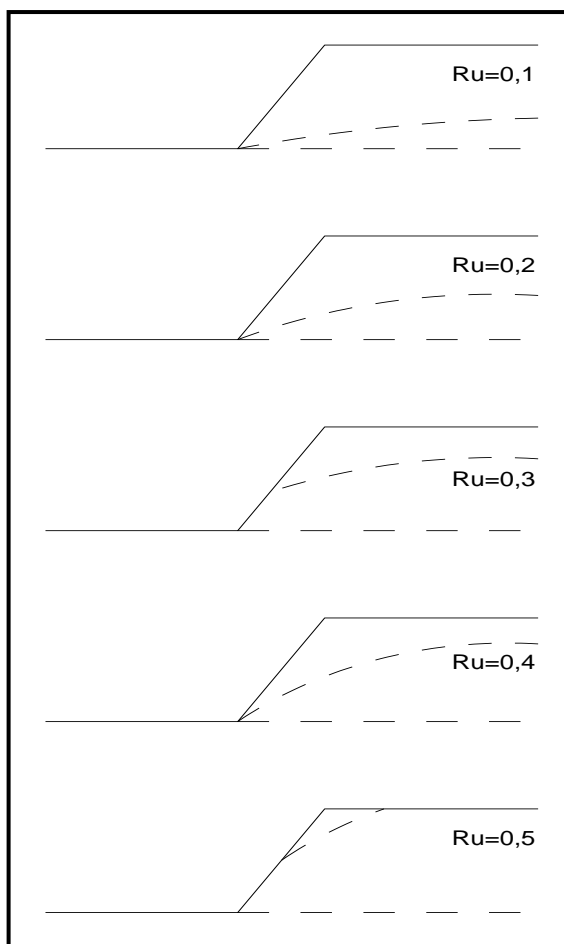
5.2.4. Hidrogeología

La presencia del agua en el interior del talud da lugar a la aparición de *presiones intersticiales* que pueden ser conocidas a partir de la red de flujo establecida.

El terreno puede quedar dividido en dos zonas con presión intersticial negativa y positiva, siendo la línea de separación entre ambas el nivel freático en el que la presión del agua es igual a la atmosférica.

En ocasiones la presión del agua puede quedar caracterizada mediante el *coeficiente de presión intersticial*, r_u , donde su máximo valor se obtiene para el caso del talud totalmente saturado (EPTISA, 1987).

Figura 32. Valor del coeficiente de presión intersticial, r_u , para distintas posiciones del nivel freático en un talud de suelo.



Fuente: (EPTISA, 1987).

Para nuestro caso de estudio se realizaron las respectivas modelaciones con un valor de r_u igual a 0,5 suponiendo los taludes totalmente saturados.

5.2.5. Geotecnia y Sismicidad: La caracterización de las propiedades geomecánicas del subsuelo en el área de estudio en Loma del Peyé, se fundamentó en la recopilación de estudios geotécnicos realizados por INGEOMINAS (2001), DJU (2008) en sector oriental y Barboza (2011) para la implantación del Colegio Pies descalzos. La metodología utilizada se estableció con base a un modelo directo, que consistió en el análisis de los resultados obtenidos luego de ejecutada una fase de exploración directa del subsuelo, que permitió la recuperación de testigos de tipo alterado e inalterado, para su posterior análisis en laboratorio. Se ejecutaron perforaciones tipo rotación por parte de la empresa CI AMBIENTAL S.A.S. y de percusión con Ensayos de Penetración Estándar (SPT) realizados por la Universidad de Cartagena.

El propósito fundamental de la toma de muestras del subsuelo, fue permitir la obtención en laboratorio, de los parámetros geotécnicos necesarios tanto para la caracterización, como para la definición de aspectos a considerar en los análisis de estabilidad de la zona de estudio en general.

La fase de exploración del subsuelo permitió contrastar los resultados obtenidos durante el desarrollo de cada perforación en los sitios específicos, con resultados obtenidos previamente de otros estudios realizados en el sector, de tal manera que se amplió y actualizó la información geotécnica de la zona de estudio, en relación a la definición de la capacidad de los suelos encontrados y sus propiedades geomecánicas.

Cabe destacar que como punto de partida para la identificación de materiales y localización de los puntos de perforación, se tomó el estudio realizado por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) en el año 2001 para toda la ciudad de Cartagena, el cual dividió el sector de estudio en zonas geotécnicas específicas de interés.

5.2.5.1. Investigación del subsuelo: Inicialmente se realizó la recopilación y análisis de información existente, tal como mapas geológicos, geomorfológicos, fotografías aéreas y estudios anteriores realizados en el área de estudio. Con base en el análisis previo de dicha información, se programó la ejecución de exploraciones del subsuelo, en los puntos donde se consideró un mayor grado de importancia para la obtención de información veraz de la zona.

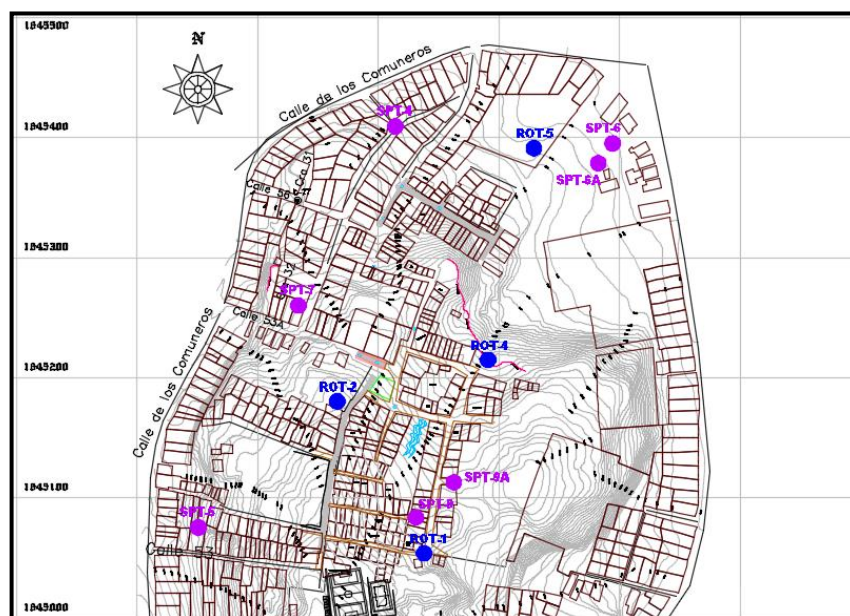
Las perforaciones ejecutadas por parte de la empresa CI AMBIENTAL S.A.S fueron realizadas mediante un equipo Beretta Alfredo Tipo T-46 para Roto-perforación en diámetro HQ. El equipo de perforación citado, cuenta con un motor de 47KW que acciona un sistema de transmisión de rotación al cabezal de la máquina, conectado a su vez a la tubería de perforación, en cuyo extremo se ubica la corona rotatoria. Mediante este sistema los diámetros de los testigos recuperados fueron de 63,5 mm.

Las perforaciones ejecutadas por medio de Ensayos de Penetración Estándar (SPT) fueron desarrolladas con un equipo de percusión. Las muestras representativas fueron obtenidas con un toma-muestra partido (Split spoon) de 2 pulgadas de diámetro externo, de acuerdo con lo especificado en la norma ASTM 1586. El toma-muestra fue hincado en el suelo con una pesa de 140 libras que se dejó caer una distancia de 30 pulgadas. El número de golpes (N) requerido para que el toma-muestras penetrara las últimas 12 pulgadas de un recorrido de penetración de 18 pulgadas, se registró como el valor de la resistencia a la penetración estándar.

Las muestras de suelo recuperadas fueron selladas y enviadas al laboratorio para ser ensayadas y clasificadas. El registro de perforación de campo fue preparado por el personal encargado de la ejecución de los sondeos; estos registros incluyeron clasificación de los materiales encontrados durante el sondeo, como también la interpretación de las condiciones del subsuelo entre las muestras obtenidas. Los registros finales de perforación del presente estudio incluyen modificaciones basadas en observaciones de laboratorio y ensayos sobre las muestras. Finalmente las muestras fueron clasificadas de acuerdo con los sistemas de clasificación de suelos.

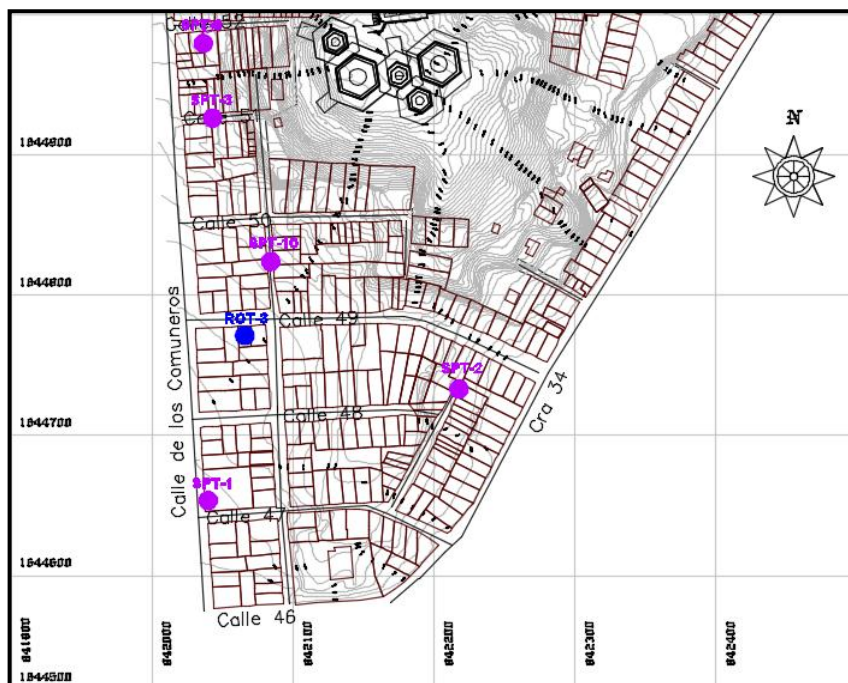
En total se ejecutaron cinco (5) perforaciones por Roto-perforación en diámetro HQ, cuyas profundidades de exploración oscilaron entre 25,0 y 35,0 m, para un total de 150,0 ml de exploración; y doce (12) perforaciones o sondeos distribuidos a lo largo y ancho del área de estudio por medio del Ensayos de Penetración Estándar (SPT), cuyas profundidades de exploración oscilaron entre 3,0 y 12,0 m, para un total de 100,0 ml de exploración. La Figura 33 y Figura 34 ilustran la localización en planta de los sondeos ejecutados.

Figura 33. Localización Sondeos de Rotoperforación HQ y SPT ejecutados en el sector norte del área de estudio.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Figura 34. Localización Sondeos de Rotoperforación HQ y SPT ejecutados en el sector sur del área de estudio.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

La Tabla 7 y Tabla 8 presentan las coordenadas de referencia y la profundidad de exploración de cada una de las perforaciones realizadas en el área de estudio.

Tabla 7. Coordenadas planas y profundidad de perforaciones ejecutadas por el método de Rotoperforación.

Sondeo	Equipo	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad máx. del sondeo (m)
PC-01	Rotación	1645054	842238	30,0
PC-02	Rotación	1645180	842166	35,0
PC-03	Rotación	1644771	842065	25,0
PC-04	Rotación	1645215	842291	30,0
PC-05	Rotación	1645391	842329	30,0

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Tabla 8. Coordenadas planas y profundidad de perforaciones ejecutadas por el método SPT.

Sondeo	Equipo	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad máx. del sondeo (m)
S-1	SPT	1644653	842039	11,0
S-2	SPT	1644733	842217	12,0
S-3	SPT	1644926	842043	10,0
S-4	SPT	1645409	842214	5,0
S-5	SPT	1645075	842050	9,0
S-6	SPT	1645395	842394	3,0
S-6a	SPT	1645378	842382	3,0
S-7	SPT	1645260	842133	10,0
S-8	SPT	1644991	842039	11,0
S-9	SPT	1645083	842231	8,0
S-9a	SPT	1645113	842262	7,0
S-10	SPT	1644824	842084	11,0

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Los registros de campo de perforación de los sondeos ejecutados se plasmaron en formatos elaborados para el proyecto. Para el caso de las Roto-perforaciones en diámetro HQ, éstas se realizaron en seco hasta donde la capacidad del equipo lo permitió, de ahí en adelante se continuó con leves inyecciones controladas de agua, para permitir el proceso y evitar el excesivo recalentamiento del equipo.

5.2.5.2. Ensayos de laboratorios: Aparte de los ensayos de laboratorio contratados por el PNUD con la empresa contratista CI Ambiental S.A.S. sobre las muestras más representativas de suelo y roca obtenidas durante las Roto-perforaciones en diámetro HQ, la Universidad de Cartagena de acuerdo con los resultados de exploración del subsuelo y las características de los materiales encontrados, formuló alternamente un plan de ensayos de laboratorio, con el fin de hacer una adecuada caracterización geomecánica de los materiales presentes en el área.

Para cada sondeo se recuperaron en campo muestras típicas de suelo y roca, las cuales una vez descritas e identificadas, se clasificaron mediante los sistemas S.U.C.S. (Sistema Unificado de Clasificación de Suelo) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) para ensayarlas en el laboratorio de geotecnia y materiales, en el que se realizaron los siguientes ensayos:

- Granulometría por tamizado (INV E-123)
- Contenido de humedad natural (ASTM D2974)
- Límites de Atterberg (ASTM D4318)
- Pesos unitarios (ASTM D2937-71)
- Gravedad específica de los sólidos (INV E-128)
- Hidrometría (ASTM D422-63)
- Compresión inconfiada (ASTM D2166-00)
- Corte directo consolidado-drenado (ASTM D3080-04)
- Expansividad y colapso (ASTM D4829-95 y ASTM D 5333)
- Permeabilidad (ASTM D 2434-68)
- Presión de hinchamiento (ASTM D 4546)
- Ensayo triaxial consolidado-no drenado (ASTM D 4767)
- Consolidación (ASTM D 2435-90)
- Peso unitario en Roca (INV E 217-07)
- Compresión simple en Roca (ASTM D3148)
- Corte directo en Roca (ASTM D5607)



EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS TALUDES DEL SECTOR OCCIDENTAL DE LA LOMA DEL PEYÉ, CASCO URBANO DE CARTAGENA



Desde la Tabla 9 a la Tabla 15, se presenta el resumen de los resultados de laboratorio realizados por parte de CI AMBIENTAL S.A.S. y la Universidad de Cartagena.

Tabla 9. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por CI AMBIENTAL S.A.S., Pozo PC-1.

PERF.	MUESTRA	PROF. (m)	PROPIEDADES ÍNDICE Y DE CLASIFICACIÓN													CORTE DIRECTO				c.s. qu (MPa)	DESCRIPCIÓN	
			Gs	wn (%)	HIDROM.	PASA T No. 200 (%)	Finos (%)	Arena (%)	Grava (%)	w _p (%)	w _L (%)	IP	USC	γ _t (g/cm ³)	PICO		RESIDUAL					
															C' _p (kPa)	φ' _p (°)	C' _{Res} (kPa)	φ' _{Res} (°)				
PC-01	M-1	0.00-3.00	2,65	18,5		58,4	2,6	97,4	0,0	NP	NL	-	SM	1,76							0,10	Arena de grano fino algo limosa de color gris
PC-01	M-4	6.00-7.50	2,65	25,5		74,8	6,0	91,0	3,0	NP	NL	-	SM	1,69	0,0	44,7	5,2	30,8				Arena de grano fino algo limosa de color gris
PC-01	M-5	7.50-9-00	2,72		Anexos																	Limo con arena de grano fino color café, consistencia media, con lentes de caliza, con oxidaciones
PC-01	M-6	9.00-10.50	2,69	25,0		67,9	86,5	13,5	0,0	31,4	43,7	12,3	ML	1,88						0,24		Limo de baja plasticidad con algo de arena de grano fino color amarillo grisáceo, consistencia
PC-01	M-9	13.50-15-00	2,70	30,7		58,7	94,5	5,5	0,0	25,9	65,1	39,3	CH	2,09								Arcilla de alta plasticidad color gris habano, lentes de caliza, con oxidaciones
PC-01	M-10	15.00-16.50	2,68	25,9		98,2	60,2	8,7	31,1	26,2	56,7	30,6	CH	2,09								Arcilla de alta plasticidad color gris y amarillo, consistencia media, con algo de material coralino
PC-01	M-11	16.50-18.00	2,69	29,0		65,0	86,3	11,5	2,2	32,0	76,3	44,4	CH	1,82								Arcilla de alta plasticidad con algo de arena de grano fino, color carmelito con oxidaciones. Consistencia dura
PC-01	M-12	18.00-18.50		19,0	Anexos									1,94	126,5	14,3	78,8	6,6				27 cm de Arcilla arenosa color gris claro, de grano fino, con fragmentos de caliza, de consistencia dura. Presenta fracturas y vetas de oxidación, seguido por 43 cm de Arcilla color gris claro, 20 cm de caliza y finalmente 23 cm de arcilla arenosa color hábano claro, de grano fino y consistencia media.
PC-01	M-13	19.50-21.00	2,69	29,9		95,6	80,1	18,5	1,4	22,5	66,6	44,1	CH	1,73								Arcilla limosa de alta plasticidad, con arena de grano fino color carmelito, consistencia media, con oxidaciones
PC-01	M-14	21.00-22.50	2,69	25,2		60,0	87,8	12,2	0,0	21,0	50,4	29,4	CH	1,98								Arcilla limosa de alta plasticidad, con arena de grano fino color amarillo con negro, consistencia media, con oxidaciones
PC-01	M-15	22.50-24.00	2,69	26,8		75,6	81,2	18,8	0,0	35,8	60,9	25,1	MH	1,96								Limo arcilloso de alta plasticidad con arena de grano fino color carmelito, con oxidaciones
PC-01	M-19	28.50-30.00	2,69	35,5		87,1	71,0	29,0	0,0	24,2	56,4	32,2	CH	1,99								Arcilla limosa de alta plasticidad, con algo de arena de grano fino color carmelito, consistencia firme, con oxidaciones

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Tabla 10. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por CI AMBIENTAL S.A.S., Pozo PC-2.

PERF.	MUESTRA	PROF. (m)	PROPIEDADES ÍNDICE Y DE CLASIFICACIÓN											Permeab. (cm/s)	CORTE DIRECTO				C.S.	COMPRESIBILIDAD					DESCRIPCIÓN	
			Gs	wn (%)	PASAT No. 200 (%)	Finos (%)	Arena (%)	Grava (%)	w _p (%)	w _L (%)	IP	USC	γ _t (g/cm ³)		PICO		RESIDUAL			qu (MPa)	σ' _v (kg/cm ²)	Cc	Cr	Expansión libre (%)		Presión de hinchamiento (Kg/cm ²)
															C' _p (kPa)	φ' _p (°)	C' _{Res} (kPa)	φ' _{Res} (°)								
PC-2	M-3	4.50-6.00	2,69	23,0	4,2	3,2	3,1	93,7	NP	NL	-	SM	2,17		0,0	37,7	0,0	31,8								Núcleos de rocas con algo de arena de grano fino, color amarillo pardo
PC-2	M-5	7.50-9.00		23,0									2,21						10,82							Núcleo de roca arenosa de grano fino, color habano y consistencia dura
PC-2	M-7	10.50-12.00	2,51	20,6	16,6	15,2	84,7	0,1	NP	NL	-	SM	1,78													Arena de grano fino algo arcillosa color amarillo anaranjado
PC-2	M-9	13.50-15.00	2,69	27,6	78,9	77,9	22,1	0,0	21,8	44,0	22,2	CL	1,42						1,61							Arcilla algo limosa de baja plasticidad con arena de grano fino, color amarillo anaranjado
PC-2	M-10	15.00 - 16.50	2,65	24,8	97,4	98,0	2,0	0,0	25,6	75,8	50,2	CH	1,57	4,25E-08						2,8	0,178	0,038	4,133	3,8626		Arcilla de color habano con trazos amarillentos
PC-2	M-13	19.50 - 21.00	2,64	29,4	98,8	98,9	1,1	0,0	25,3	61,0	35,7	CH	1,49	8,62E-08						2,7	0,118	0,019	0,343	0,4876		Arcilla de color amarillento
PC-2	M-14	21.00-22.50		18,5									1,87		0,0	34,0	0,0	25,6								Arena arcillosa color habano claro y vetas grises con fragmentos de caliza. De baja plasticidad y consistencia media. Presenta fracturas y vetas de oxidación.
PC-2	M-15	22.50-24.00	2,68	23,7	66,7	66,6	33,0	0,3	22,2	45,9	23,7	CL	1,58													Arcilla con algo de limo y arena de grano fino con algunas gravas color castaño oliva claro
PC-2	M-18	27.00 - 28.50	2,64	22,7	97,1	98,7	1,3	0,0	25,8	59,6	33,8	CH	1,59	3,23E-09						2,7	0,076	0,008	0,448	0,4878		Arcilla de color gris con betas amarillentas
PC-2	M-19	28.50 -30.00	2,65	35,2	92,7	91,4	8,6	0,0	30,0	70,3	40,3	CH	1,43	1,70E-07						9,21						Arcilla de color gris oscura
PC-2	M-21	31.00 - 33.00	2,66	23,1		87,8	12,2	0,0					1,56	1,23E-07												Arcilla de color gris con presencia de arena fina
PC-2	M-22	33.00-34.30	2,69	31,9	67,2	77,0	23,0	0,0	23,7	43,0	19,3	CL	1,96							2,54						Arcilla con algo de limo de baja plasticidad y arena de grano fino color habano, consistencia dura

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Tabla 11. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por CI AMBIENTAL S.A.S., Pozo PC-4.

PERF.	MUESTRA	PROF. (m)	PROPIEDADES ÍNDICE Y DE CLASIFICACIÓN													Permeab. (cm/s)	CORTE DIRECTO				C.S. qu (MPa)	COMPRESIBILIDAD		DESCRIPCIÓN										
			Gs	wn (%)	HIDROM.	PASA T No. 200 (%)	Finos (%)	Arena (%)	Grava (%)	w _p (%)	w _L (%)	IP	USC	γ _t (g/cm ³)	PICO		RESIDUAL		Expansión libre (%)	Presión de hinchamiento (Kg/cm ²)														
															C _p (kPa)		φ _p (°)	C _{Res} (kPa)				φ _{Res} (°)												
PC-3	M-3	5.30-6.00		24,0																														Arcilla color gris medio con vetas color hábano claro con fragmentos de caliza. De plasticidad alta y consistencia media
PC-3	M-6	9.00-10.50		22,0																														Arcilla color gris medio con vetas color hábano claro y lentes de yeso. De alta plasticidad. Presenta fracturas y vetas de oxidación
PC-3	M-9	12.70 - 13.50	2,62	24,9	Anexos	86,0	86,1	13,9	0,0	23,0	49,0	26,0	CL	1,63	6,77E-09																			Arcilla de color gris con poca arena fina
PC-3	M-13	19.50 - 21.00	2,61	26,0		54,8	57,9	42,1	0,0	24,5	39,1	14,6	CL	1,53																				Arcilla arenosa de color gris
PC-04	M-4	6.00-7.50		20,0																														Arcilla arenosa color gris claro con vetas color hábano claro, de plasticidad baja y consistencia media. Presenta fracturas y vetas de oxidación
PC-04	M-10	15.00-16.50	2,45	16,0		87,3	88,6	11,0	0,4	28,3	36,7	8,4	ML-OL	1,90																				58 cm de limo orgánico arenoso color gris medio, 35 cm de caliza fracturada y 58 cm de arena de grano fino, color gris medio. Densidad media.
PC-04	M-13	20.50-21.00		15,0																														Arena de grano fino, color gris medio. Densidad media. Presenta fracturas y vetas de oxidación.
PC-04	M-17	25.50-27.00	2,74	20,6		79,2	65,1	34,0	0,9					2,00																				Arcilla color gris oscuro de humedad media-baja.
PC-04	M-18	27.00-28.50	2,76	21,6		77,9	77,0	23,0	0,0	26,0	51,6	25,6	CH	1,97																				Arcilla de alta plasticidad, color gris oscuro

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Tabla 12. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por CI AMBIENTAL S.A.S., Pozo PC-5.

PERF.	MUESTRA	PROF. (m)	PROPIEDADES ÍNDICE Y DE CLASIFICACIÓN													Permeab. (cm/s)	CORTE DIRECTO				COMPRESIBILIDAD				DESCRIPCIÓN
			Gs	wn (%)	HIDROM.	PASAT No. 200 (%)	Finos (%)	Arena (%)	Grava (%)	w _p (%)	w _L (%)	IP	USC	γ _t (g/cm ³)	PICO		RESIDUAL		σ' _p (Kg/cm ²)	Cc	Cr	Expansión libre (%)	Presión de hinchamiento (Kg/cm ²)		
															C' _p (kPa)		φ' _p (°)	C' _{Res} (kPa)						φ' _{Res} (°)	
PC-05	M-2	3.00-4.50	2,70	25,5		95,7	95,9	4,0	0,1	19,1	41,5	22,3	CL	2,34										Arcilla de alta plasticidad, color amarillo pardo moreno	
PC-05	M-4	6.00 - 7.50	2,62	30,4		94,4	94,3	5,7	0,0	25,8	59,6	33,8	CH	1,44	7,43E-08					2,7	0,16	0,026	0,071	0,1263	Arcilla de color marrón claro con trazos oxidados
PC-05	M-5	7.50 - 7.90	2,81	20,0	Anexos	97,7	98,3	1,5	0,2	30,9	61,3	30,5	CH	1,89		53,0	24,2	27,8	13,2						Arcilla color gris medio, de plasticidad alta y consistencia media, seguido por 40 cm de caliza fracturada.
PC-05	M-7	10.50-12.00												2,14											Arcilla color gris consistencia muy dura, consolidada.
PC-05	M-10	15.00-16.50	2,41	17,0	Anexos	88,1	87,7	12,3	0,0	23,4	32,0	8,6	ML	1,96		86,3	32,4	43,0	31,0						Arcilla arenosa color gris medio. Densidad media.
PC-05	M-14	21.00 - 22.50	2,63	23,8			91,2	8,8	0,0					1,57	2,93E-08										Arcilla de color gris oscuro con presencia de arena fina
PC-05	M-16	24.00 - 25.50	2,64	27,0			79,6	20,4	0,0					1,53	5,38E-07										Arcilla de color gris oscuro con algo de arena fina
PC-05	M-17	25.50 - 27.00	2,64	29,6			94,1	5,9	0,0					1,45	1,72E-07										Arcilla gris oscura con presencia de arena fina

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Tabla 13. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por la Universidad de Cartagena a las muestras de suelo obtenidas por Roto-perforación.

Sondeo N°	Muestra N°	Profundidad (m)	Wn (%)	Análisis de Consistencia			LC (%)	IL (%)	γ_t (ton/m ³)	γ_d (ton/m ³)	Gs	ϕ (grados)	ϕ_r (grados)	C (Ton/m ²)	K (cm/seg)	E (MN/m ²)	Gradación		AASHTO	S.U.C.S.	Descripción del Suelo	
				LL (%)	LP (%)	IP (%)											N° 4 (%)	N° 200 (%)				
PC-01	3	4.50-6.00	19,40	25	0	0	--	--	1,74	1,46	2,55	21	--	4,48	6,45E-04	13	100,0	20,8	A-2-4	SM	Arena Arcillosa	
PC-01	7	10.50-12.00	30,80	51	25	26	--	0,2	1,84	1,41	2,57	17	11	5,90	5,42E-06	17	100,0	91,6	A-7-6	CH	Arcilla Inorganica de Alta Plasticidad	
PC-01	12	18.00-19.50	30,30	40	19	21	--	0,5	1,76	1,35	2,50	21	12	5,72	3,57E-05	17	100,0	91,9	A-6	CL	Arcilla Inorganica de Plasticidad baja a media	
PC-01	16	24.00-25.50	31,10	24	0	0	--	--	1,82	1,39	2,58	19	--	10,03	6,46E-04	30	100,0	61,3	A-4	ML	Limo inorganico y arenas muy finas	
PC-02	2	3.50-4.50	25,50	45	19	26	16,2	0,3	2,00	1,59	2,74	--	--	5,32	--	16	95,7	88,2	A-7-6	CL	Arcilla inorganica de plasticidad media a baja	
PC-02	6	9.00-10.50	23,40	0	0	0	--	--	1,92	1,56	2,87	--	--	--	1,49E-05	--	100,0	8,1	A-3	SP-SM	Arena pobremente gradada	
PC-02	8	12.00-13.50	26,50	41	16	25	--	0,4	1,96	1,55	3,14	18	11	11,96	1,29E-05	35	100,0	90,9	A-7-6	CL	Arcilla inorganica de plasticidad baja a media	
PC-02	12	18.00-19.50	24,70	51	22	29	--	0,1	2,21	1,77	2,74	6	--	14,88	--	44	100,0	97,1	A-7-6	CH	Arcilla de alta plasticidad	
PC-02	17	25.50-27.00	24,90	22	0	0	--	--	--	--	3,05	--	--	--	1,81E-04	--	100,0	16,8	A-2-4	SM	Arenas Limosas	
PC-03	2	3.00-4.50	22,00	25	11	14	--	0,8	1,92	1,57	2,73	26	14	18,20	7,97E-05	54	100,0	66,9	A-6	CL	Arcillas Limosas Inorganicas	
PC-03	5	7.50-9.00	28,80	36	31	5	43,6	-0,4	1,92	1,49	3,06	32	--	3,68	3,48E-05	11	99,5	40,7	A-4	SM	Arenas Limosas	
PC-03	7	10.50-12.00	30,80	45	23	22	23,2	0,4	1,92	1,47	3,30	56	12	7,00	4,79E-07	21	100,0	94,8	A-7-6	CL	Arcilla Inorganica de Plasticidad baja a media	
PC-04	3	4.50-6.00	30,40	57	21	36	--	0,3	1,84	1,41	2,39	17	9	5,83	1,22E-05	17	100,0	90,0	A-7-6	CH	Arcilla Inorganica de Alta Plasticidad	
PC-04	6	9.00-10.50	30,00	58	25	33	15,0	0,2	1,88	1,45	2,42	8	--	8,37	5,40E-06	25	100,0	92,0	A-7-6	CH	Arcilla Inorganica de Alta Plasticidad	
PC-04	9	13.50-15.00	29,70	52	23	29	24,3	0,2	1,98	1,53	2,40	--	--	--	--	--	98,5	93,9	A-7-6	CH	Arcilla Inorganica de Alta Plasticidad	
PC-04	11	16.50-18.00	22,80	36	19	17	35,9	0,2	2,00	1,63	2,34	15	13	16,41	--	48	100,0	69,9	A-6	CL	Arcilla Inorganica de Plasticidad baja a media	
PC-04	18	27.00-28.50	--	--	--	--	27,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
PC-05	3	4.50-6.00	25,40	49	26	23	--	0,0	1,92	1,53	2,81	18	12	6,99	9,08E-06	21	100,0	69,2	A-7-6	CL	Arcilla inorganica de plasticidad baja a media	
PC-05	6	9.00-10.50	19,80	35	23	12	--	-0,3	1,93	1,61	2,64	--	--	--	2,87E-05	--	78,9	50,5	A-6	CL	Arcilla limosa inorganica de baja plasticidad	
PC-05	9	13.50-15.00	25,20	28	26	2	--	-0,4	1,80	1,44	2,99	26	--	4,34	--	13	100,0	98,0	A-4	ML	Limo inorganico arcilloso de poca plasticidad	
PC-05	13	19.50-21.00	28,80	37	34	3	--	-1,7	1,82	1,41	2,94	25	--	7,49	--	22	100,0	56,6	A-4	ML	Limo inorganico arcilloso de poca plasticidad	

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Tabla 14. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por la Universidad de Cartagena a las muestras obtenidas mediante el Ensayo de Penetración Estándar (SPT).

Sondeo N°	Muestra N°	Profundidad (m)	Wn (%)	Análisis de Consistencia			N	γ_t (ton/m ³)	γ_d (ton/m ³)	GS	Φ (grados)	C (Ton/m ²)	K (cmv/seg)	E (MN/m ²)	Gradación		AASHTO	S.U.C.S.	Descripción del Suelo (Consistencia)
				LL (%)	LP (%)	IP (%)									N° 4 (%)	N° 200 (%)			
SPT-01	2	1,50-2,00	21,08	24,44	15,41	9,02	6	1,91	1,57		-	2,40		7,06	100,00	72,60	A-4	CL	Arcilla Limosa Clara de plasticidad baja a media (Blanda)
	3	2,5-3,00	18,48	26,92	15,47	11,45	10	1,99	1,68		-	4,00		11,77	91,50	51,30	A-6	CL	Arcilla Parda Amarillenta de baja plasticidad, con rastros de arena fina (Media)
	5	4,50-5,00	16,30	24,21	14,60	9,60	15	2,05	1,77	2,87	-	6,00		17,65	98,80	59,40	A-4	CL	Arcilla Limosa Amarillenta de baja plasticidad, con rastros de arena fina (Compactada)
	6	5,50-6,00	14,56	24,68	14,11	10,57	16	2,06	1,80	2,54	-	6,40		18,83	96,00	63,00	A-6	CL	Arcilla Parda Amarillenta, con rastros de arena fina (Muy Compactada)
	10	9,5-10,0	18,00	26,00	15,00	11,00	47	2,24	1,89			18,80		55,31	95,70	62,40		CL	Arcilla Parda Amarillenta, con rastros de arena fina (Muy Compactada)
SPT-02	2	1,50-2,00	25,18	38,33	18,02	20,31	3	1,80	1,43	2,90	-	1,20		3,53	100,00	84,80	A-6	CL	Arcilla Limosa Parda Clara plasticidad baja a media (Blanda)
	4	3,50-4,00	25,65	41,47	21,89	19,57	9	1,97	1,57	2,76	-	3,60		10,59	100,00	98,10	A-7-6	CL	Arcilla Parda Clara plasticidad baja a media con Arena Fina (Compactada)
	6	5,50-6,00	25,32	33,98	19,38	14,61	18	2,08	1,66	2,63	-	7,20		21,18	99,70	65,50	A.6	CL	Arcilla Limosa Parda Clara plasticidad baja a media (Muy compactada)
	8	7,50-8,00	22,12	23,00	15,00	8,00	28	2,15	1,76	2,40		11,20		32,95	99,60	62,20		CL	Arcilla Limosa Parda Clara plasticidad baja a media (Muy compactada)
SPT-03	2	1,50-2,00	17,02	27,10	14,68		5	1,88	1,60		-	2,00	4,07E-05	5,88	100,00	65,10	A6	CL	Arcilla Limosa Parda Clara, de plasticidad baja a media (Blanda)
	4	3,50-4,00	18,16	26,01	15,67	10,35	15	2,05	1,74	2,85	-	6,00		17,65	58,80	30,20	A4	CL	Arcilla Amarilla de plasticidad baja a media con Grava (Compactada)
	6	5,50-6,00	19,06	26,44	16,98	9,46	33	2,18	1,83	2,76	-	13,20		38,84	75,20	35,80	A5	CL	Arcilla de plasticidad baja a media con Arena Fina (Dura)
	7	6,50-7,00	15,78	25,00	17,00	8,00	39	2,02	1,75	2,73	39	15,60		45,90	77,10	54,50	A-4	SC	Arena Fina Limosa Parda Amarillenta
SPT-04	2	1,50-2,00	21,15	25,00	11,00	14,00	21	2,11	1,74	2,55	-	8,40		24,71	83,80	64,30	A6	CL	Arcilla Limosa Parda Clara de plasticidad baja a media (Muy compactada)
	4	3,50-4,00	20,19	36,00	31,00	5,00	34	2,18	1,82	2,62	-	13,60		40,01	97,20	86,50	A-7-6	CH	Arcilla Amarilla de alta plasticidad (Dura)
SPT-05	2	1,50-2,00	6,20	27,84	23,12	4,73	18	2,08	1,96		-	7,20		21,18	85,30	57,10	A-4	ML-OL	Limo Pardo Amarillento, inorganico u organico con arcilla de baja plasticidad (Muy compactada)
	3	2,50-3,00	5,80	27,26	23,77	3,49	22	2,11	2,00		-	8,80		25,89	95,40	61,90	A-4	ML-OL	Limo inorganico u organico con arcilla de baja plasticidad - Zahorra Fina Arcillosa con Caliza (Muy compactada)
	6	5,5-6,00	5,28	33,00	21,00	12,00	40	2,21	2,10		-	16,00		47,07	99,50	65,00	A-6	CL	Arcilla Limosa Parda Clara de plasticidad baja a media (Muy compactada)

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Tabla 15. Resumen de los resultados de laboratorio realizados por la Universidad de Cartagena a las muestras obtenidas mediante el Ensayo de Penetración Estándar (SPT).

Sondeo N°	Muestra N°	Profundidad (m)	Wn (%)	Análisis de Consistencia			N	γ_t (ton/m ³)	γ_d (ton/m ³)	Gs	Φ (grados)	C (Ton/m ²)	K (cm/seg)	E (MN/m ²)	Gradación		AASHTO	S.U.C.S.	Descripción del Suelo (Consistencia)
				LL (%)	LP (%)	IP (%)									N° 4 (%)	N° 200 (%)			
SPT-06	1	1,00-1,50	7,86				5	1,69	1,56		33	0,00	4,14E-04	0,00	98,10	22,60	A-3	SM	Arena Fina Limosa Parda Clara (Floja)
	2	1,50-2,00	6,09				9	2,23	2,10		43	0,00	4,14E-04	0,00	96,80	11,10	A-3	SP-SC	Arena Fina Limosa Parda Amarillenta, Pobremente Gradada (Floja)
SPT-06.a	1	1,00-1,50	4,60				9	1,80	1,72		35	0,00		0,00	93,10	13,70	A-3	SM	Arena Fina Limosa Parda Amarillenta
	2	1,50-2,00	4,12				15	2,17	2,09	2,78	42	0,00	8,15E-04	0,00	99,80	8,00	A-3	SP-SC	Arena Fina Limosa Parda Amarillenta, pobremente gradada (Media)
SPT-07	2	1,50-2,00	18,36	42,52	16,70	25,82	4	1,84	1,56		-	1,60		4,71	85,10	61,60	A-7-6	CL	Arcilla Limosa Parda Clara de plasticidad baja a media, rastros de Grava (Blanda)
	3	2,50-3,00	20,90	50,99	21,00	29,99	12	2,02	1,67	2,73	-	4,80	6,49E-06		97,10	86,40	A-7-6	CH	Arcilla Amarilla de alta plasticidad (Compactada)
	4	3,50-4,00	21,03	41,00	24,00	17,00	18	2,08	2,08		-	7,20			93,60	66,70	A-7-6	CL	Arcilla inorgánica de plasticidad baja a media
SPT-08	2	1,50-2,00	16,25	33,97	21,02	12,94	2	1,73	1,49		-	0,80		2,35	100,00	77,90	A-6	CL	Arcilla limosa Amarilla de baja plasticidad con Gravas (Blanda)
	3	2,50-3,00	13,54	48,55	22,48	26,07	5	1,88	1,65		-	2,00		5,88	89,00	79,00	A-7-6	CL	Arcilla limosa Pardo Amarillenta de baja plasticidad con rastros de Arena Fina (Media)
	5	4,50-5,00	21,02	40,40	23,36	17,04	10	1,99	1,64	2,82	-	4,00	2,62E-05		84,80		A-6	CL	Arcilla limosa Parda Clara de baja plasticidad con Arena Fina (Compactada)
SPT-09	2	1,50-2,00	8,23	20,45	16,02	4,43	9	1,97	1,82		-	3,60	2,66E-04		44,40		A-4	CL-ML	Arena limosa mezcla arena limo
	3	2,50-3,00	9,84	35,40	23,13	12,27	9	1,69	1,53		33		1,33E-03		32,60		A-2-6	SM	Arena limosa mezcla arena limo
SPT-09.a	2	1,50-2,00	13,64	23,07	16,01	7,06	7	1,93	1,70	2,71	-	2,80		8,24	100,00	57,50	A-4	CL-ML	Limo o arcilla Amarilla de poca plasticidad con Gravas (Media)
	3	2,50-3,00	4,40	16,49	11,92	4,56	16	1,82	1,74	2,85	35	0,00	5,09E-05		45,30		A-4	SM-SC	Arena Parda limo arcillosa (Media)
SPT-10	2	1,50-2,00	20,76	44,76	23,37	21,38	6	1,91	1,58	2,73	-	2,40	3,56E-05		93,80	81,30	A-7-6	CL	Arcilla amarilla de plasticidad baja a media (Media)
	3	2,50-3,00	20,14	51,34	21,98	29,36	12	2,02	1,68	2,78	-	4,80	2,18E-05		100,00	96,90	A-7-6	CH	Arcilla amarilla de plasticidad baja a media (Media)
	5	4,50-5,00	27,75	51,68	25,90	25,78	15	2,05	1,61		-	6,00		17,65	97,00	89,80	A-7-6	CH	Arcilla Limosa Parda Clara de plasticidad Alta (Compactada)
	7	6,50-7,00	22,69	40,50	16,34	24,16	2,07	2,09	1,70		-	0,83	1,14E-05		100,00	90,10	A-7-6	CL	Arcilla Parda Clara de baja plasticidad con Arena Fina (Muy Compactada)
	8	7,50-8,00	21,13	48,00	18,00	30,00	34	2,18	1,80		-	13,60			100,00	89,90	A-7-6	CL	Arcilla Parda Clara de baja plasticidad con Arena Fina (Muy Compactada)

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

A continuación se presentan las convenciones utilizadas en los cuadros anteriores.

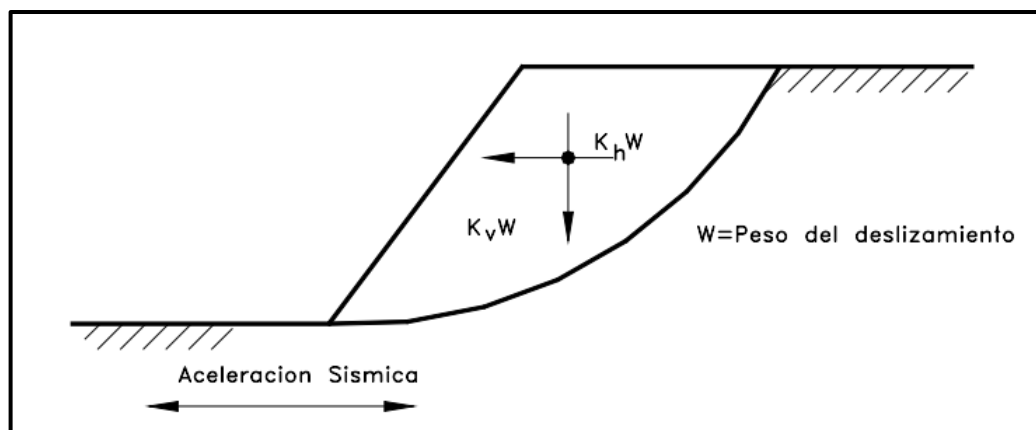
- SPT : Standard Penetration Test (Ensayo de Penetración Estándar)
- N: Número de Golpes del Ensayo de Penetración Estándar
- W_n (%) : Contenido de humedad natural
- LL (%) : Límite líquido
- LP (%) : Límite plástico
- IP (%) : Índice de plasticidad
- N° 4 (%) : Tamiz N° 4 (abertura de 4,76 mm)
- N° 200 (%) : Tamiz N° 200 (abertura de 0,074 mm)
- SUCS : Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
- AASHTO: Clasificación de suelos de la American Association of State Highway and Transportation Officials
- G_s : Gravedad específica de los sólidos
- γ_t (gr/cm^3) : Peso unitario húmedo
- γ_d (gr/cm^3) : Peso unitario seco
- Φ : Ángulo de fricción interna
- Φ^p : Ángulo de fricción interna pico
- Φ^r : Ángulo de fricción interna residual
- C (Ton/m^2) : Cohesión
- C^p (Kpa) : Cohesión pico
- C^r (Kpa) : Cohesión residual
- K (cm/seg): Permeabilidad
- E (MN/m^2): Módulo de Elasticidad
- σ^p (Kg/cm^2) : Esfuerzo de preconsolidación
- C_c : Índice de compresibilidad
- C_r : índice de expansibilidad

5.2.5.3. **Sismicidad:** El municipio de Cartagena es considerado como de sismicidad baja, según las Normas sísmo resistente (NSR10). En la región Caribe en general la sismicidad va de baja a intermedia, y se caracteriza por el registro histórico de sismos, la mayoría de magnitud M_s entre 4,1 a 5,5 y menores.

Los sismos cuyo epicentro se han demarcado en cercanías a la ciudad de Cartagena son de magnitudes similares al del resto de la región Caribe y por su ubicación podrían relacionarse con las fallas de Canoas y Mamonal. A continuación se muestran los Mapas de Fuentes Sismogénicas y de Sismicidad Histórica de la región Caribe. (INGEOMINAS, 2001).

Se incluye análisis pseudo-estático (sismo) en el cual se utilizaron valores de coeficiente sísmico horizontal (k_h) de **0,15g**, y vertical (k_v) de **0,10g** (de conformidad con el nivel de amenaza sísmica dispuesta por la NSR-2010 para el área de estudio). (NSR, 2010)

Figura 35. Análisis sísmico pseudo-estático de equilibrio límite para falla circular



Fuente: (Suarez Diaz, 1998)

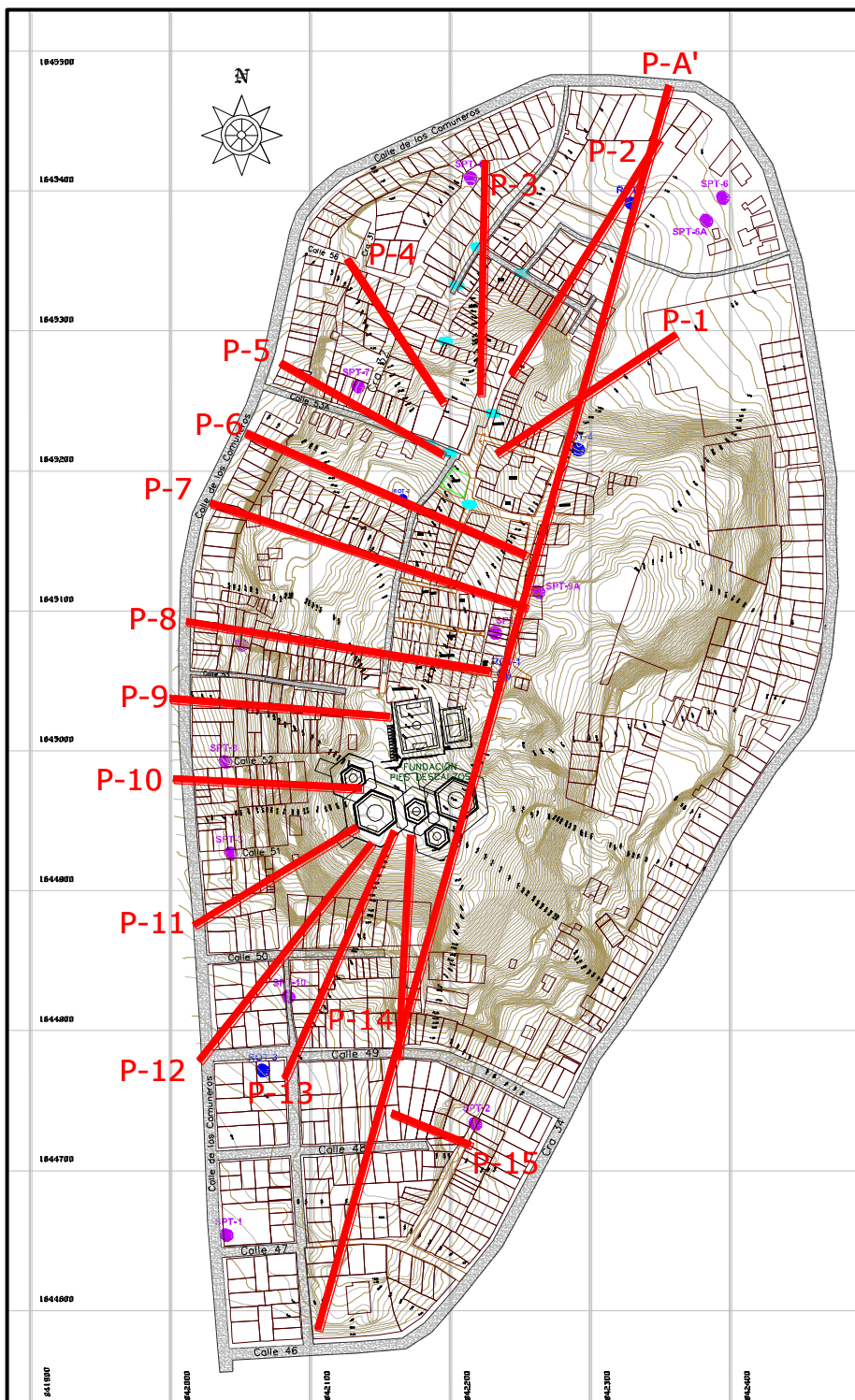
5.3. MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

El modelo geológico-geotécnico se definió con base en los resultados de la fase de exploración del suelo y la información geológica previa. Los cambios en la profundidad de los diferentes estratos y la caracterización geomecánica de los mismos, fueron factores necesarios para la obtención de los perfiles estratigráficos que fueron utilizados posteriormente en el análisis de estabilidad propuesto.

La Figura 36 muestra la localización en planta de los perfiles estratigráficos definidos en el área de estudio.

Desde el Anexo 1 al Anexo 16 se muestran cada uno de los perfiles estratigráficos generados en el área de estudio. En total se definieron dieciséis (16) líneas de perfil, con base en los accidentes y disposición topográfica del terreno, así como la evidencia de potenciales fenómenos de inestabilidad.

Figura 36. Localización de los perfiles estratigráficos trazados.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

5.4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE LA MODELACIÓN EN EL SOFTWARE SLIDE® V.5

El análisis de estabilidad de taludes se realizó sobre los dieciséis (16) perfiles estratigráficos representativos trazados en la Loma del Peyé.

Se establecieron tres escenarios para las modelaciones teniendo en cuenta factores como el sismo y el nivel freático; se definieron los tres posibles escenarios de afectación directa a los taludes propuestos, tales como:

- Condición con sismo con nivel de agua (CS-CNA).
- Condición con sismo sin nivel de agua (CS-SNA)
- Condición sin sismo con nivel de agua (SS-CNA)

Con base en los resultados de la investigación del subsuelo, los ensayos de laboratorio y la información geológica, se identificaron cinco (5) tipos de materiales que hacen parte de la estratigrafía de la zona. Los materiales son los siguientes:

Tabla 16. Descripción de los estratos de suelo, de acuerdo a la geología del área y las perforaciones realizadas.

<i>N°</i>	<i>Descripción de los estratos de suelo</i>
1.	<i>Calizas coralinas algo compactas</i>
2.	<i>Arcillas limosas color habano claro con fragmentos cálcareos a margas</i>
3.	<i>Arenas sueltas a medias de grano fino a medio</i>
4.	<i>Limolitas arcillosas estratificadas color crema</i>
5.	<i>Limolitas arenosas grises, masivas, homogéneas y ligeramente compactas</i>

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

Con base en los resultados de los ensayos de laboratorio ejecutados se definieron los parámetros geomecánicos de cada uno de los materiales en su estado actual.

La Tabla 17 relaciona los valores de los parámetros geomecánicos utilizados para el análisis de estabilidad de taludes.

Tabla 17. Valores de parámetros geomecánicos utilizados.

Material	Cohesión (KN/m ²)	Angulo de fricción interna (°)	Peso unitario húmedo (kN/m ³)	Peso unitario saturado (kN/m ³)
Calizas coralinas	200,0	45	21,0	23,0
Arcillas limosas color habano claro	40,0	22	19,0	21,0
Arenas de grano fino a medio	10,0	32	17,0	19,0
Limolitas arcillosas estratificadas	50,0	15	18,2	21,0
Limolitas arenosas grises	30,0	23	18,5	21,0

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

5.4.1. Mecanismos de falla: En los taludes de estudio de acuerdo a las visitas realizadas a campo, y con base en la exploración del subsuelo realizada por la Universidad de Cartagena, se propone un movimiento en masa tipo deslizamiento con componente rotacional (fallas circulares) como mecanismo de falla a evaluar, de acuerdo con lo propuesto en la clasificación de movimientos en masa de *Cruden y Varnes (1996)*.

En un escenario crítico, estos deslizamientos podrían producir deformaciones por corte y desplazamientos generados a lo largo de los taludes en estudio. Con base en los resultados de la investigación del subsuelo y las visitas técnicas de campo se infieren las profundidades de las superficies de falla, una vez se modelan los perfiles de estudio.

Los taludes en general pueden fallar por efecto de las condiciones de esfuerzo y deformación de los materiales constituyentes y la acción de los factores contribuyentes (movimientos en masa) asociados al drenaje, topografía, cobertura vegetal, erosión, clima y factor antrópico.

5.4.2. Modelación en Software Slide® v.5: A continuación desde la Tabla 19 hasta la Tabla 21 se muestran los factores de seguridad obtenidos de la modelación de los dieciséis (16) perfiles; a partir del Anexo 17 hasta el Anexo 220 (en formato digital) se muestran las diferentes modelaciones realizadas a cada perfil, por cada método de Equilibrio Límite planteado y cada condición.

Para esta investigación los valores de los factores de seguridad se clasificaron de acuerdo a los niveles de amenaza según Suarez, 1998.

La Tabla 18 muestra la clasificación (de acuerdo a los factores de seguridad), según la categoría de inestabilidad dada en la literatura actual

Cada uno de estos colores están reflejados en los tres mapas de categorización (bajo las tres condiciones analizadas), creados de acuerdo a los valores de los factores de seguridad obtenidos.

Tabla 18. Clasificación de los factores de seguridad

Factor de Seguridad	Categoría de Inestabilidad	Color
<1,2	Alta	Red
1,2<F.S.<1,5	Media	Yellow
>1,5	Baja	Green

Fuente: (Suarez, 1998)

Tabla 19. Factores de seguridad previos a la modelación en condición CS-CNA.

FACTORES DE SEGURIDAD CS-CNA						
PERFIL	MATERIAL	BISHOP Y MORGENSTERN	JAMBU	ORDINARIO O FELLENIOUS	SPENCER	Variación (%)
P1	ARCILLAS LIMOSAS	4,736	4,685	4,715	4,736	1,08%
	ARENAS SUELTAS	1,816	1,799	1,800	1,812	0,94%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	6,726	6,602	6,701	6,723	1,84%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P2	ARCILLAS LIMOSAS	4,404	4,377	4,401	4,401	0,61%
	ARENAS SUELTAS	1,482	1,424	1,429	1,486	4,17%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,042	3,697	3,905	4,040	8,54%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P3	CALIZA CORALINA	3,798	3,685	3,745	3,799	3,00%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,997	2,937	2,943	2,998	2,03%
	ARENAS SUELTAS	5,287	5,115	5,228	5,283	3,25%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P4	ARENAS SUELTAS	6,068	5,966	5,982	6,069	1,70%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,208	3,994	4,156	4,208	5,09%
	LIMOLITAS ARENOSAS	6,221	6,137	6,187	6,221	1,35%
P5	ARENAS SUELTAS	2,277	2,202	2,219	2,277	3,29%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	7,969	7,911	7,958	7,969	0,73%
	LIMOLITAS ARENOSAS	4,873	4,595	4,780	4,865	5,70%
P6	ARCILLAS LIMOSAS	10,435	10,303	10,432	10,437	1,28%
	ARENAS SUELTAS	2,555	2,486	2,495	2,559	2,85%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	15,554	15,554	15,555	15,553	0,01%
	CALIZA CORALINA	2,194	2,262	2,201	2,213	3,01%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P7	ARCILLAS LIMOSAS	6,091	6,052	6,086	6,089	0,64%
	ARENAS SUELTAS	3,146	3,133	3,134	3,148	0,48%
	ARENAS SUELTAS	1,661	1,670	1,668	1,663	0,54%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P8	ARCILLAS LIMOSAS	6,343	6,290	6,323	6,342	0,84%
	ARENAS SUELTAS	2,787	2,752	2,754	2,787	1,26%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	2,999	2,989	2,997	INVALID	0,33%
	LIMOLITAS ARENOSAS	6,379	6,275	6,333	6,379	1,63%

Tabla 19. (continuación)

FACTORES DE SEGURIDAD CS-CNA						
PERFIL	MATERIAL	BISHOP Y MORGENSTERN	JAMBU	ORDINARIO O FELLENIUS	SPENCER	Variación (%)
P9	CALIZA CORALINA	15,787	15,546	15,739	15,786	1,53%
	ARCILLAS LIMOSAS	3,861	3,752	3,819	3,859	2,82%
	ARENAS SUELTAS	2,638	2,612	2,616	2,637	0,99%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	2,657	2,624	2,643	2,657	1,24%
	LIMOLITAS ARENOSAS	4,767	4,730	4,738	4,764	0,78%
P10	CALIZA CORALINA	12,250	12,200	12,241	12,247	0,41%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,151	2,085	2,121	2,147	3,07%
	ARENAS SUELTAS	2,045	1,726	1,748	2,041	15,60%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	2,658	2,610	2,645	2,657	1,81%
	LIMOLITAS ARENOSAS	21,698	21,574	21,674	21,699	0,58%
P11	CALIZA CORALINA	16,077	15,810	16,025	16,071	1,66%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,123	2,116	2,121	2,120	0,33%
	ARENAS SUELTAS	1,545	1,445	1,464	1,541	6,47%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	1,588	1,569	1,584	INVALID	1,20%
	LIMOLITAS ARENOSAS	4,346	4,276	4,305	4,345	1,61%
P12	CALIZA CORALINA	10,431	10,204	10,376	10,427	2,18%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,155	2,129	2,144	2,153	1,21%
	ARENAS SUELTAS	1,151	1,115	1,122	1,148	3,13%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	2,778	2,765	2,770	INVALID	0,47%
	LIMOLITAS ARENOSAS	13,713	13,674	13,702	13,711	0,28%
P13	CALIZA CORALINA	10,349	10,212	10,310	10,346	1,32%
	ARCILLAS LIMOSAS	1,787	1,761	1,774	1,784	1,45%
	ARENAS SUELTAS	0,734	0,411	0,354	0,907	60,97%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	5,916	5,700	5,869	5,915	3,65%
	LIMOLITAS ARENOSAS	6,525	6,446	6,478	6,526	1,23%
P14	CALIZA CORALINA	11,743	11,634	11,717	11,741	0,93%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,076	1,993	2,035	2,077	4,04%
	ARENAS SUELTAS	1,020	0,911	0,989	1,020	10,69%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	3,326	3,275	3,318	3,323	1,53%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P15	LIMOLITAS ARCILLOSAS	6,391	6,314	6,382	6,387	1,20%
	LIMOLITAS ARENOSAS	8,077	7,832	7,985	8,081	3,08%
PA NORTE- SUR	ARCILLAS LIMOSAS	6,955	6,874	6,905	6,956	1,18%
	ARENAS SUELTAS	3,071	3,021	2,999	3,073	2,41%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	3,435	3,350	3,402	3,436	2,50%
PA SUR- NORTE	ARCILLAS LIMOSAS	1,636	1,604	1,617	1,632	1,96%
	ARENAS SUELTAS	1,230	1,177	1,169	1,230	4,96%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,892	4,717	4,835	4,893	3,60%
	LIMOLITAS ARENOSAS	4,376	4,150	4,234	4,735	12,35%
PROMEDIO FS CS-CNA						3,48%

Tabla 20. Factores de seguridad previos a la modelación en condición CS-SNA.

FACTORES DE SEGURIDAD CS-SNA						
PERFIL	MATERIAL	BISHOP Y MORGENSTERN	JAMBU	ORDINARIO O FELLENIUS	SPENCER	Variación (%)
P1	ARCILLAS LIMOSAS	5,008	4,953	4,986	5,008	1,10%
	ARENAS SUELTAS	1,926	1,908	1,911	1,922	0,93%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	7,704	7,564	7,679	7,701	1,82%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P2	ARCILLAS LIMOSAS	4,807	4,779	4,805	4,803	0,58%
	ARENAS SUELTAS	1,542	1,482	1,490	1,544	4,02%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,452	4,062	4,311	4,450	8,76%
	LIMOLITAS ARENOSAS	11,804	11,575	11,732	11,799	1,94%
P3	CALIZA CORALINA	4,038	3,916	3,984	4,038	3,02%
	ARCILLAS LIMOSAS	3,118	3,054	3,062	3,118	2,05%
	ARENAS SUELTAS	5,834	5,639	5,773	5,830	3,34%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P4	ARENAS SUELTAS	6,360	6,252	6,271	6,365	1,78%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,574	4,334	4,519	4,574	5,25%
	LIMOLITAS ARENOSAS	6,881	6,787	6,846	6,881	1,37%
P5	ARENAS SUELTAS	2,368	2,291	2,310	2,368	3,25%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	8,554	8,490	8,542	8,553	0,75%
	LIMOLITAS ARENOSAS	5,501	5,196	5,410	5,501	5,54%
P6	ARCILLAS LIMOSAS	11,441	11,296	11,437	11,443	1,28%
	ARENAS SUELTAS	2,737	2,664	2,677	2,740	2,77%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	17,901	17,901	17,902	17,898	0,02%
	CALIZA CORALINA	2,414	2,507	2,426	INVALID	3,71%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P7	ARCILLAS LIMOSAS	6,656	6,614	6,650	6,656	0,63%
	ARENAS SUELTAS	3,371	3,357	3,359	3,375	0,53%
	ARENAS SUELTAS	1,825	1,841	1,833	1,827	0,87%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P8	ARCILLAS LIMOSAS	6,694	6,636	6,673	6,694	0,87%
	ARENAS SUELTAS	2,911	2,874	2,877	2,911	1,27%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	3,425	3,414	3,424	INVALID	0,32%
	LIMOLITAS ARENOSAS	7,127	7,012	7,081	7,126	1,61%

Tabla 20. (continuación)

FACTORES DE SEGURIDAD CS-SNA						
PERFIL	MATERIAL	BISHOP Y MORGENSTERN	JAMBU	ORDINARIO O FELLENIUS	SPENCER	Variación (%)
P9	CALIZA CORALINA	16,740	16,483	16,691	16,738	1,54%
	ARCILLAS LIMOSAS	4,067	3,951	4,024	4,065	2,85%
	ARENAS SUELTAS	2,751	2,724	2,729	2,750	0,98%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	3,022	2,987	3,008	3,022	1,16%
	LIMOLITAS ARENOSAS	5,306	5,267	5,278	5,307	0,75%
P10	CALIZA CORALINA	12,932	12,880	12,923	12,929	0,40%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,278	2,207	2,248	2,275	3,12%
	ARENAS SUELTAS	2,130	1,796	1,831	2,123	15,68%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	3,027	2,973	3,014	3,025	1,78%
	LIMOLITAS ARENOSAS	24,510	24,370	24,486	24,512	0,58%
P11	CALIZA CORALINA	16,764	16,477	16,710	16,757	1,71%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,231	2,224	2,229	2,228	0,31%
	ARENAS SUELTAS	1,596	1,492	1,514	1,591	6,52%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	1,815	1,799	1,812	INVALID	0,88%
	LIMOLITAS ARENOSAS	4,825	4,748	4,784	4,824	1,60%
P12	CALIZA CORALINA	10,968	10,727	10,912	10,963	2,20%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,276	2,249	2,265	2,274	1,19%
	ARENAS SUELTAS	1,191	1,154	1,162	1,188	3,11%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	3,166	3,157	3,159	3,160	0,28%
	LIMOLITAS ARENOSAS	15,377	15,335	15,367	15,376	0,27%
P13	CALIZA CORALINA	10,967	10,822	10,928	10,960	1,32%
	ARCILLAS LIMOSAS	1,896	1,869	1,883	1,892	1,42%
	ARENAS SUELTAS	0,783	0,440	0,386	INVALID	50,70%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	6,711	6,525	6,725	6,771	3,63%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P14	CALIZA CORALINA	12,430	12,314	12,404	12,428	0,93%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,203	2,115	2,163	2,201	3,99%
	ARENAS SUELTAS	1,094	1,066	1,065	1,093	2,65%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	3,811	3,755	3,803	3,815	1,57%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P15	LIMOLITAS ARCILLOSAS	6,900	6,813	6,890	6,987	2,49%
	LIMOLITAS ARENOSAS	9,008	8,737	8,915	9,012	3,05%
PA NORTE- SUR	ARCILLAS LIMOSAS	7,601	7,512	7,547	7,602	1,18%
	ARENAS SUELTAS	3,255	3,204	3,181	3,257	2,33%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	3,906	3,810	3,783	3,907	3,17%
PA SUR- NORTE	ARCILLAS LIMOSAS	1,752	1,719	1,734	1,751	1,88%
	ARENAS SUELTAS	1,323	1,268	1,263	1,325	4,68%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	5,751	5,373	5,514	5,573	6,57%
	LIMOLITAS ARENOSAS	4,830	4,587	4,689	4,828	5,03%
PROMEDIO FS CS-SNA						3,17%

Tabla 21. Factores de seguridad previos a la modelación en condición SS-CNA.

FACTORES DE SEGURIDAD SS-CNA						
PERFIL	MATERIAL	BISHOP Y MORGENSTERN	JAMBU	ORDINARIO O FELLENIUS	SPENCER	Max. Variación (%)
P1	ARCILLAS LIMOSAS	6,735	6,650	6,704	6,736	1,28%
	ARENAS SUELTAS	3,017	3,002	2,995	3,015	0,73%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	11,528	11,251	11,487	11,527	2,40%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P2	ARCILLAS LIMOSAS	7,708	7,699	7,704	7,708	0,12%
	ARENAS SUELTAS	1,710	1,643	1,653	1,708	3,92%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	6,515	5,740	6,294	6,509	11,90%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P3	CALIZA CORALINA	5,414	5,245	5,343	5,413	3,12%
	ARCILLAS LIMOSAS	3,773	3,689	3,706	5,773	36,10%
	ARENAS SUELTAS	8,915	8,545	8,818	8,913	4,15%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P4	ARENAS SUELTAS	9,495	9,309	9,358	9,493	1,96%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	5,391	5,099	5,326	5,389	5,42%
	LIMOLITAS ARENOSAS	13,198	12,977	13,130	13,199	1,68%
P5	ARENAS SUELTAS	2,642	2,564	2,580	2,640	2,95%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	10,792	10,701	10,777	10,791	0,84%
	LIMOLITAS ARENOSAS	6,491	6,067	6,378	6,485	6,53%
P6	ARCILLAS LIMOSAS	25,510	25,384	25,484	25,509	0,49%
	ARENAS SUELTAS	4,504	4,399	4,405	4,503	2,33%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	25,286	25,304	25,286	25,290	0,07%
	CALIZA CORALINA	2,809	2,961	2,817	INVALID	5,13%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P7	ARCILLAS LIMOSAS	12,435	12,398	12,422	12,438	0,32%
	ARENAS SUELTAS	6,714	6,692	6,694	6,713	0,33%
	ARENAS SUELTAS	2,135	2,191	2,146	INVALID	2,56%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P8	ARCILLAS LIMOSAS	9,271	9,176	9,241	9,271	1,02%
	ARENAS SUELTAS	3,634	3,586	3,594	3,634	1,32%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,452	4,445	4,446	4,453	0,18%
	LIMOLITAS ARENOSAS	13,762	13,445	13,664	13,759	2,30%

Tabla 21. (continuación)

FACTORES DE SEGURIDAD SS-CNA						
PERFIL	MATERIAL	BISHOP Y MORGENSTERN	JAMBU	ORDINARIO O FELLENIUS	SPENCER	Max. Variación (%)
P9	CALIZA CORALINA	22,583	22,314	22,516	22,582	1,19%
	ARCILLAS LIMOSAS	4,797	4,657	4,750	4,793	2,92%
	ARENAS SUELTAS	3,638	3,599	3,602	3,633	1,07%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,129	4,070	4,103	4,129	1,43%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P10	CALIZA CORALINA	15,721	15,674	15,710	15,721	0,30%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,627	2,545	2,590	2,624	3,12%
	ARENAS SUELTAS	2,353	1,967	2,024	2,343	16,40%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,018	3,966	4,000	4,017	1,29%
	LIMOLITAS ARENOSAS	50,778	50,402	50,736	50,780	0,74%
P11	CALIZA CORALINA	19,160	18,784	19,096	19,153	1,96%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,462	2,457	2,459	2,461	0,20%
	ARENAS SUELTAS	1,684	1,575	1,600	1,676	6,47%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	2,092	2,104	2,090	INVALID	0,67%
	LIMOLITAS ARENOSAS	8,860	8,703	8,876	8,585	3,28%
P12	CALIZA CORALINA	12,380	12,104	12,318	12,373	2,23%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,585	2,557	2,574	2,584	1,08%
	ARENAS SUELTAS	1,255	1,214	1,233	1,247	3,27%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,160	4,176	4,141	INVALID	0,84%
	LIMOLITAS ARENOSAS	107,976	107,681	107,899	107,977	0,27%
P13	CALIZA CORALINA	13,370	13,200	13,326	13,369	1,27%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,172	2,140	2,157	2,170	1,47%
	ARENAS SUELTAS	0,750	0,454	0,395	INVALID	47,33%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	9,656	9,296	9,593	9,653	3,73%
	LIMOLITAS ARENOSAS	50,762	50,144	50,424	50,762	1,22%
P14	CALIZA CORALINA	15,392	15,270	15,361	15,390	0,79%
	ARCILLAS LIMOSAS	2,555	2,456	2,506	2,551	3,87%
	ARENAS SUELTAS	1,380	1,349	1,344	1,380	2,61%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	4,635	4,601	4,626	4,636	0,75%
	LIMOLITAS ARENOSAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P15	LIMOLITAS ARCILLOSAS	8,090	7,996	8,078	8,089	1,16%
	LIMOLITAS ARENOSAS	25,122	24,401	24,855	25,123	2,87%
PA NORTE- SUR	ARCILLAS LIMOSAS	15,578	14,457	15,468	15,578	7,20%
	ARENAS SUELTAS	6,764	6,668	6,601	6,765	2,42%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	5,821	5,666	5,772	5,823	2,70%
PA SUR- NORTE	ARCILLAS LIMOSAS	2,346	2,313	2,321	2,343	1,41%
	ARENAS SUELTAS	1,677	1,613	1,607	1,673	4,17%
	LIMOLITAS ARCILLOSAS	9,177	8,854	9,084	9,177	3,52%
	LIMOLITAS ARENOSAS	10,287	9,330	9,941	10,283	9,30%
PROMEDIO FS SS-CNA						3,90%

Los resultados de los factores de seguridad obtenidos en la modelación de los dieciséis (16) taludes representativos de la zona de estudio bajo las tres condiciones y para los cuatro métodos analizados dan valores en su mayoría parecidos con variaciones promedios aproximadamente menores al 4%, calculada con los valores máximos y mínimos de los factores de seguridad.

Sin embargo, la Tabla 22 muestra los factores de seguridad de algunos perfiles analizados mediante los métodos de Equilibrio Límite, los cuales muestran resultados con considerables variaciones entre algunos métodos.

Tabla 22. Variaciones altas de F.S.

Perfil	Condición	Variación de F.S.	FS min.	FS max.
13	CS-CNA	60,97%	0,354 (Fellenius)	0,907 (Spencer)
	CS-SNA	50,70%	0,386 (Fellenius)	0,783 (Bishop)
	SS-CNA	47,33%	0,395 (Fellenius)	0,750 (Bishop)
10	CS-CNA	15,60%	1,726 (Jambu)	2,045 (Bishop)
	CS-SNA	15,48%	1,796 (Jambu)	2,130 (Bishop)
	SS-CNA	16,40%	1,967 (Jambu)	2,353 (Bishop)
PA Sur-Norte	CS-CNA	12,35%	4,150 (Jambu)	4,735 (Spencer)
	CS-SNA	5,03%	4,587 (Jambu)	4,830 (Bishop)
	SS-CNA	9,30%	9,330 (Jambu)	10,287 (Bishop)
14	CS-CNA	10,69%	0,911 (Fellenius)	1,020(Bishop/Spencer)
	CS-SNA	2,65%	1,065 (Fellenius)	1,094 (Bishop)
	SS-CNA	2,61%	1,344 (Fellenius)	1,380(Bishop/Spencer)

De acuerdo al análisis de resultados obtenidos, podemos observar que los métodos *Bhisop* y *Spencer* dan factores de seguridad muy similares entre ellos, lo mismo se observó para los métodos *Jambu* y *Fellenius*. Estos últimos arrojan resultados más cercanos a un nivel de amenaza más alto en comparación con *Bhisop* y *Spencer*.

A partir de los resultados obtenidos desde la Tabla 19 hasta la Tabla 21 se observó que el método *Bhisop* arroja resultados muy parecidos con el método *Spencer*. Este último, a



diferencia de los otros métodos estudiados, es el más completo por satisfacer totalmente el equilibrio de esfuerzos y momento.

Teniendo en cuenta lo anterior, el método escogido para categorizar la zona por nivel de amenaza fue el *Spencer*, alternativo a este se usó *Bhisop*.

5.5. CATEGORIZACIÓN DE CONDICIONES DE INESTABILIDAD

Desde la Figura 37 hasta la Figura 39 muestra la categorización de la estabilidad de los taludes de la Loma del Peyé de acuerdo a las condiciones planteadas **CS-CNA**, **CS-SNA**, **SS-CNA**, una vez modelados los taludes en el Software Slide® V.5., por el método de Spencer.

Figura 37. Categorización de la estabilidad de los taludes en el área de estudio, CS-CNA.

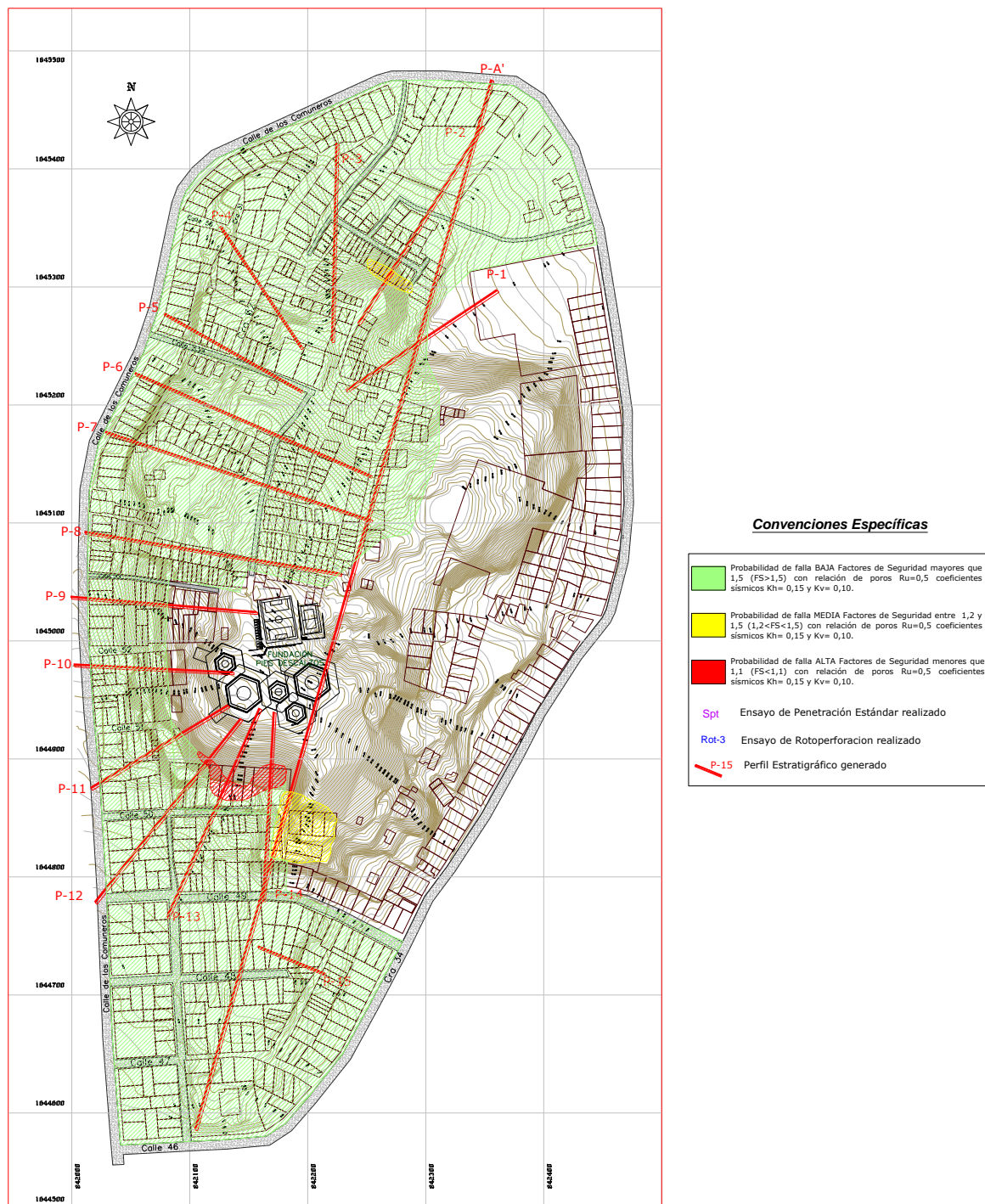


Figura 38. Categorización de la estabilidad de los taludes en el área de estudio, CS-SNA.

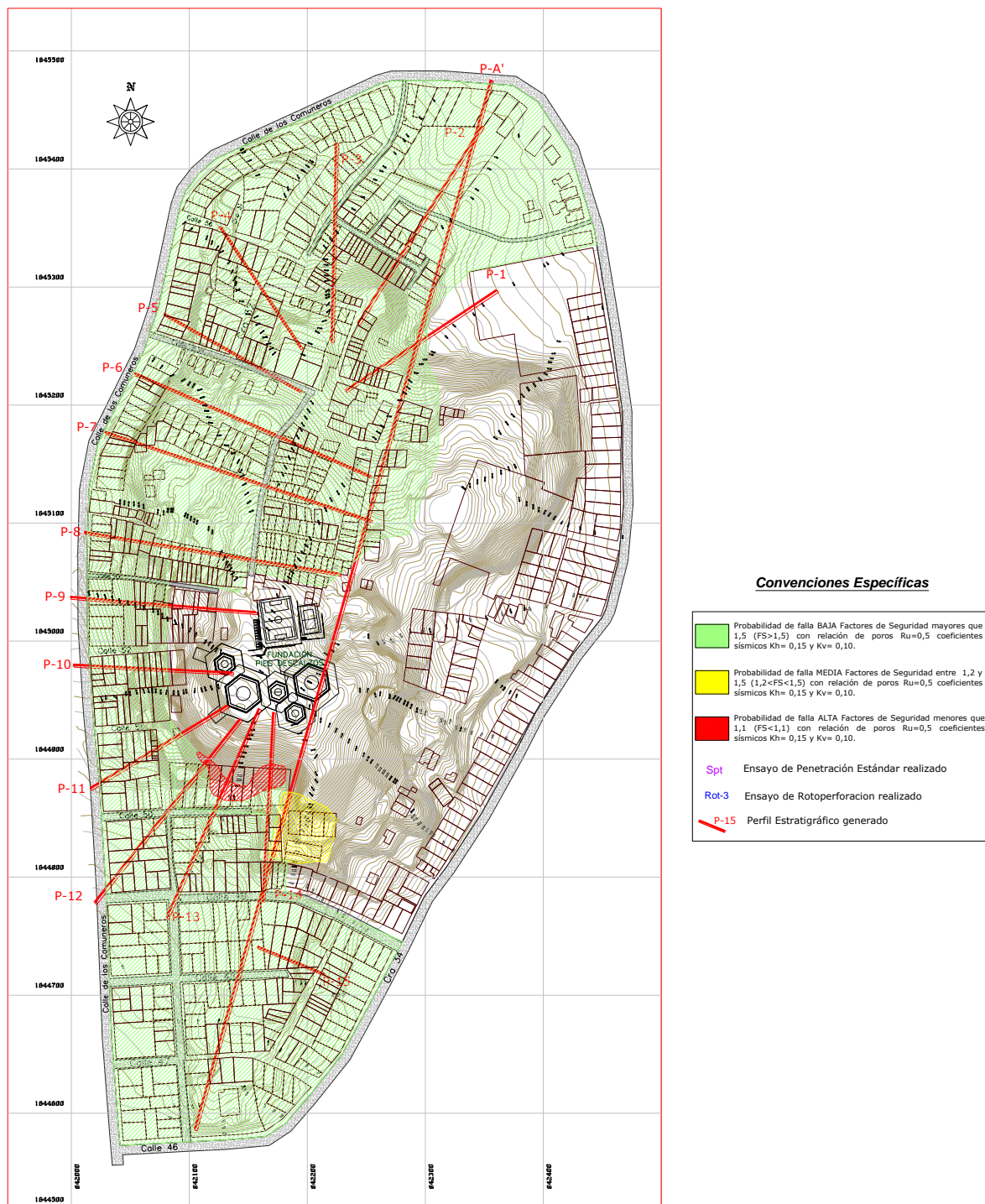
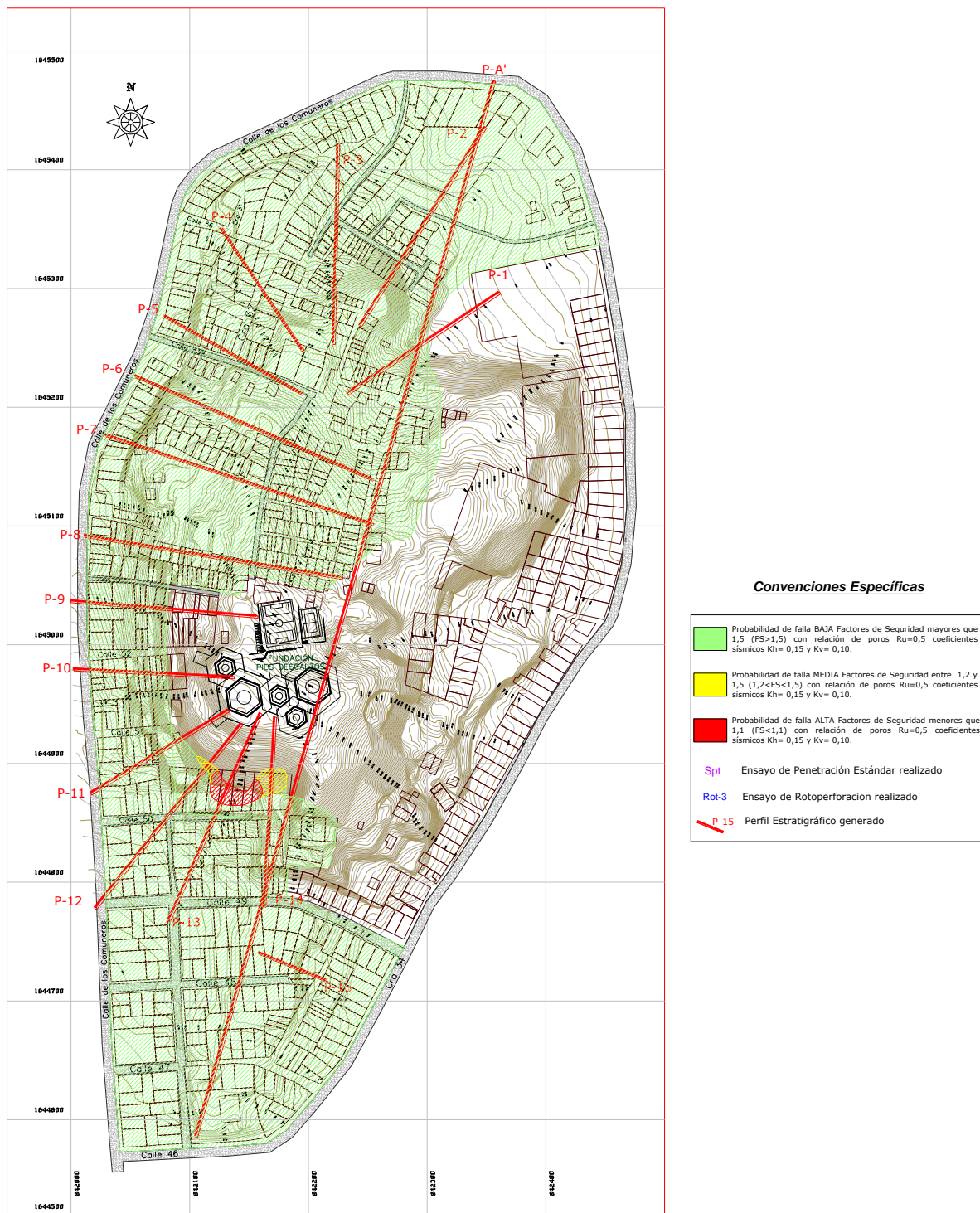


Figura 39. Categorización de la estabilidad de los taludes en el área de estudio, SS-CNA.



5.6. DISEÑO CONCEPTUAL DE OBRAS DE MITIGACIÓN

Teniendo en cuenta que para la caracterización de los taludes del sector occidental de la Loma del Peyé se plantearon tres (3) posibles escenarios (CS-CNA, CS-SNA y SS-CNA), las obras de mitigación se realizaron de acuerdo a la tercera condición (SS-CNA, sin sismo y con nivel de agua) la cual tiene mayor probabilidad de ocurrencia en la ciudad de Cartagena, ya que el municipio de Cartagena según la NSR-10 es considerado como de sismicidad baja (NSR, 2010).

Adicionalmente a esto se realizó la visita de campo en la cual se identificaron algunos problemas de inestabilidad de taludes por erosión, los cuales el software Slide® no tiene en cuenta, a continuación en la Figura 40, se muestra el sector occidental de la Loma del Peyé con la localización de las zonas con problemas de erosión pluvial.

Figura 40. Localización de zonas con problemas de erosión pluvial (color café).



Fuente: Google Earth 2015 y modificado por Autores.

5.6.1. Inspección Visual: durante el recorrido hecho el día 17 de marzo de 2015 se identificaron diferentes zonas las cuales se pueden categorizar como de inestabilidad por problemas de erosión pluvial, la Figura 40 muestra las zonas (en café) con dichos problemas los cuales mostraron ser zonas que se deben ser intervenidas con diseños de obras civiles tales que eviten pérdidas humanas y de patrimonio.

A continuación desde la Figura 41 hasta la Figura 45 se muestra un registro fotográfico tomado en las zonas con presencia de erosión pluvial.

Figura 41. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas $10^{\circ}25'39.71''N$, $75^{\circ}31'4.41''O$



Figura 42. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas $10^{\circ}25'30.13''N$, $75^{\circ}31'12.12''O$



Figura 43. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas $10^{\circ}25'27.97''N$, $75^{\circ}31'12.12''O$



Figura 44. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas $10^{\circ}25'25.50''N$, $75^{\circ}31'5.95''O$

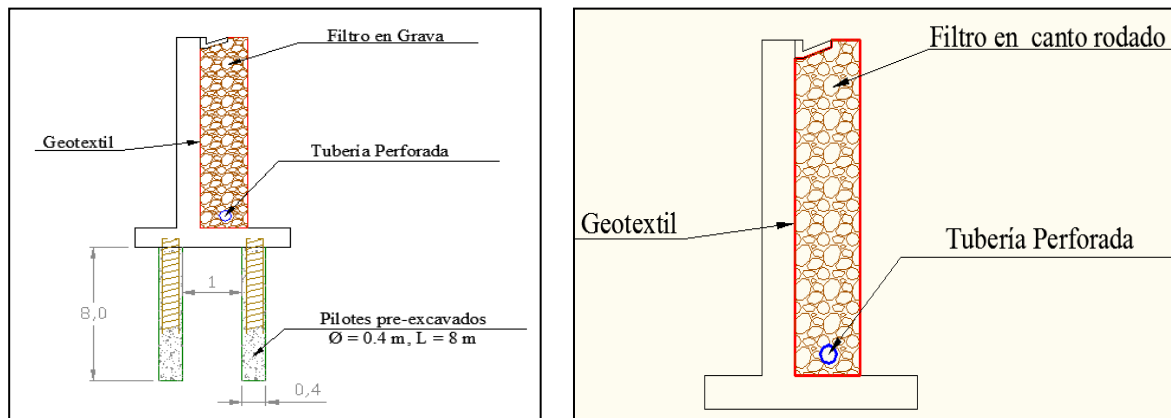


Figura 45. Erosión pluvial de talud en zona de estudio, coordenadas $10^{\circ}25'25.52''N$, $75^{\circ}31'6.60''O$



5.6.2. Obras de contención: En zonas donde se han originado problemas de estabilidad de taludes y fundamentados en estudios detallados, se deben diseñar muros de contención en voladizo, de acuerdo con las características físicas y requerimientos técnicos de la ladera afectada, con el propósito de contener el empuje de suelo que tiende a desestabilizar generando movimientos en masa y para confinar todo el bloque del área de estudio. Tanto los muros como los pilotes serán construidos en concreto de 4000 psi y reforzados con acero estructural de 60.000 y 40.000 psi

Figura 46. Detalle de Muro de contención recomendado para mitigación del Riesgo en laderas de Loma del Peyé.



Fuente: Universidad de Cartagena, 2014

5.6.3. Obras de Bioingeniería: Dentro de las obras de bioingeniería es conveniente utilizar biomantos en las zona de los escarpes, así como en cualquier zona con pendientes promedios mayores a 45° (Parte media y alta de la ladera), en dichas zonas no es conveniente sembrar especies de medio y alto follaje pues la biomasa de las mismas aportaría una carga desfavorable a la ladera y adicionaría cargas dinámicas por vientos que desestabilizarían el sistema, por otra parte donde las pendientes son menores a los 45° es favorable aportar biomasa y especies vegetales de medio y alto follaje.

Estos diseños son conceptuales y corresponden al análisis del autor sobre la necesidad del área, en cuanto al drenaje existente, reducción en los movimientos de tierra y refuerzo del suelo; es pertinente realizar los diseños específicos y detallados de dichas obras para simular su funcionamiento en la ladera mediante un software de análisis de estabilidad de taludes o cualquier otro método para la comprobación y validación de los mismos.

Es conveniente definir un sistema de medición para los desplazamientos en el terreno, así como los niveles freáticos en la zona. La obtención de las medidas de los desplazamientos en superficie y en el interior del terreno en el área afectada, permitirán detectar el movimiento de una zona determinada del talud o de todo el conjunto, y conocer la dirección y velocidad del mismo. Para el monitoreo y medición de los niveles piezométricos de agua, se requiere la instalación de piezómetros; los cuales arrojan información útil para la predicción de la estabilidad de los taludes, el monitoreo de la infiltración y la verificación de modelos de flujo.

La Figura 47 muestra la superposición del mapa donde se encontró en la inspección visual problemas de erosión (zonas color café) y el mapa con la condición selecta (SS-CNA).

Con base en lo anterior, se localizaron aquellas zonas donde se requieren las obras conceptuales de ingeniería para la mitigación del riesgo ante posibles fenómenos denudativos (movimientos en masa) (ver Figura 48).

Figura 47. Superposición de mapa con problemas de erosión (zonas cafés) y mapa SS-CNA

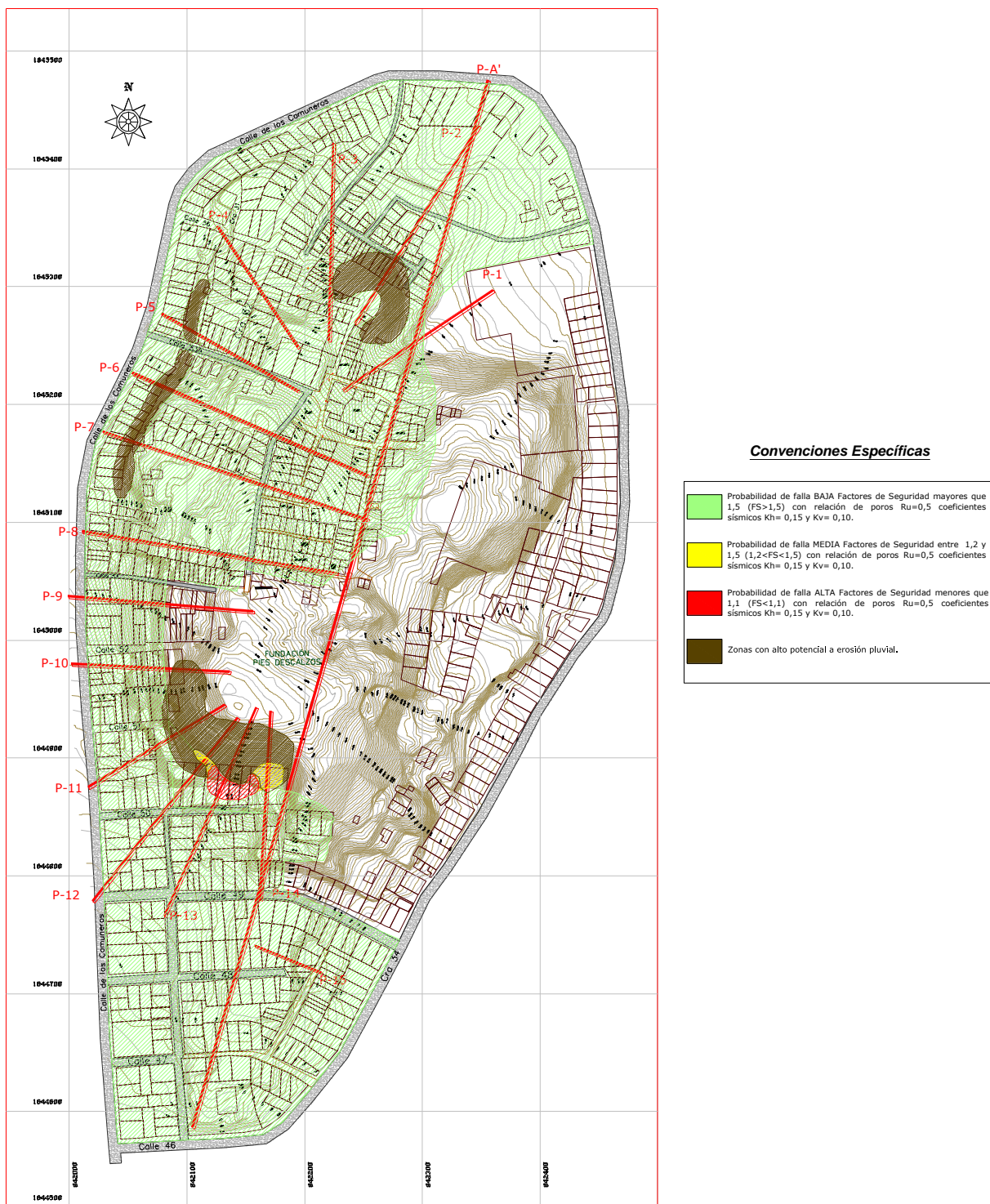
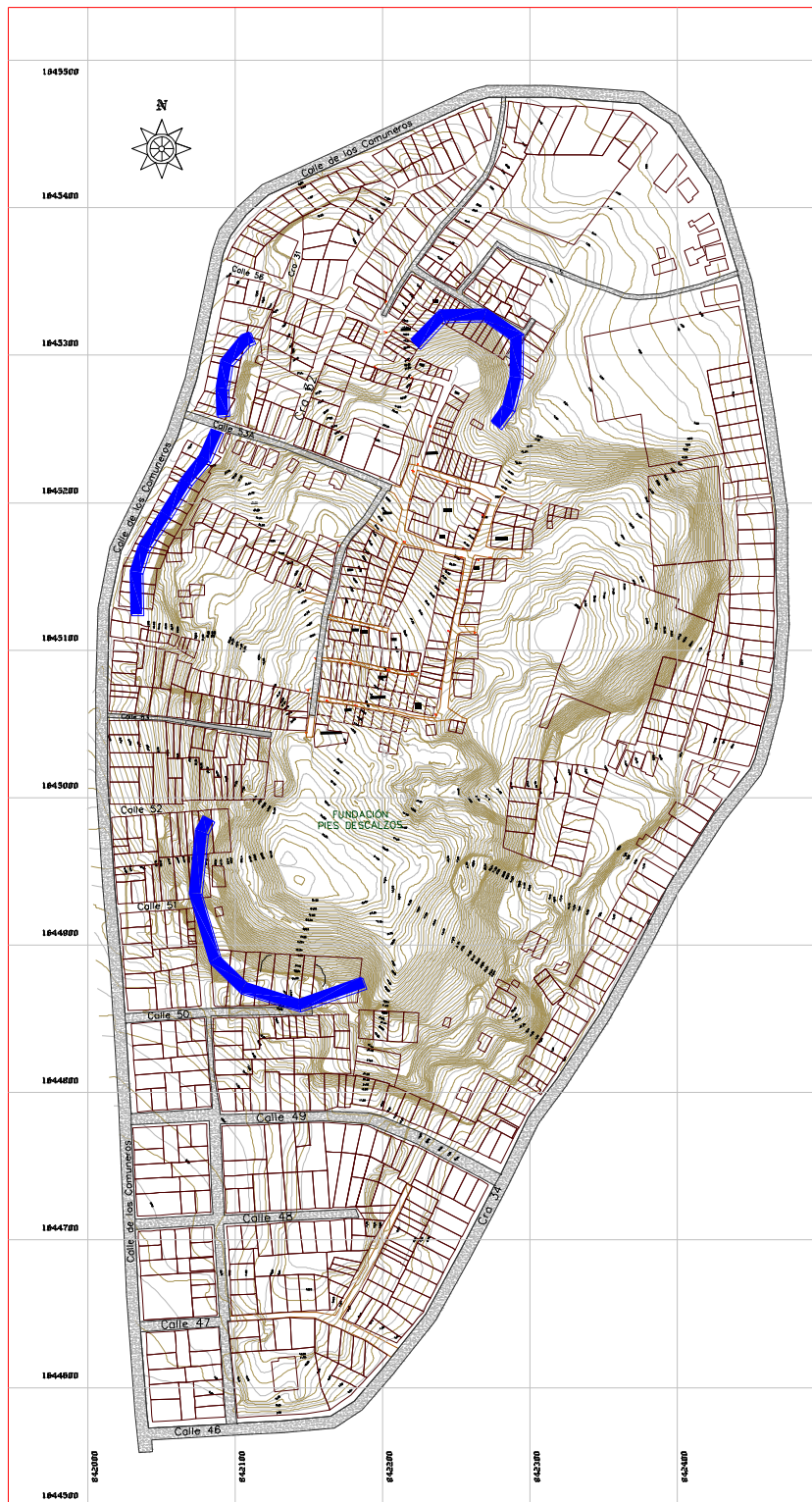


Figura 48. Localización de obras conceptuales para mitigación del riesgo (líneas azules).



Fuente: Plano Topográfico Universidad de Cartagena y modificado por Autores.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente proyecto de investigación condujo a una categorización de la inestabilidad de los taludes del sector occidental de la Loma del Peyé, mediante el análisis de estabilidad de los taludes más representativos de la misma, de la cual se desprenden las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a la categorización de la zona de estudio por nivel de inestabilidad, se encontró que una de las zonas se encuentran en alto riesgo, además es una zona que presenta alta susceptibilidad a erosión pluvial y pendientes de terreno mayores del 60% (como lo muestran los perfiles P-12, P-13 y P-14 condición SS-CNA).
- El análisis de estabilidad de taludes por cada estrato (induciendo una superficie de falla por cada estrato), es más preciso que el realizado induciendo superficies de falla por varios estratos (como lo hizo la Universidad de Cartagena en el presente estudio), debido a que cada estrato posee diferentes parámetros geomecánicos los cuales al inducirle una superficie de falla, arrojarán resultados mucho más cercanos a la realidad.
- La categorización de la zona de estudio por inestabilidad de taludes permite concluir que para el evento-condición más probable (SS-CNA), la zona es estable, exceptuando los alrededores del colegio perteneciente a la fundación Pies Descalzos, (ver perfiles P-12, P-13 y P-14 condición SS-CNA).
- De acuerdo a la literatura existente, los métodos de Equilibrio límite (Bishop, y Morgenstern, Jambu, Ordinario o Fellenius y Spencer), presentan entre si una variación promedio menor al 5%, mientras que en nuestro trabajo de investigación sobre la Loma del Peyé encontramos una variación promedio de aproximadamente el 4% entre ellos.
- Los factores de seguridad obtenidos por los diferentes métodos de Equilibrio límite (Bishop, y Morgenstern, Jambu, Ordinario o Fellenius y Spencer), arrojan resultados con variaciones considerables para algunos perfiles estudiados (P-13, P-10, PA Sur-Norte y P-14), hasta el 60% para los métodos *Spencer vs Fellenius* (ver Tabla 22).
- Los métodos *Bhisop* y *Spencer* dan factores de seguridad muy similares entre ellos, lo mismo se observó para los métodos *Jambu* y *Fellenius*. Estos últimos arrojaron

resultados más cercanos a un nivel de amenaza más alto en comparación con *Bhisop* y *Spencer*. Por tanto asumimos como los métodos más precisos *Spencer* y *Bhisop*, porque el *Spencer* es el único de los cuatro que satisface totalmente el equilibrio de momentos y de esfuerzos.

- Los métodos de Equilibrio Límite analizados en esta investigación para determinar el nivel de amenaza de los taludes del sector occidental de la Loma del Peyé, dan resultados parecidos, sin embargo el método que más se ajusta al posible nivel de amenaza de las zonas observadas en campo es el método de *Spencer*, además de ser éste el método más recomendado por entidades internacionales (Suarez, 1998).
- El uso del software *Slide*[®] V.5, en cuanto a los resultados inválidos, son causados debido a que no es posible por este método calcular todas las ecuaciones para hallar las fuerzas y momentos actuantes sobre cada dovela, como lo es el método de *Spencer*.
- Las zonas de amenaza alta obtenida mediante el cálculo de los factores de seguridad, concuerdan en gran porcentaje con lo observado en campo (perfiles P-12, P-13 y P-14 condición SS-CNA), y a demás de esto, se observaron problemas de erosión pluvial en los mismos.
- Los F.S. pueden disminuir con el paso del tiempo, debido a la progresiva invasión antrópica y los cambios del terreno, pudiendo éstos llegar a ser críticos ($>1,1$).

7. RECOMENDACIONES

- Es necesario realizar la intervención inmediata de los taludes que presentan un alto nivel de riesgo, desde el punto de vista geotécnico, estructural y social.
- Para realizar un análisis hidrogeológico cercano a la realidad, se necesita realizar la instalación de piezómetros en toda el área de estudio para identificar los niveles de aguas subterráneas reales.
- Para las zonas de alta inestabilidad es necesario realizar estudios detallados, y así poder realizar diseños definitivos de las obras propuestas en esta investigación.
- Las masas de suelos y/o rocas en proceso de actividad de remoción de masas en ladera poseen un comportamiento mecánico constante que obedece a leyes físicas, como tal se deben monitorear los asentamientos de la masa y su movimiento horizontal y vertical con el fin de determinar la dirección y magnitud del movimiento. Para ello es importante tener puntos fijos de control. Es importante así mismo la existencia diversos sistemas de monitoreo y alerta temprana que genere una actitud preventiva.
- Debido a la alta erodabilidad del terreno es fundamental la realización de programas de Bioingeniería de reforestación en las zonas escarpadas y en todas aquellas áreas donde sean significativos los procesos denudacionales tipo erosión.
- Se debe desestimular la urbanización y densificación de construcciones en las zonas escarpadas del sector, por ser considerados susceptibles a los fenómenos de inestabilidad del terreno.

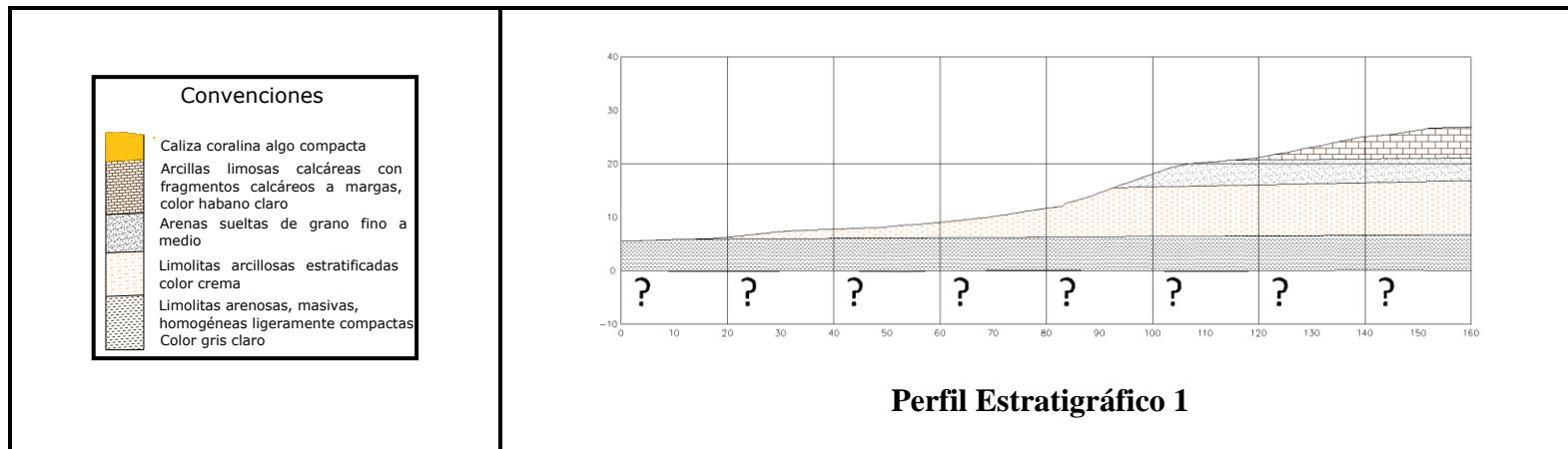
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aysen, A. A. (2002). Stability of Earth Slopes. En A. A. Aysen, *Soil Mechanics Basic Concepts and Engineering Applications* (pág. 374). Amsterdam: Swets & Zeitlinger B.V.
- Braja M., D. (2001). Estabilidad de Taludes. En B. M. Das, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (págs. 339, 340). Mexico: Thomson Editores.
- Camacho, M. M. (15 de 08 de 2011). *EL UNIVERSAL*. Recuperado el 26 de Agosto de 2014, de <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/local/san-francisco-se-viene-abajo-38246>
- Caracol Radio. (03 de Enero de 2012). *www.caracol.com.co*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2014, de <http://www.caracol.com.co/noticias/regionales/deslizamiento-de-tierra-afecta-20-viviendas-en-las-faldas-del-cerro-la-popa-en-cartagena/20120103/nota/1600914.aspx>
- Distrito de Cartagena. (2001). Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias. *DECRETO No 0977 DE 2001 Artículo 25: Identificación y localización de las áreas de protección y conservación de los recursos naturales y paisajísticos del distrito y medidas de manejo de las areas de protección*. Cartagena.
- Duncan J.M. & Wright S. G. (2005). Soil Strength and Slope Stability. *Landslides investigation and mitigation* (págs. 337-371). Transportation research Board.
- Duque, H. (1984). *Estilo estructural. Diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú - San Jacinto en el noroccidente de Colombia*. Bogotá, Colombia: Boletín Geológico INGEOMINAS Vol. 27 No.2 pp. 1-29.
- EPTISA. (1987). *Manual de Taludes*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Fredlund & Krahn. (1981). The Relationship between Limit Equilibrium Slope Stability Methods. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (págs. 409-416). Stockholm, Sweden: University of Saskatchewan.



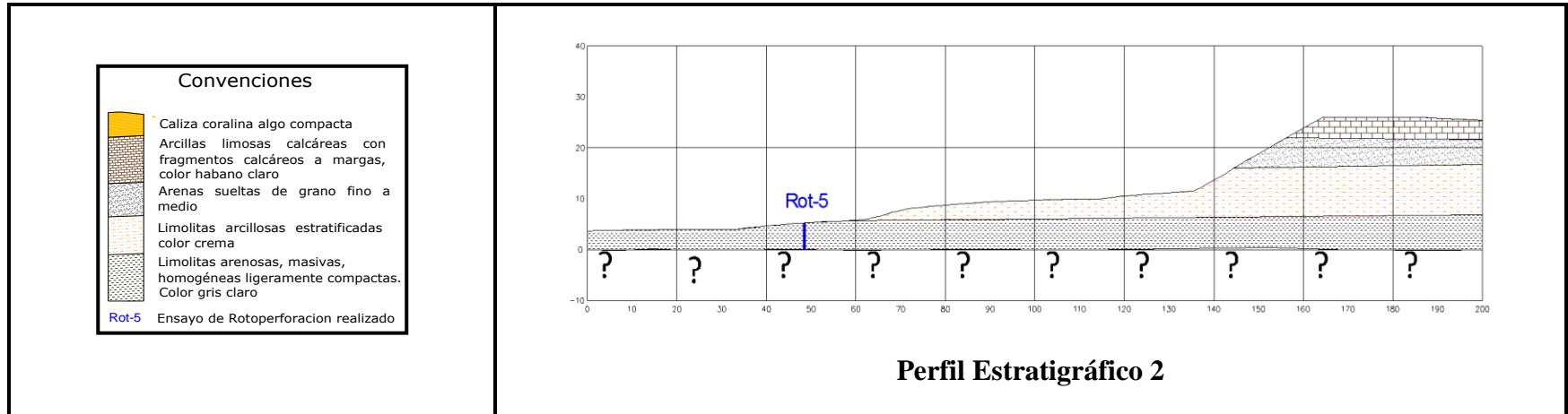
- Guilliam Barboza Miranda. (2011). *EVALUACIÓN GEOTÉCNICA Y DISEÑOS GEOTÉCNICOS E HIDRÁULICOS DE OBRAS DE MITIGACIÓN, EN LAS LADERAS DONDE SE PLANEA CONSTRUIR EL COLEGIO DE LA FUNDACIÓN PIES DESCALZOS, EN LA CIUDAD DE CARTAGENA*. Cartagena.
- INGEOMINAS. (2001). *ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA, APTITUD Y USO DEL SUELO EN EL CASCO URBANO DE CARTAGENA DE INDIAS, DTC - BOLÍVAR*. Cartagena, Colombia.
- NSR. (2010). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE*. Bogotá DC-Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Revista Semana. (29 de Diciembre de 2011). *Semana*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2014, de <http://www.semana.com/nacion/articulo/colombia-ha-invertido-102000-millones-atender-recientes-emergencias-lluvias/251393-3>
- Salas, C. O. (2010). Metodos de Cálculo y Criterios de diseño de taludes. *Estabilidad de Taludes*. Universidad Privada de Tacna.
- Suarez Diaz, J. (1998). Modelos de Analisis de Estabilidad. En J. S. Diaz, *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes es Zonas Tropicales* (págs. 123-124). Bucaramanga: Ediciones UIS.
- Suarez, J. (1998). EQUILIBRIO LIMITE Y FACTOR DE SEGURIDAD. En J. S. Diaz, *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes* (pág. 123). Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Tom, A. T. (16 de Noviembre de 2010). *www.eluniversal.com.co*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2014, de <http://www.eluniversal.com.co/alud-de-tierra-emergencia-invierno-cartagena/deslizamientos-destruyen-parcialmente-44-viviendas>
- Universidad de Cartagena. (2014). *Informe Producto 1, FORTALECIMIENTO DE LAS CAPACIDADES INSTITUCIONALES PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO Y EL MEJORAMIENTO DE LOS MEDIOS DE VIDA DE LA COMUNIDAD VULNERABLE FRENTE A FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA, ASENTADA EN EL SECTOR DENOMINADO LOMAS DEL PEYÉ*. Cartagena: UniCartagena.

ANEXOS



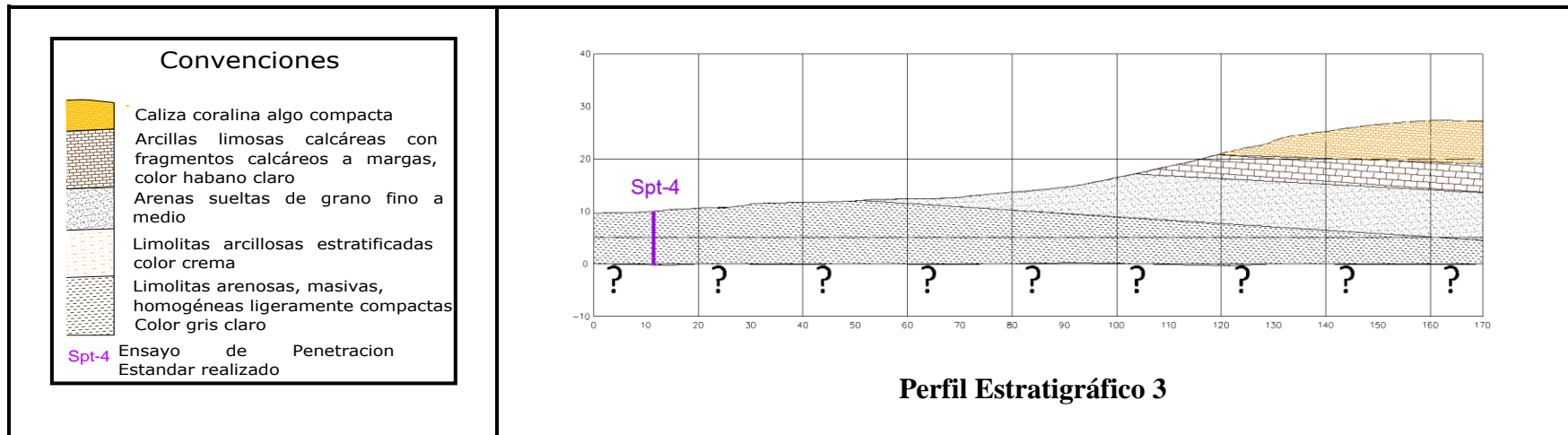
Anexo 1. Perfil Estratigráfico N° 1.

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



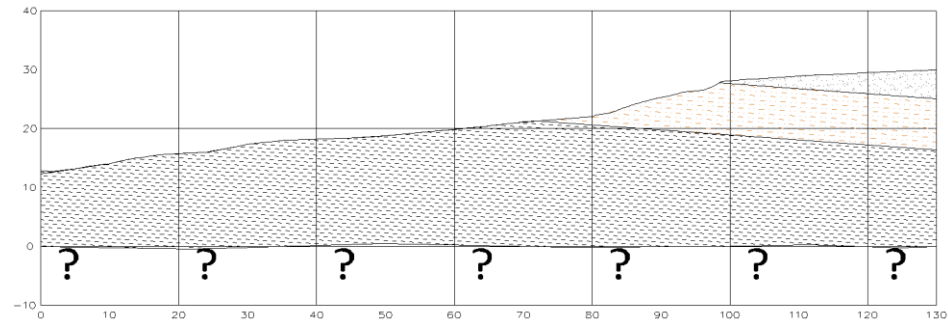
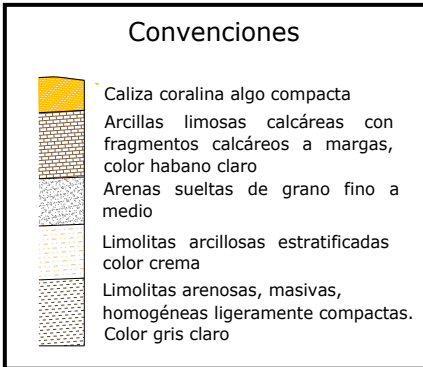
Anexo 2. Perfil Estratigráfico N° 2.

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



Anexo 3. Perfil Estratigráfico N° 3.

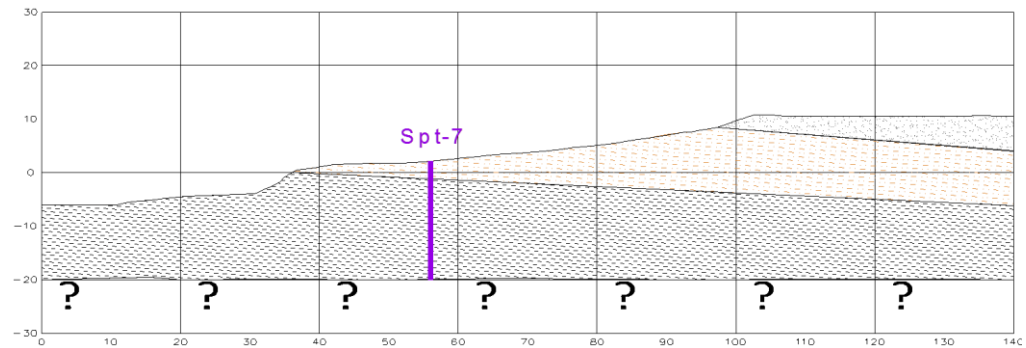
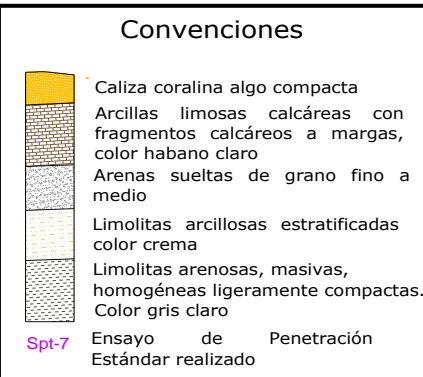
Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



Perfil Estratigráfico 4

Anexo 4. Perfil Estratigráfico N° 4.

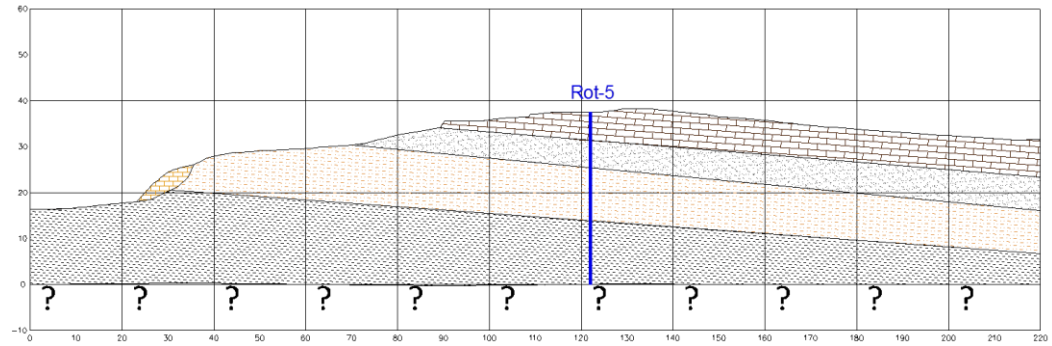
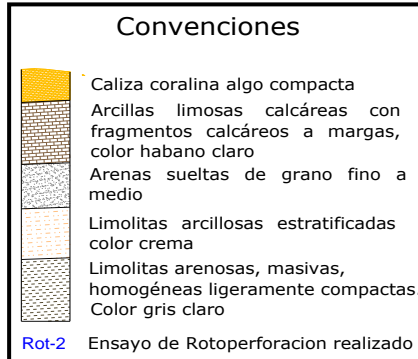
Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



Perfil Estratigráfico 5

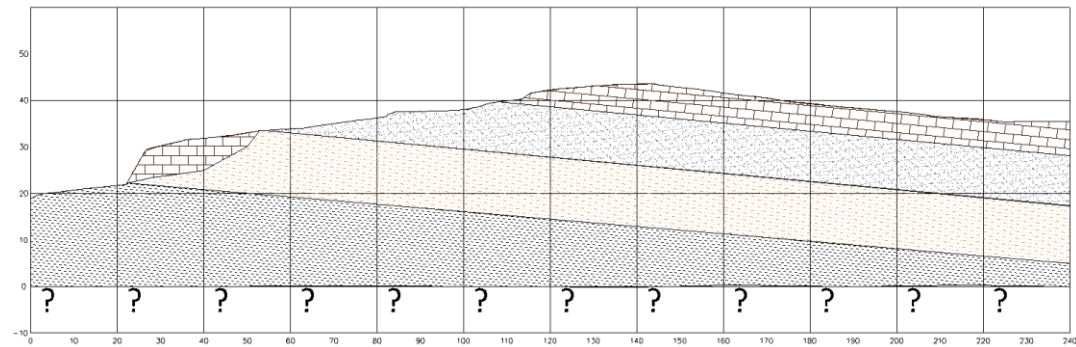
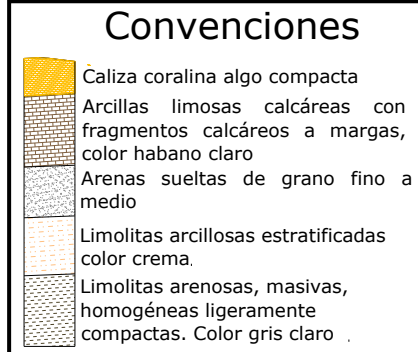
Anexo 5. Perfil Estratigráfico N° 5.

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



Anexo 6. Perfil Estratigráfico N° 6.






Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

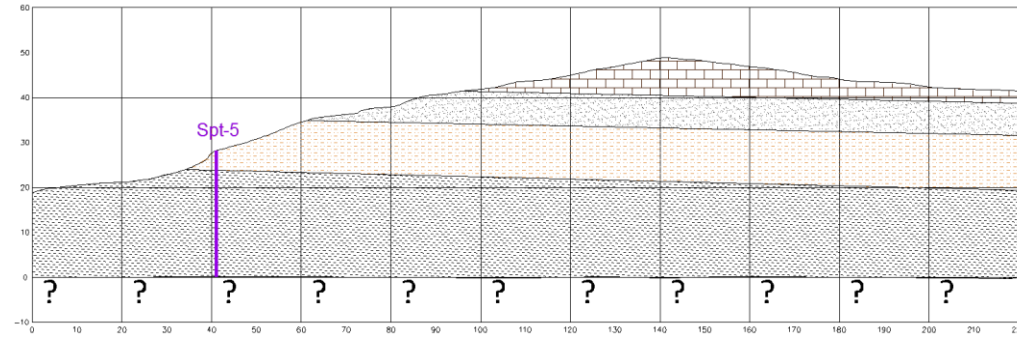


Anexo 7. Perfil Estratigráfico N° 7.

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Convenciones

	Caliza coralina algo compacta
	Arcillas limosas calcáreas con fragmentos calcáreos a margas, color habano claro
	Arenas sueltas de grano fino a medio
	Limolitas arcillosas estratificadas color crema.
	Limolitas arenosas, masivas, homogéneas ligeramente compactas. Color gris claro .
Spt-5	Ensayo de Penetracion Estandar realizado








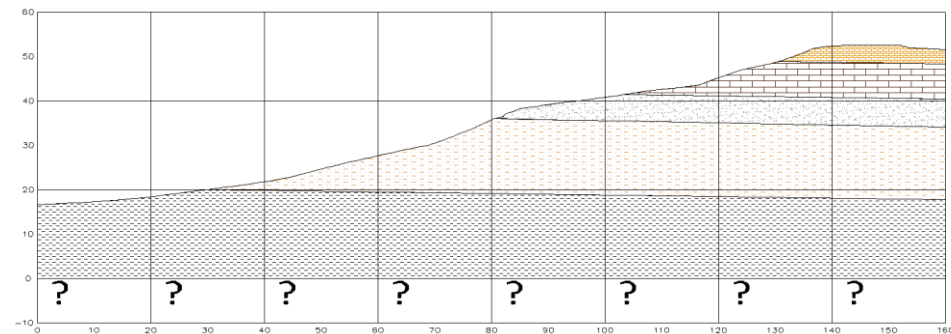
Perfil Estratigráfico 8

Anexo 8. Perfil Estratigráfico N° 8.

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

Convenciones

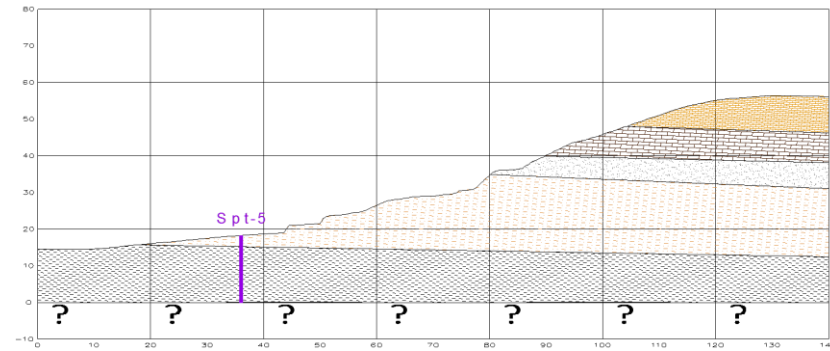
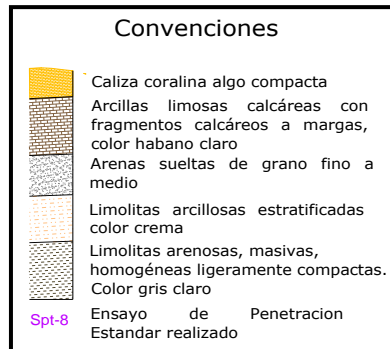
	Caliza coralina algo compacta
	Arcillas limosas calcáreas con fragmentos calcáreos a margas, color habano claro
	Arenas sueltas de grano fino a medio
	Limolitas arcillosas estratificadas color crema
	Limolitas arenosas, masivas, homogéneas ligeramente compactas. Color gris claro



Perfil Estratigráfico 9

Anexo 9. Perfil Estratigráfico N° 9.

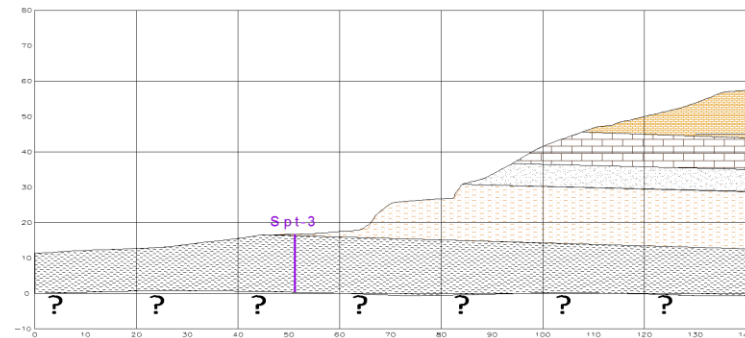
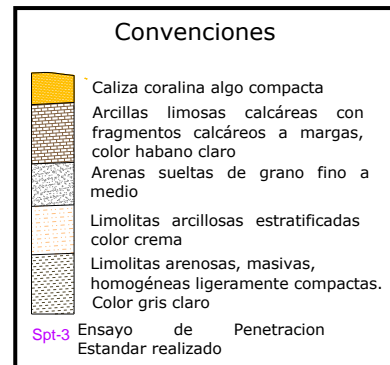
Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



Perfil Estratigráfico 10

Anexo 10. Perfil Estratigráfico N° 10.

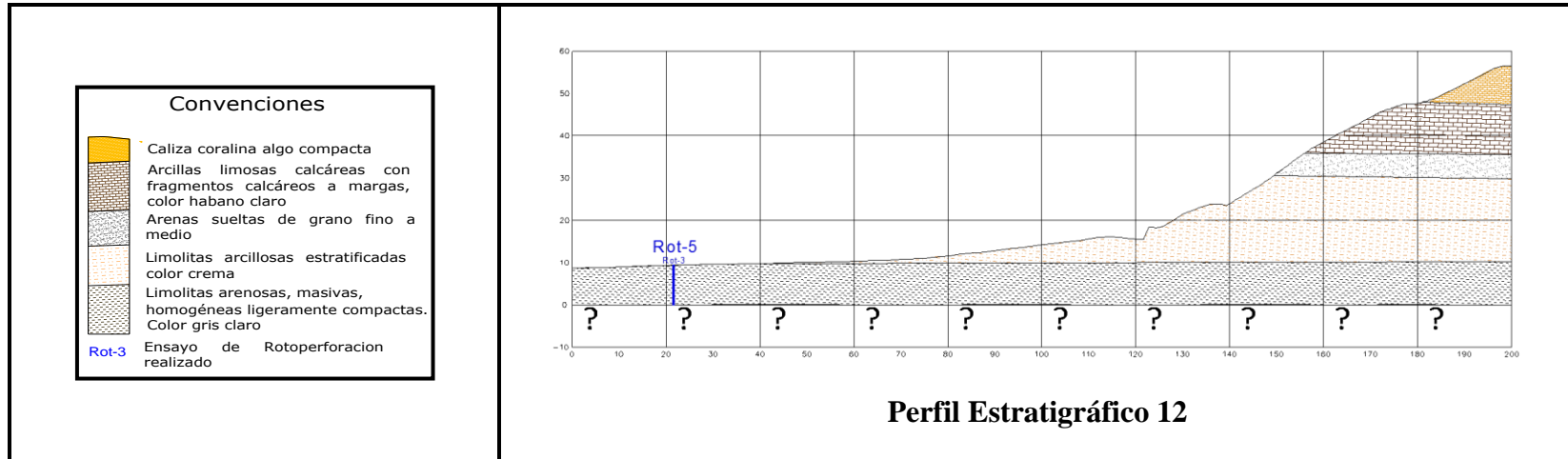
Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



Perfil Estratigráfico 11

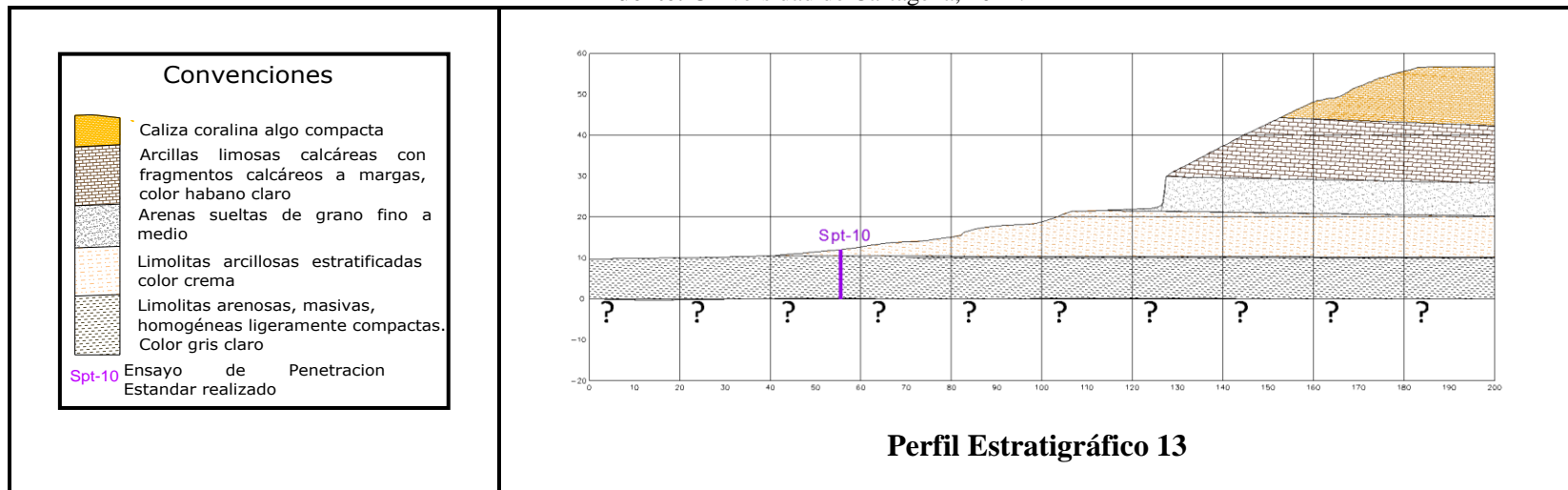
Anexo 11. Perfil Estratigráfico N° 11.

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



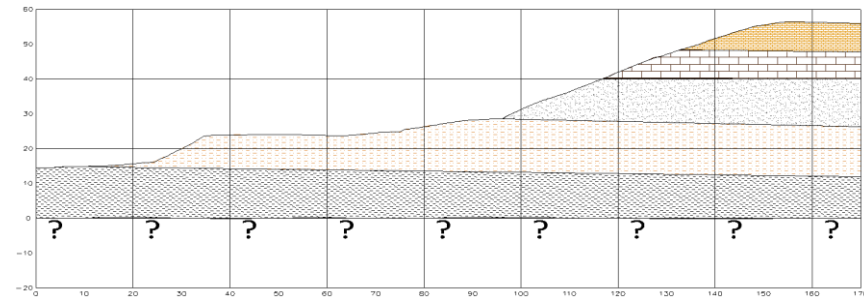
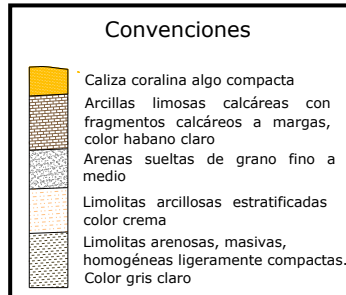
Anexo 12. Perfil Estratigráfico N° 12.

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



Anexo 13. Perfil Estratigráfico N° 13.

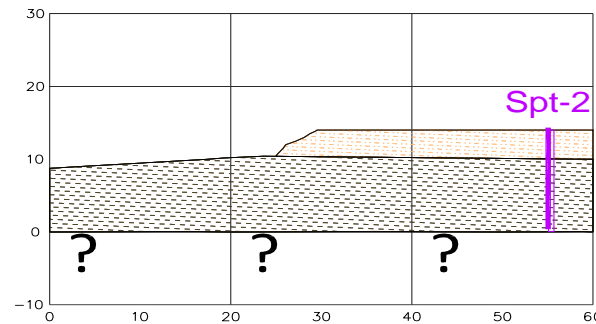
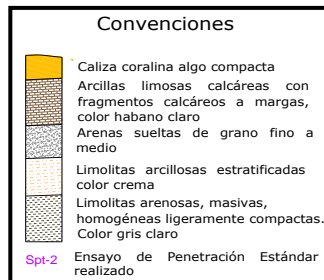
Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



Perfil Estratigráfico 14

Anexo 14. Perfil Estratigráfico N° 14

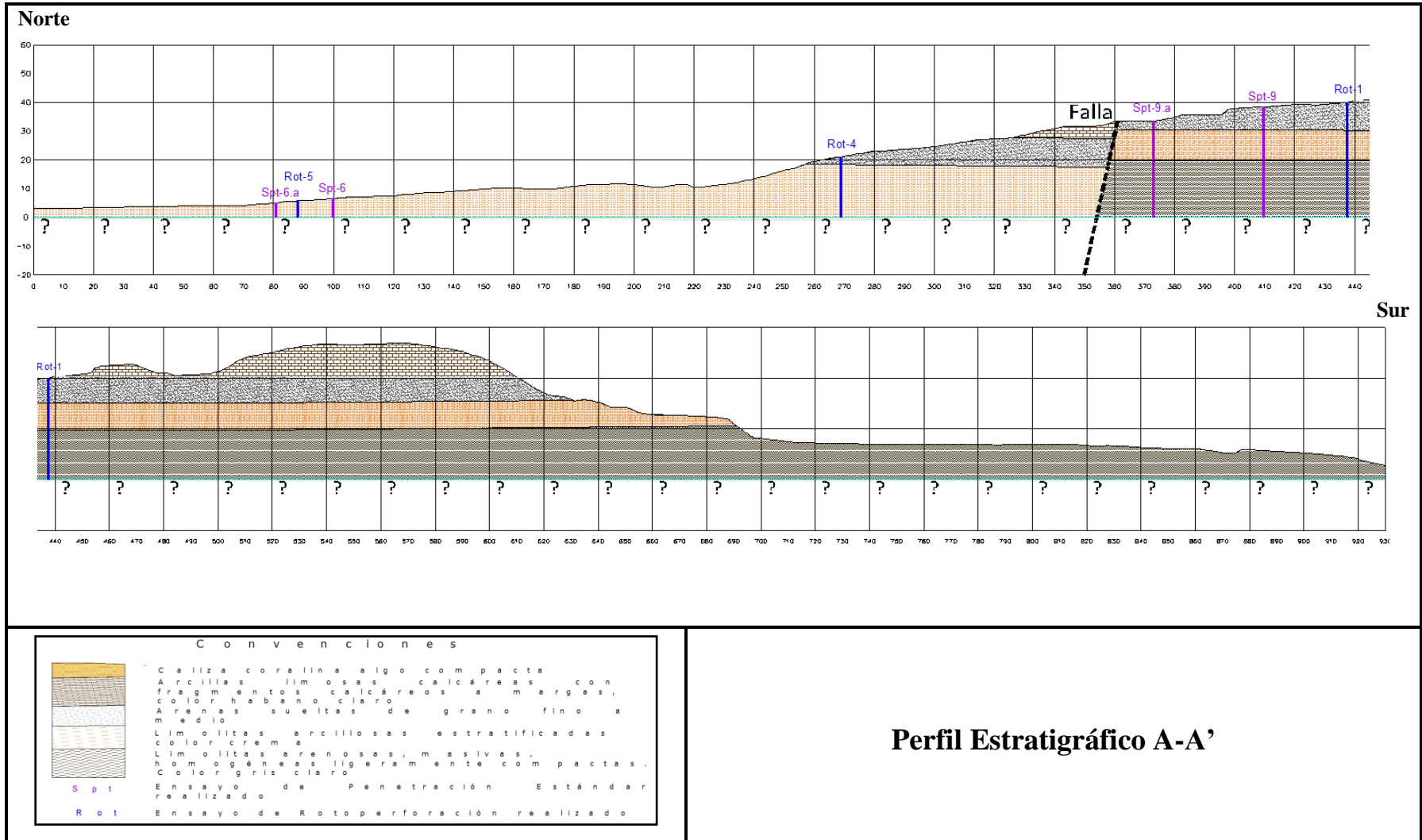
Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



Perfil Estratigráfico 15

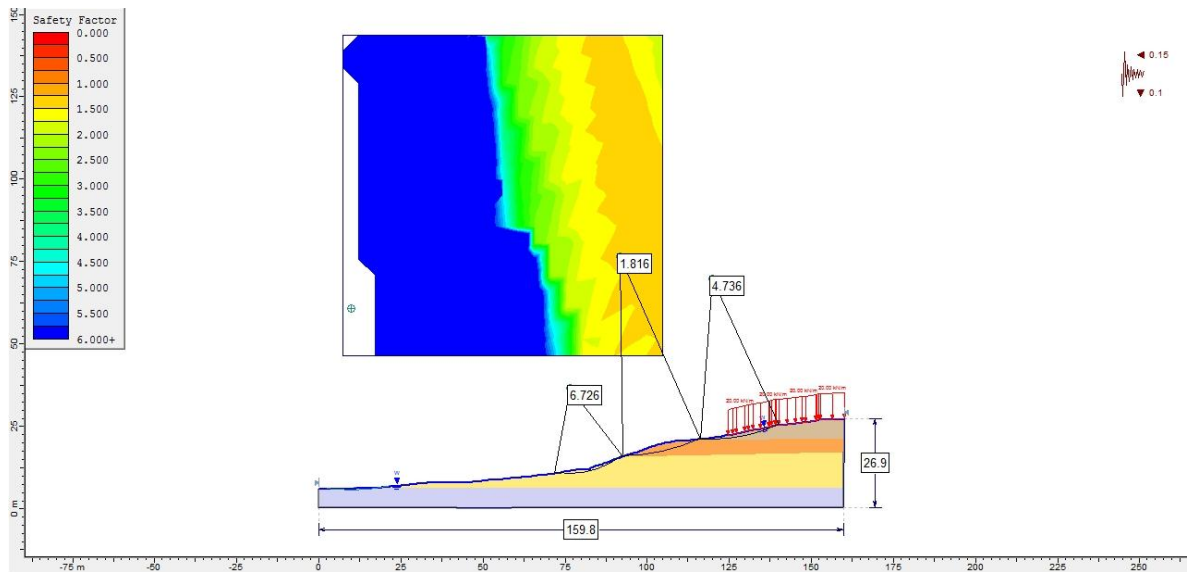
Anexo 15. Perfil Estratigráfico N° 16

Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.

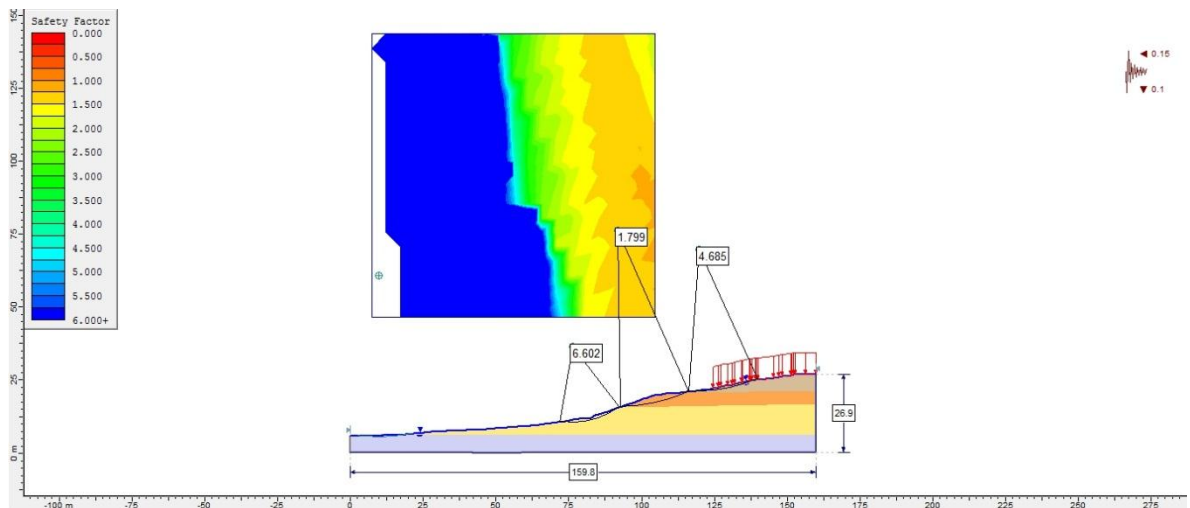


Anexo 16. Perfil Estratigráfico N° A-A'

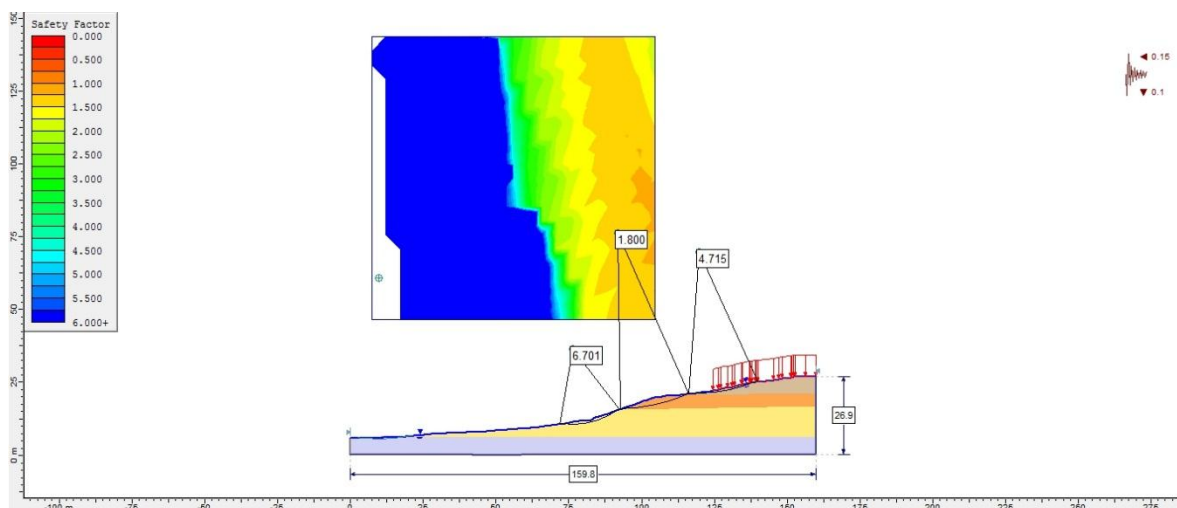
Fuente: Universidad de Cartagena, 2014.



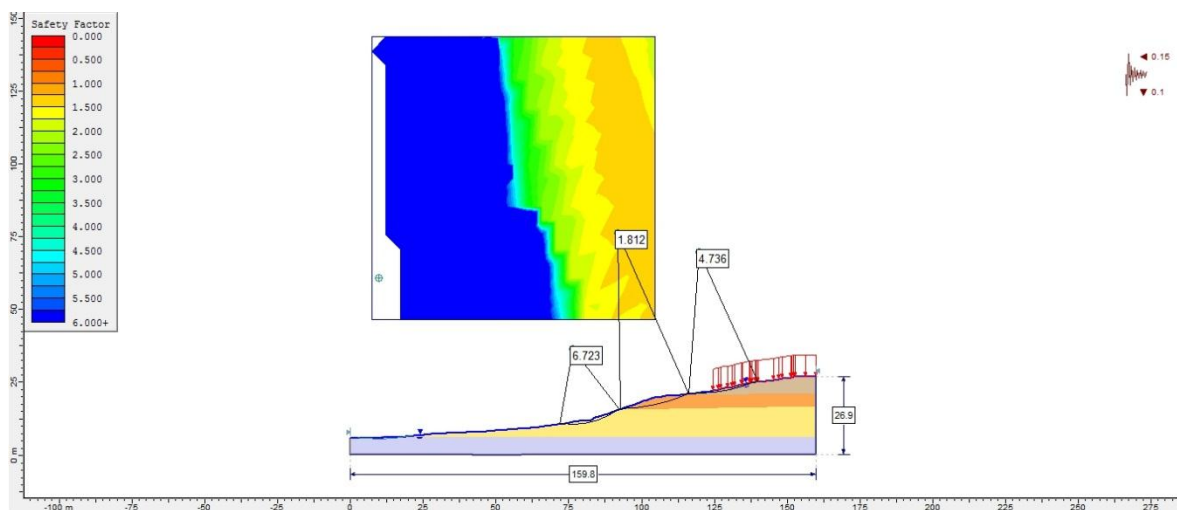
Anexo 17. Perfil 1 modelado CS-CNA-Método de Bishop



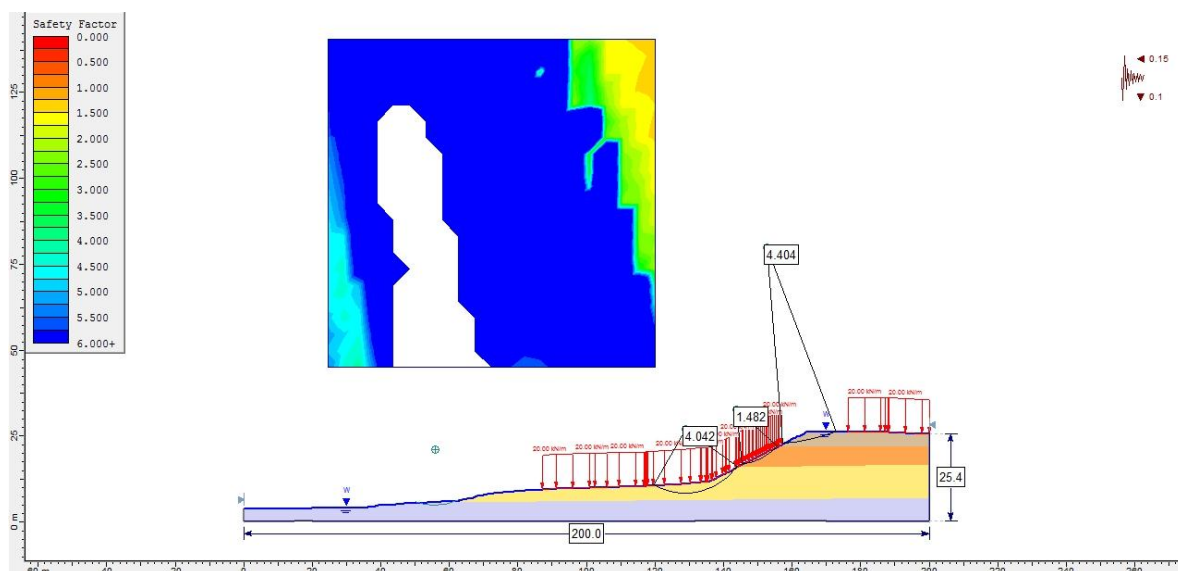
Anexo 18. Perfil 1 modelado CS-CNA-Método de Jambu



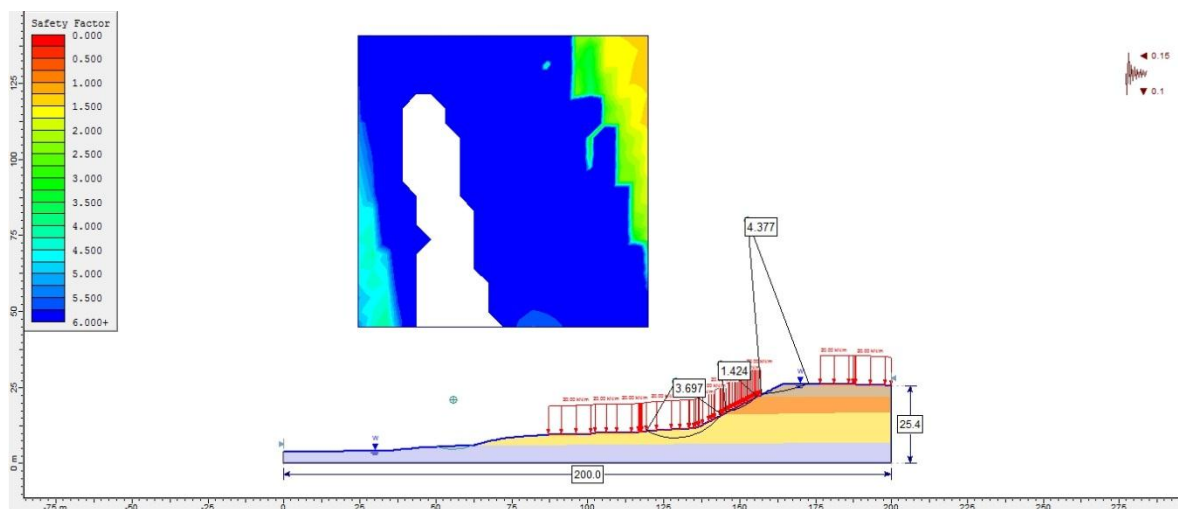
Anexo 19. Perfil 1 modelado CS-CNA-Método Ordinario



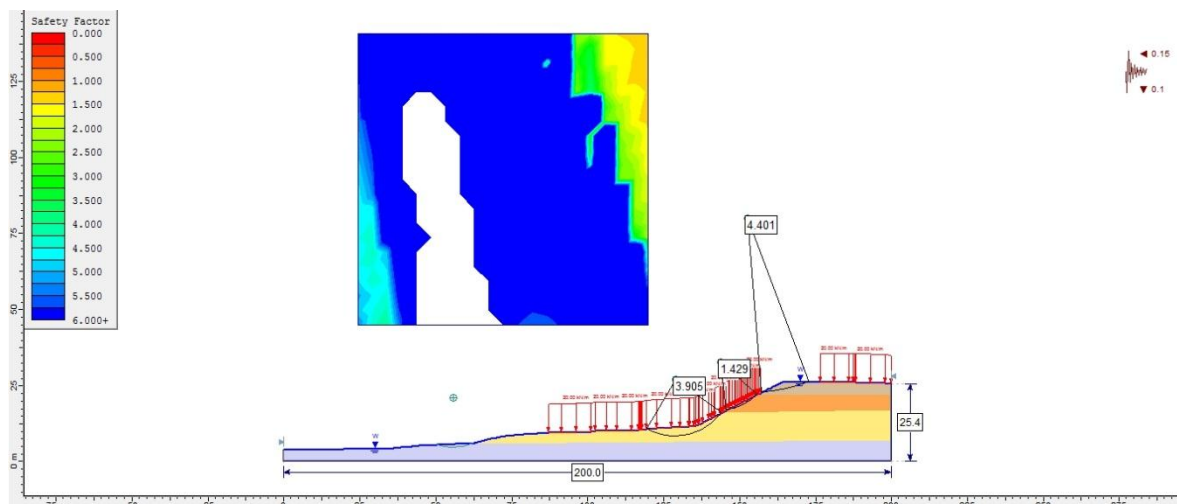
Anexo 20. Perfil 1 modelado CS-CNA-Método de Spencer



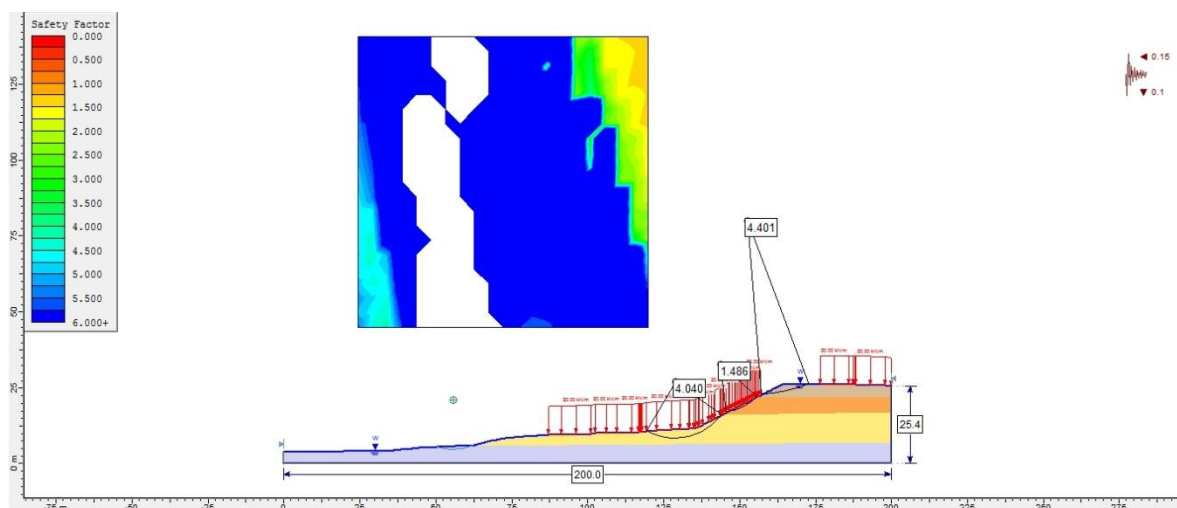
Anexo 21. Perfil 2 modelado CS-CNA-Método de Bishop



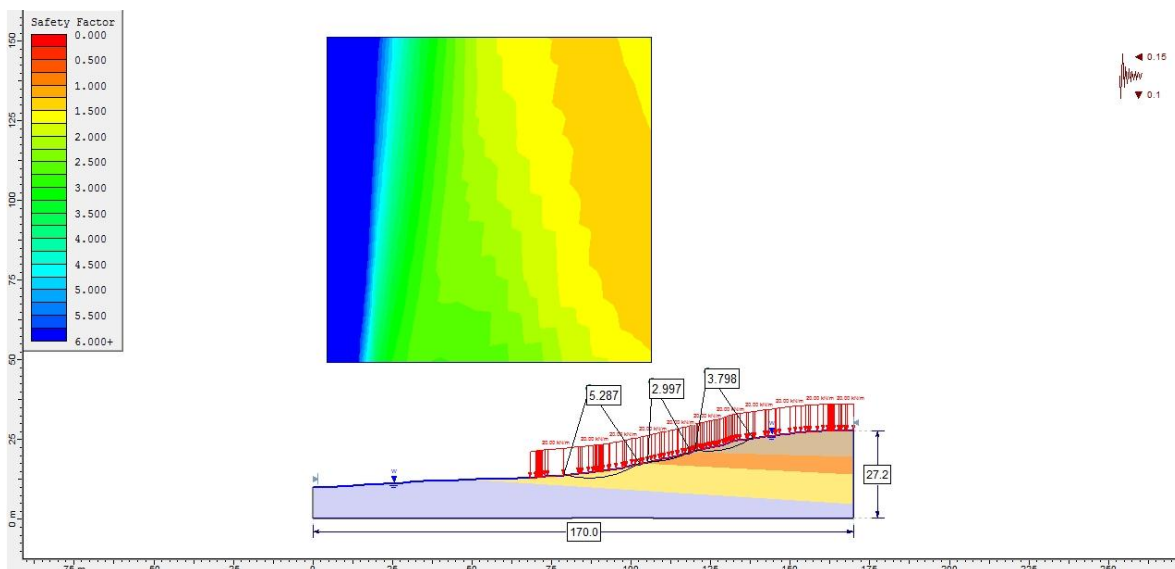
Anexo 22. Perfil 2 modelado CS-CNA-Método de Jambu



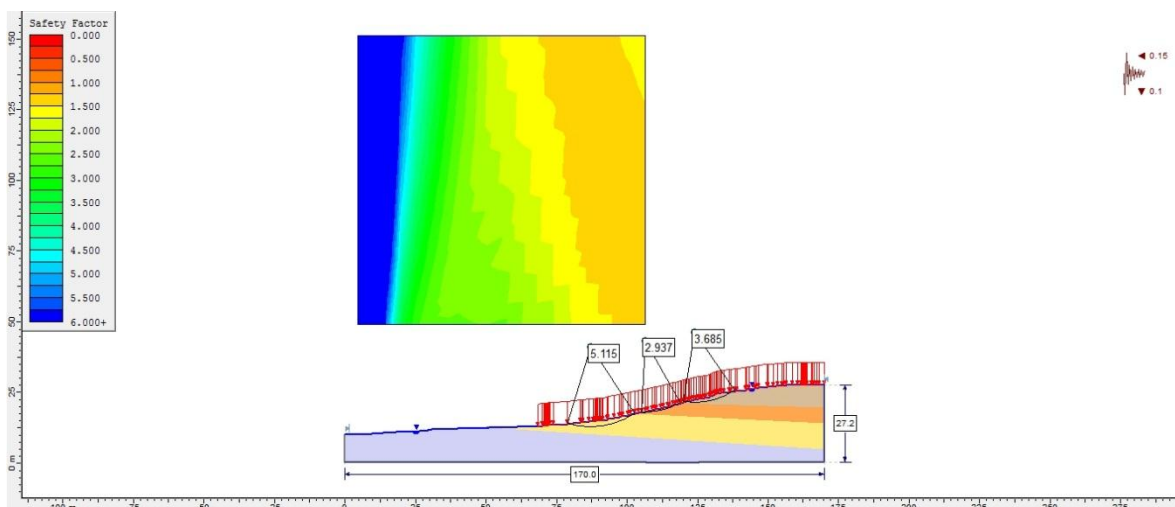
Anexo 23. Perfil 2 modelado CS-CNA-Método Ordinario



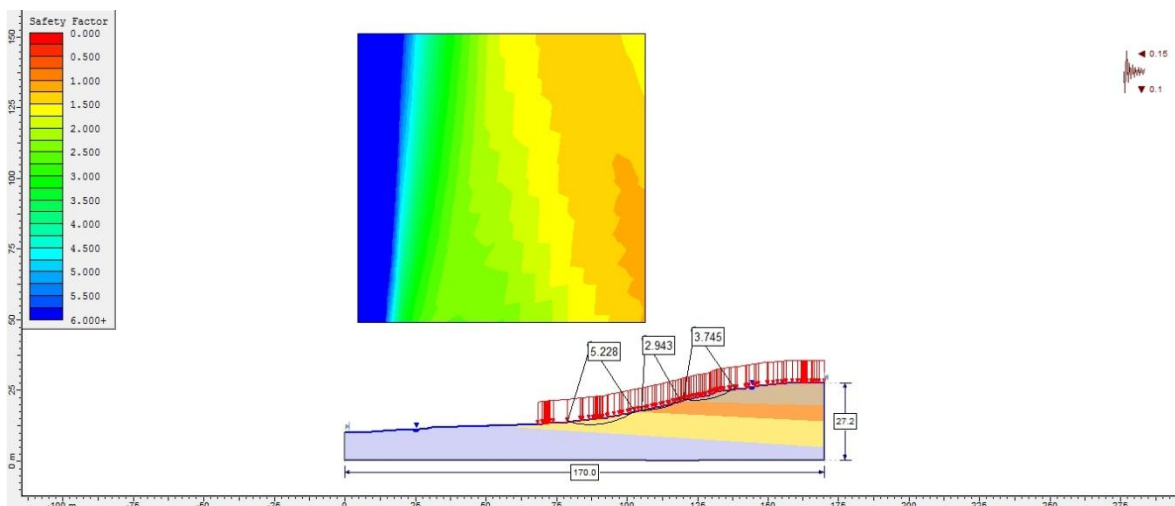
Anexo 24. Perfil 2 modelado CS-CNA-Método de Spencer



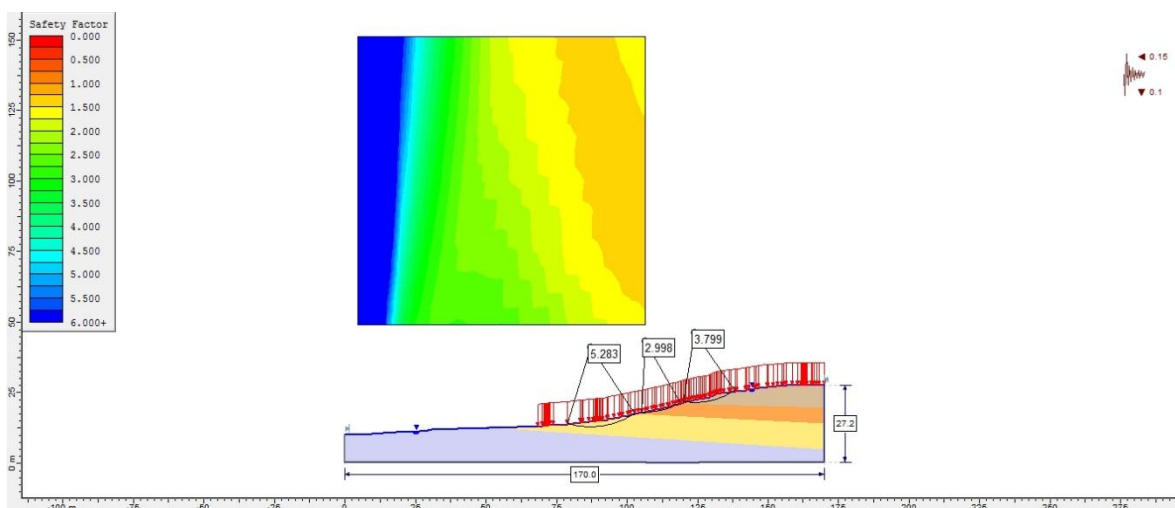
Anexo 25. Perfil 3 modelado CS-CNA-Método de Bishop



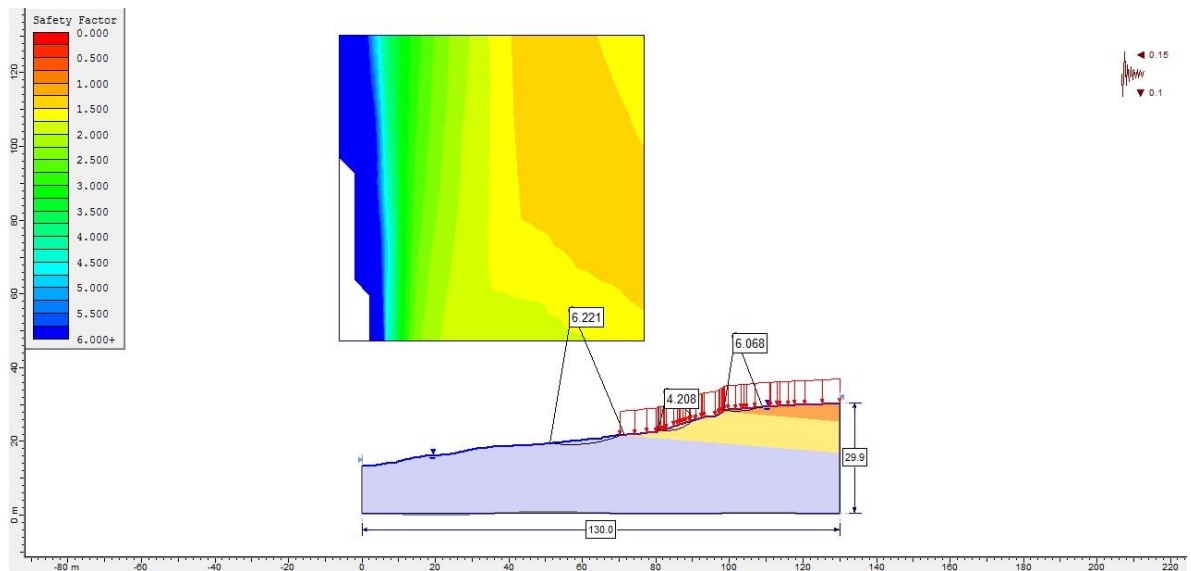
Anexo 26. Perfil 3 modelado CS-CNA-Método de Jambu



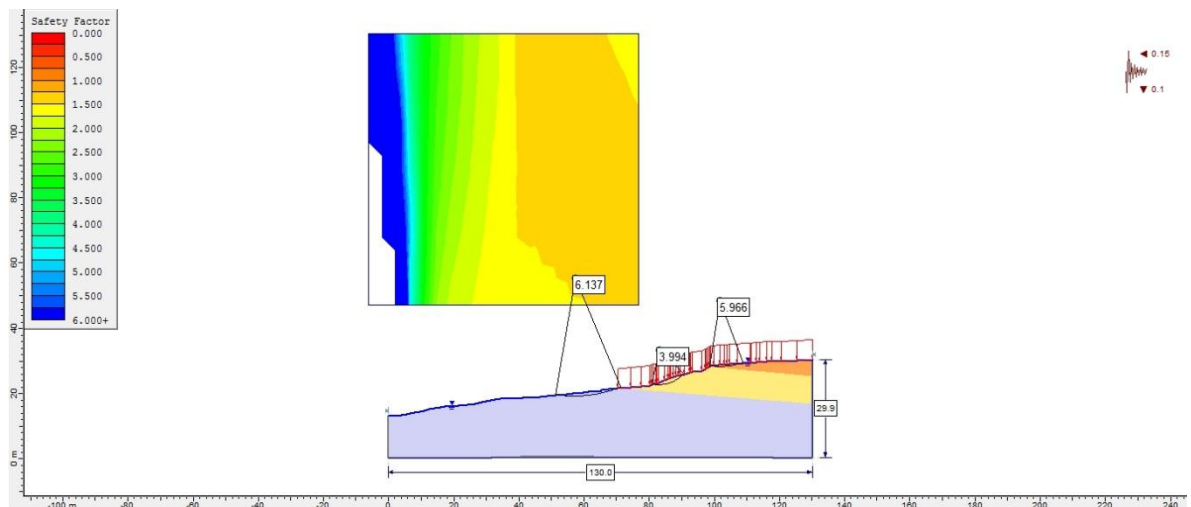
Anexo 27. Perfil 3 modelado CS-CNA-Método Ordinario



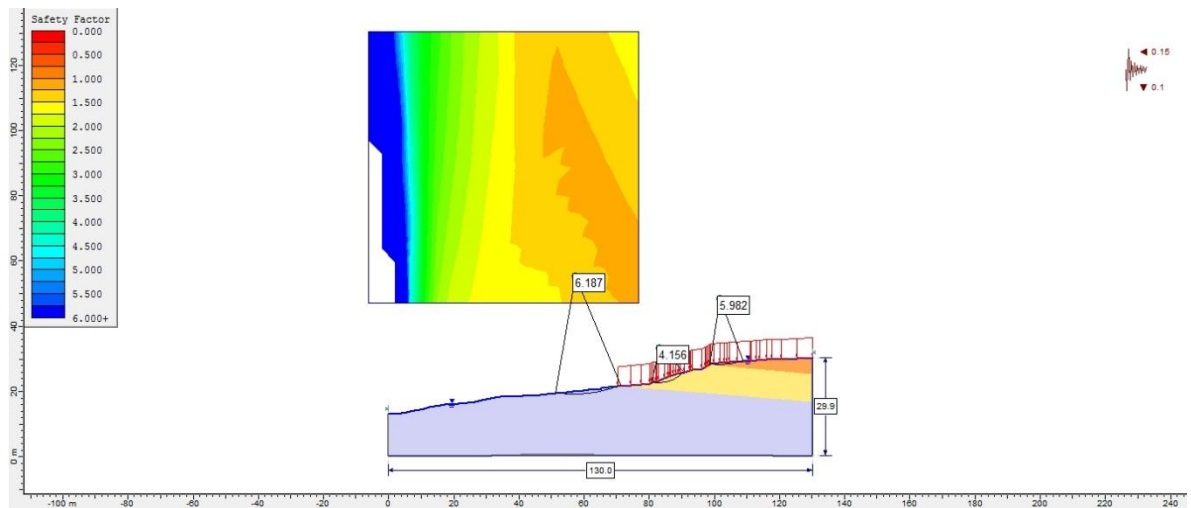
Anexo 28. Perfil 3 modelado CS-CNA-Método de Spencer



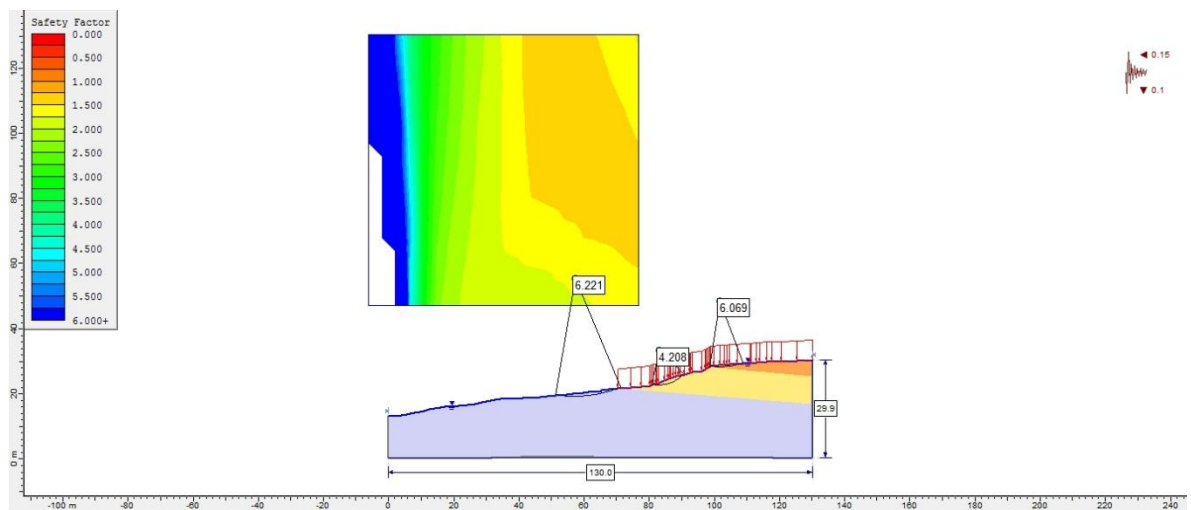
Anexo 29. Perfil 4 modelado CS-CNA-Método de Bishop



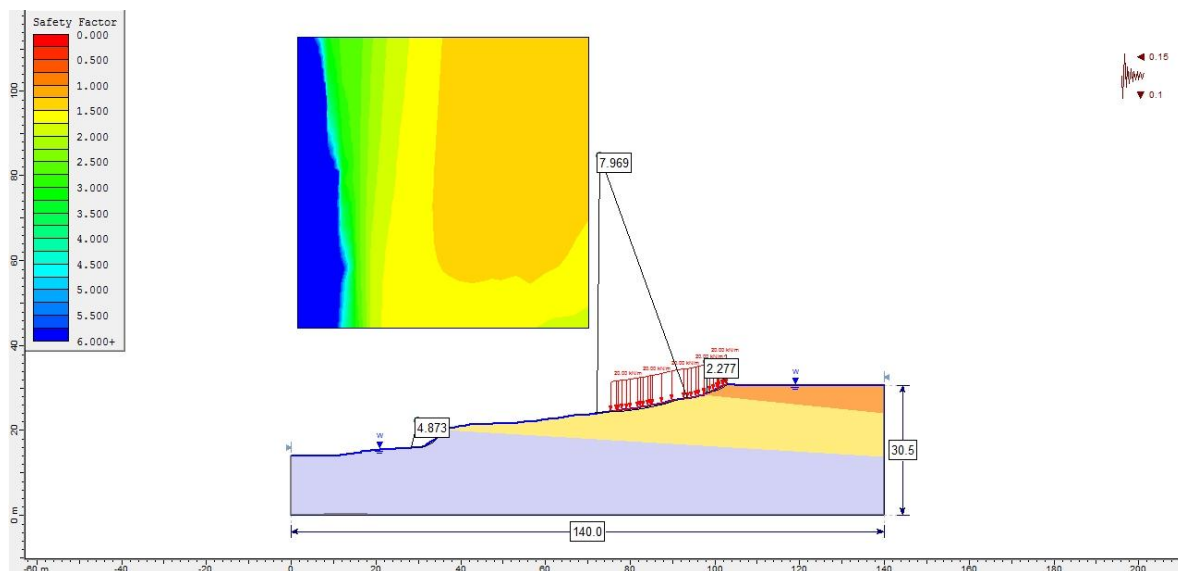
Anexo 30. Perfil 4 modelado CS-CNA-Método de Jambu



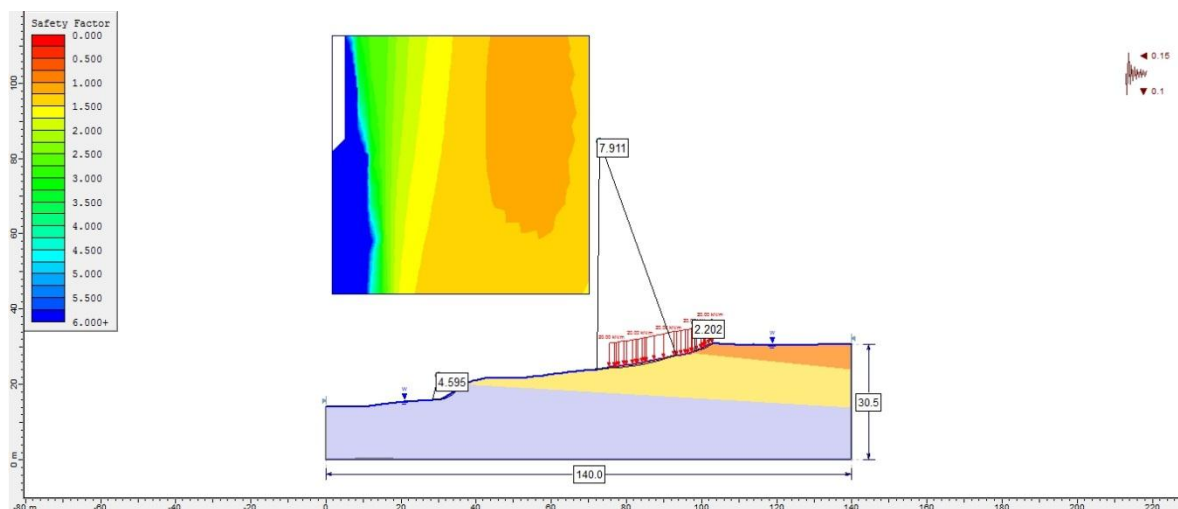
Anexo 31. Perfil 4 modelado CS-CNA-Método Ordinario



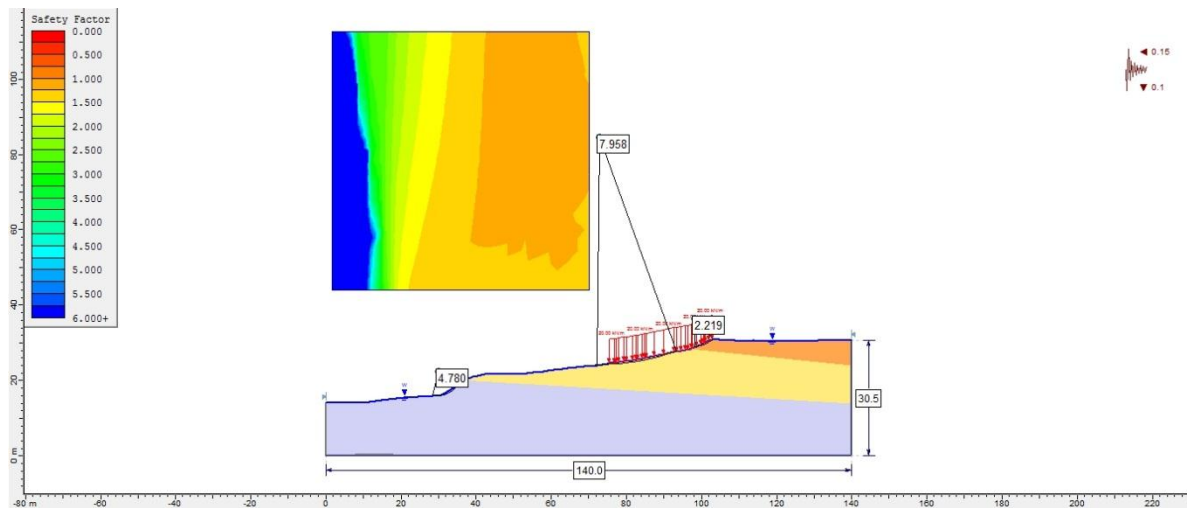
Anexo 32. Perfil 4 modelado CS-CNA-Método de Spencer



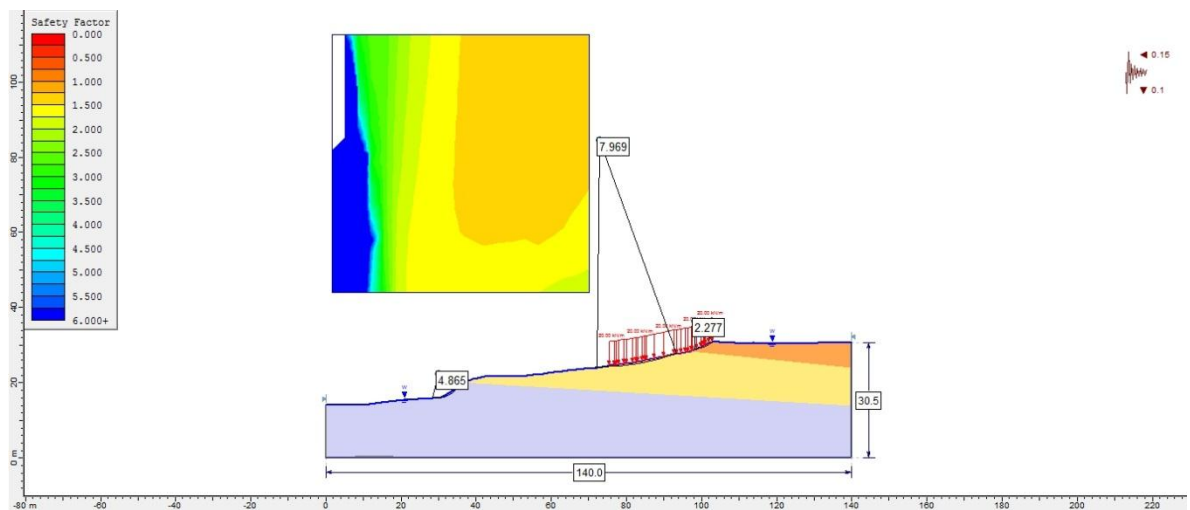
Anexo 33. Perfil 5 modelado CS-CNA-Método de Bishop



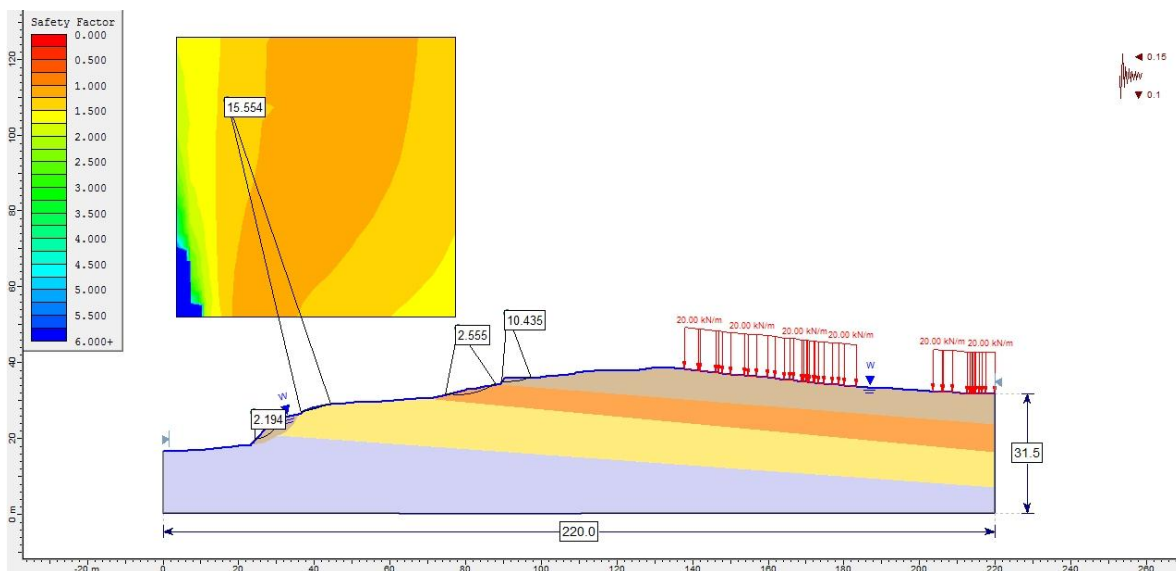
Anexo 34. Perfil 5 modelado CS-CNA-Método de Jambu



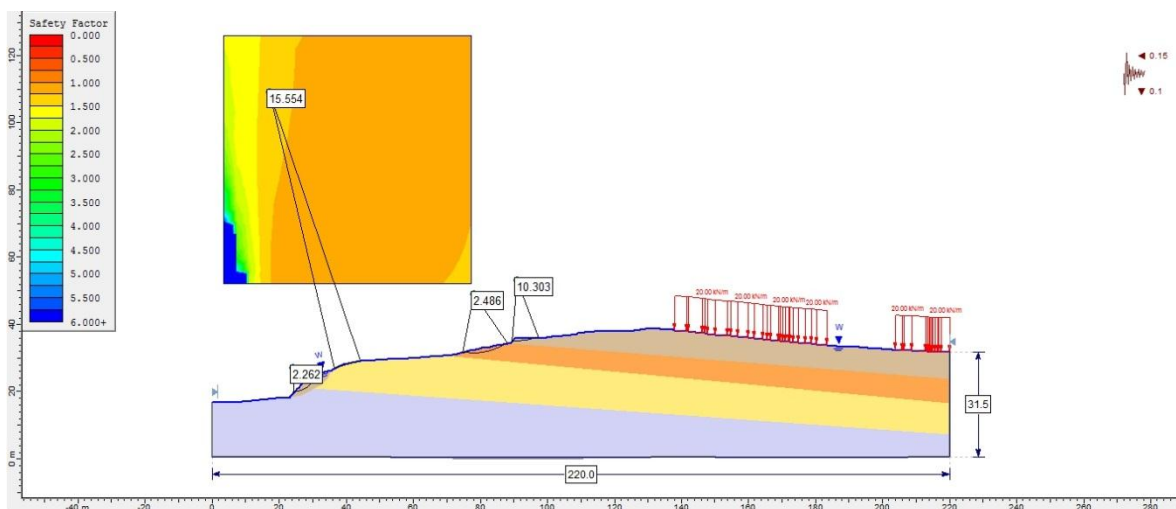
Anexo 35. Perfil 5 modelado CS-CNA-Método Ordinario



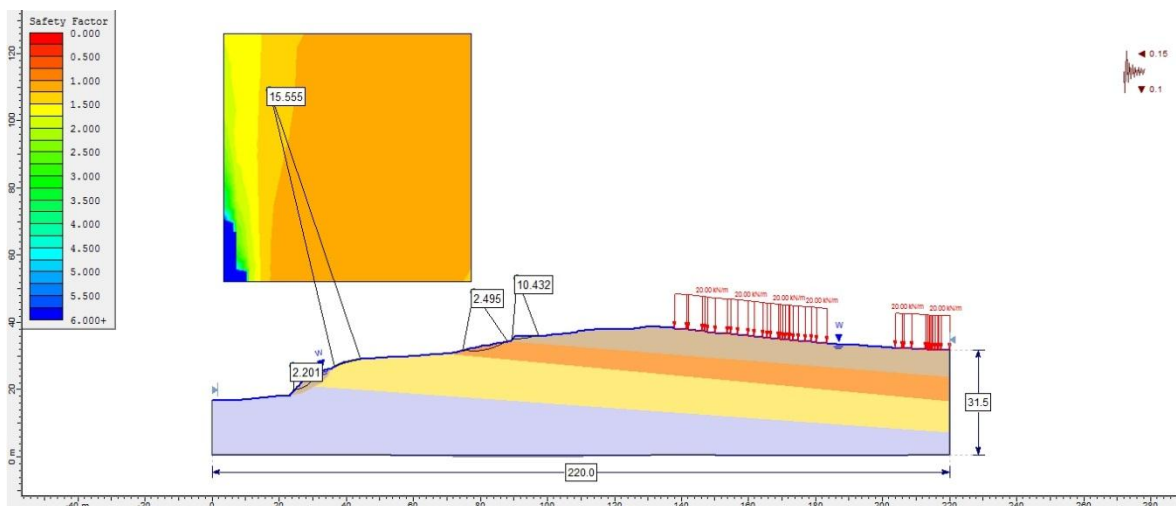
Anexo 36. Perfil 5 modelado CS-CNA-Método de Spencer



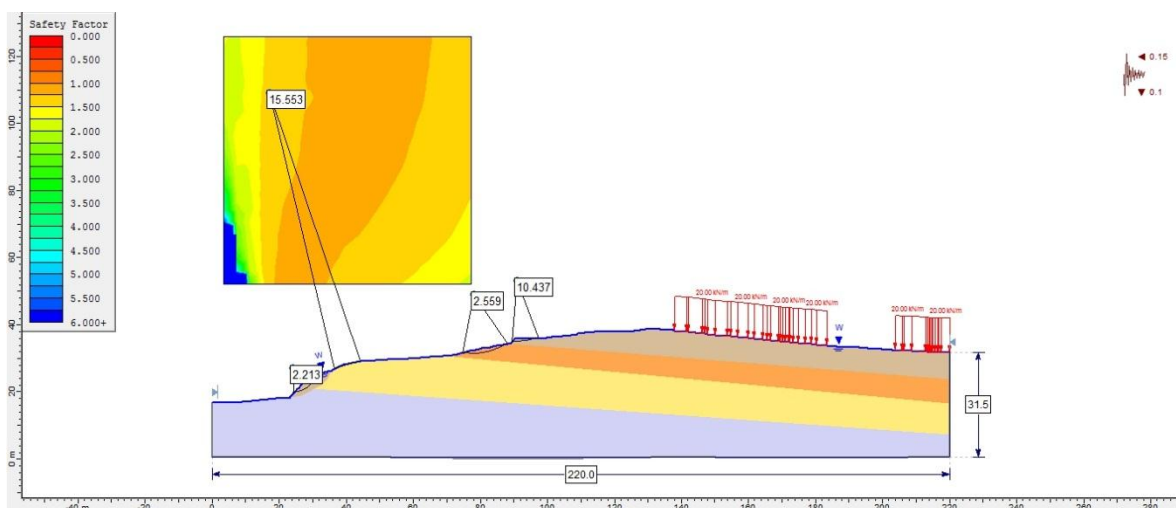
Anexo 37. Perfil 6 modelado CS-CNA-Método de Bishop



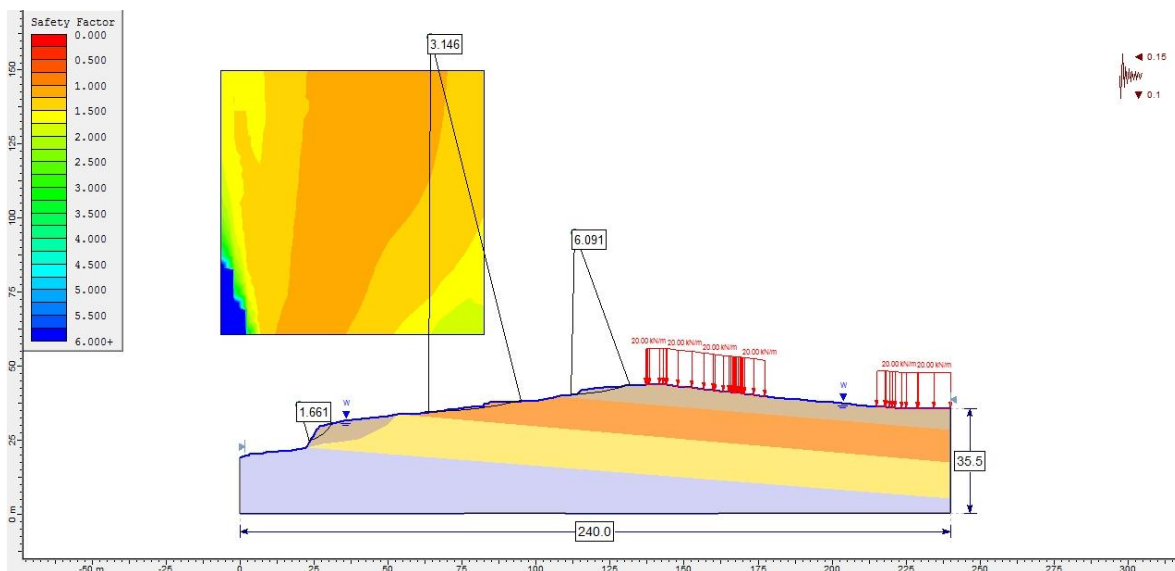
Anexo 38. Perfil 6 modelado CS-CNA-Método de Jambu



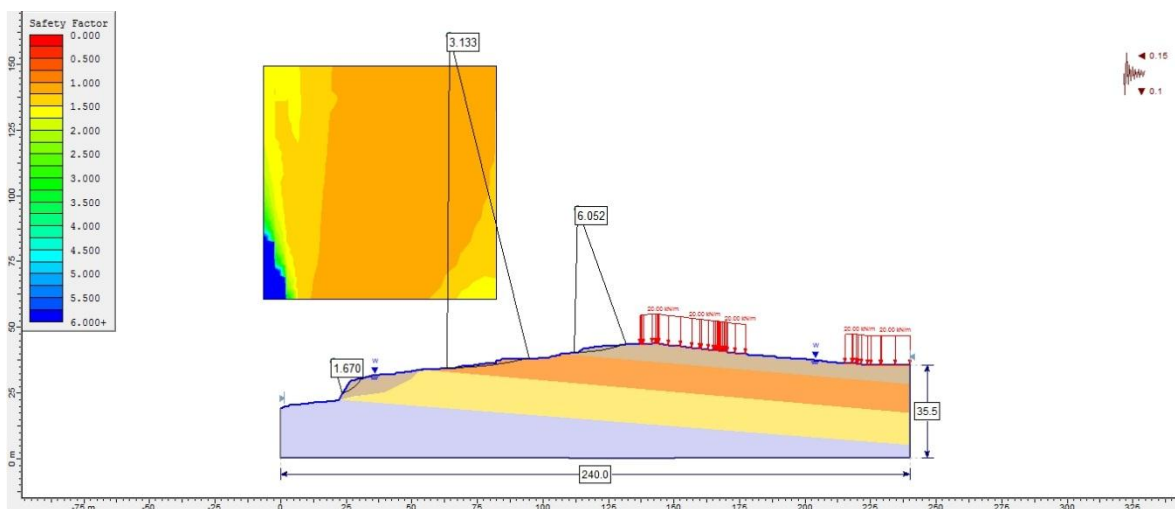
Anexo 39. Perfil 6 modelado CS-CNA-Método Ordinario



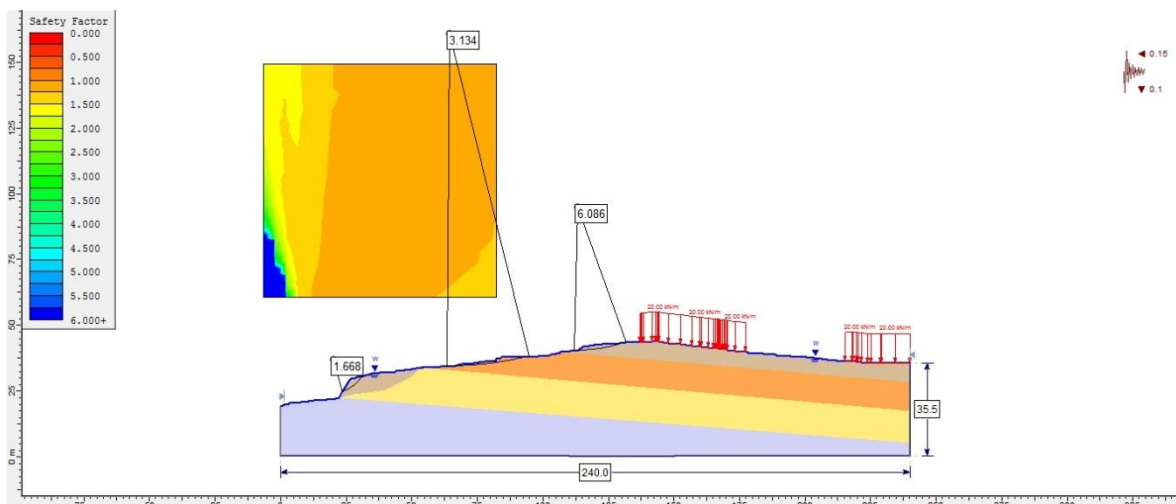
Anexo 40. Perfil 6 modelado CS-CNA-Método de Spencer



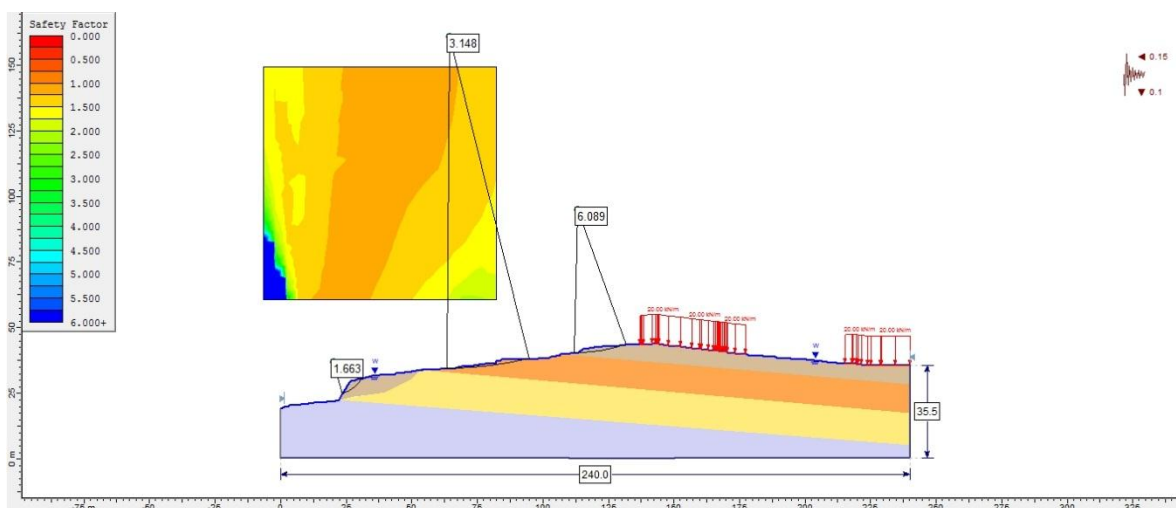
Anexo 41. Perfil 7 modelado CS-CNA-Método de Bishop



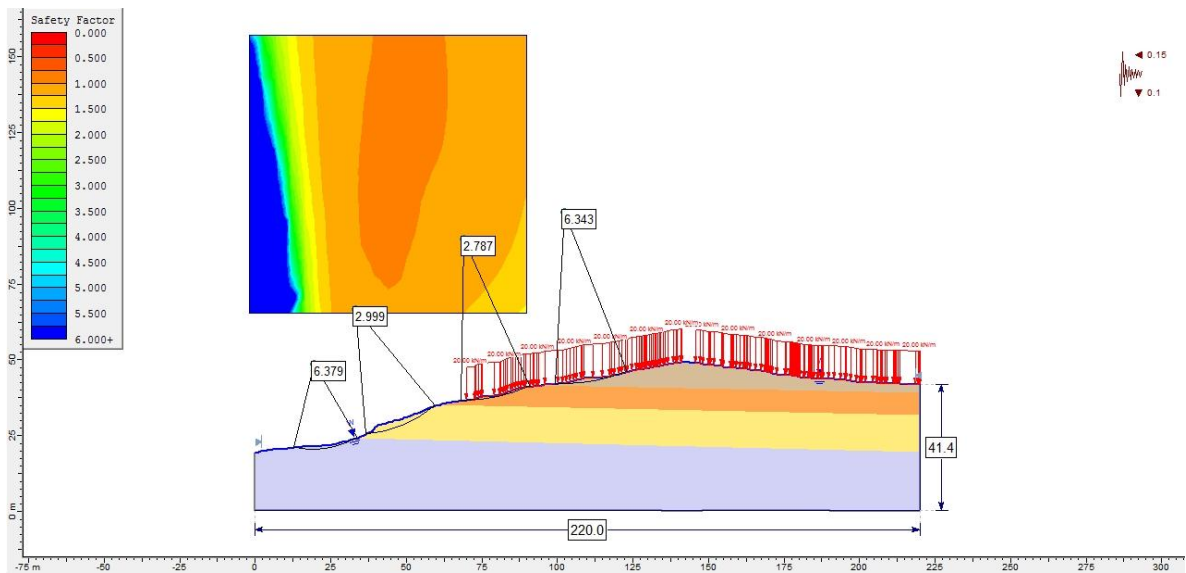
Anexo 42. Perfil 7 modelado CS-CNA-Método de Jambu



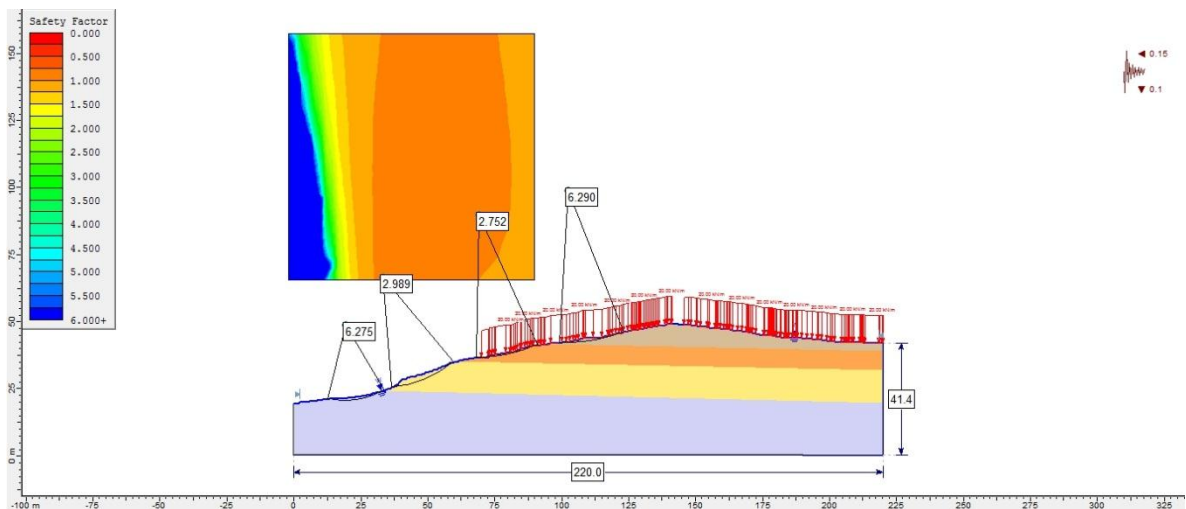
Anexo 43. Perfil 7 modelado CS-CNA-Método Ordinario



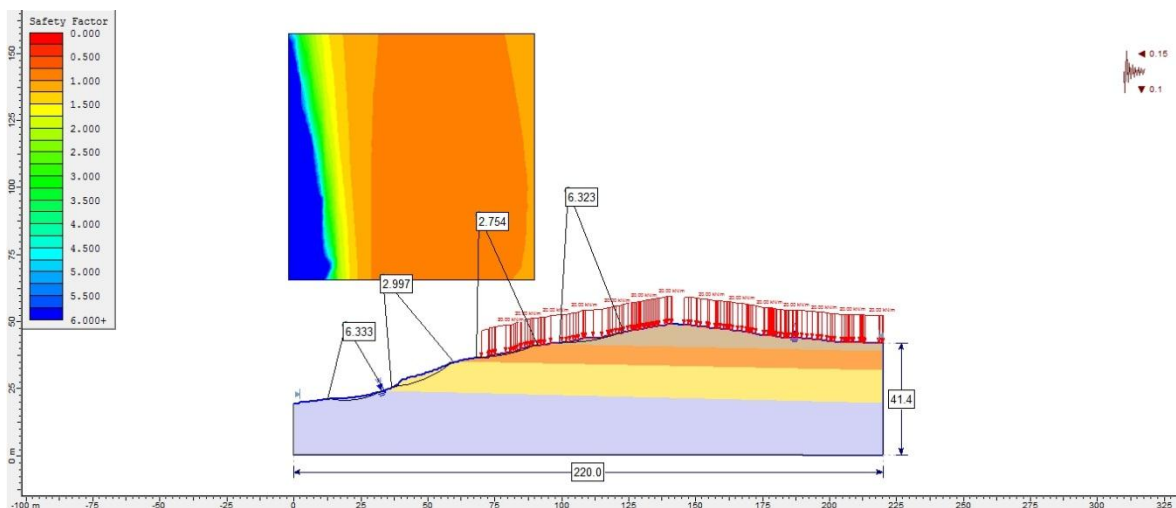
Anexo 44. Perfil 7 modelado CS-CNA-Método de Spencer



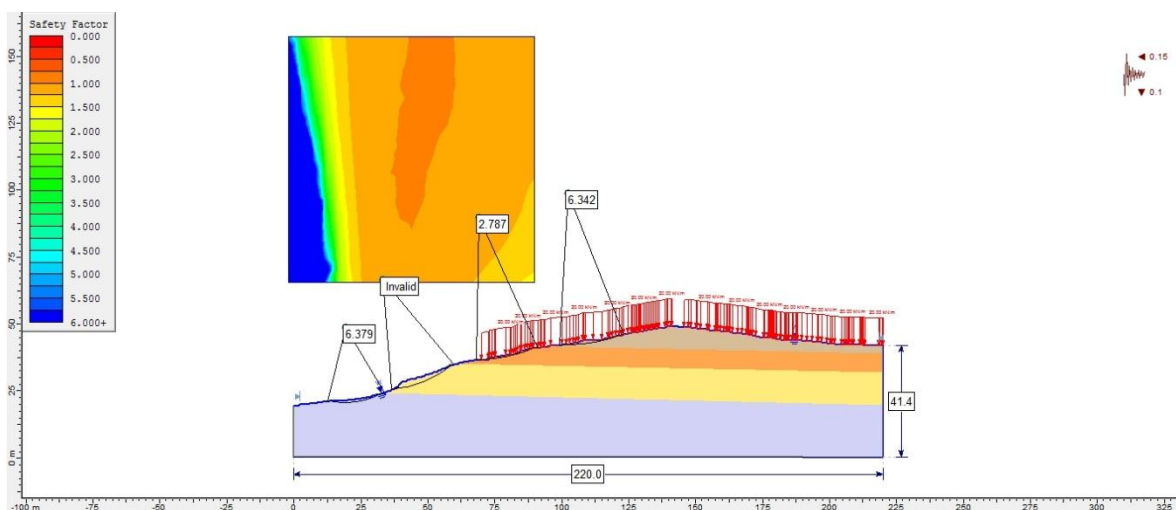
Anexo 45. Perfil 8 modelado CS-CNA-Método de Bishop



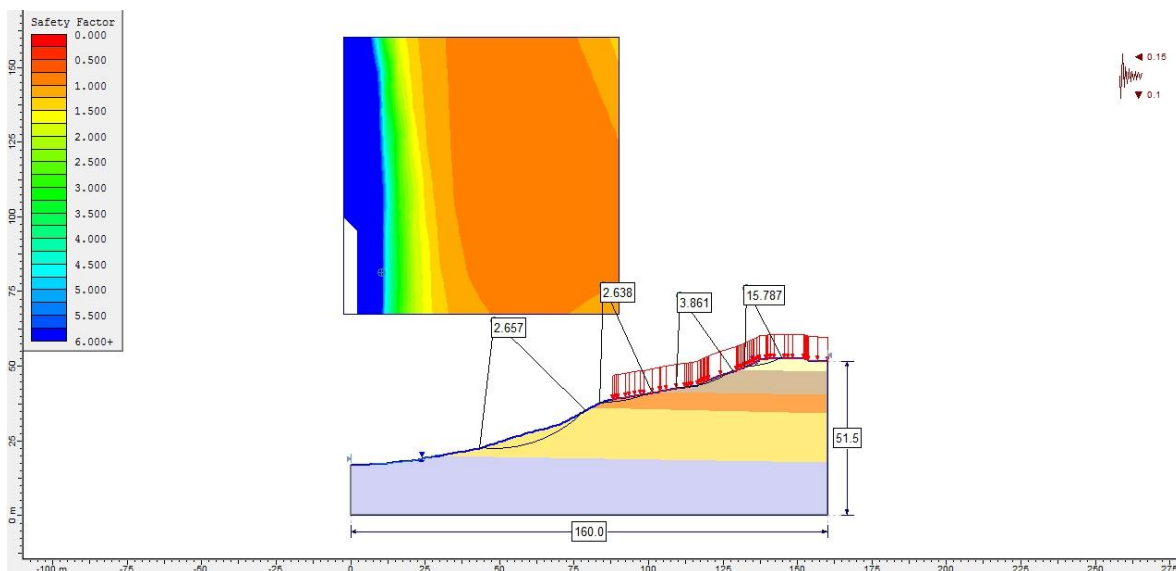
Anexo 46. Perfil 8 modelado CS-CNA-Método de Jambu



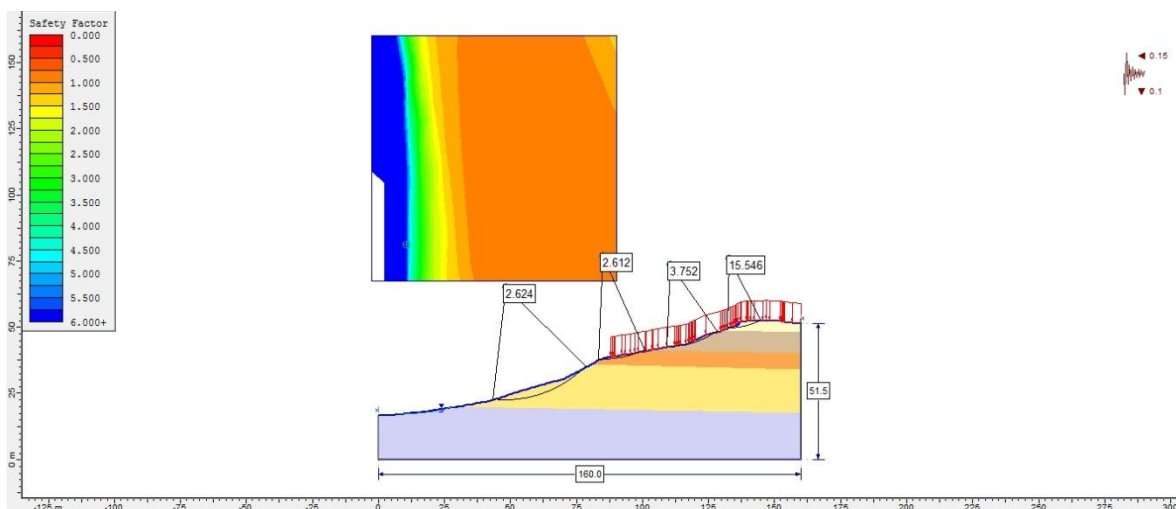
Anexo 47. Perfil 8 modelado CS-CNA-Método Ordinario



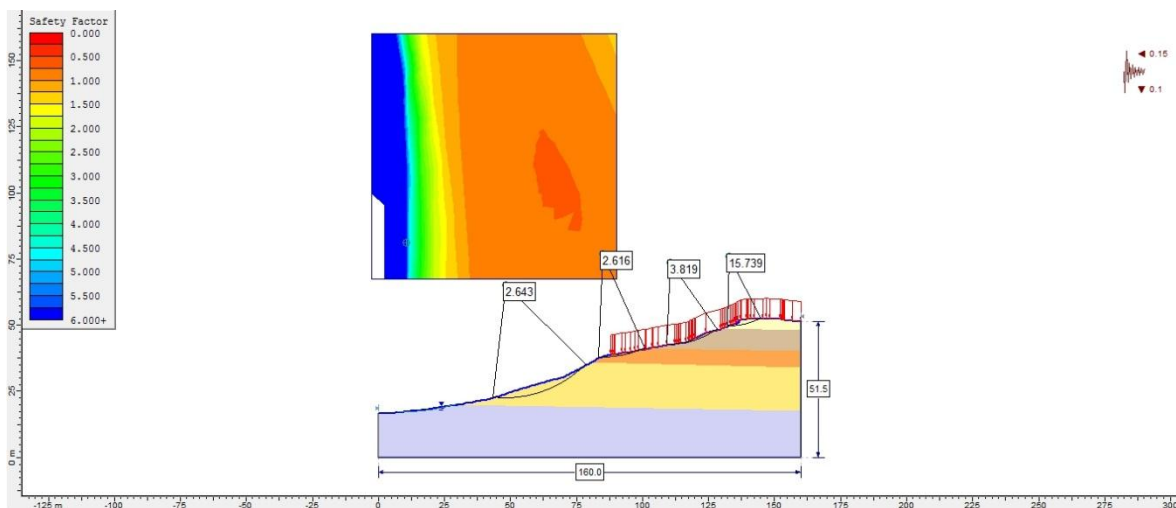
Anexo 48. Perfil 8 modelado CS-CNA-Método de Spencer



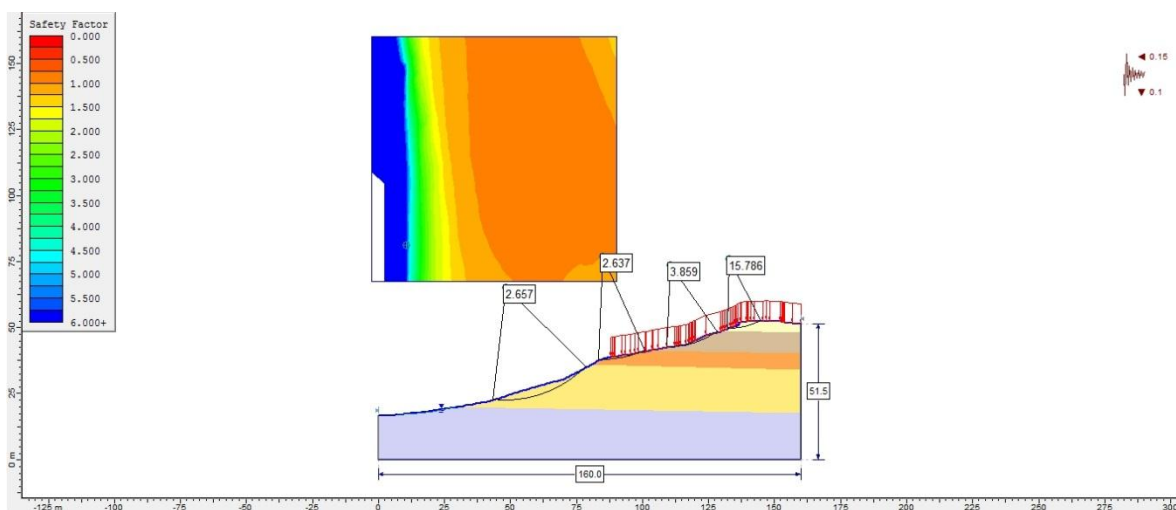
Anexo 49. Perfil 9 modelado CS-CNA-Método de Bishop



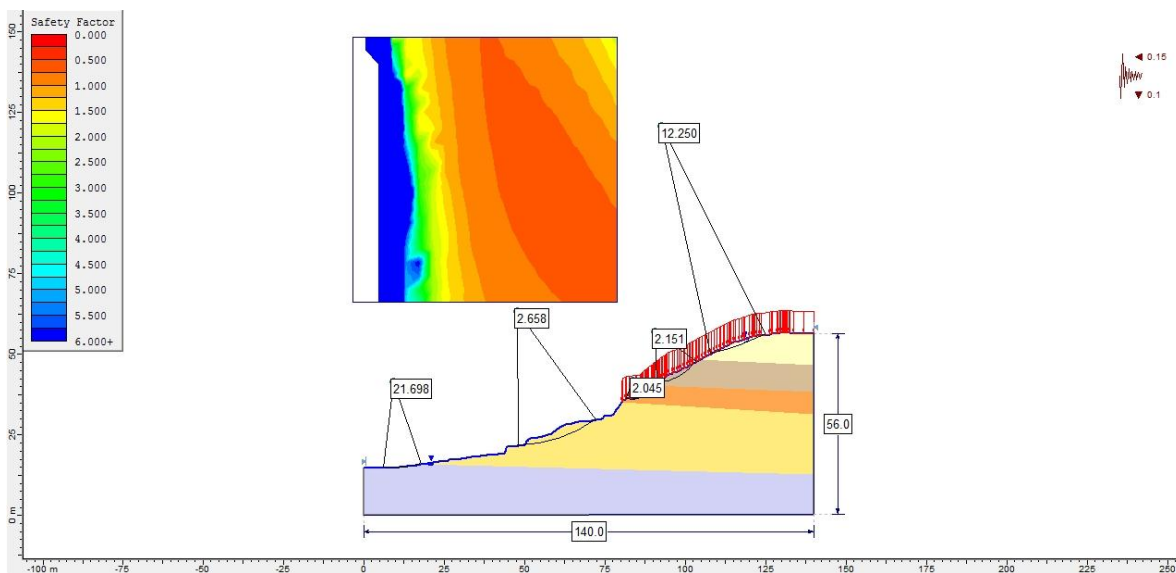
Anexo 50. Perfil 9 modelado CS-CNA-Método de Jambu



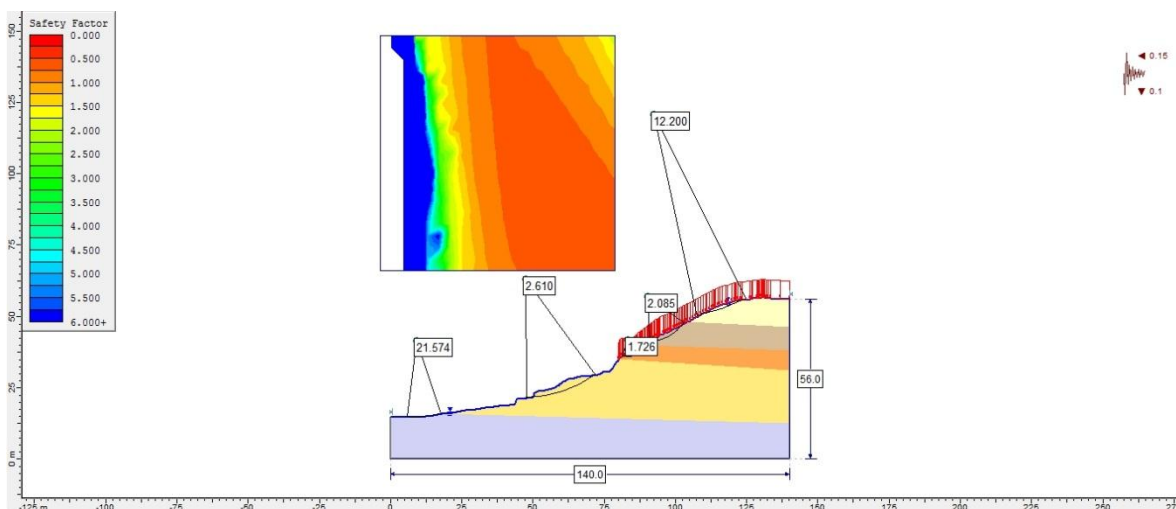
Anexo 51. Perfil 9 modelado CS-CNA-Método Ordinario



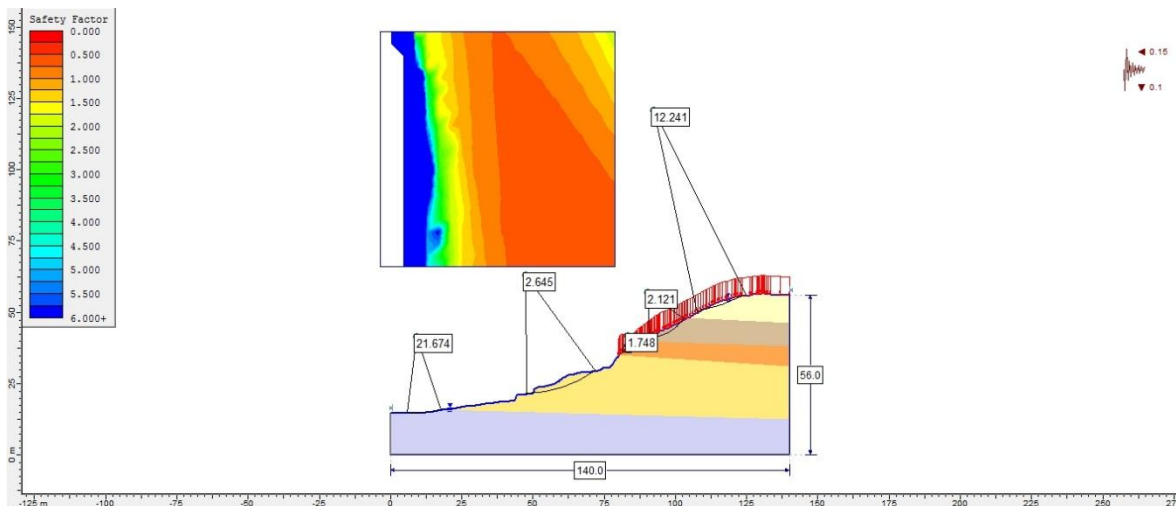
Anexo 52. Perfil 9 modelado CS-CNA-Método de Spencer



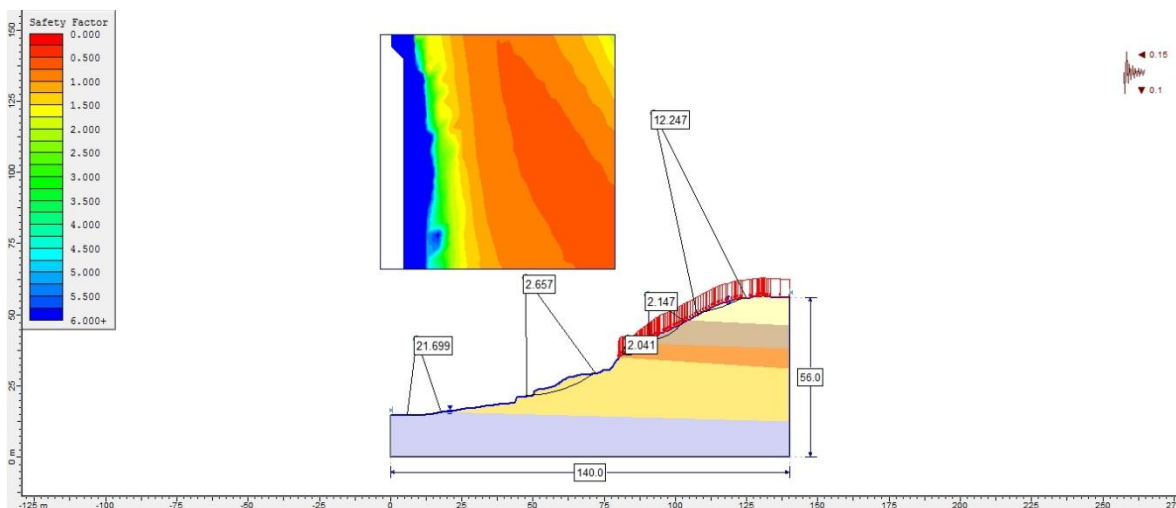
Anexo 53. Perfil 10 modelado CS-CNA-Método de Bishop



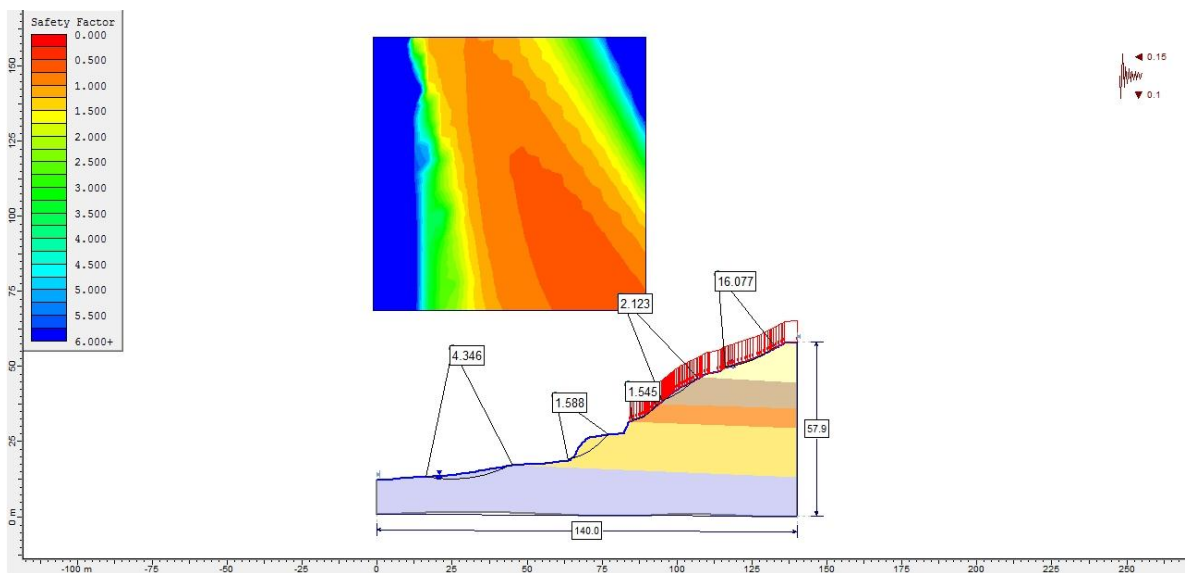
Anexo 54. Perfil 10 modelado CS-CNA-Método de Jambu



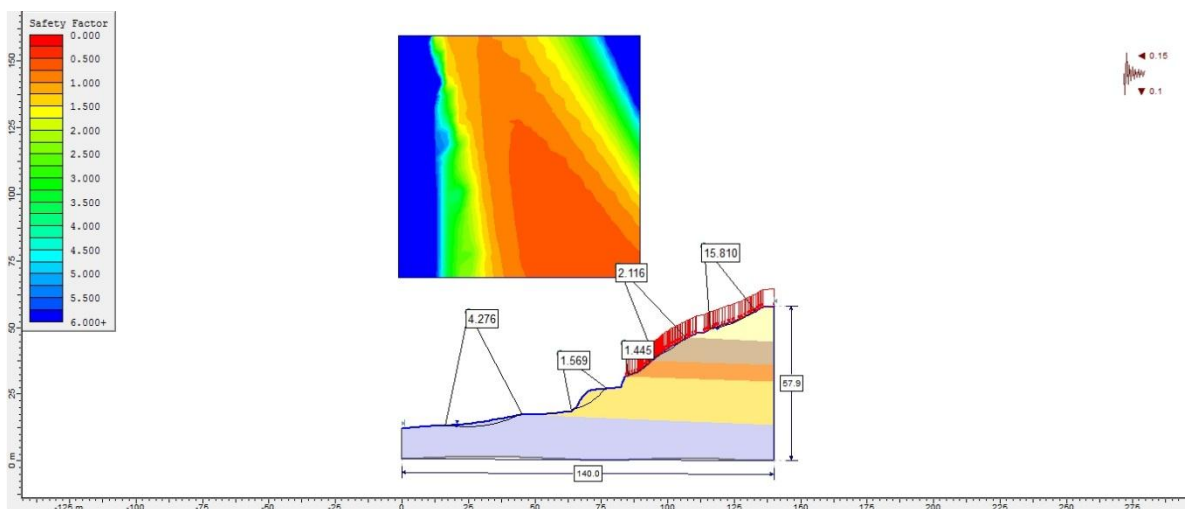
Anexo 55. Perfil 10 modelado CS-CNA-Método Ordinario



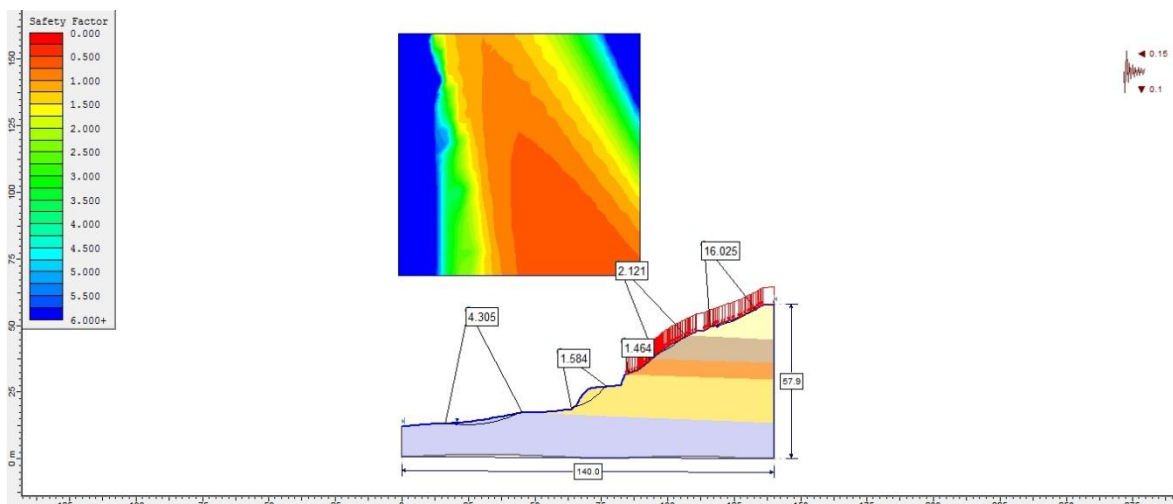
Anexo 56. Perfil 10 modelado CS-CNA-Método de Spencer



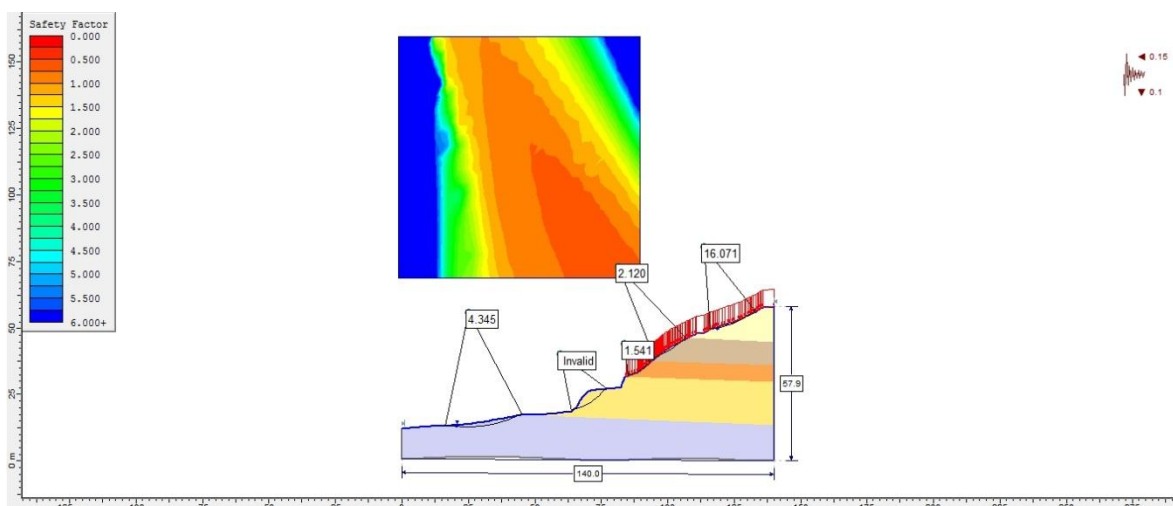
Anexo 57. Perfil 11 modelado CS-CNA-Método de Bishop



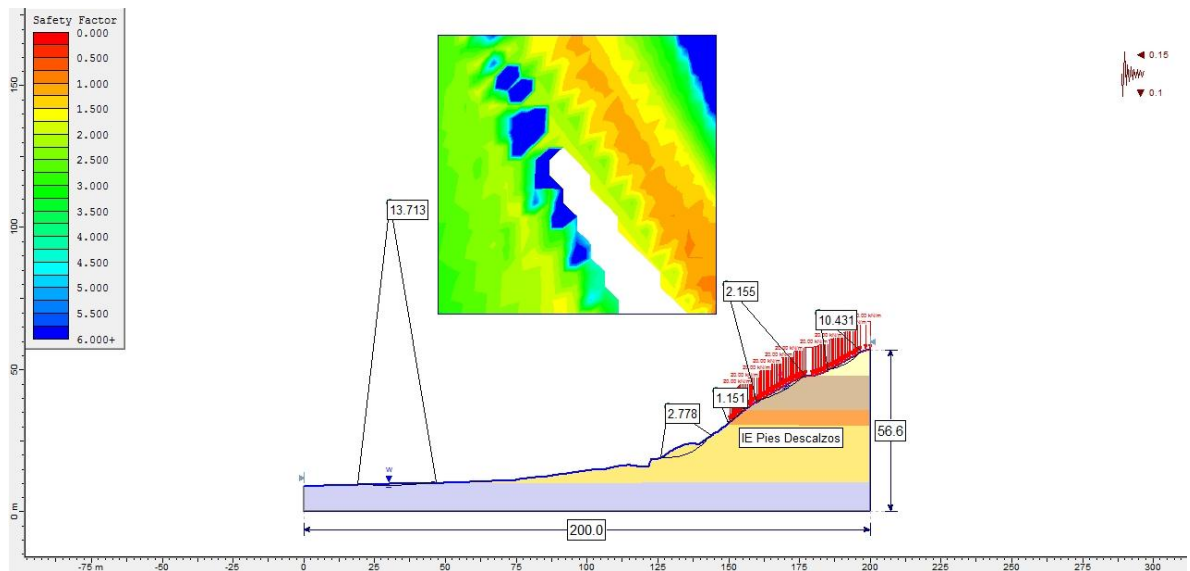
Anexo 58. Perfil 11 modelado CS-CNA-Método de Jambu



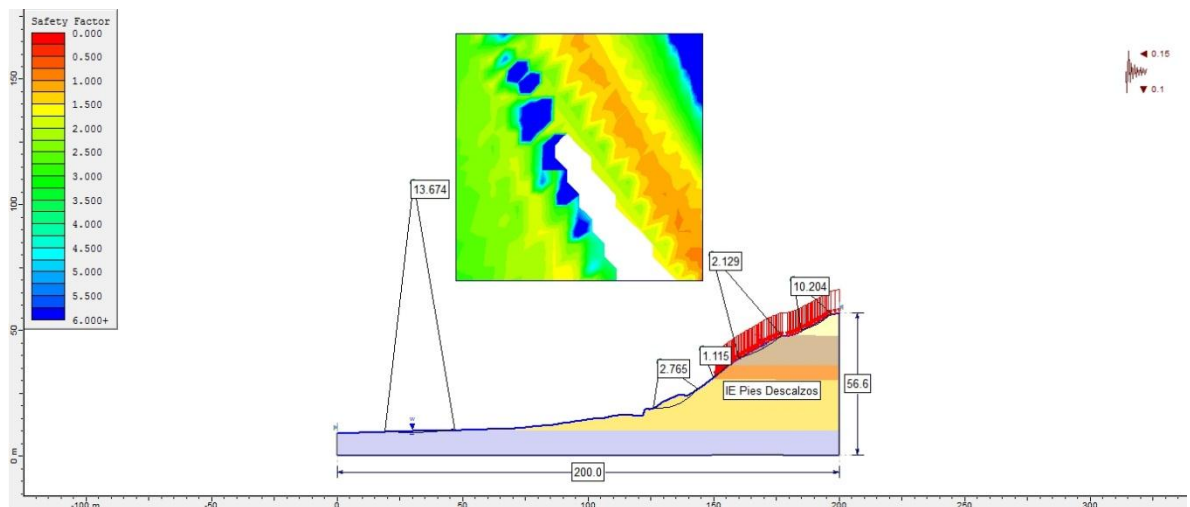
Anexo 59. Perfil 11 modelado CS-CNA-Método Ordinario



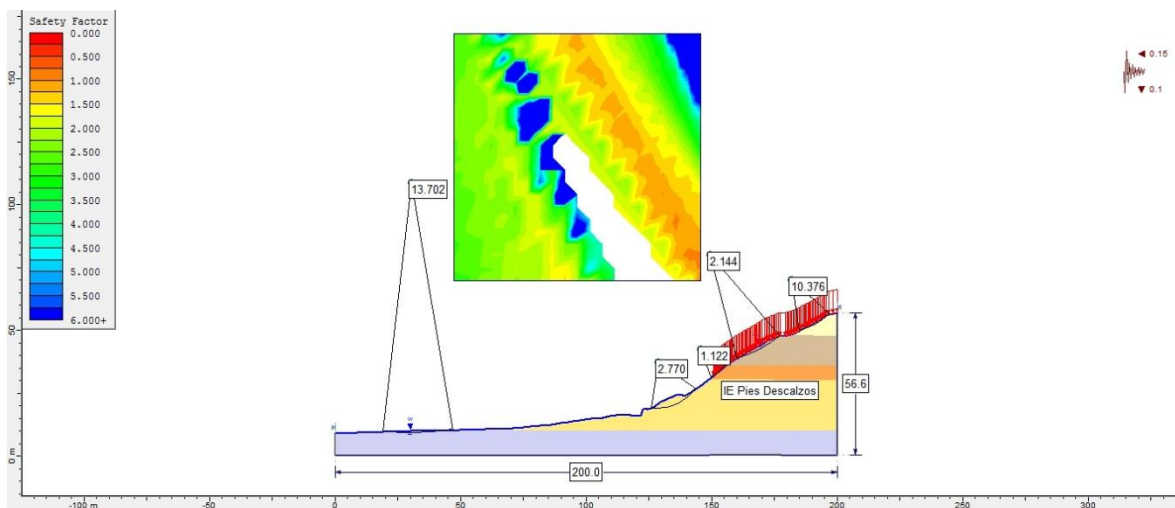
Anexo 60. Perfil 11 modelado CS-CNA-Método de Spencer



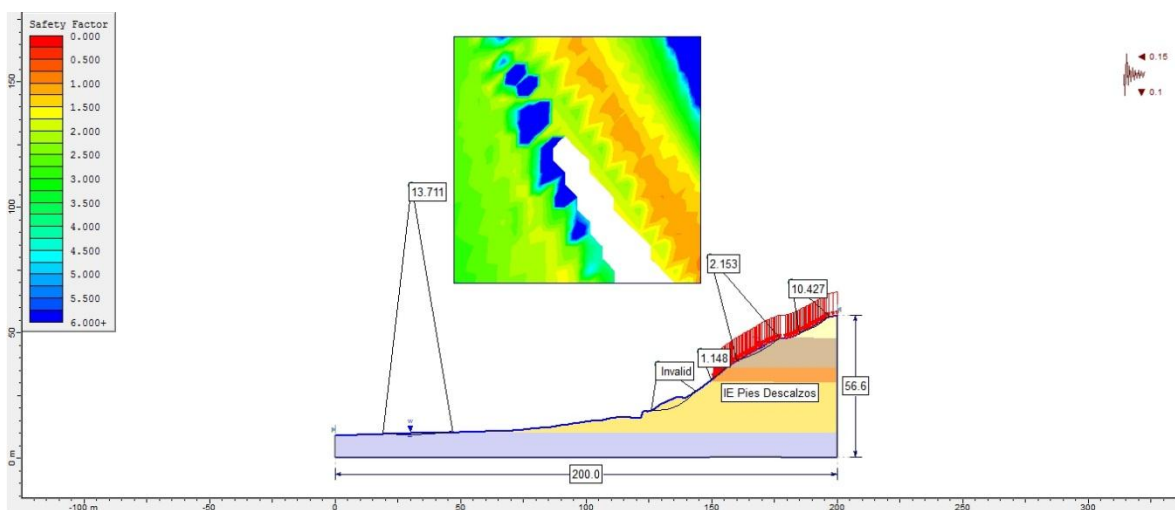
Anexo 61. Perfil 12 modelado CS-CNA-Método de Bishop



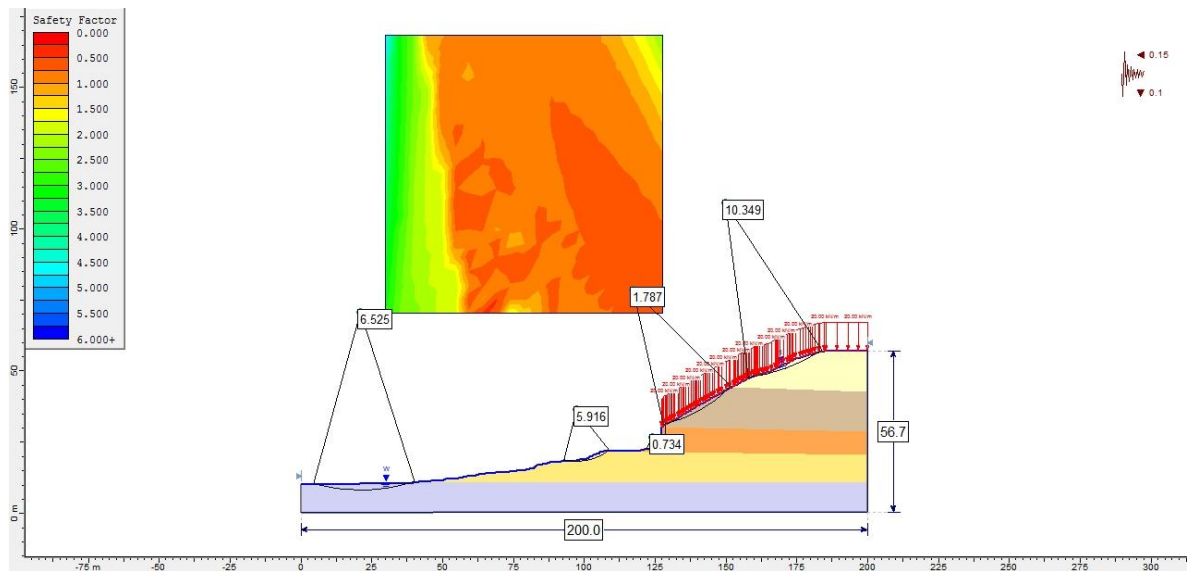
Anexo 62. Perfil 12 modelado CS-CNA-Método de Jambu



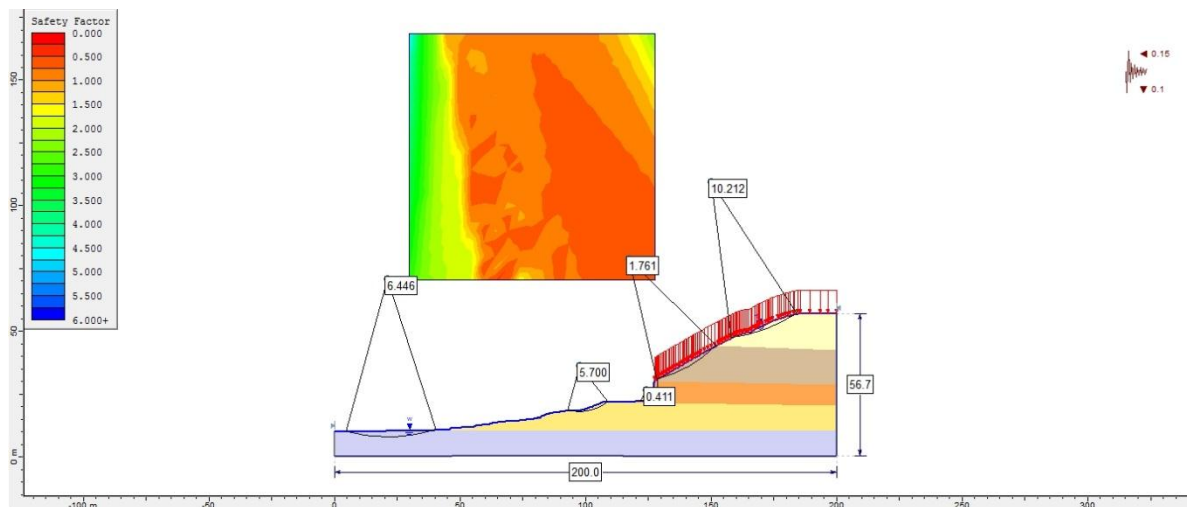
Anexo 63. Perfil 12 modelado CS-CNA-Método Ordinario



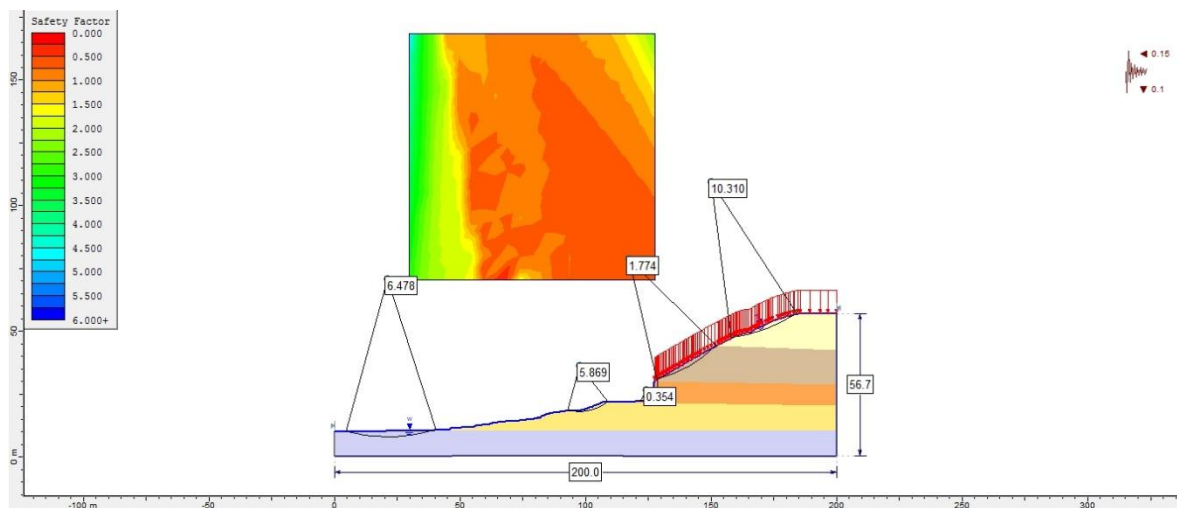
Anexo 64. Perfil 12 modelado CS-CNA-Método de Spencer



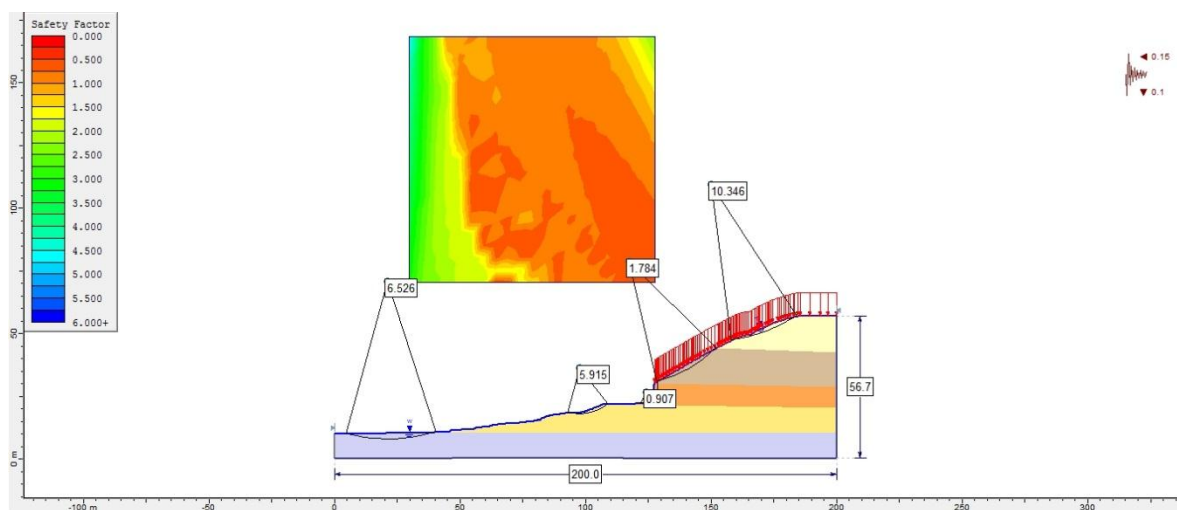
Anexo 65. Perfil 13 modelado CS-CNA-Método de Bishop



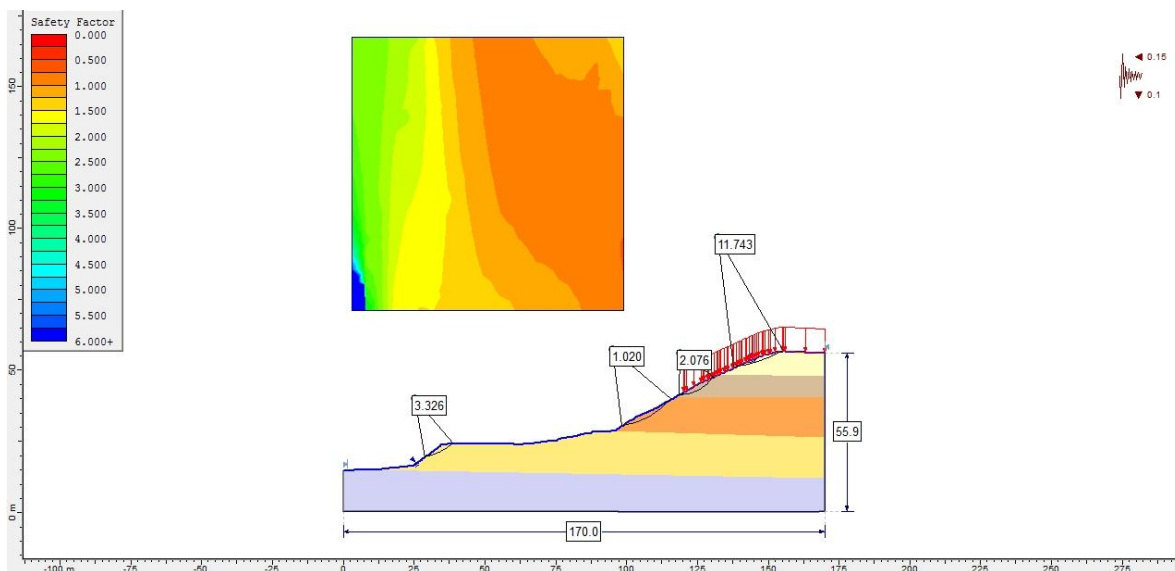
Anexo 66. Perfil 13 modelado CS-CNA-Método de Jambu



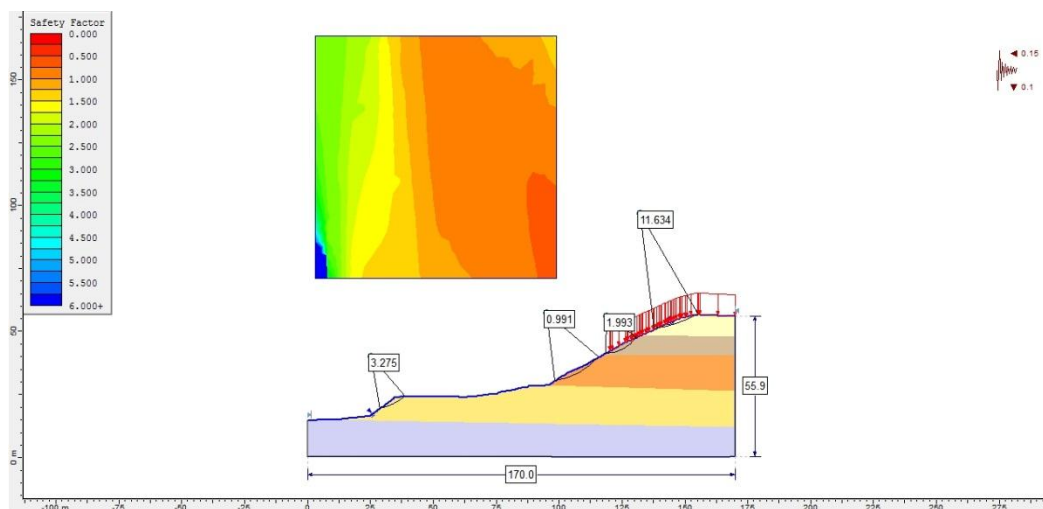
Anexo 67. Perfil 13 modelado CS-CNA-Método Ordinario



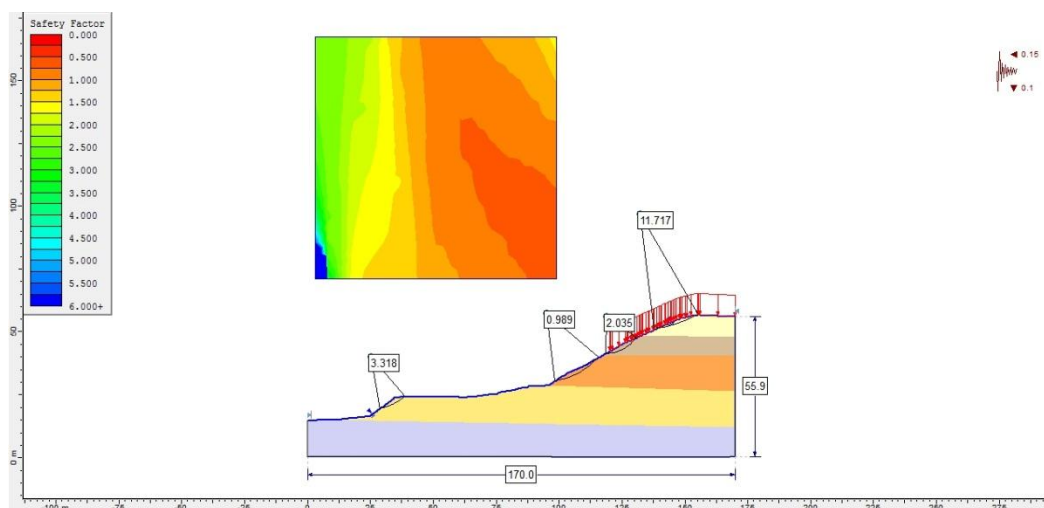
Anexo 68. Perfil 13 modelado CS-CNA-Método de Spencer
odelado CS-CNA-Método de Spencer



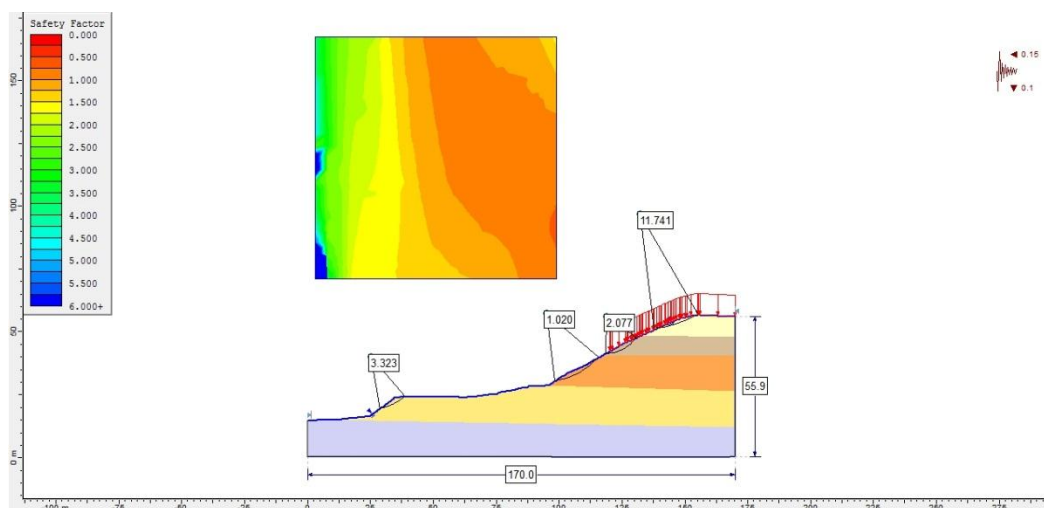
Anexo 69. Perfil 14 modelado CS-CNA-Método de Bishop



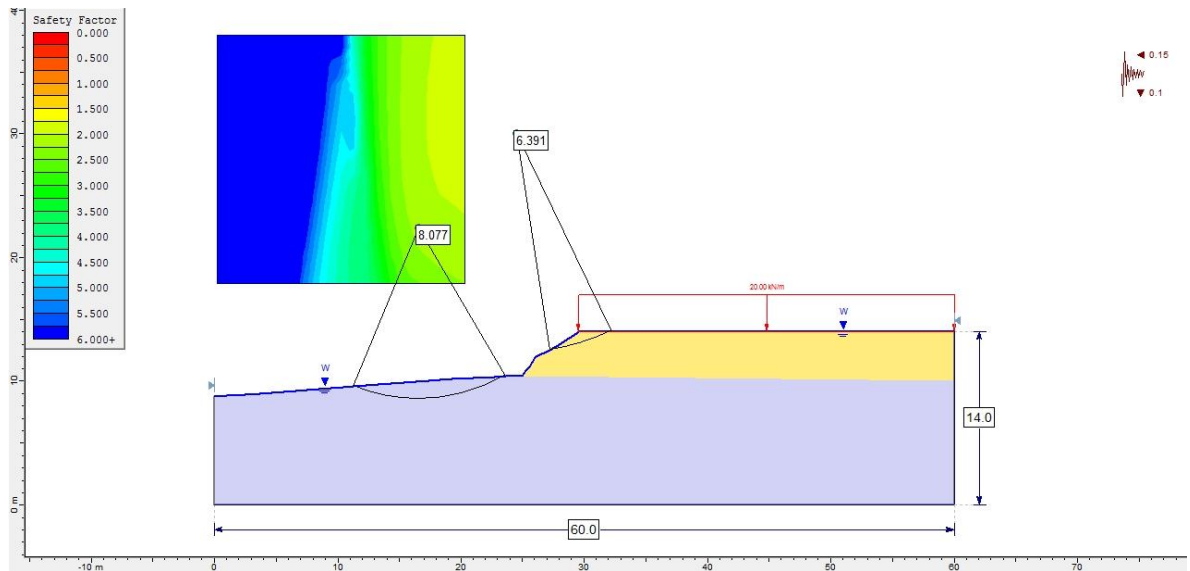
Anexo 70. Perfil 14 modelado CS-CNA-Método de Jambu



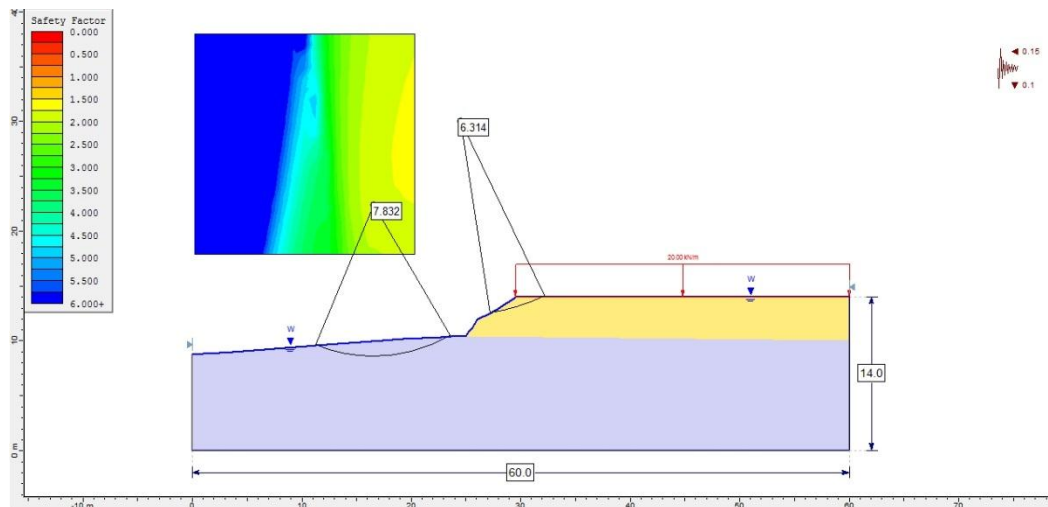
Anexo 71. Perfil 14 modelado CS-CNA-Método Ordinario



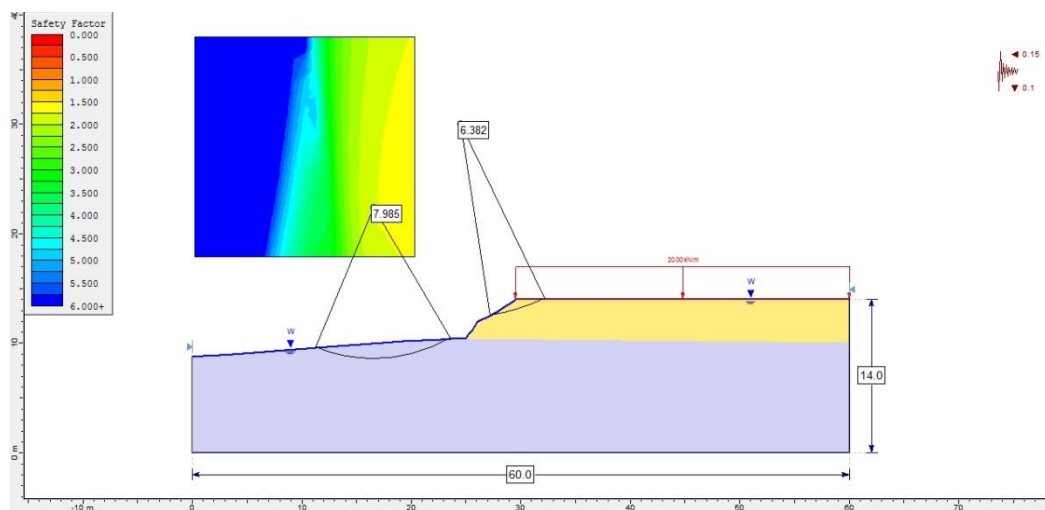
Anexo 72. Perfil 14 modelado CS-CNA-Método de Spencer



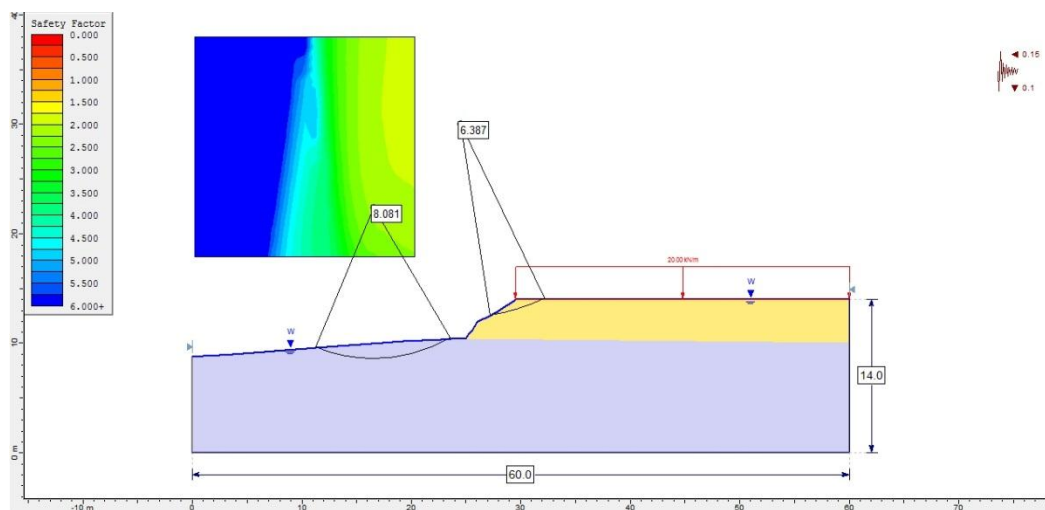
Anexo 73. Perfil 15 modelado CS-CNA-Método de Bishop



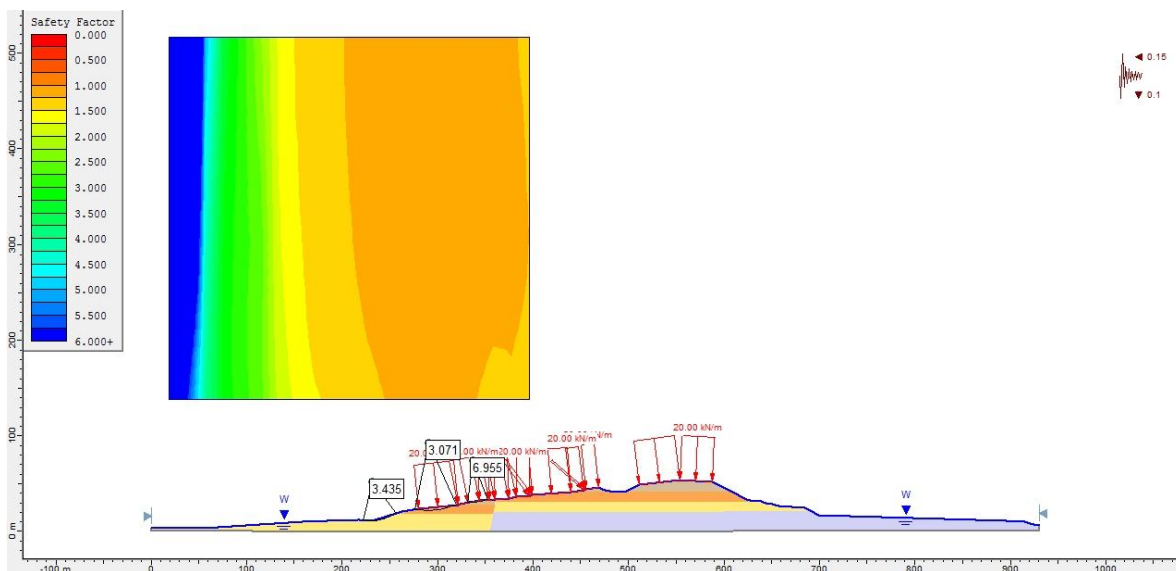
Anexo 74. Perfil 15 modelado CS-CNA-Método de Jambu



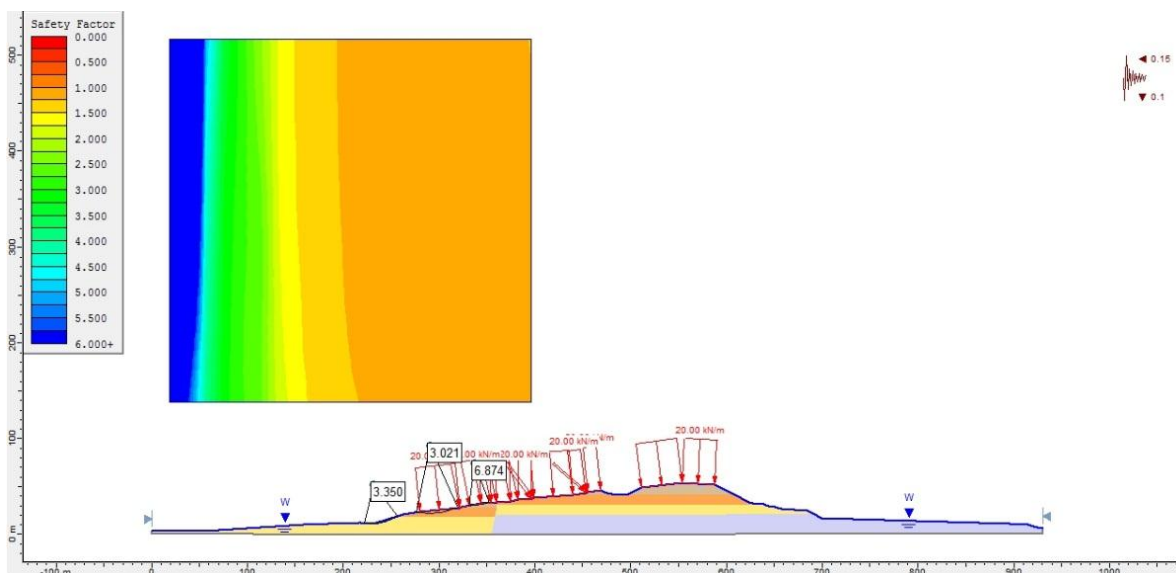
Anexo 75. Perfil 15 modelado CS-CNA-Método Ordinario



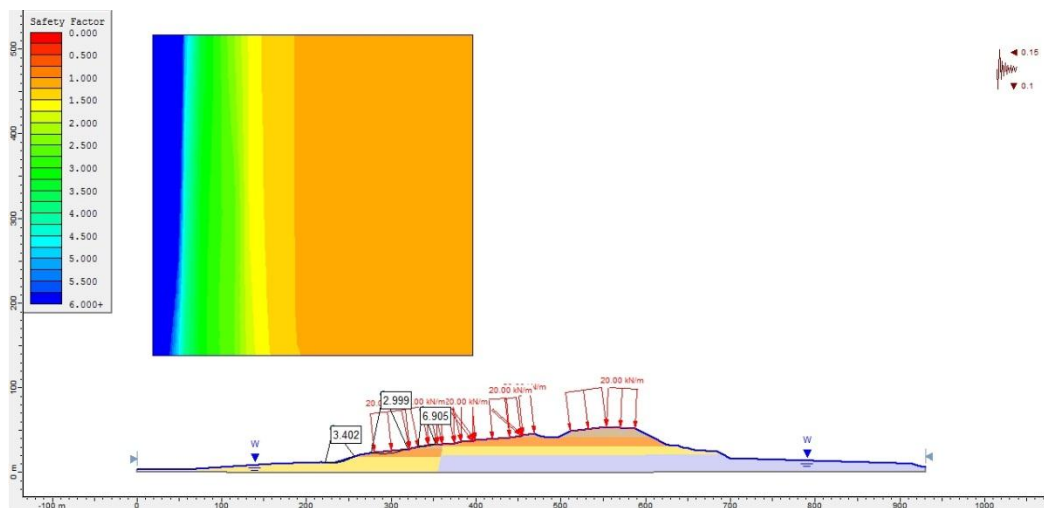
Anexo 76. Perfil 15 modelado CS-CNA-Método de Spencer



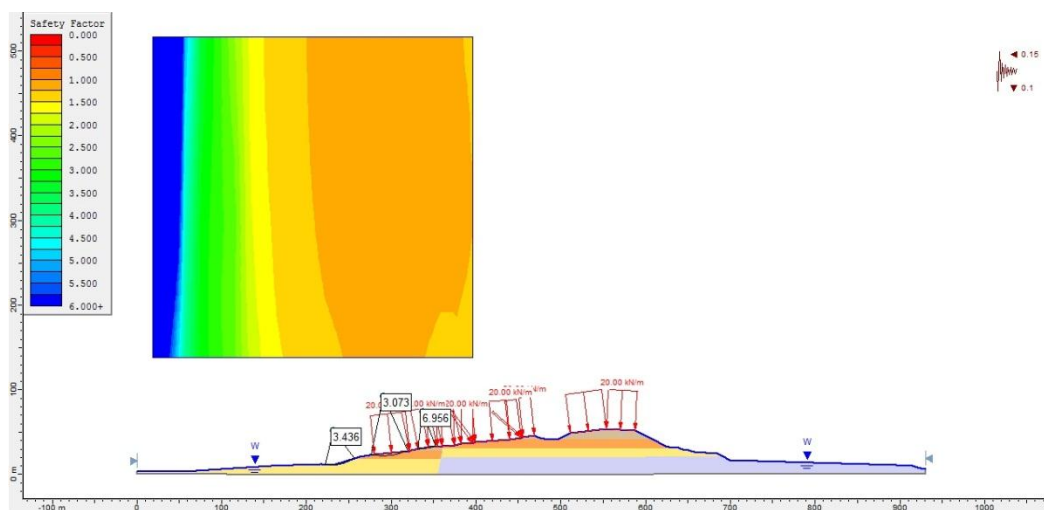
Anexo 77. Perfil A N-S modelado CS-CNA-Método de Bishop



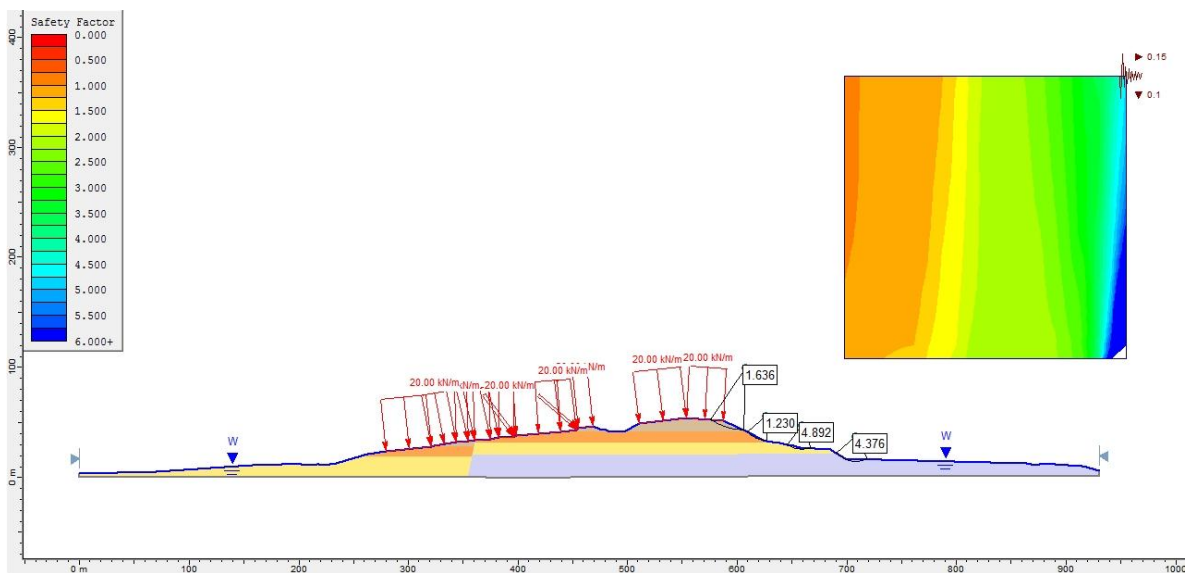
Anexo 78. Perfil A N-S modelado CS-CNA-Método de Jambu



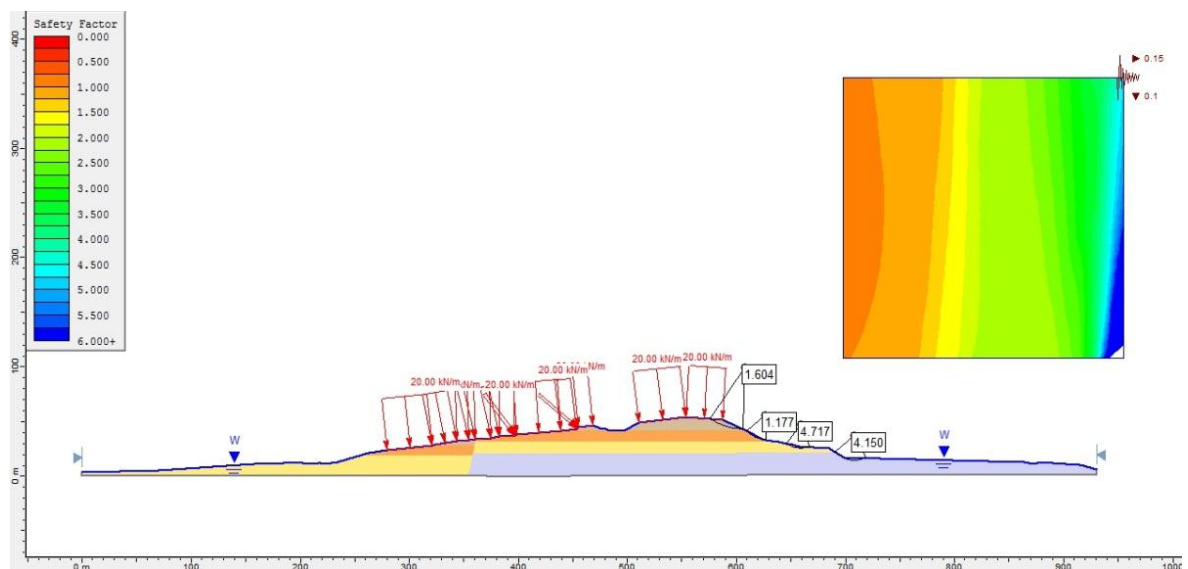
Anexo 79. Perfil A N-S modelado CS-CNA-Método Ordinario



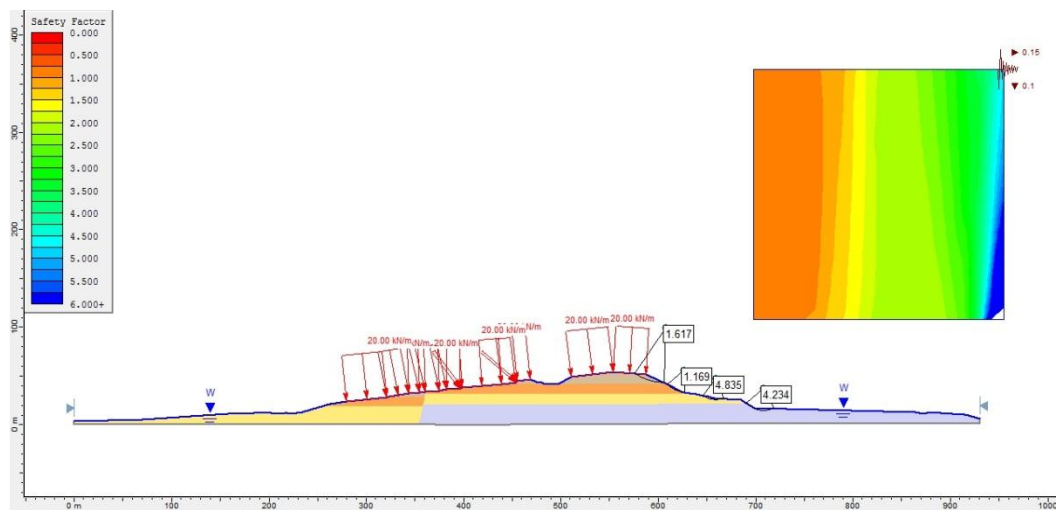
Anexo 80. Perfil A N-S modelado CS-CNA-Método de Spencer



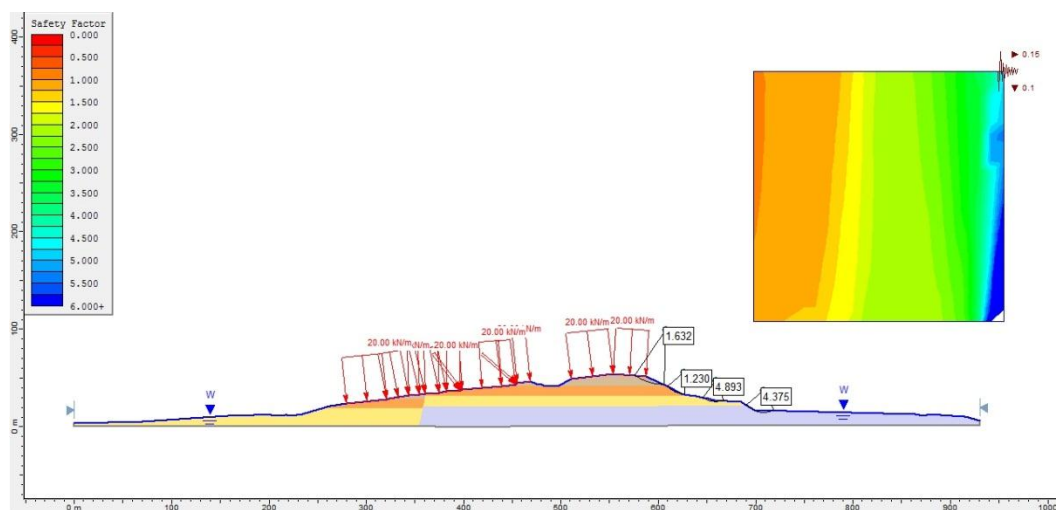
Anexo 81. Perfil A S-N modelado CS-CNA-Método de Bishop



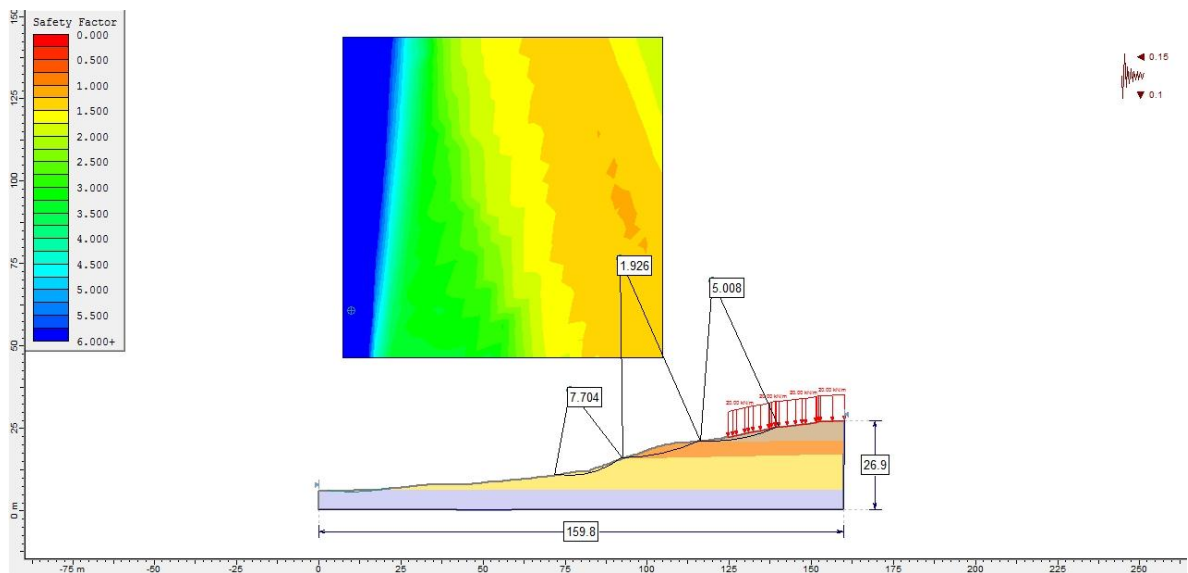
Anexo 82. Perfil A S-N modelado CS-CNA-Método de Jambu



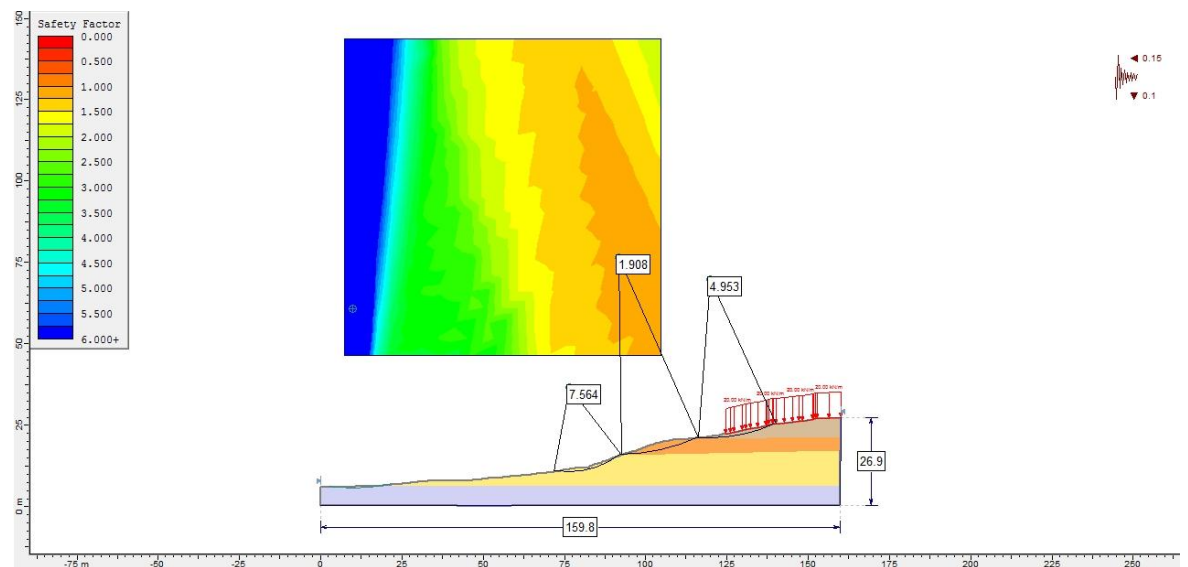
Anexo 83. Perfil A S-N modelado CS-CNA-Método Ordinario



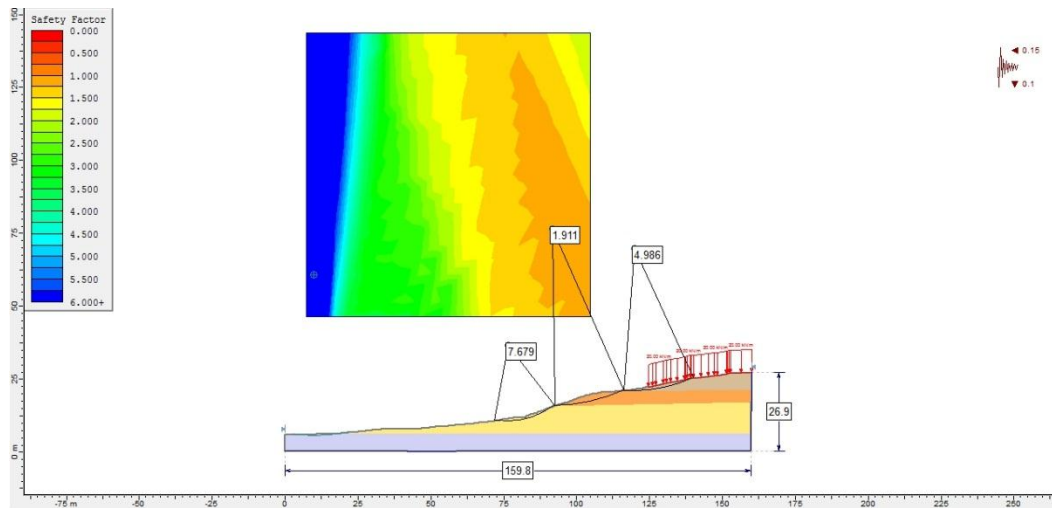
Anexo 84. Perfil A S-N modelado CS-CNA-Método de Spencer



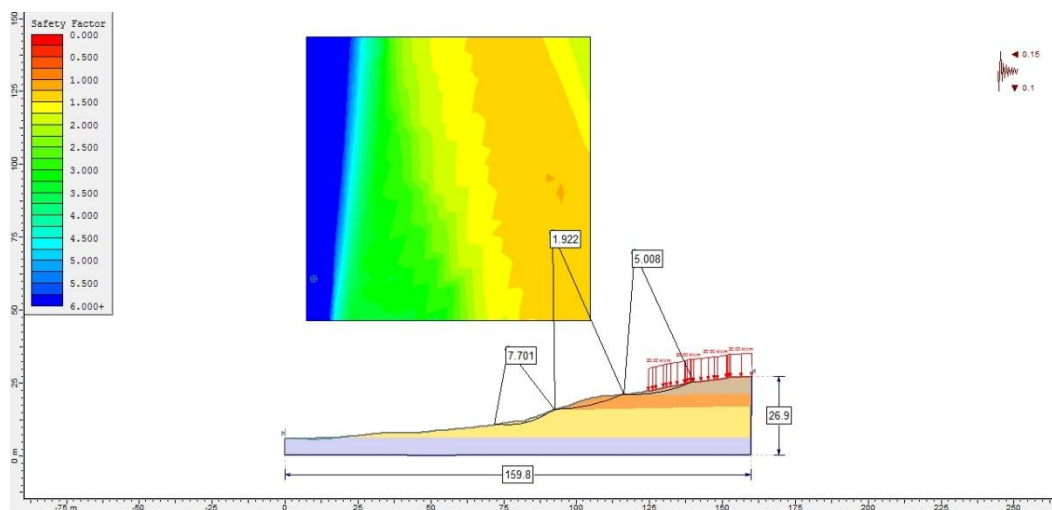
Anexo 85. Perfil 1 modelado CS-SNA-Método de Bishop



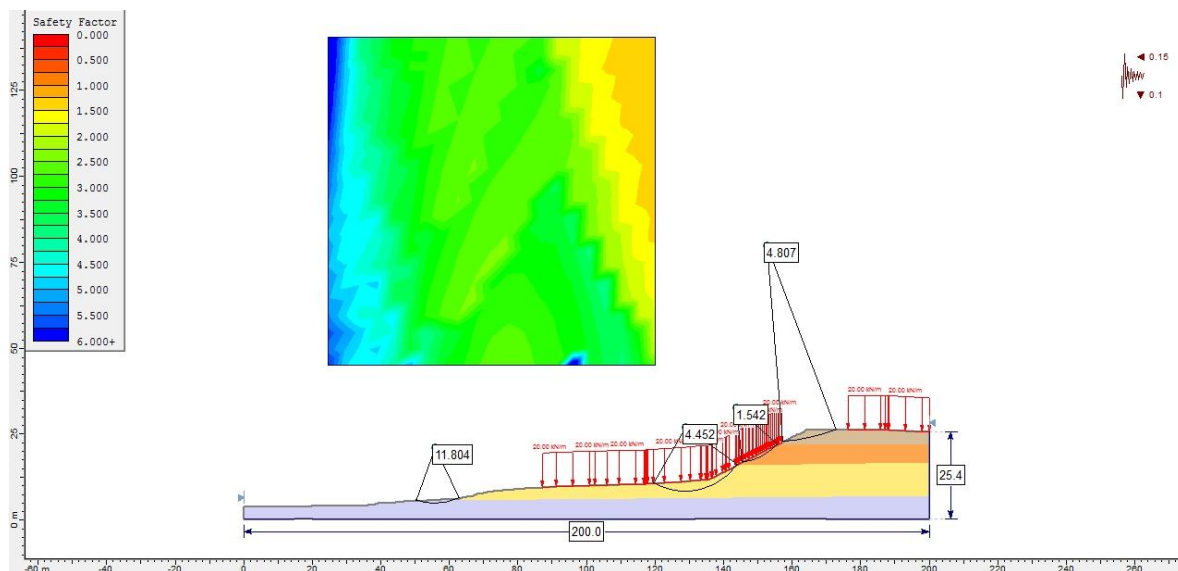
Anexo 86. Perfil 1 modelado CS-SNA-Método de Jambu



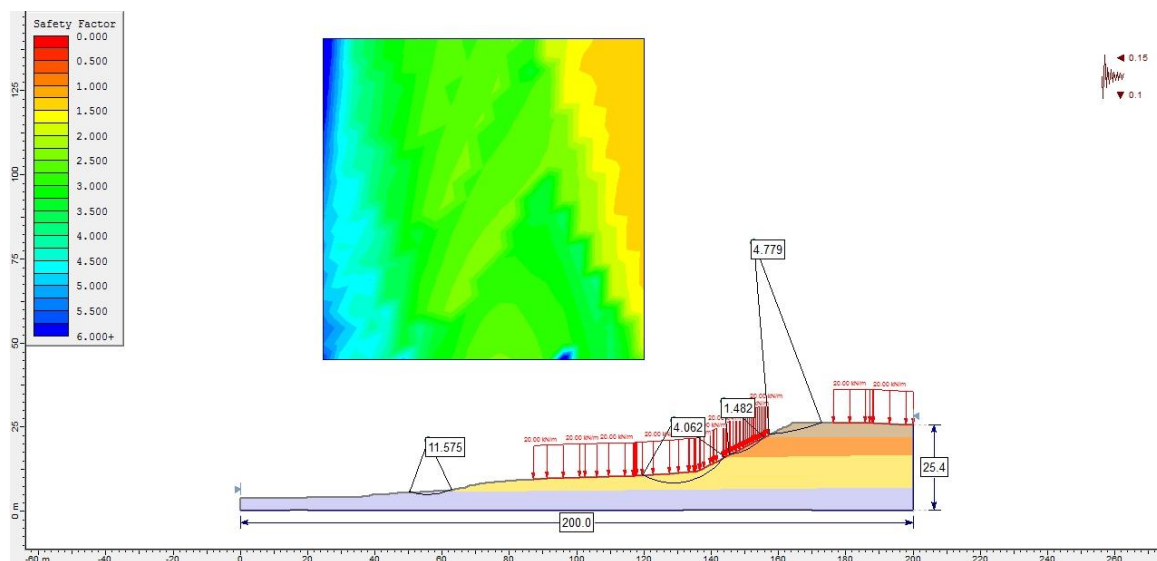
Anexo 87. Perfil 1 modelado CS-SNA-Método Ordinario



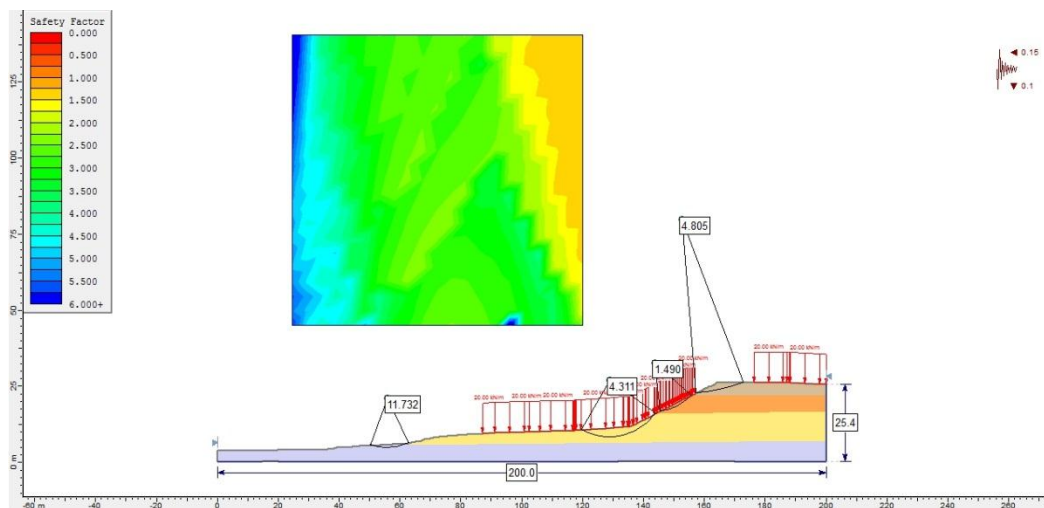
Anexo 88. Perfil 1 modelado CS-SNA-Método de Spencer



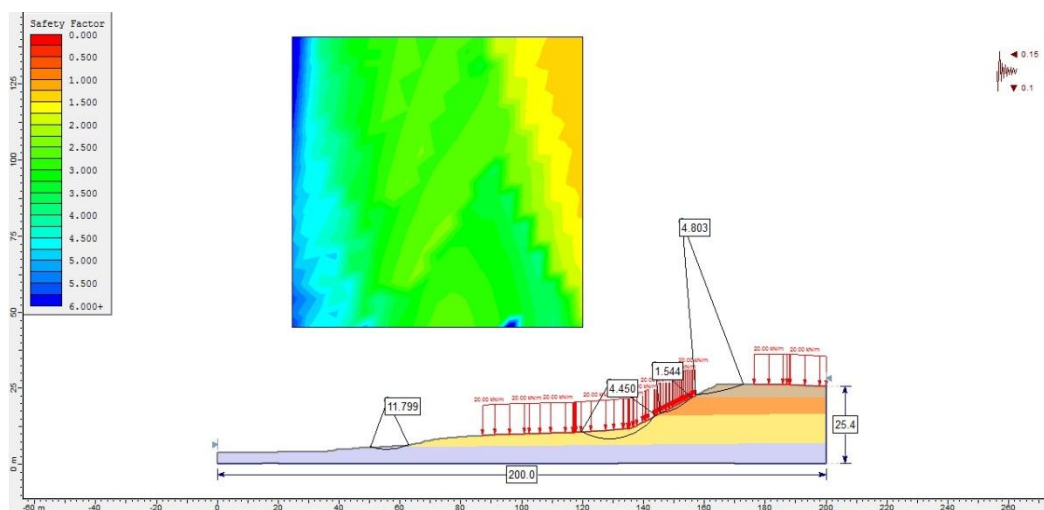
Anexo 89. Perfil 2 modelado CS-SNA -Método de Bishop



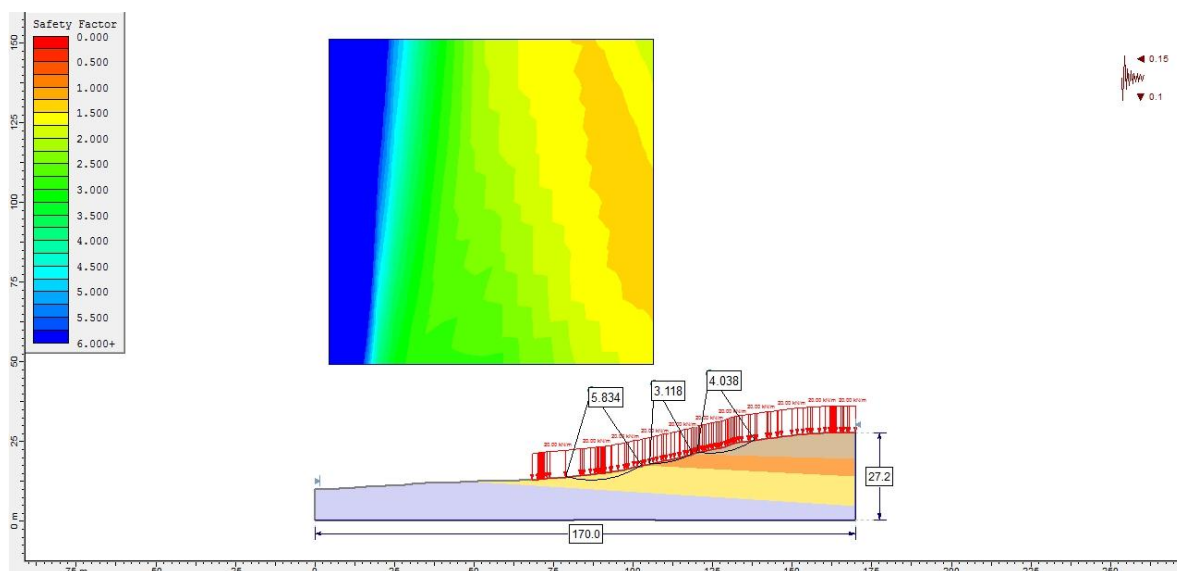
Anexo 90. Perfil 2 modelado CS-SNA -Método de Jambu



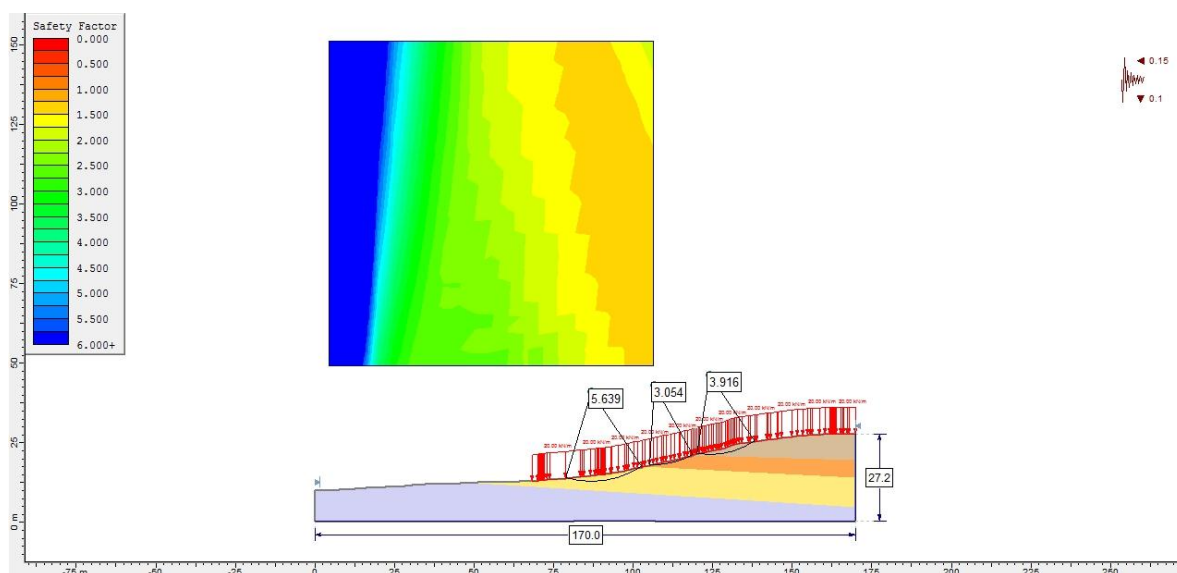
Anexo 91. Perfil 2 modelado CS-SNA -Método Ordinario



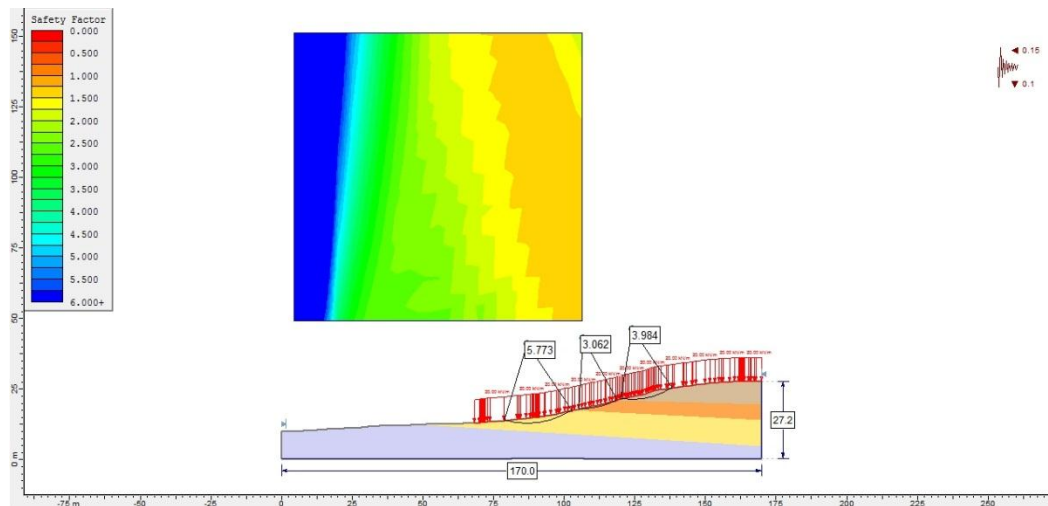
Anexo 92. Perfil 2 modelado CS-SNA -Método de Spencer



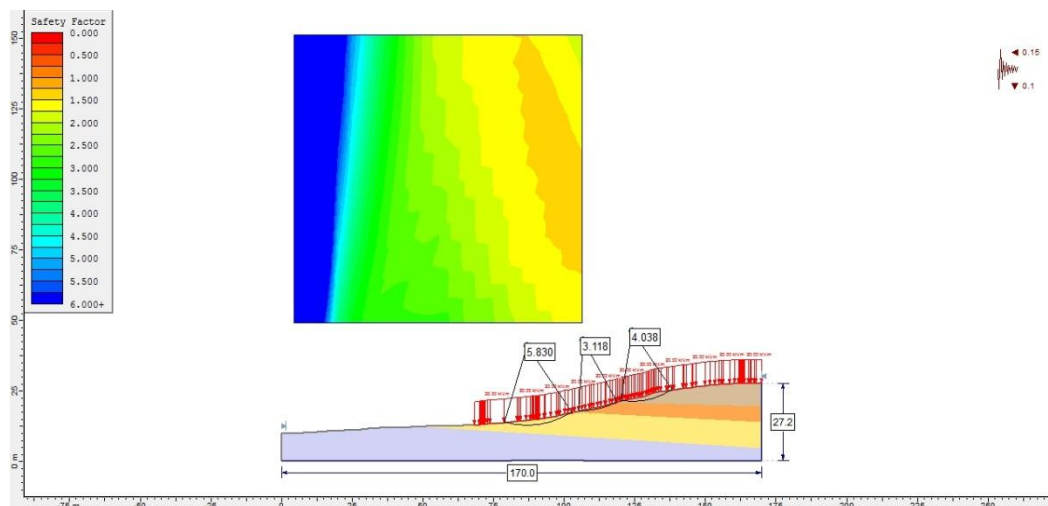
Anexo 93. Perfil 3 modelado CS-SNA -Método de Bishop



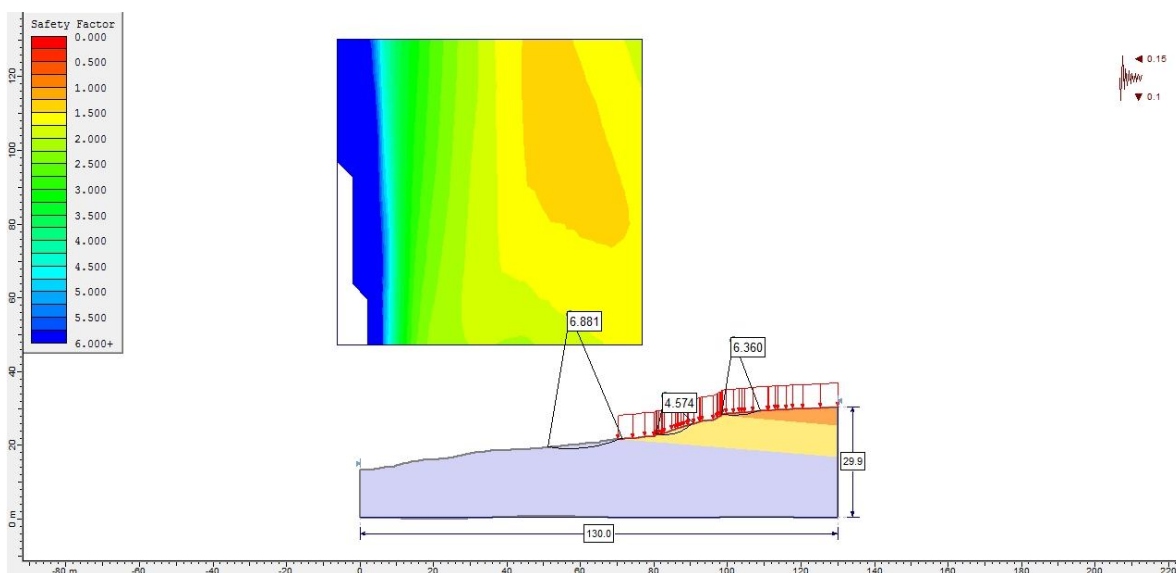
Anexo 94. Perfil 3 modelado CS-SNA -Método de Jambu



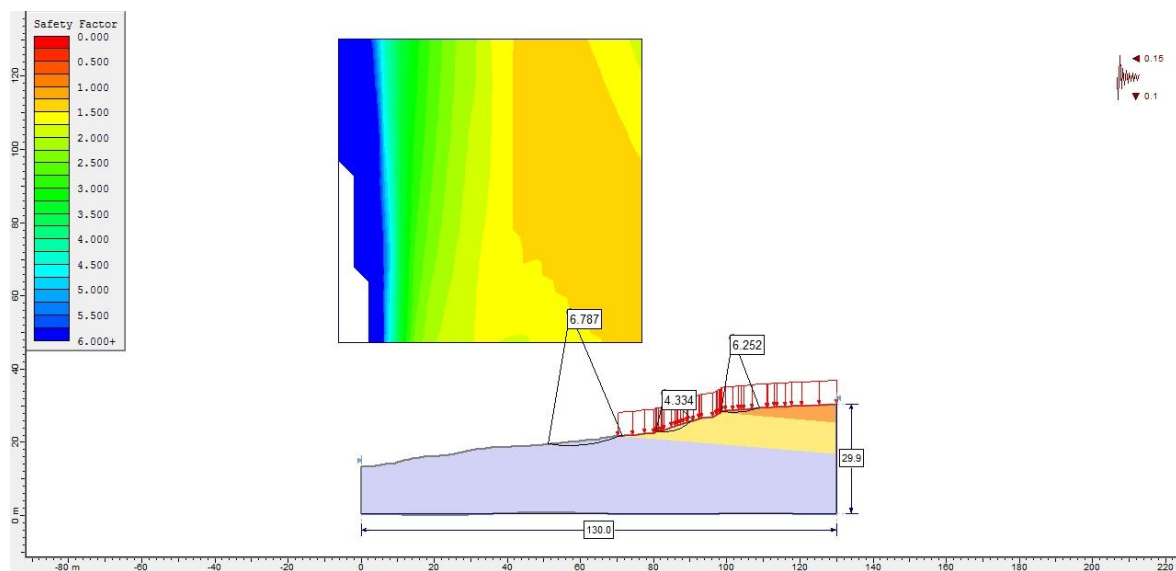
Anexo 95. Perfil 3 modelado CS-SNA -Método Ordinario



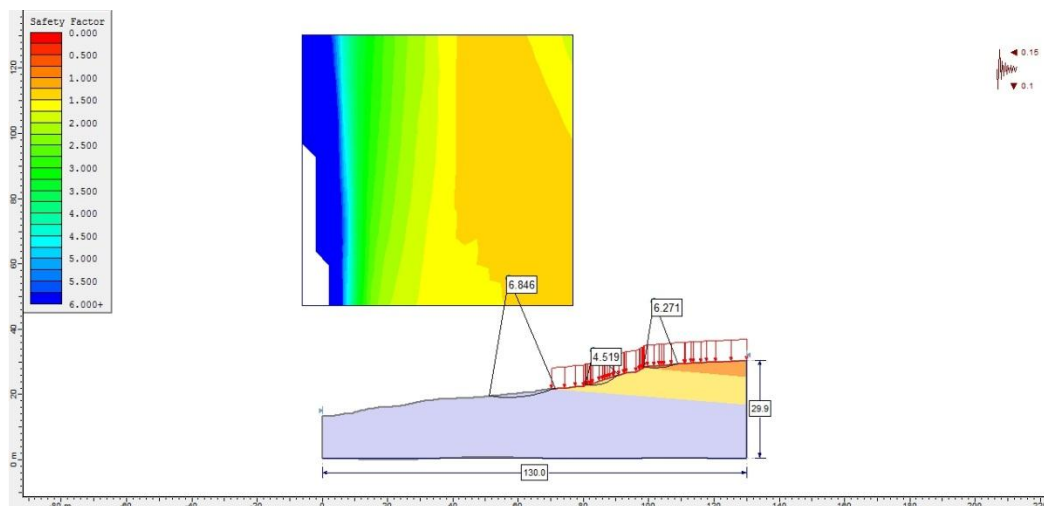
Anexo 96. Perfil 3 modelado CS-SNA -Método de Spencer



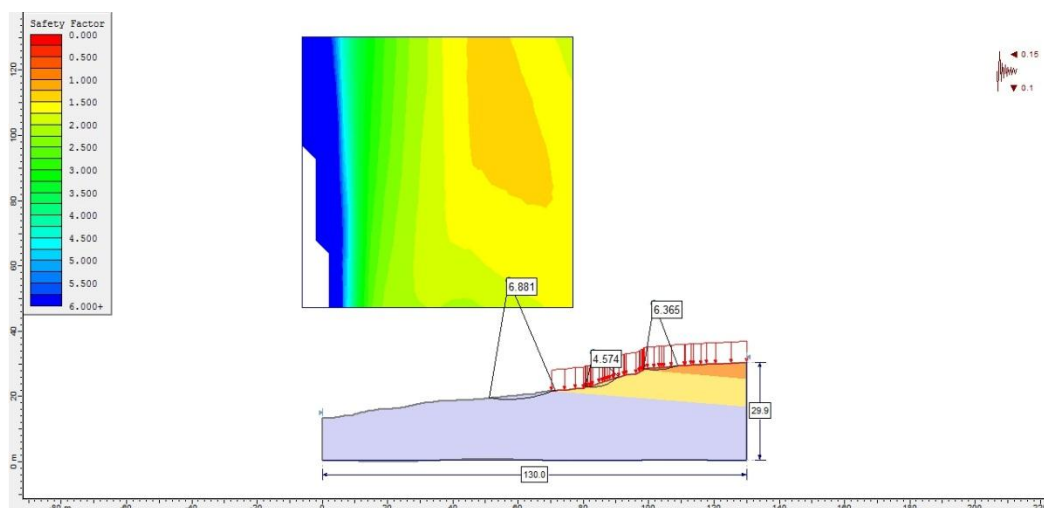
Anexo 97. Perfil 4 modelado CS-SNA -Método de Bishop



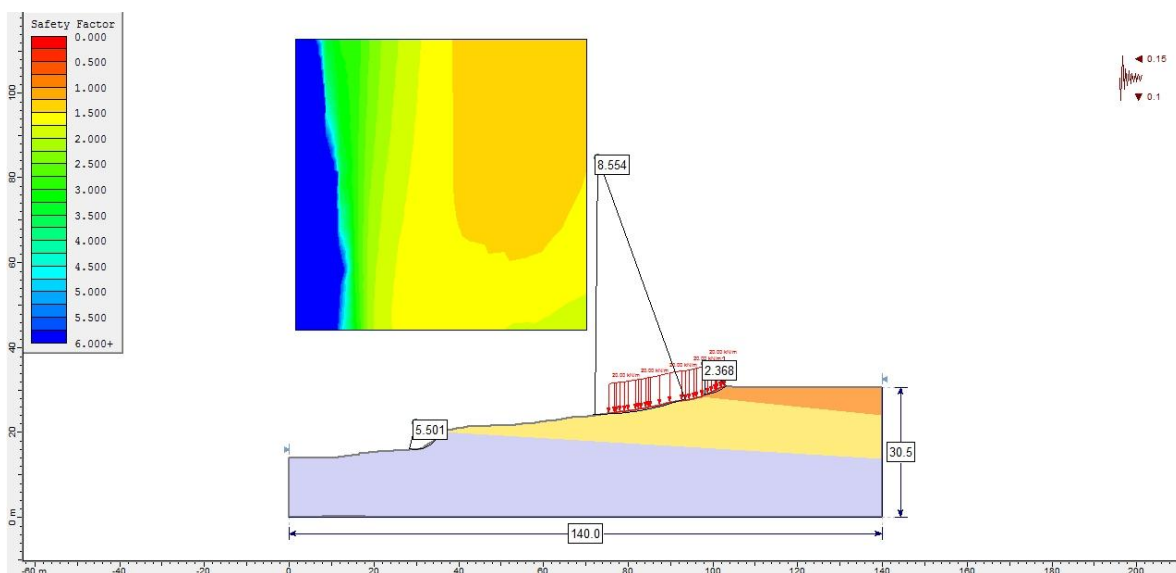
Anexo 98. Perfil 4 modelado CS-SNA -Método de Jambu



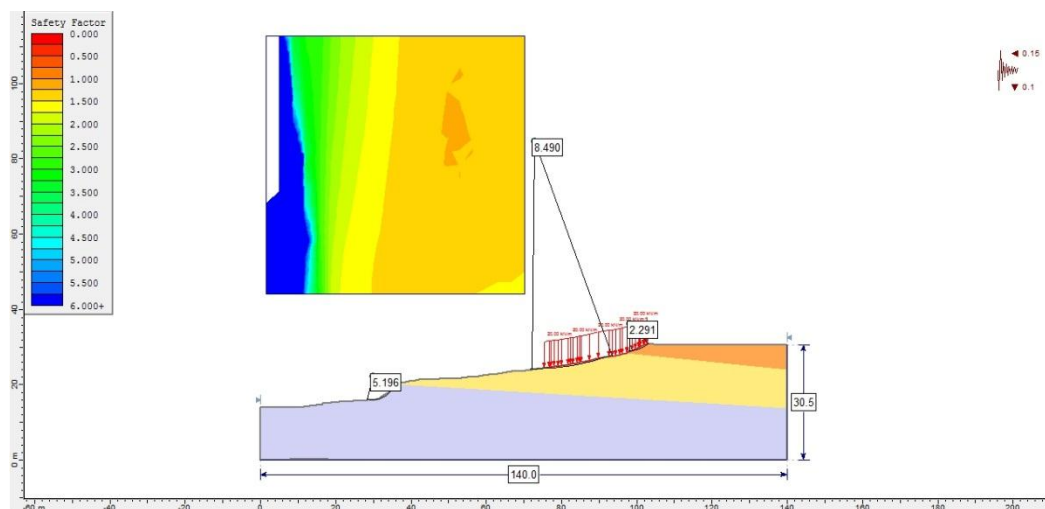
Anexo 99. Perfil 4 modelado CS-SNA -Método Ordinario



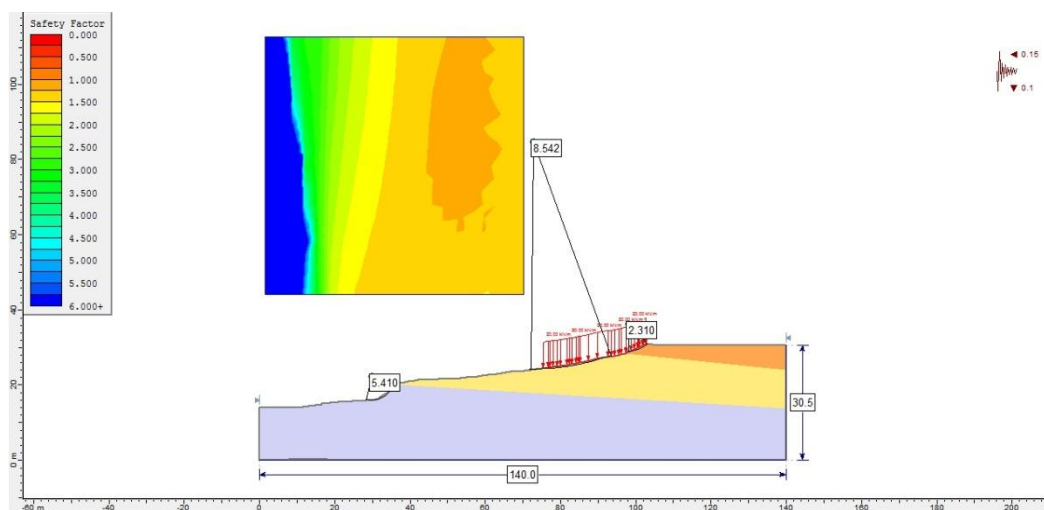
Anexo 100. Perfil 4 modelado CS-SNA -Método de Spencer



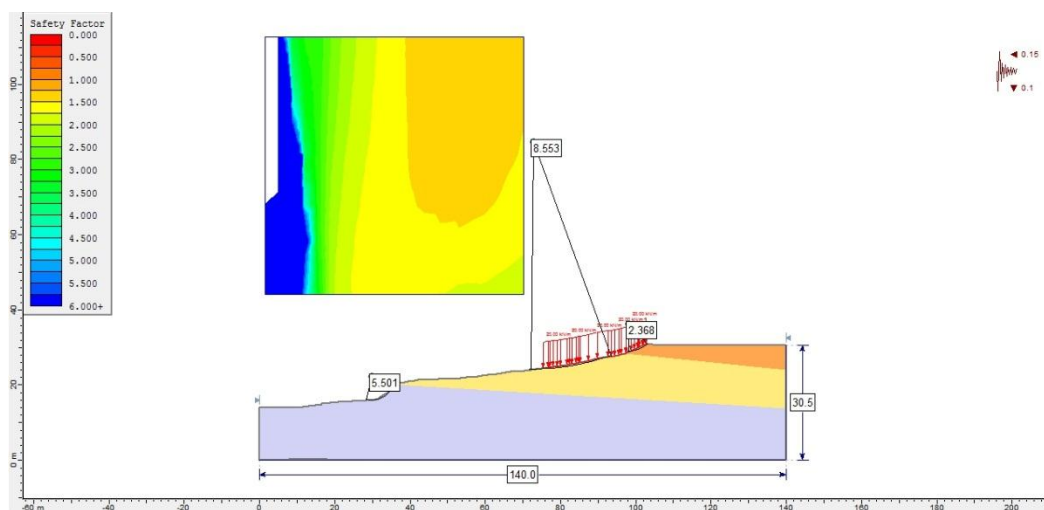
Anexo 101. Perfil 5 modelado CS-SNA -Método de Bishop



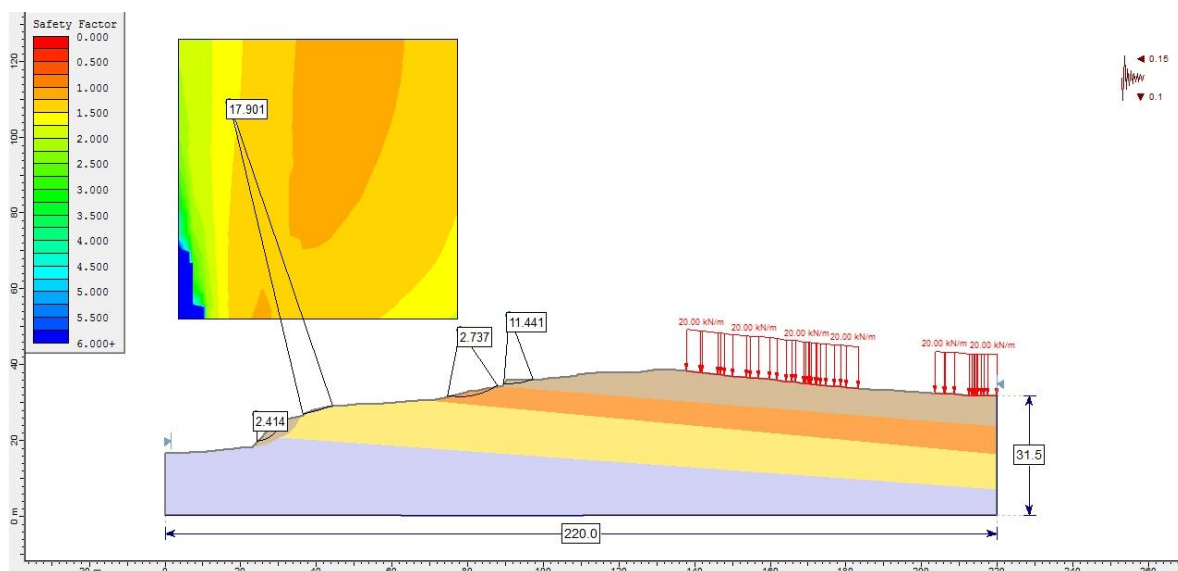
Anexo 102. Perfil 5 modelado CS-SNA -Método de Jambu



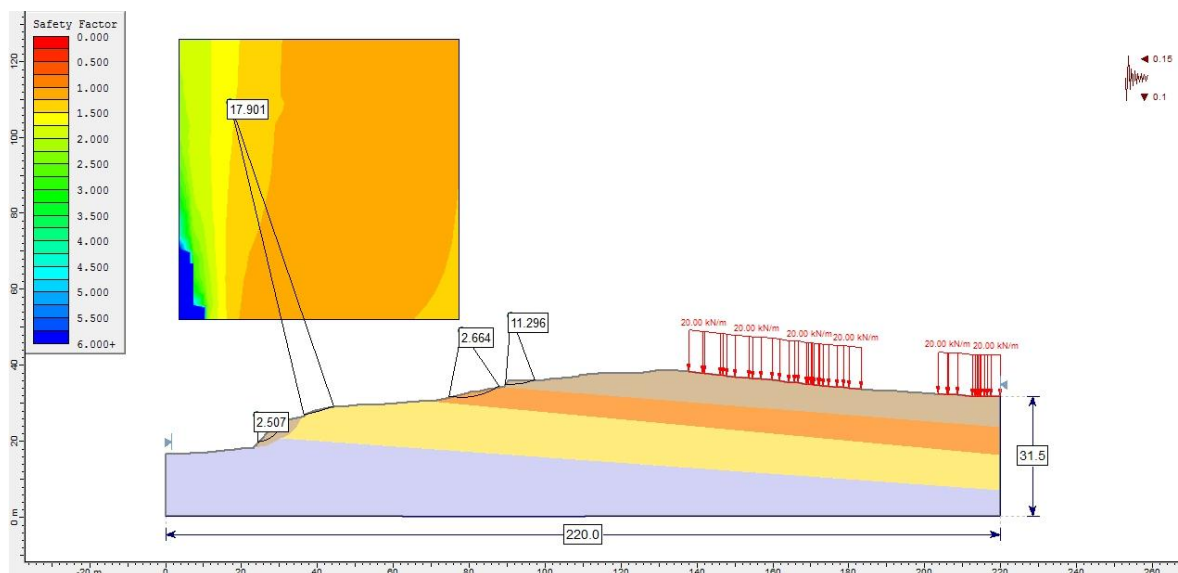
Anexo 103. Perfil 5 modelado CS-SNA -Método Ordinario



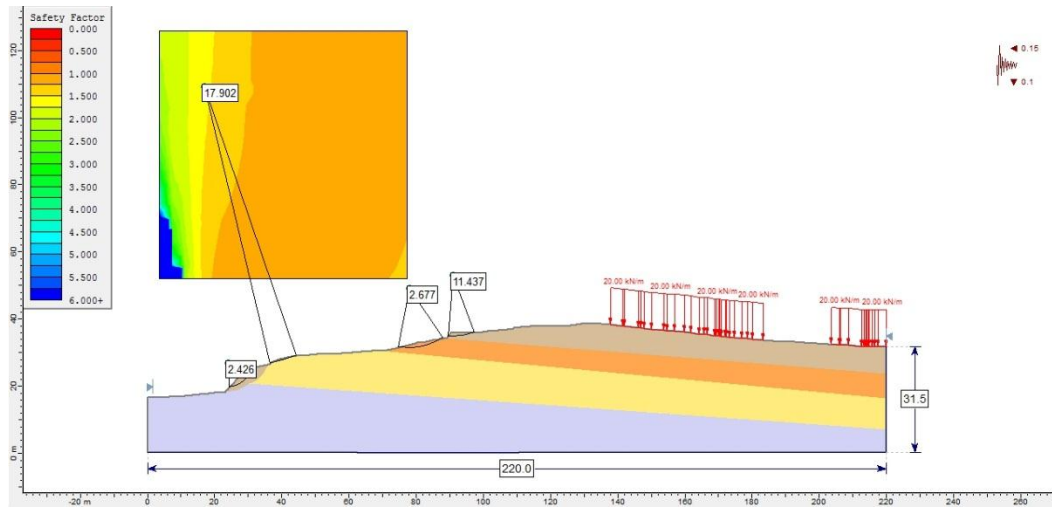
Anexo 104. Perfil 5 modelado CS-SNA -Método de Spencer



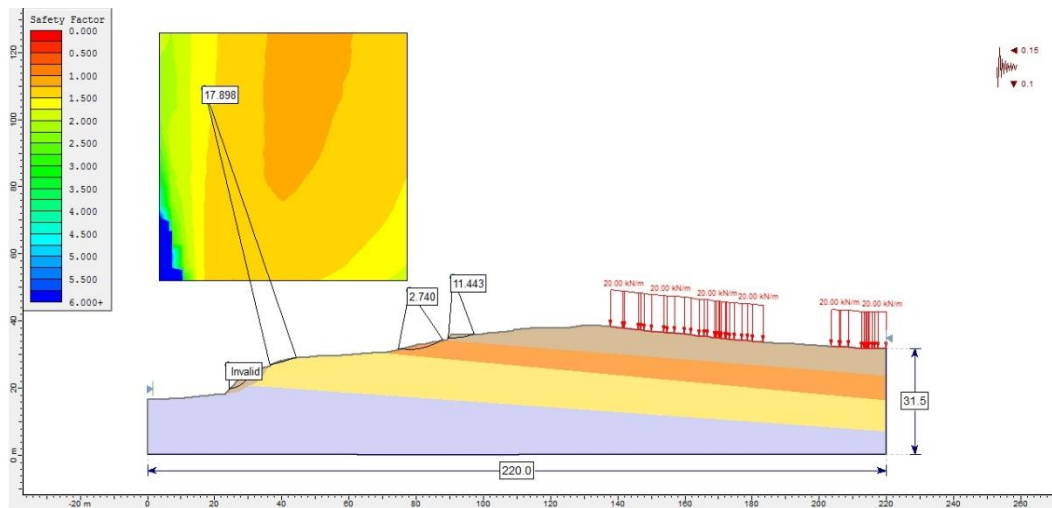
Anexo 105. Perfil 6 modelado CS-SNA -Método de Bishop



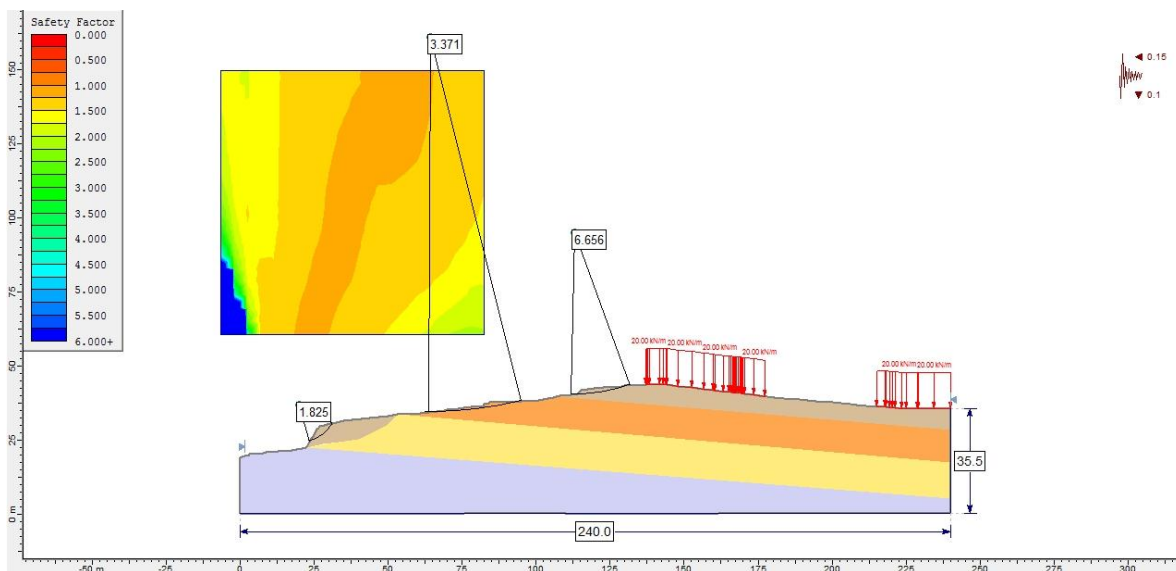
Anexo 106. Perfil 6 modelado CS-SNA -Método de Jambu



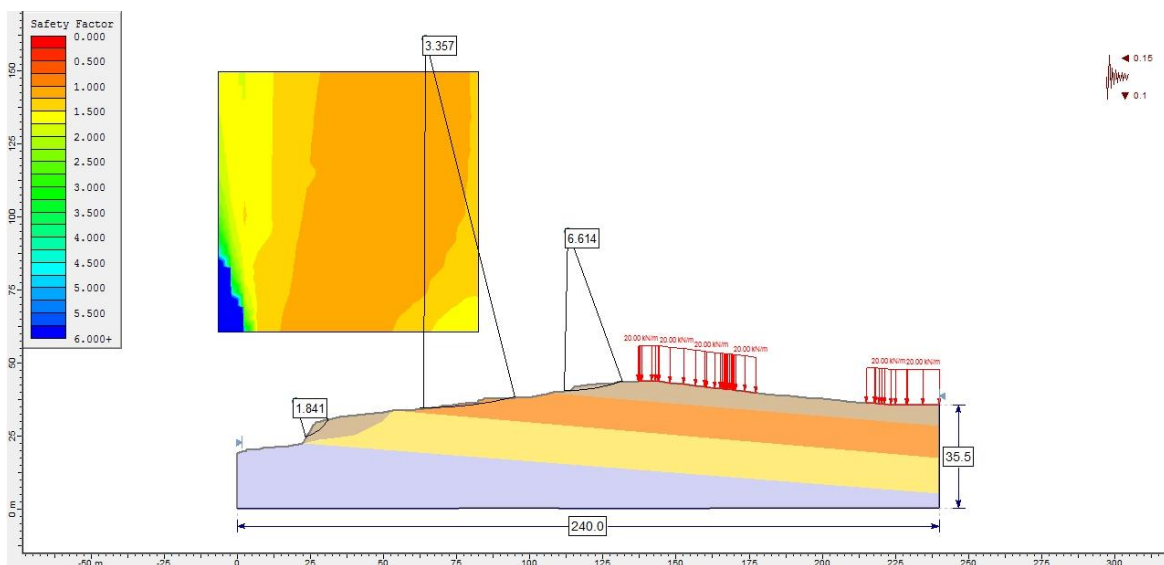
Anexo 107. Perfil 6 modelado CS-SNA -Método Ordinario



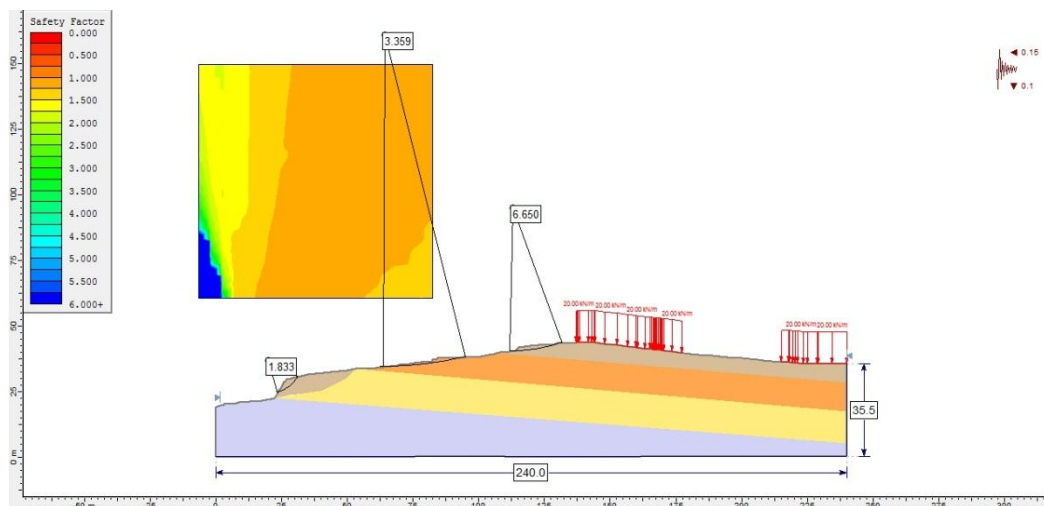
Anexo 108. Perfil 6 modelado CS-SNA -Método de Spencer



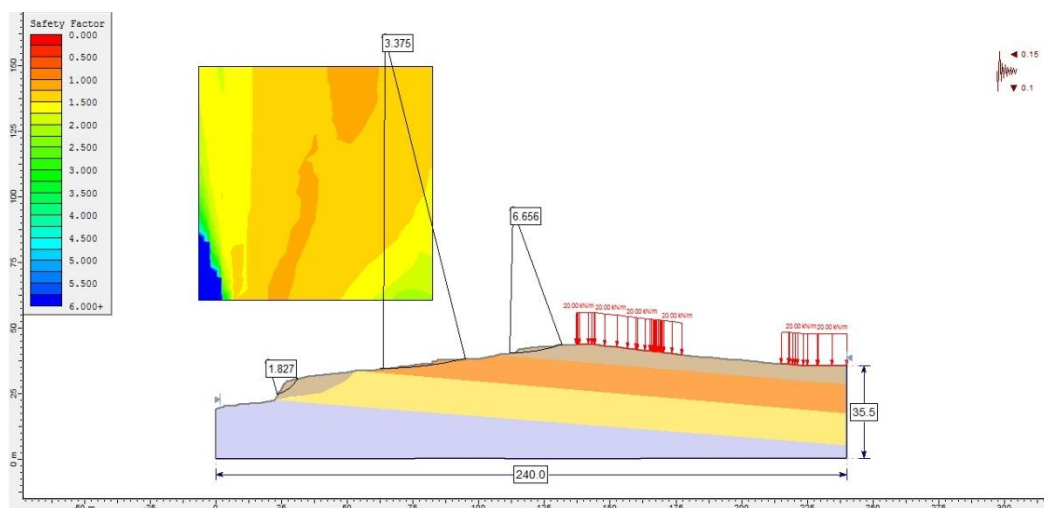
Anexo 109. Perfil 7 modelado CS-SNA -Método de Bishop



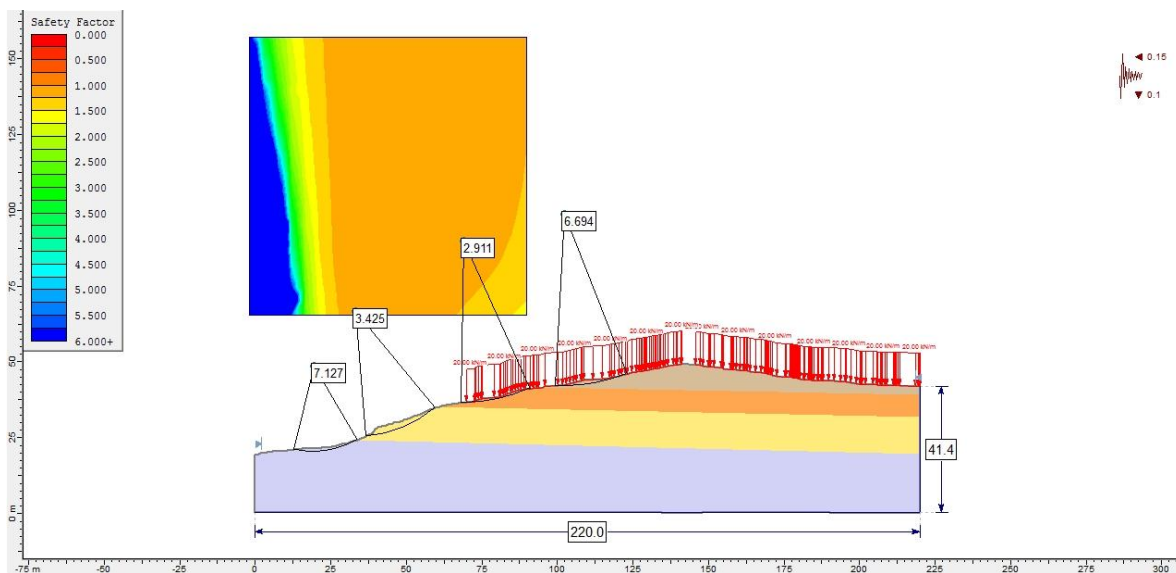
Anexo 110. Perfil 7 modelado CS-SNA -Método de Jambu



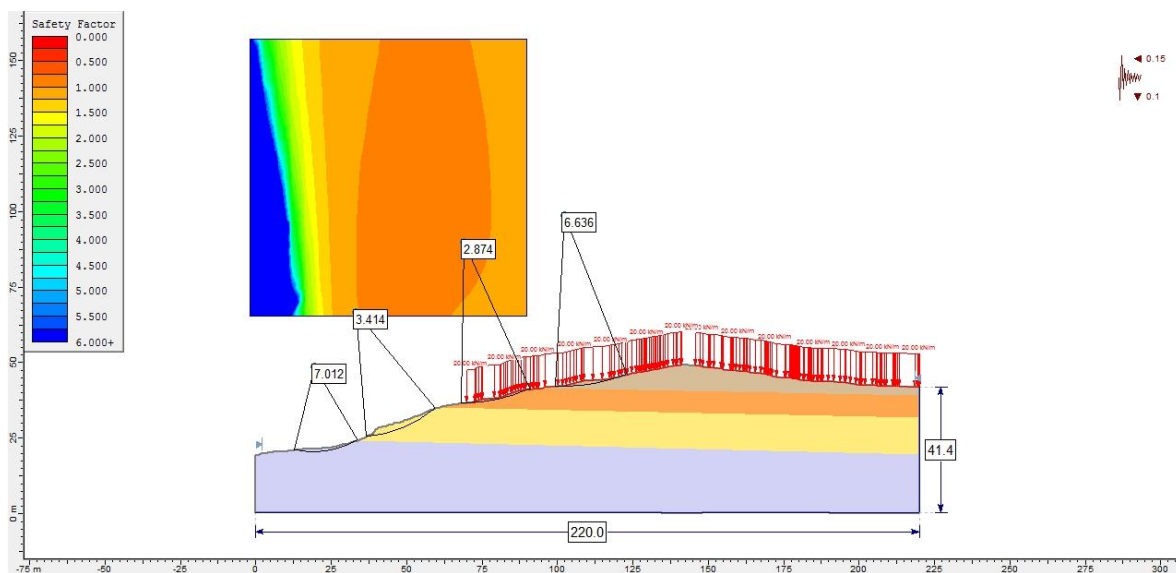
Anexo 111. Perfil 7 modelado CS-SNA -Método Ordinario



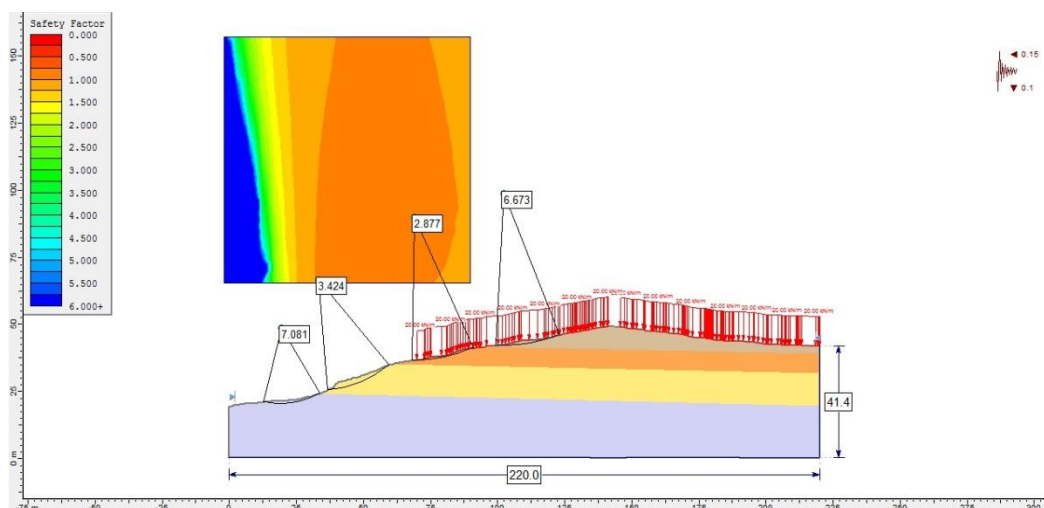
Anexo 112. Perfil 7 modelado CS-SNA -Método de Spencer



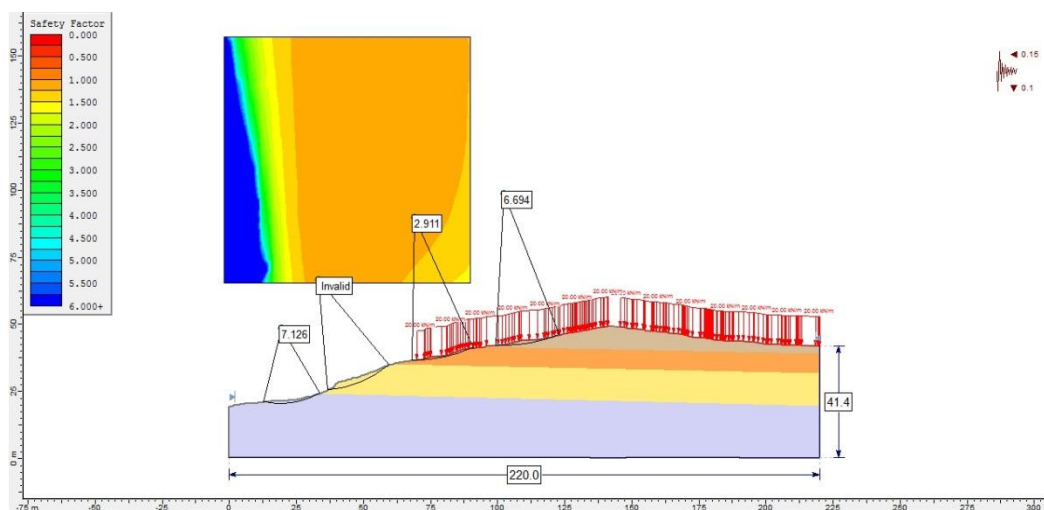
Anexo 113. Perfil 8 modelado CS-SNA -Método de Bishop



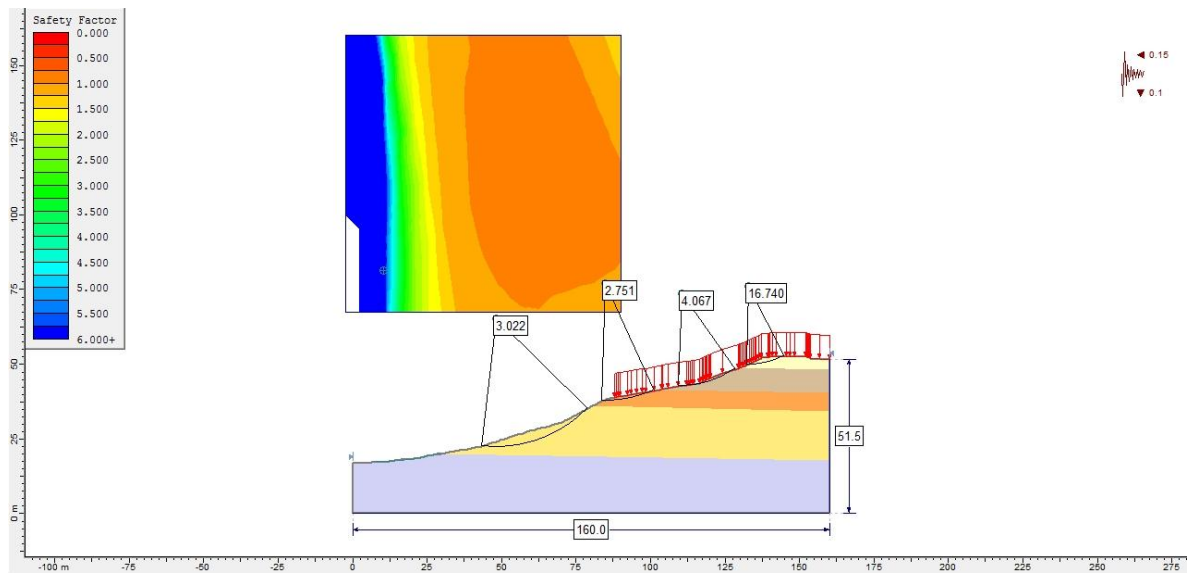
Anexo 114. Perfil 8 modelado CS-SNA -Método de Jambu



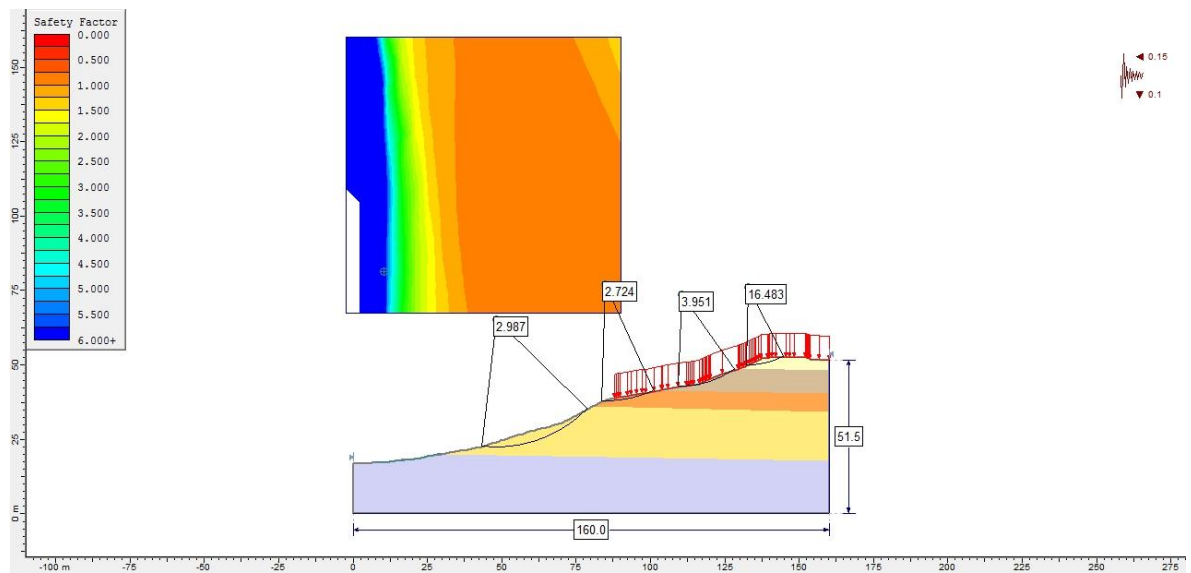
Anexo 115. Perfil 8 modelado CS-SNA -Método Ordinario



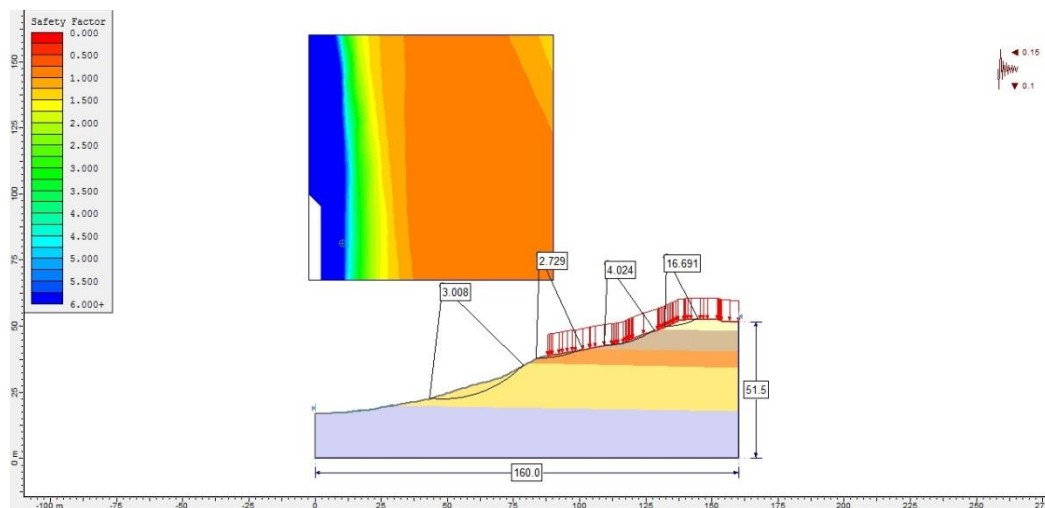
Anexo 116. Perfil 8 modelado CS-SNA -Método de Spencer



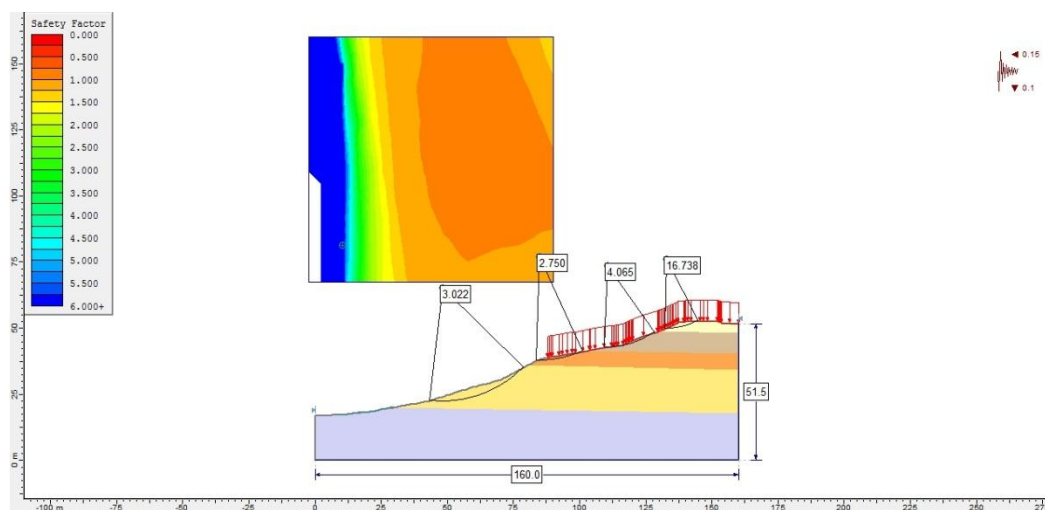
Anexo 117. Perfil 9 modelado CS-SNA -Método de Bishop



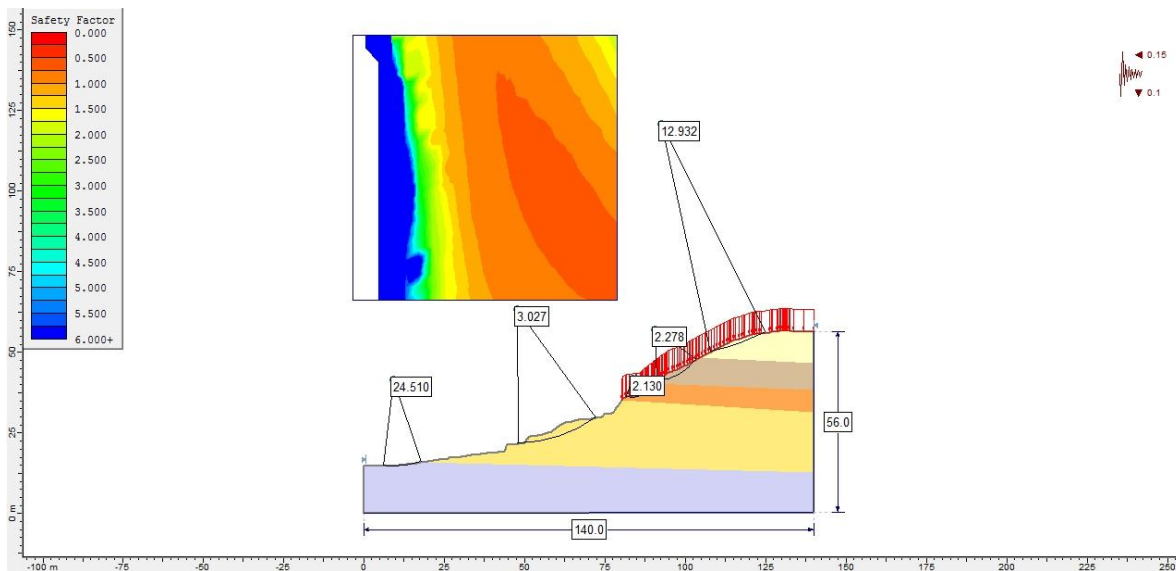
Anexo 118. Perfil 9 modelado CS-SNA -Método de Jambu



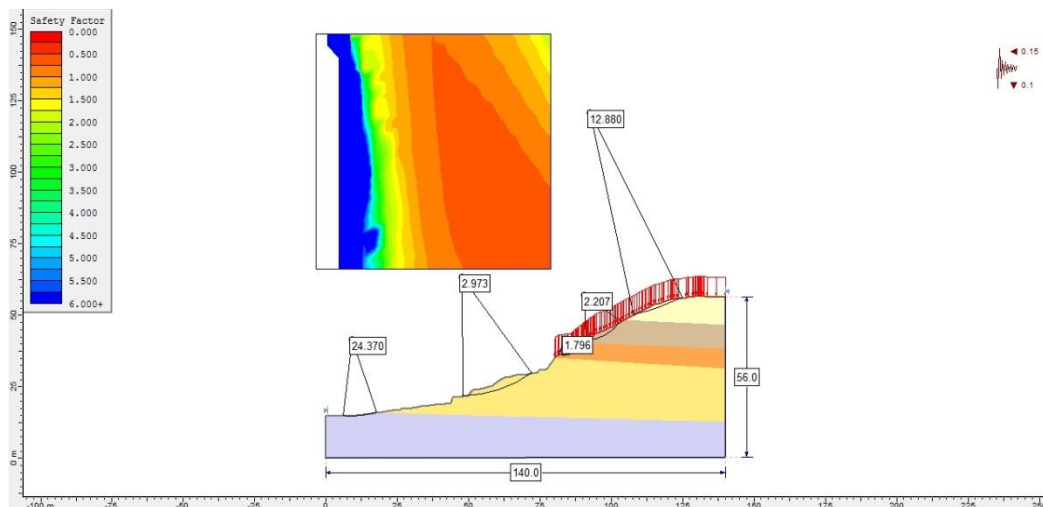
Anexo 119. Perfil 9 modelado CS-SNA -Método Ordinario



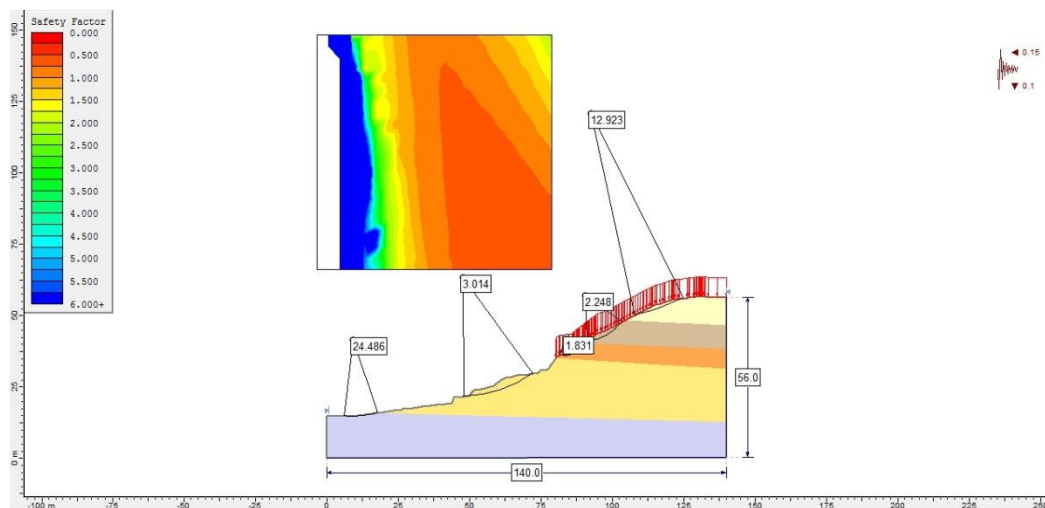
Anexo 120. Perfil 9 modelado CS-SNA -Método de Spencer



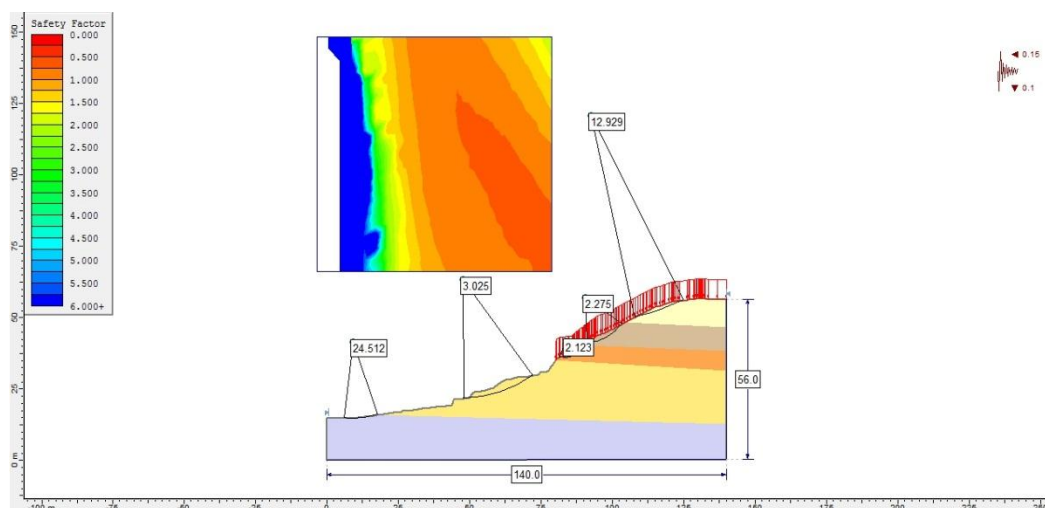
Anexo 121. Perfil 10 modelado CS-SNA -Método de Bishop



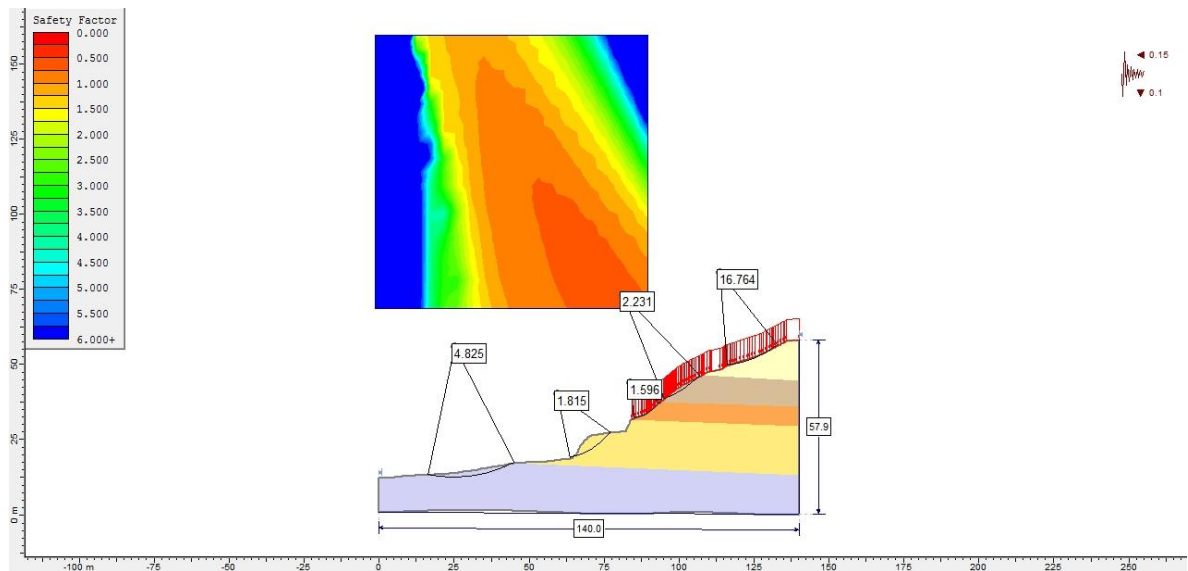
Anexo 122. Perfil 10 modelado CS-SNA -Método de Jambu



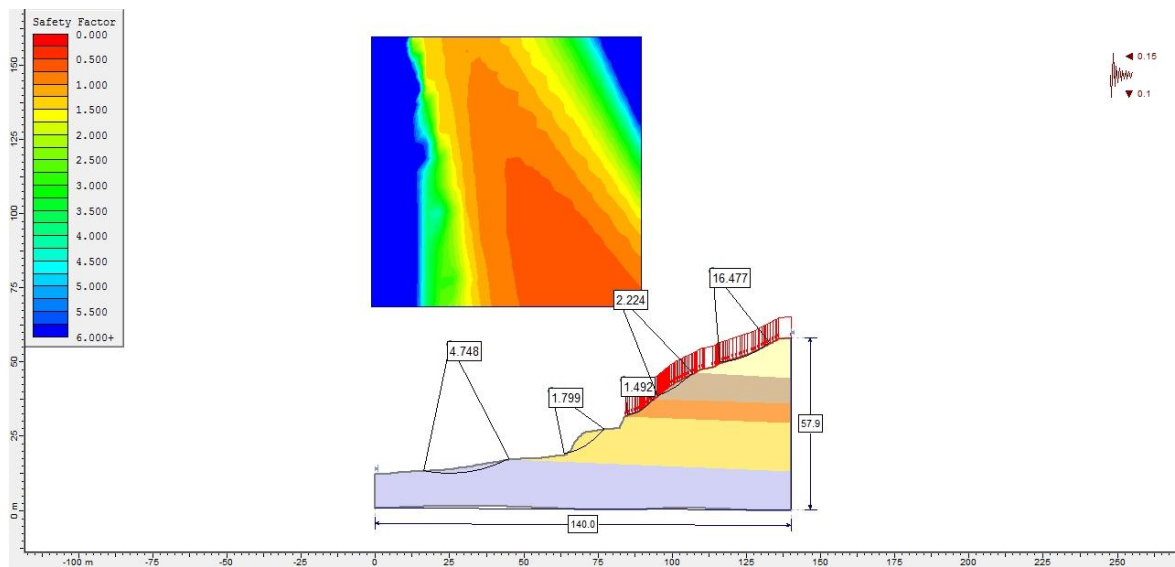
Anexo 123. Perfil 10 modelado CS-SNA -Método Ordinario



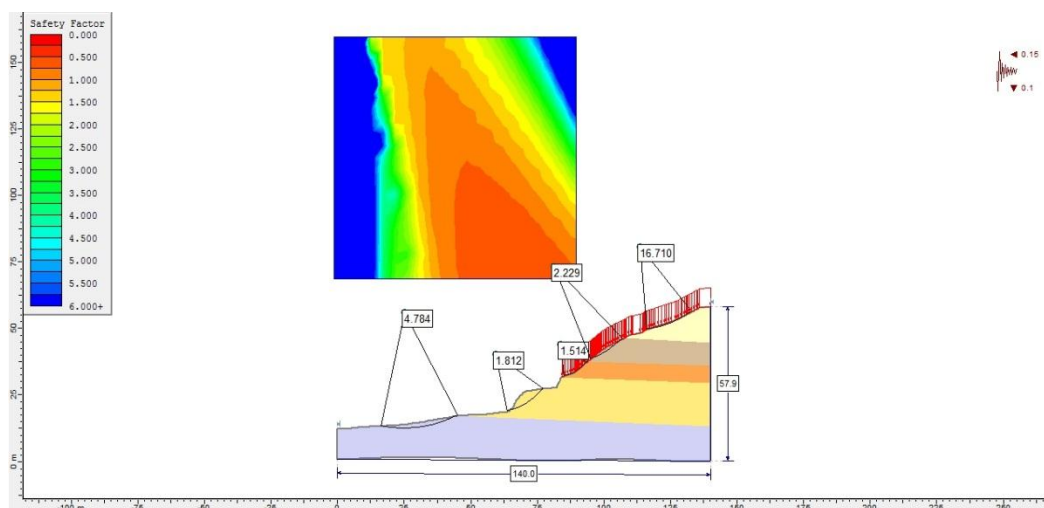
Anexo 124. Perfil 10 modelado CS-SNA -Método de Spencer



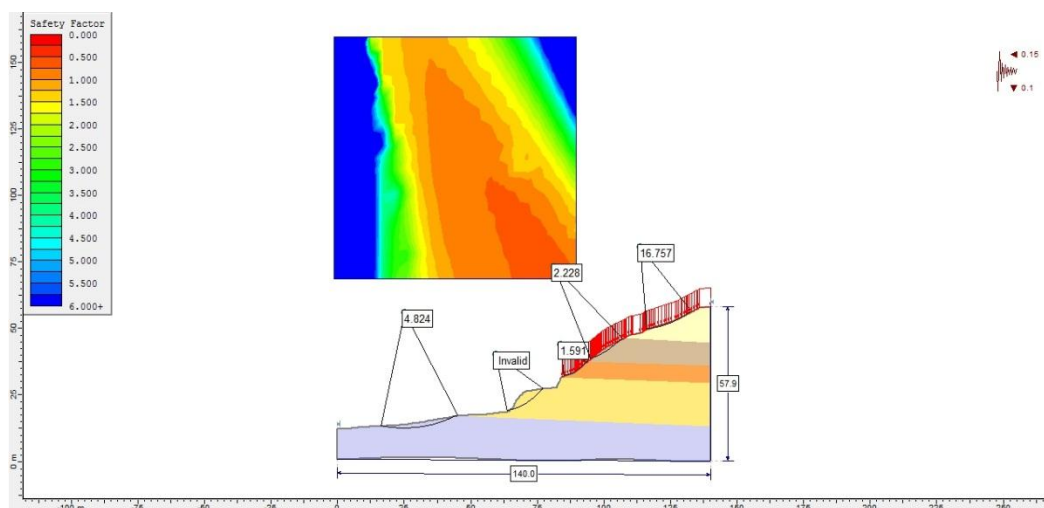
Anexo 125. Perfil 11 modelado CS-SNA -Método de Bishop



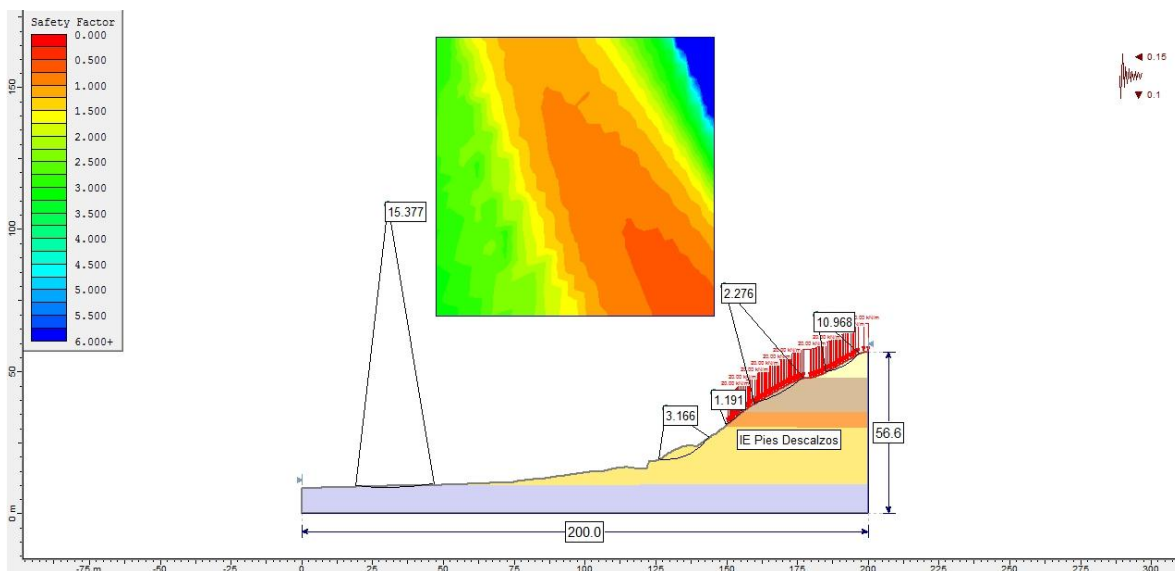
Anexo 126. Perfil 11 modelado CS-SNA -Método de Jambu



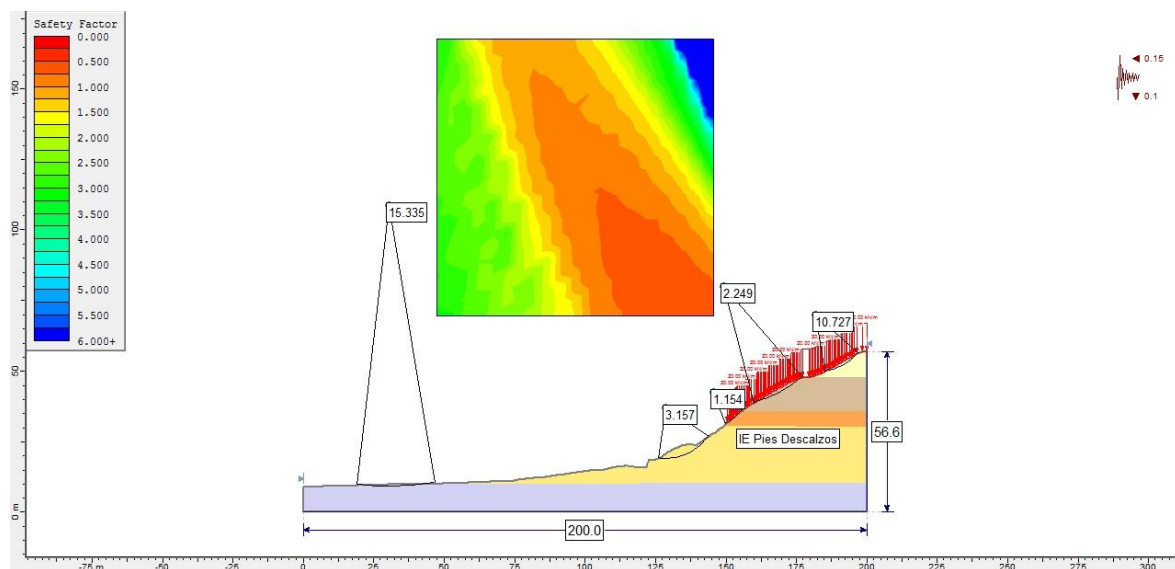
Anexo 127. Perfil 11 modelado CS-SNA -Método Ordinario



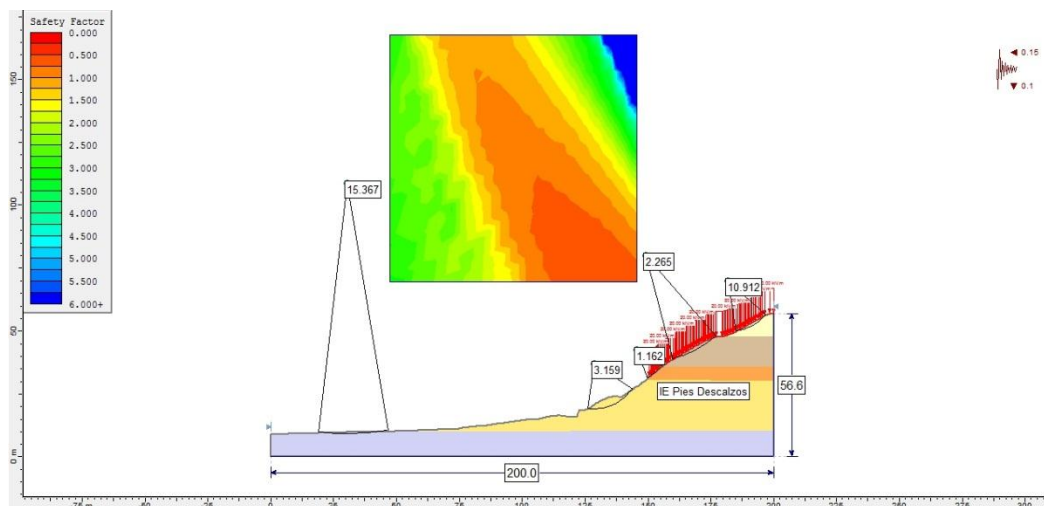
Anexo 128. Perfil 11 modelado CS-SNA -Método de Spencer



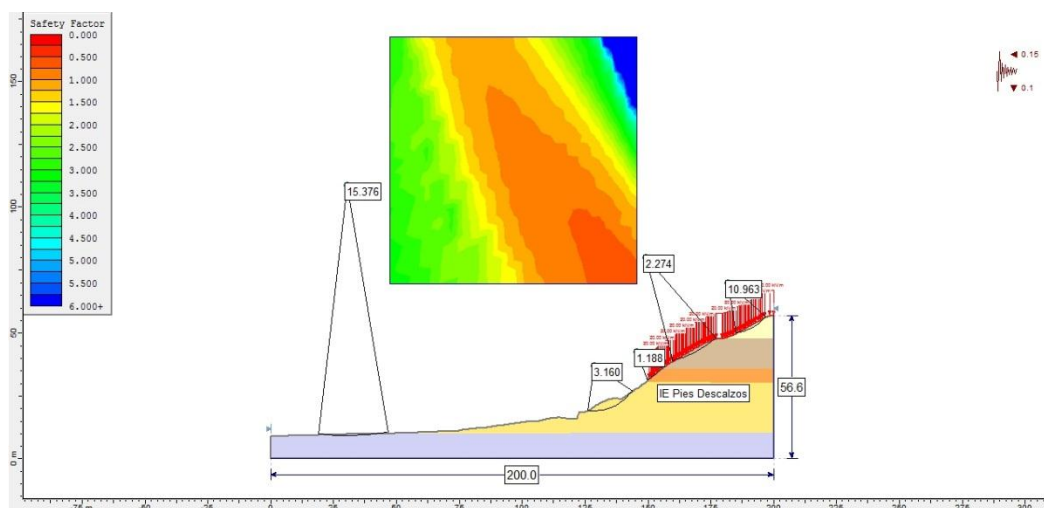
Anexo 129. Perfil 12 modelado CS-SNA -Método de Bishop



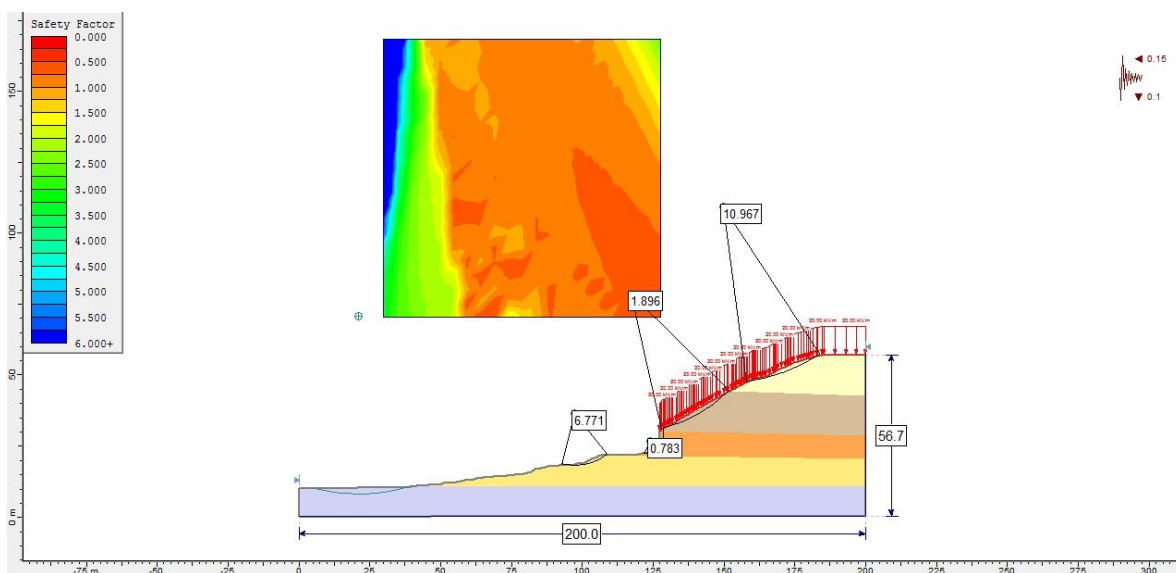
Anexo 130. Perfil 12 modelado CS-SNA -Método de Jambu



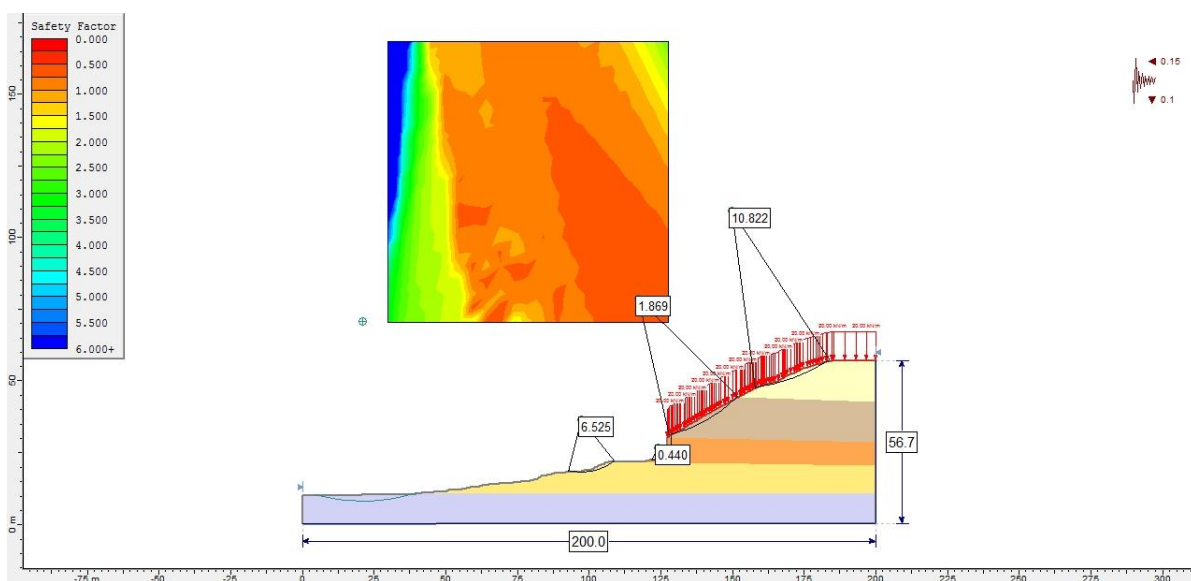
Anexo 131. Perfil 12 modelado CS-SNA -Método Ordinario



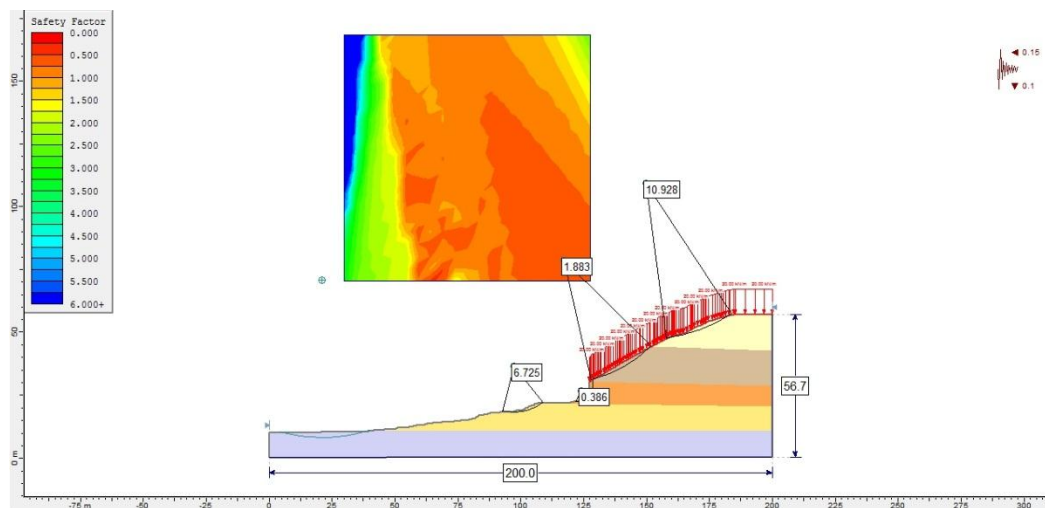
Anexo 132. Perfil 12 modelado CS-SNA -Método de Spencer



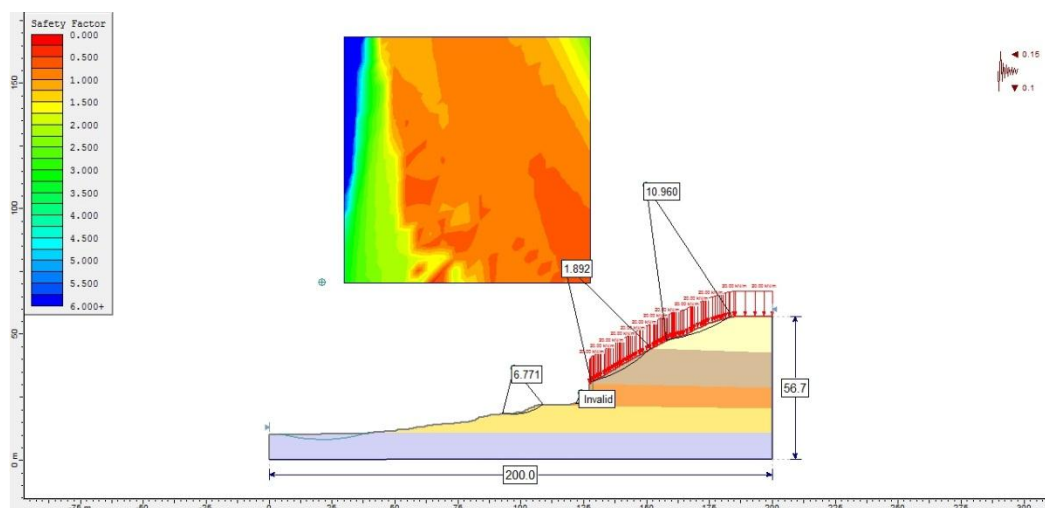
Anexo 133. Perfil 13 modelado CS-SNA -Método de Bishop



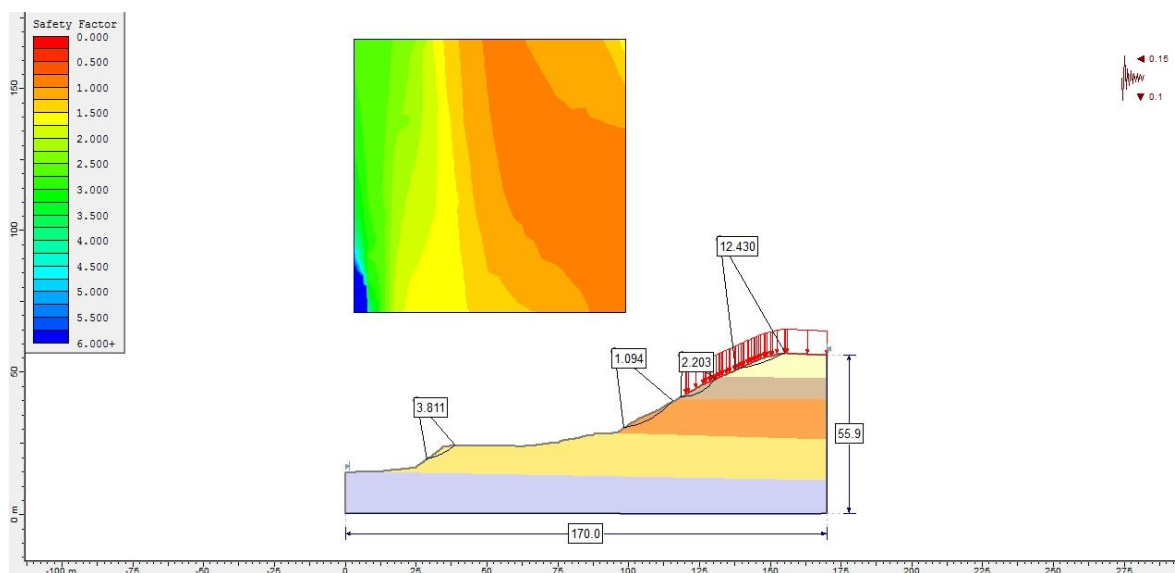
Anexo 134. Perfil 13 modelado CS-SNA-Método de Jambu



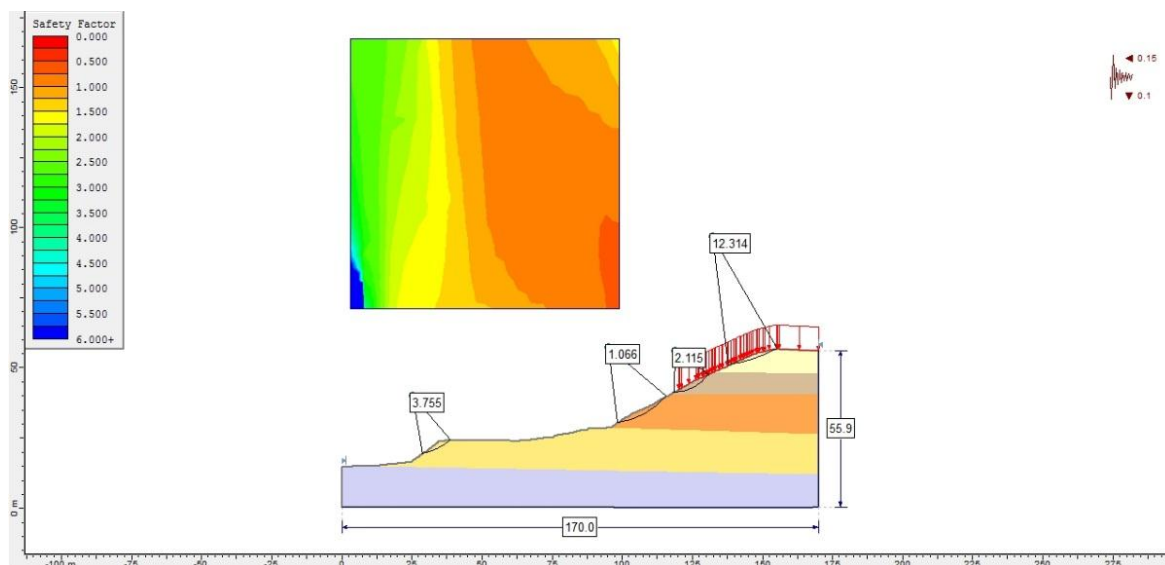
Anexo 135. Perfil 13 modelado CS-SNA-Método Ordinario



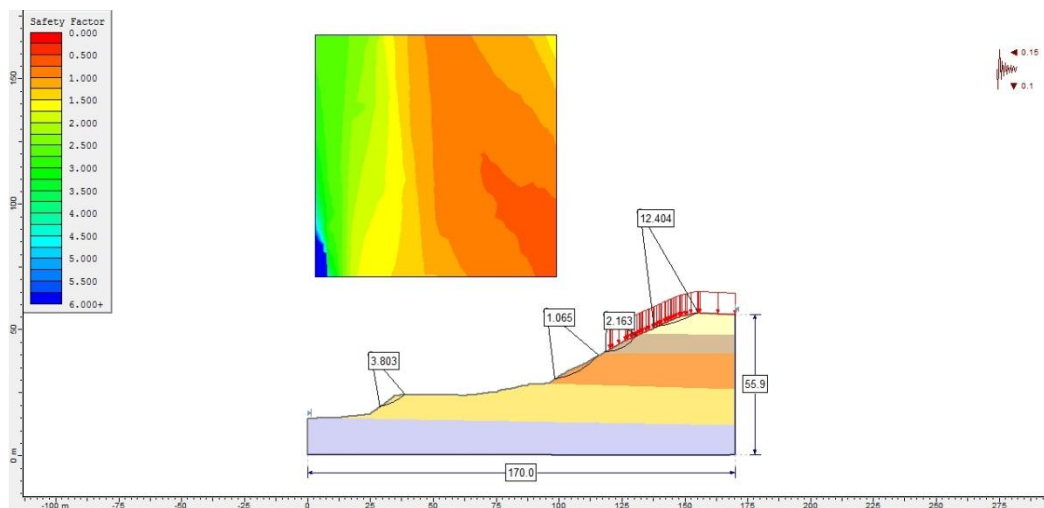
Anexo 136. Perfil 13 modelado CS-SNA-Método de Spencer



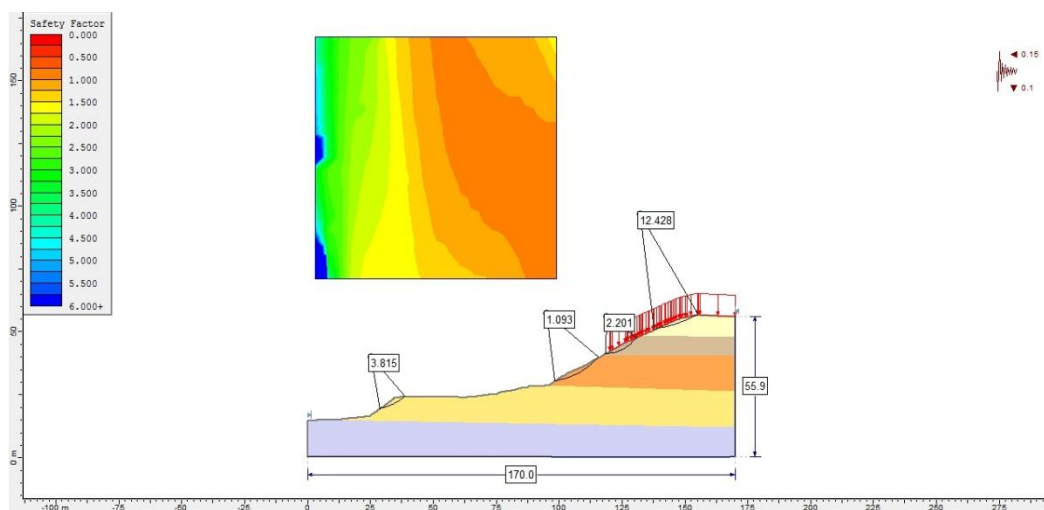
Anexo 137. Perfil 14 modelado CS-SNA-Método de Bishop



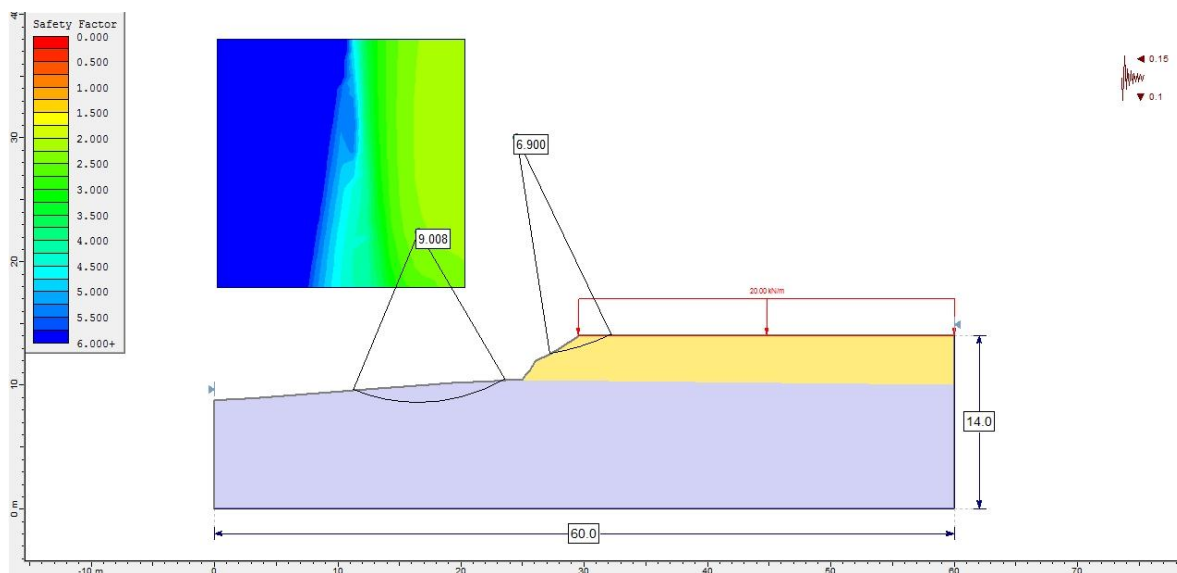
Anexo 138. Perfil 14 modelado CS-SNA -Método de Jambu



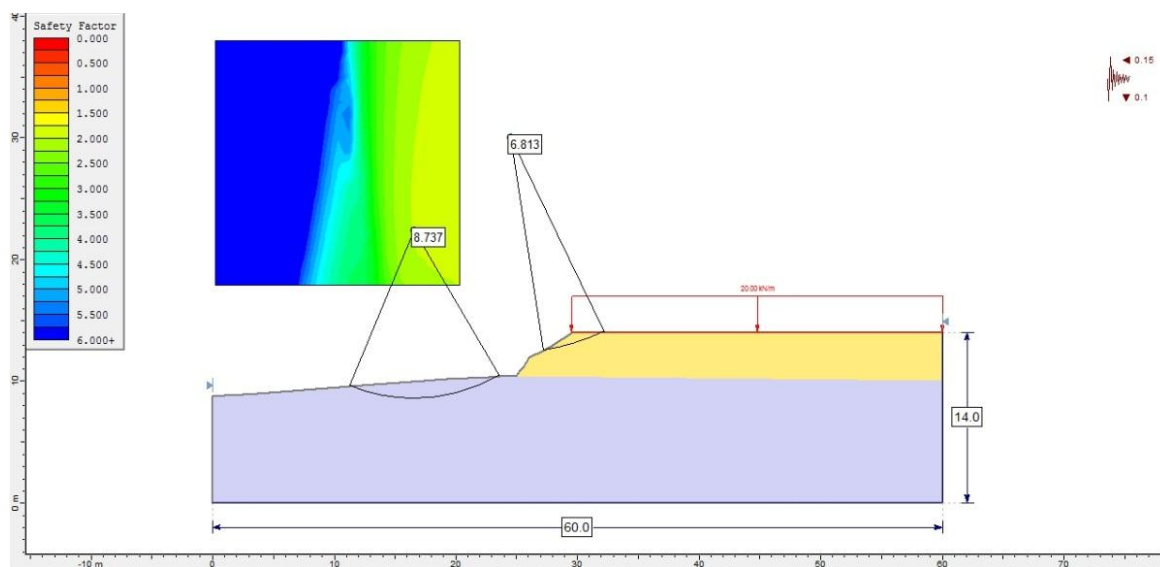
Anexo 139. Perfil 14 modelado CS-SNA -Método Ordinario



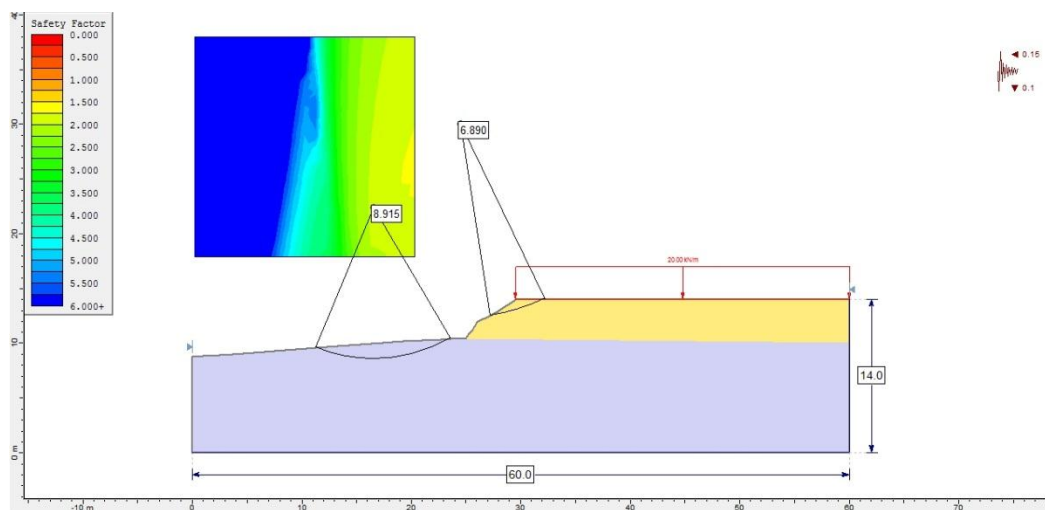
Anexo 140. Perfil 14 modelado CS-SNA -Método de Spencer



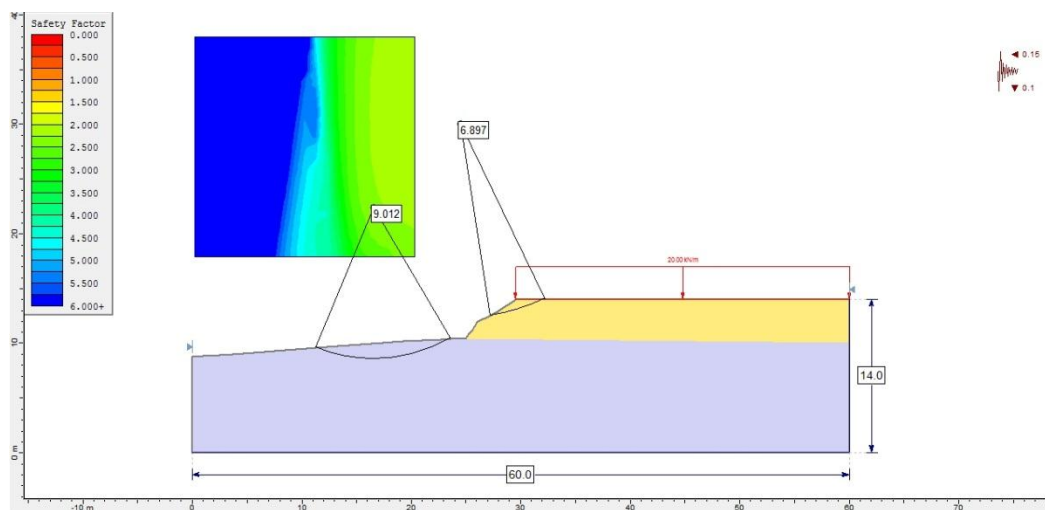
Anexo 141. Perfil 15 modelado CS-SNA -Método de Bishop



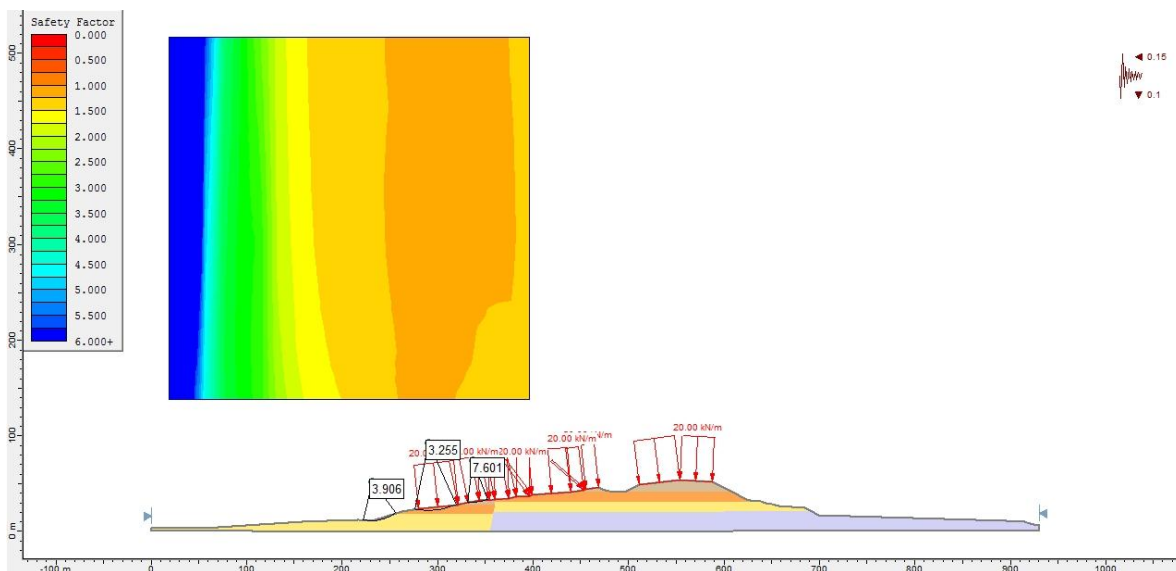
Anexo 142. Perfil 15 modelado CS-SNA-Método de Jambu



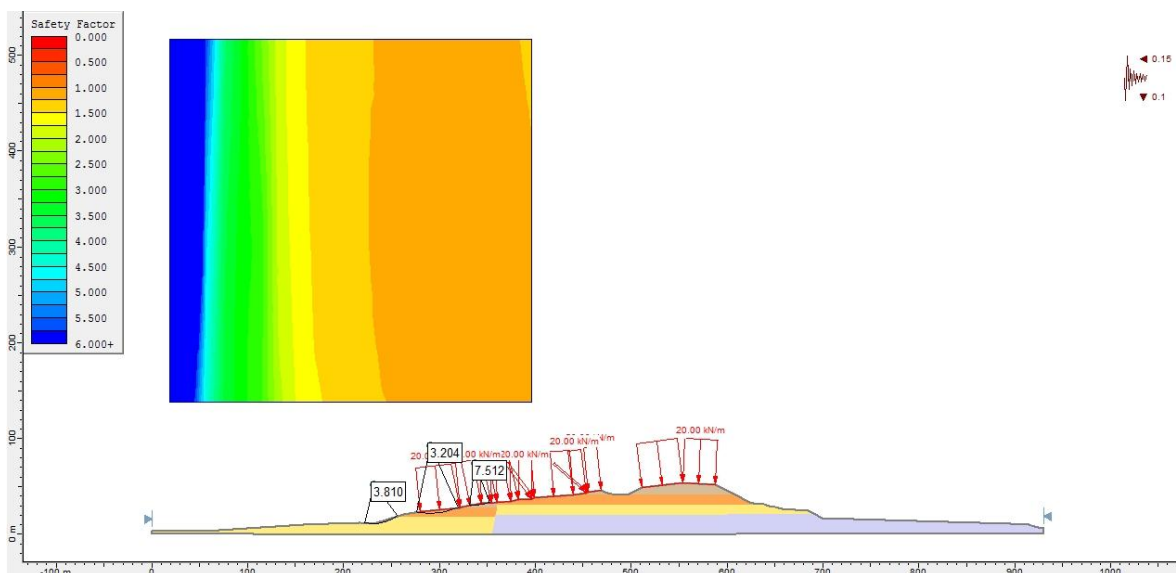
Anexo 143. Perfil 15 modelado CS-SNA -Método Ordinario



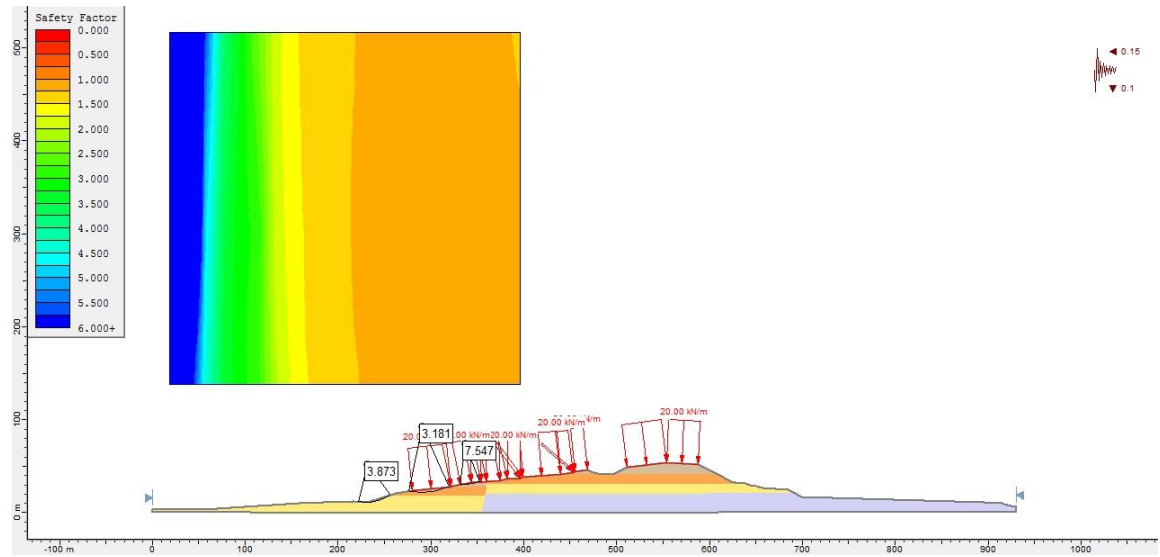
Anexo 144. Perfil 15 modelado CS-SNA -Método de Spencer



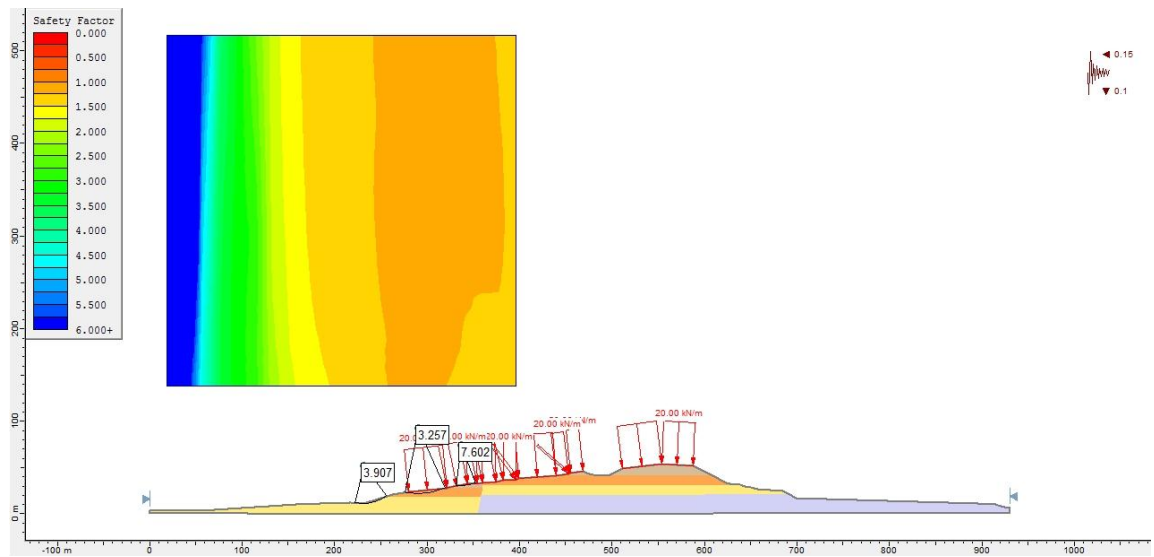
Anexo 145. Perfil A N-S modelado CS-SNA -Método de Bishop



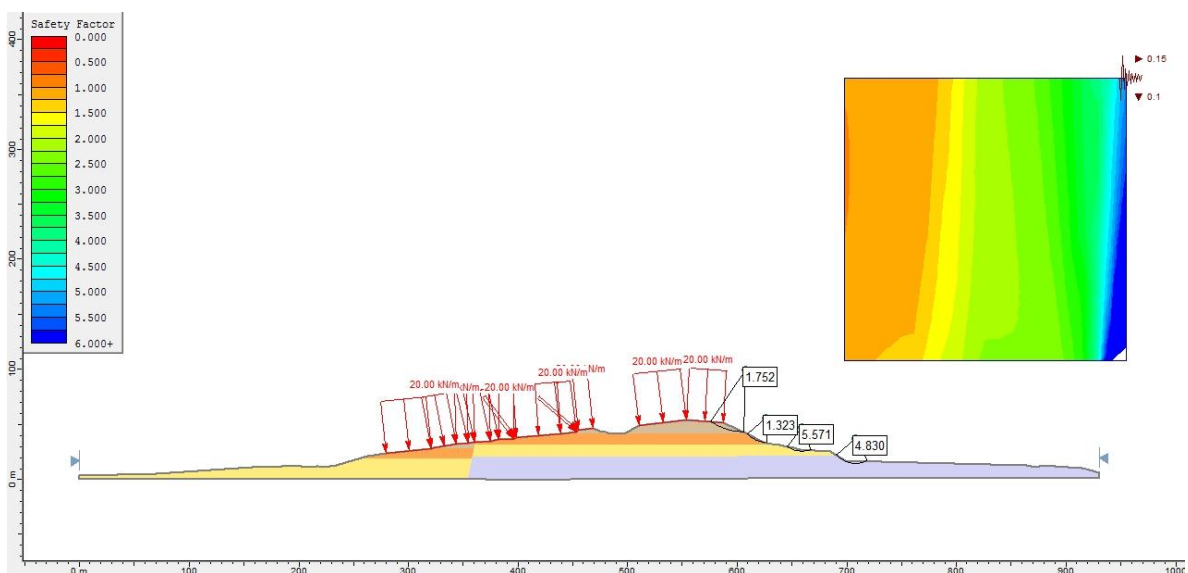
Anexo 146. Perfil A N-S modelado CS-SNA -Método de Jambu



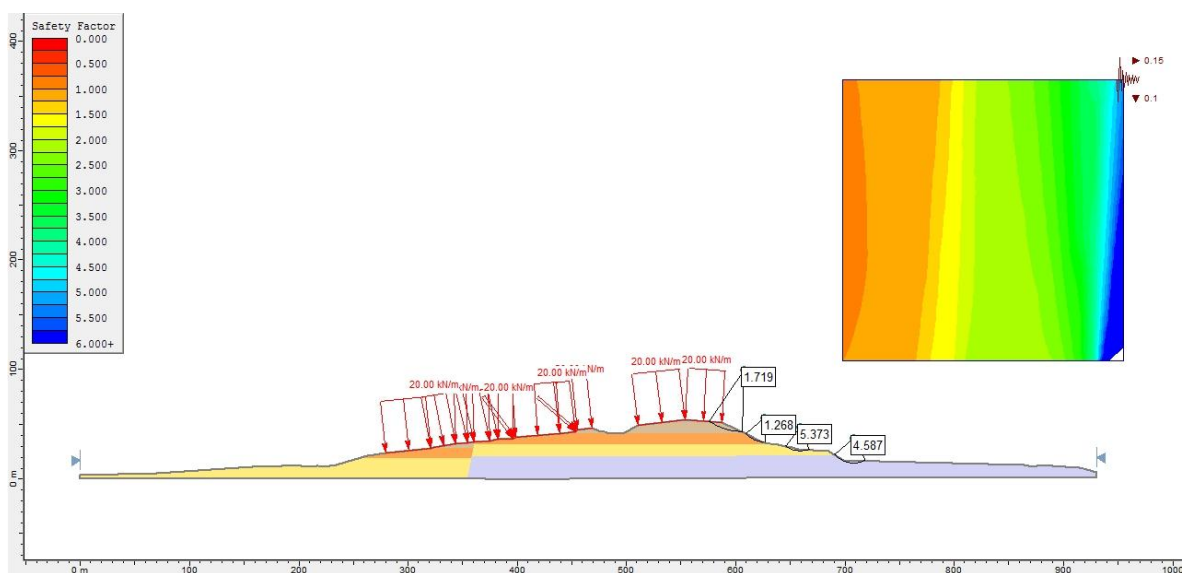
Anexo 147. Perfil A N-S modelado CS-SNA -Método Ordinario



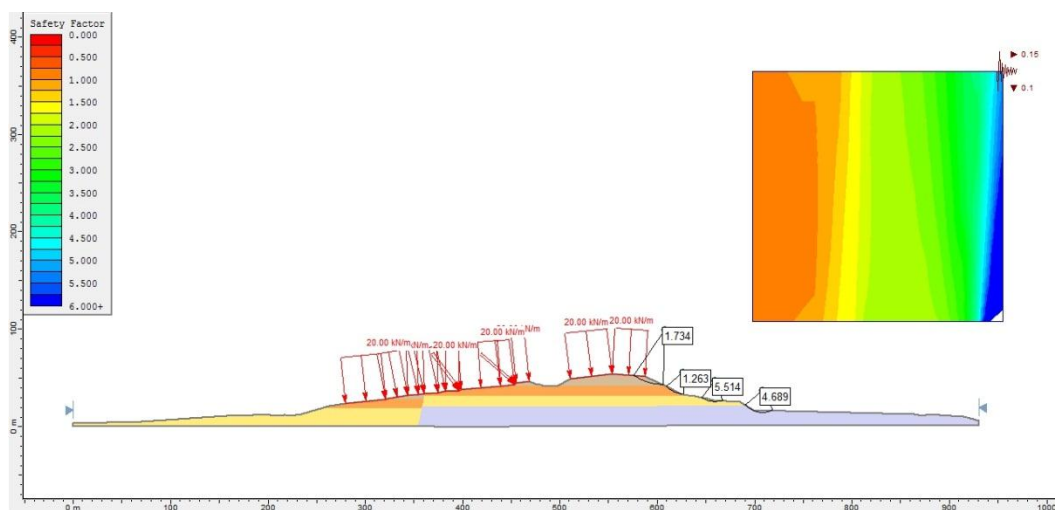
Anexo 148. Perfil A N-S modelado CS-SNA -Método de Spencer



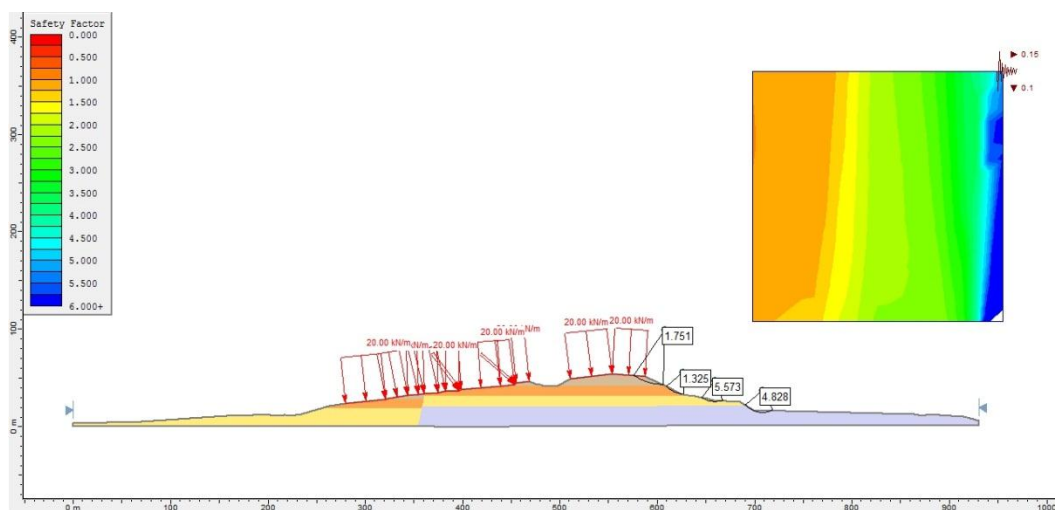
Anexo 149. Perfil A S-N modelado CS-SNA -Método de Bishop



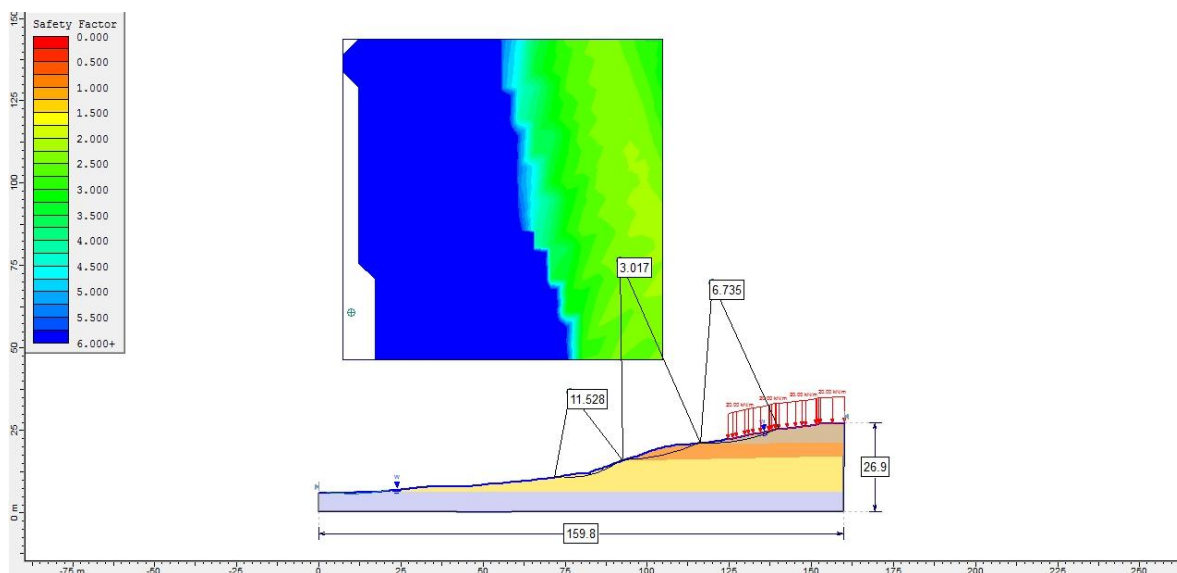
Anexo 150. Perfil A S-N modelado CS-SNA -Método de Jambu



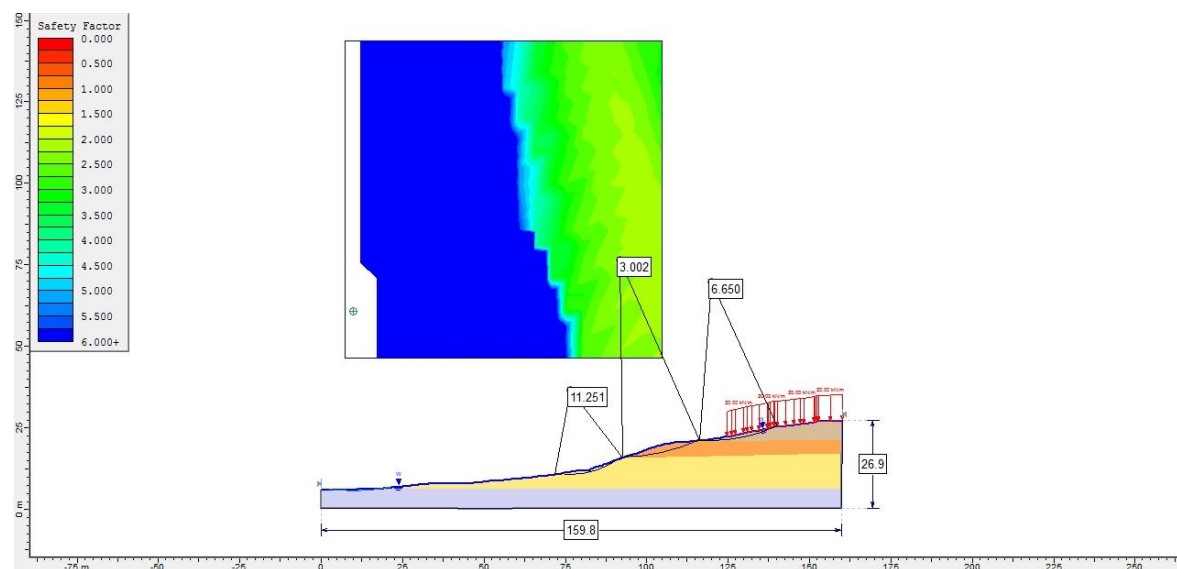
Anexo 151. Perfil A S-N modelado CS-SNA -Método Ordinario



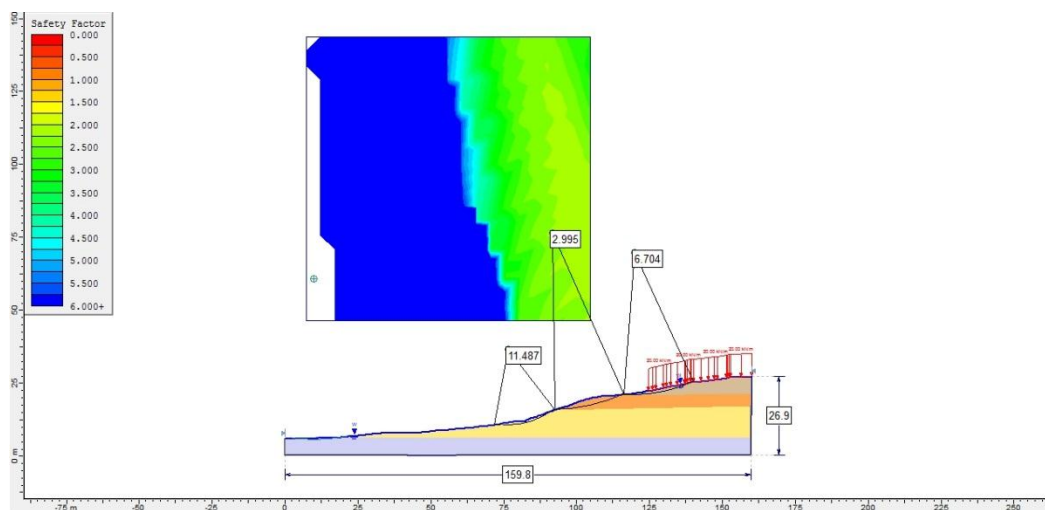
Anexo 152. Perfil A S-N modelado CS-SNA -Método de Spencer



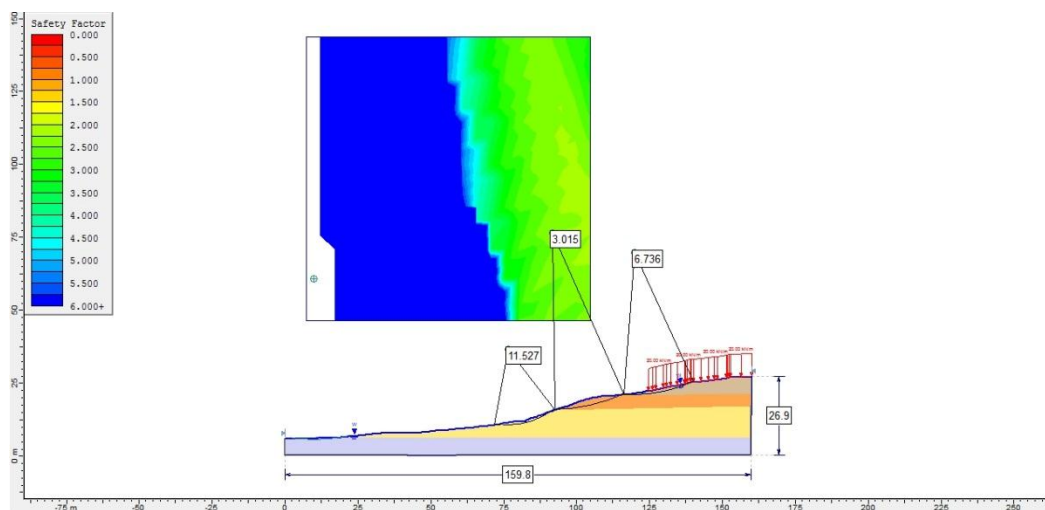
Anexo 153. Perfil 1 modelado SS-CNA -Método de Bishop



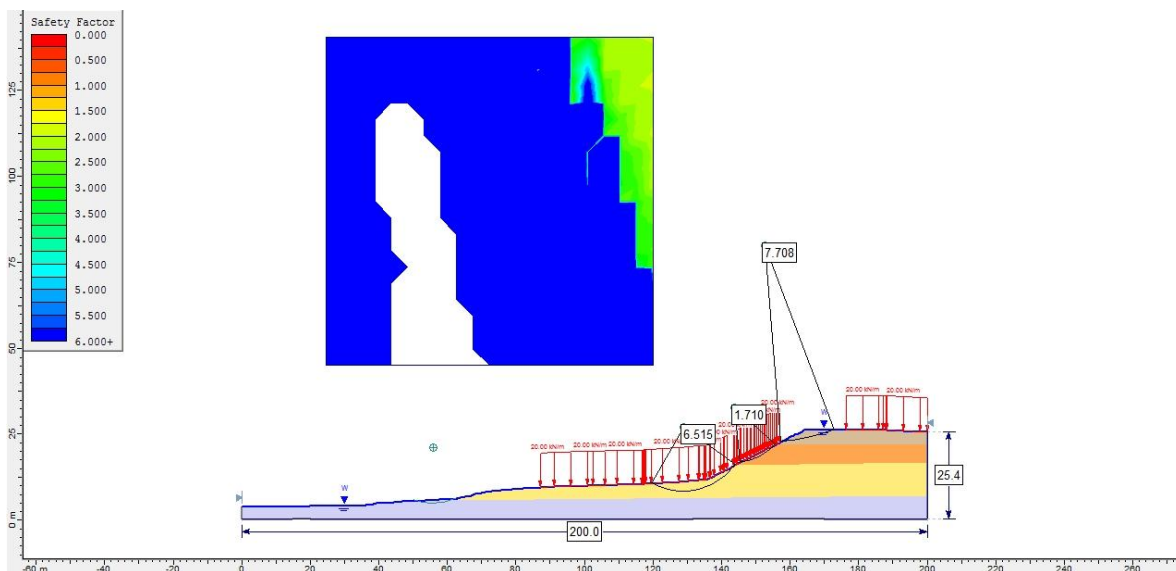
Anexo 154. Perfil 1 modelado SS-CNA-Método de Jambu



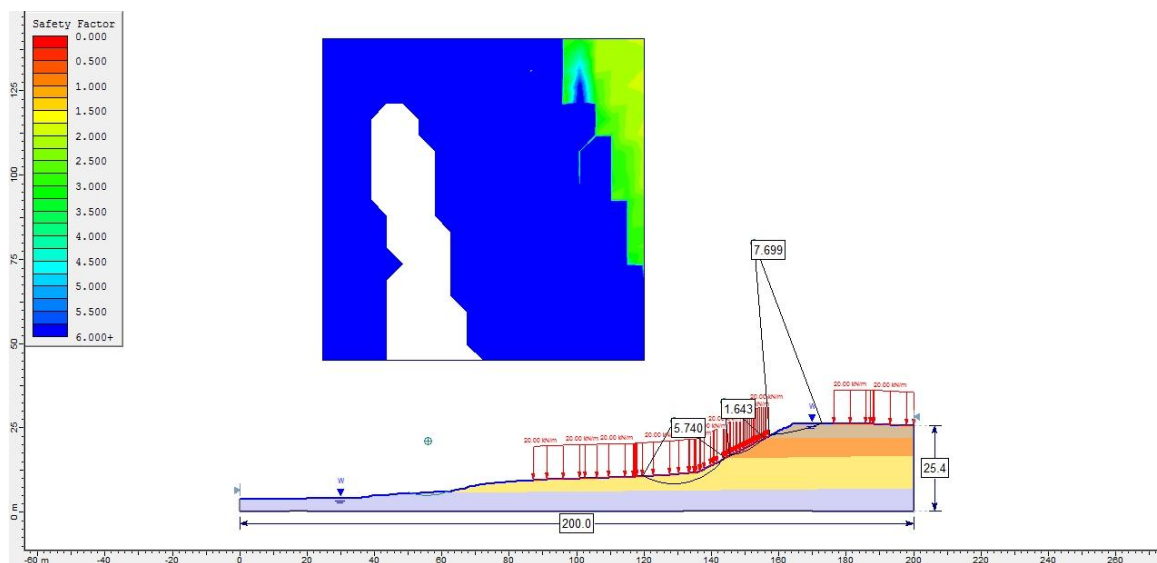
Anexo 155. Perfil 1 modelado SS-CNA -Método Ordinario



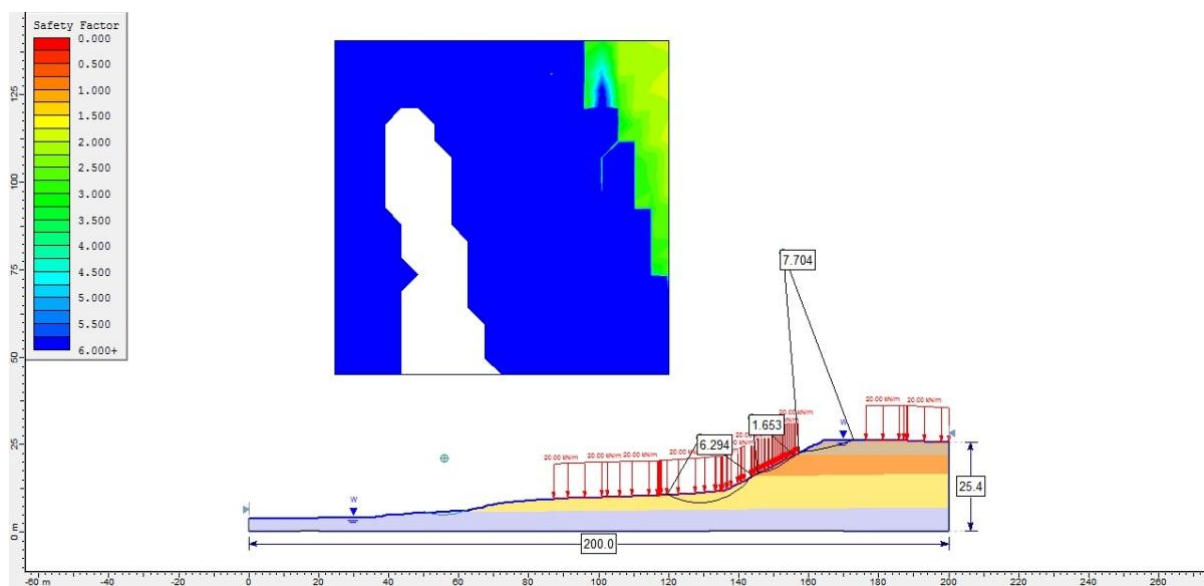
Anexo 156. Perfil 1 modelado SS-CNA -Método de Spencer



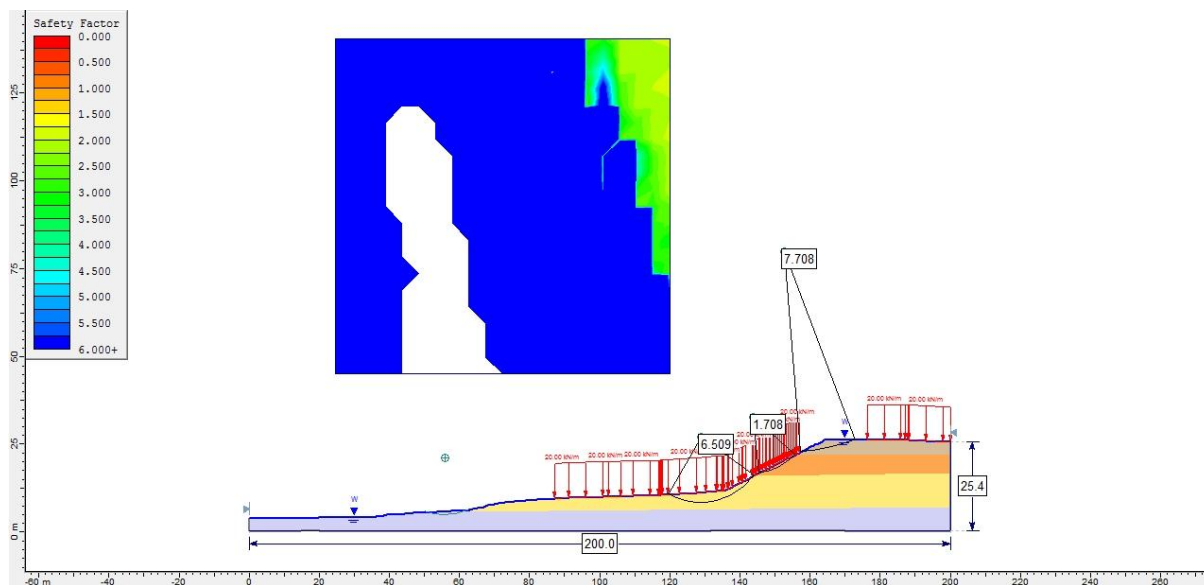
Anexo 157. Perfil 2 modelado SS-CNA -Método de Bishop



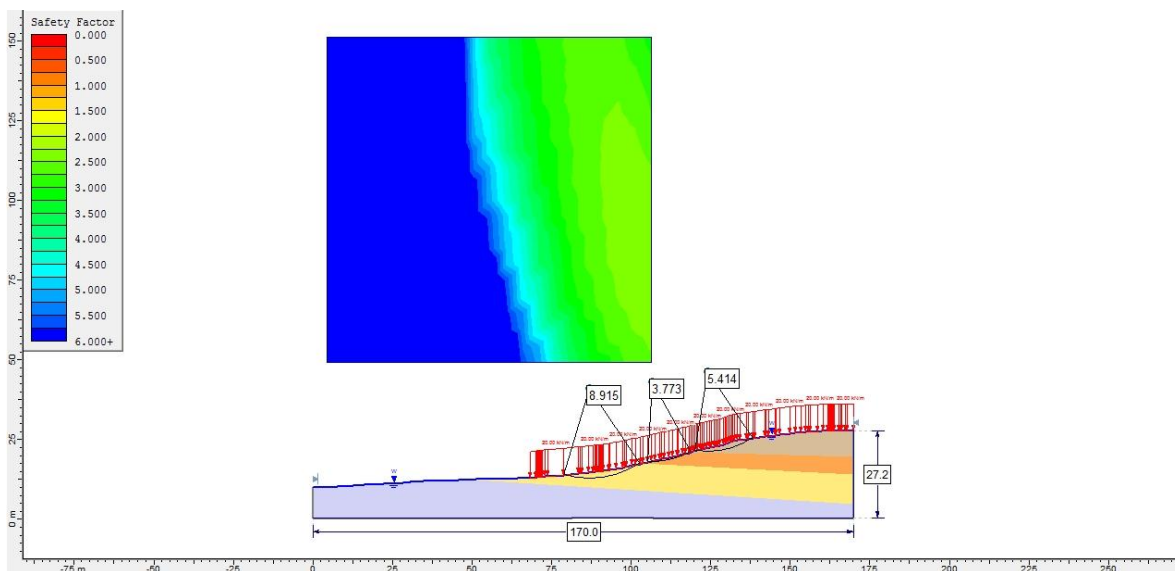
Anexo 158. Perfil 2 modelado SS-CNA -Método de Jambu



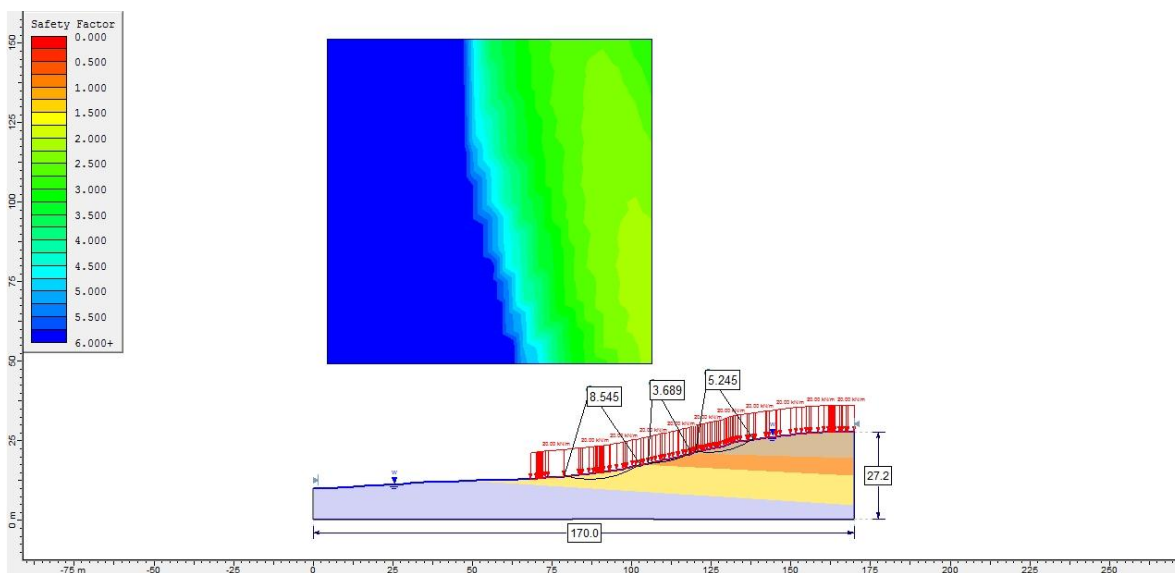
Anexo 159. Perfil 2 modelado SS-CNA -Método Ordinario



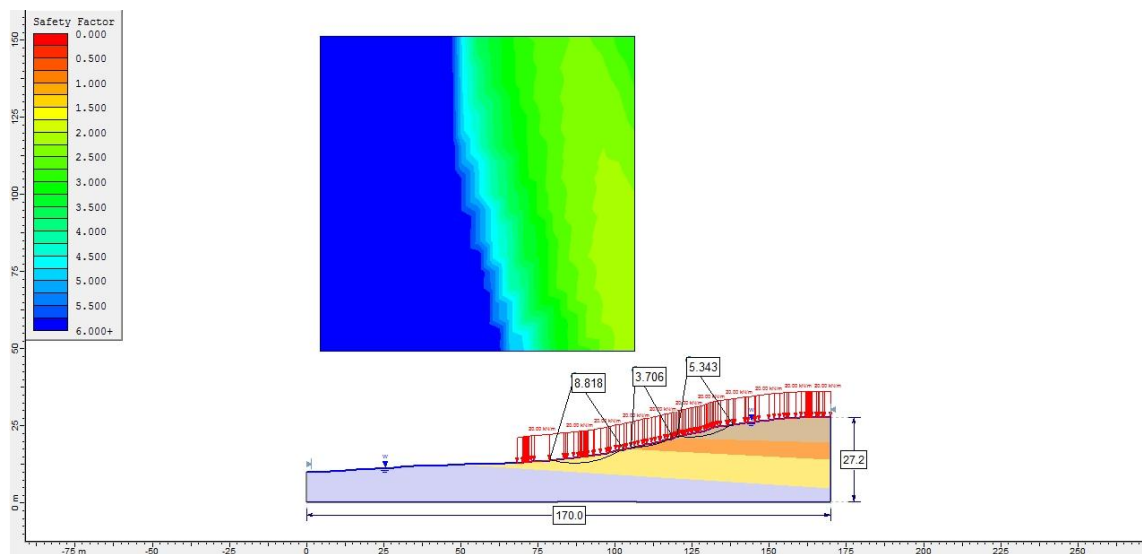
Anexo 160. Perfil 2 modelado SS-CNA -Método de Spencer



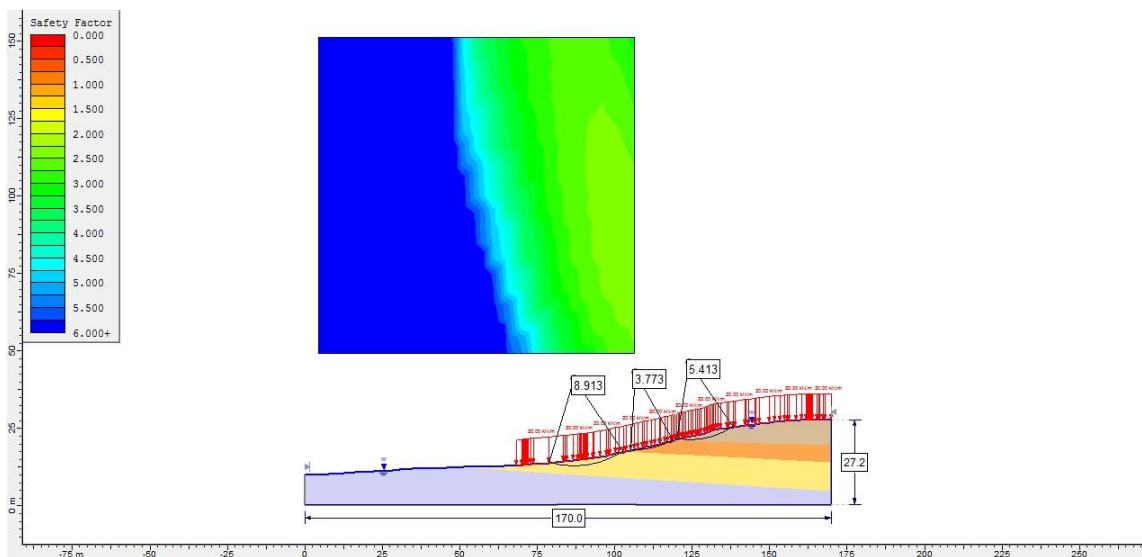
Anexo 161. Perfil 3 modelado SS-CNA -Método de Bishop



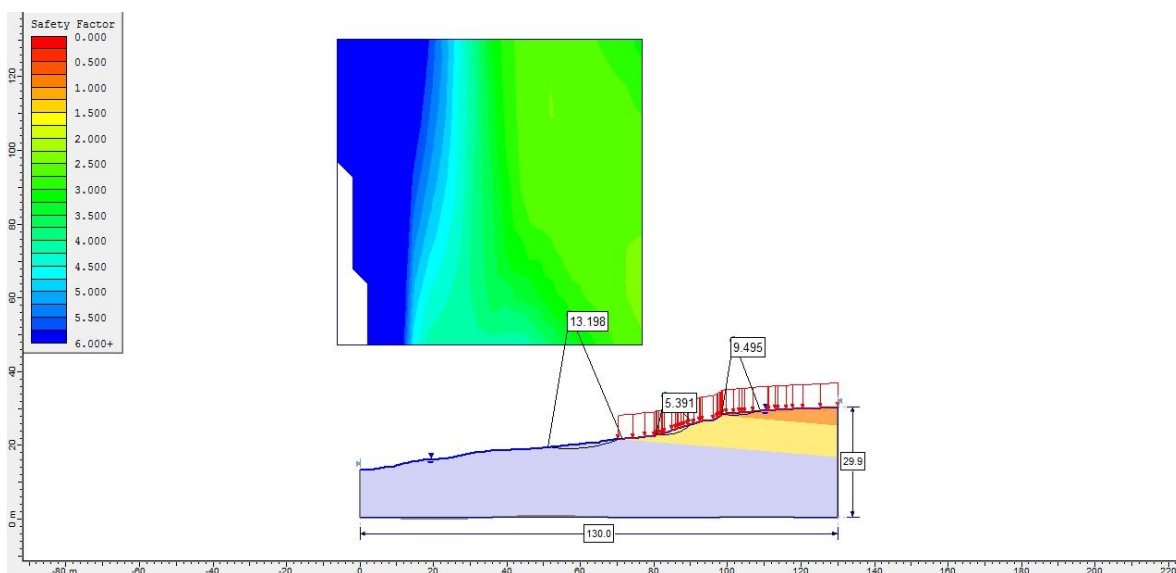
Anexo 162. Perfil 3 modelado SS-CNA -Método de Jambu



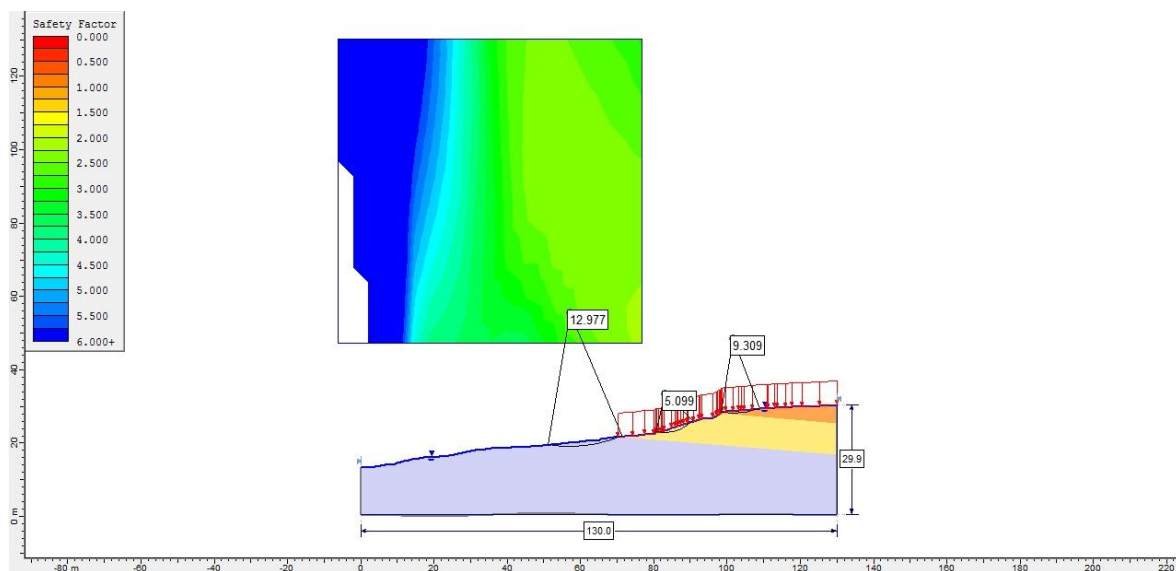
Anexo 163. Perfil 3 modelado SS-CNA -Método Ordinario



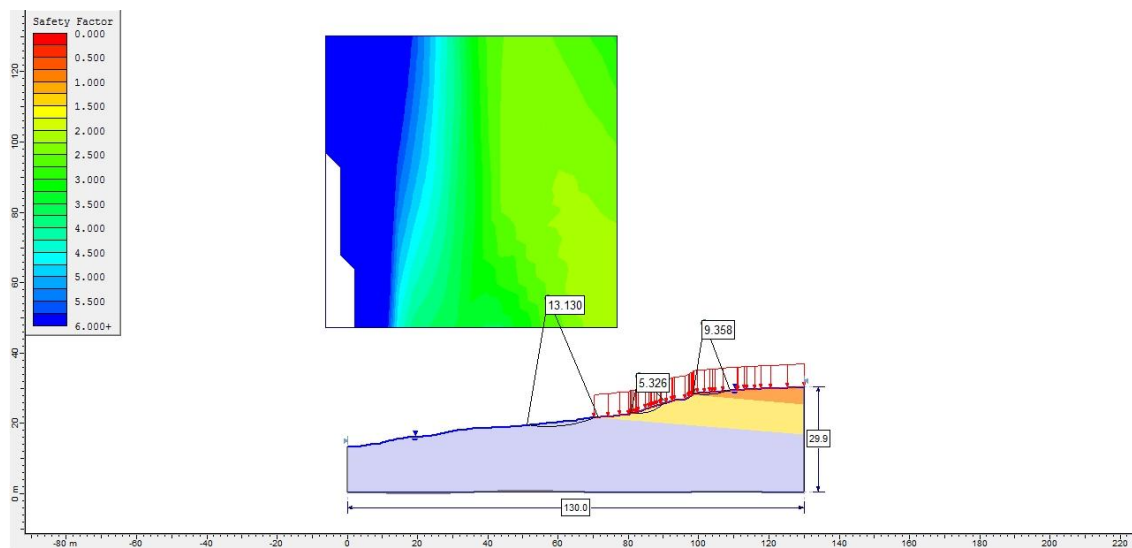
Anexo 164. Perfil 3 modelado SS-CNA -Método de Spencer



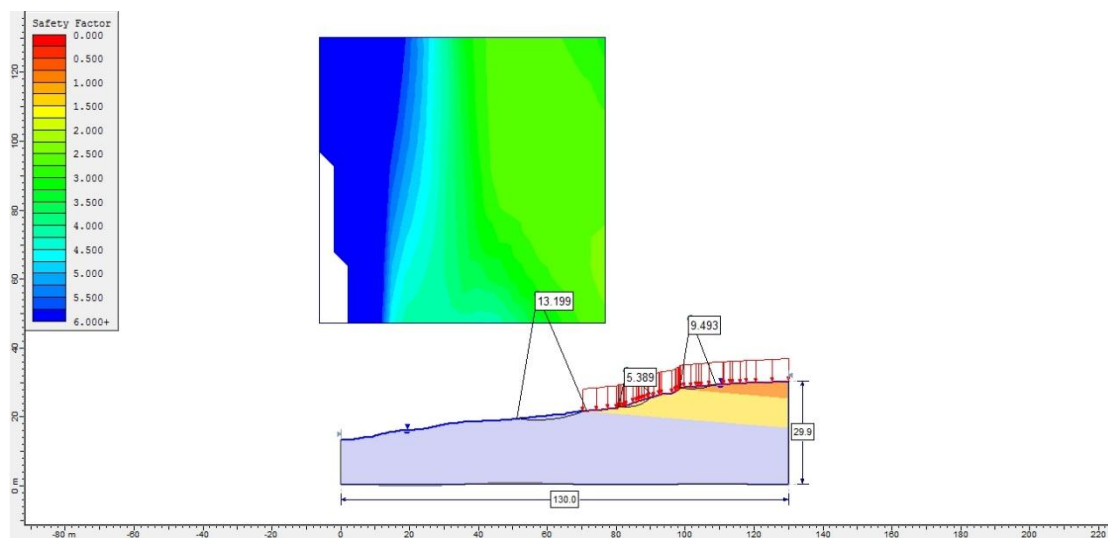
Anexo 165. Perfil 4 modelado SS-CNA -Método de Bishop



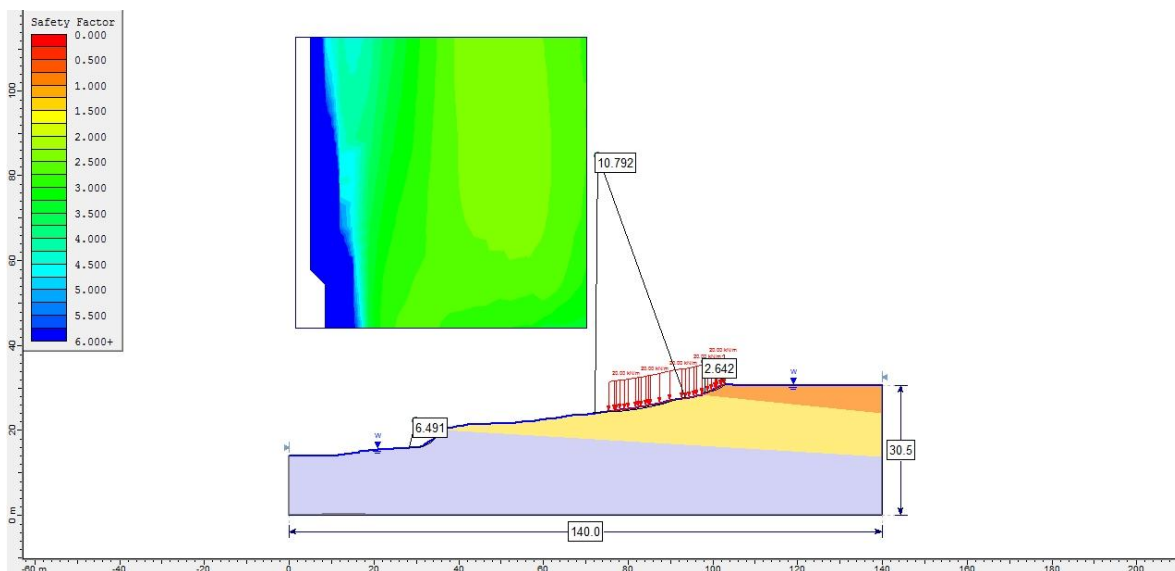
Anexo 166. Perfil 4 modelado SS-CNA -Método de Jambu



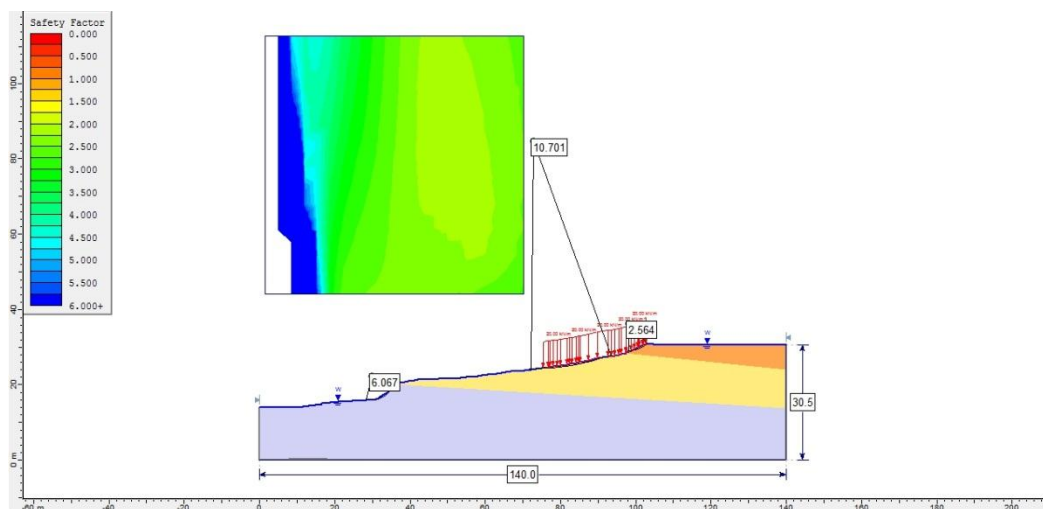
Anexo 167. Perfil 4 modelado SS-CNA -Método Ordinario



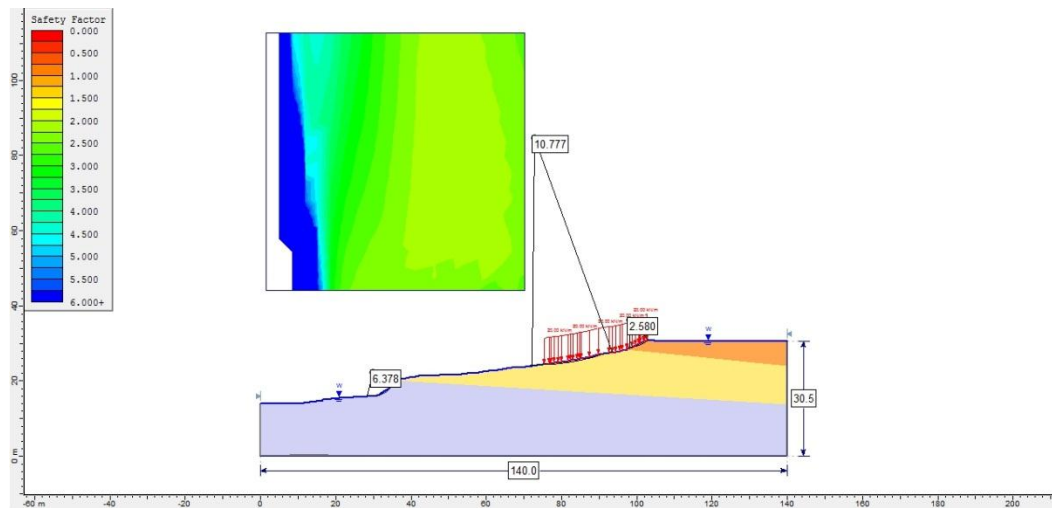
Anexo 168. Perfil 4 modelado SS-CNA -Método de Spencer



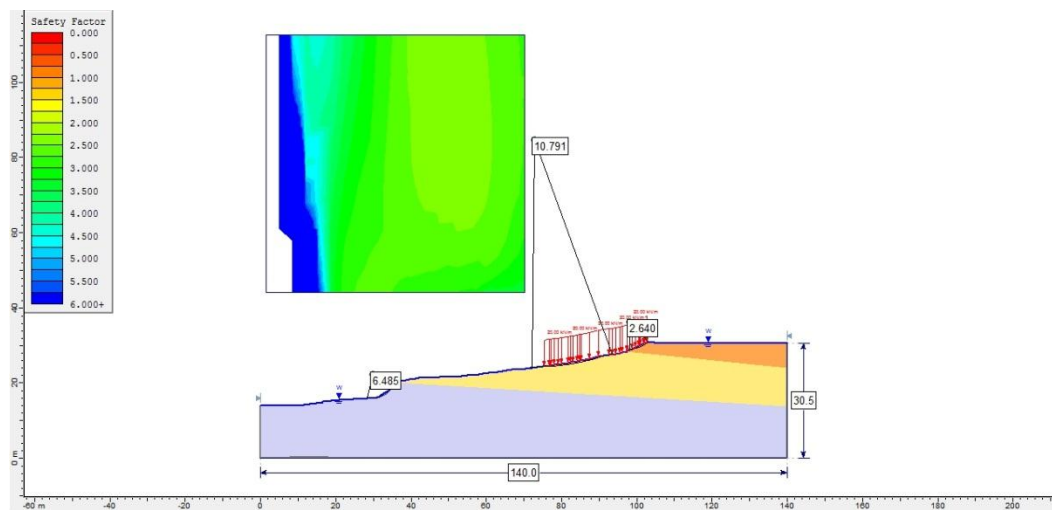
Anexo 169. Perfil 5 modelado SS-CNA -Método de Bishop



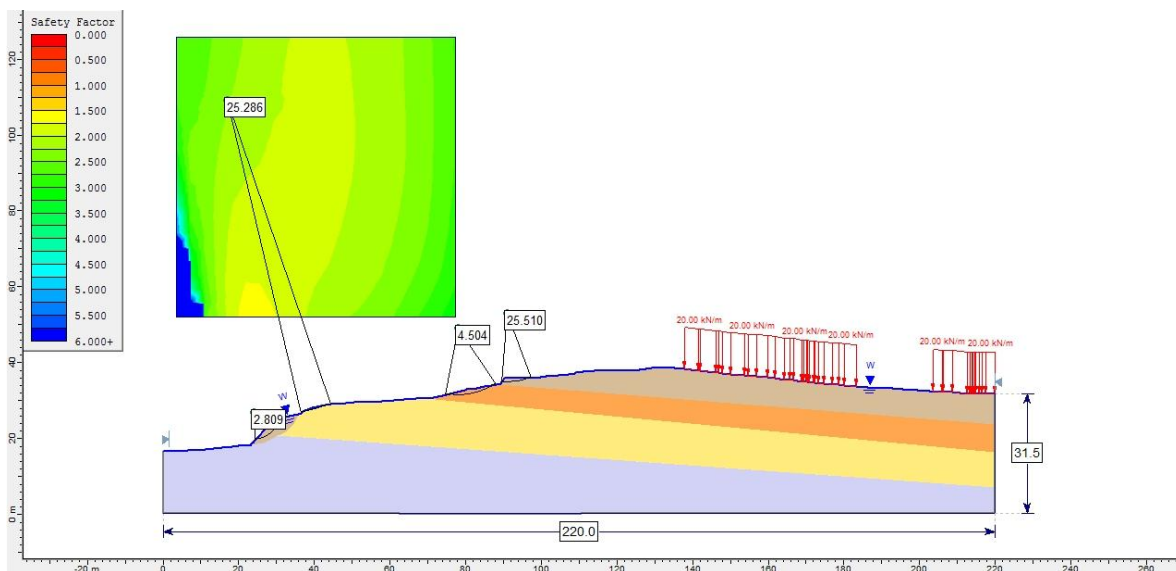
Anexo 170. Perfil 5 modelado SS-CNA -Método de Jambu



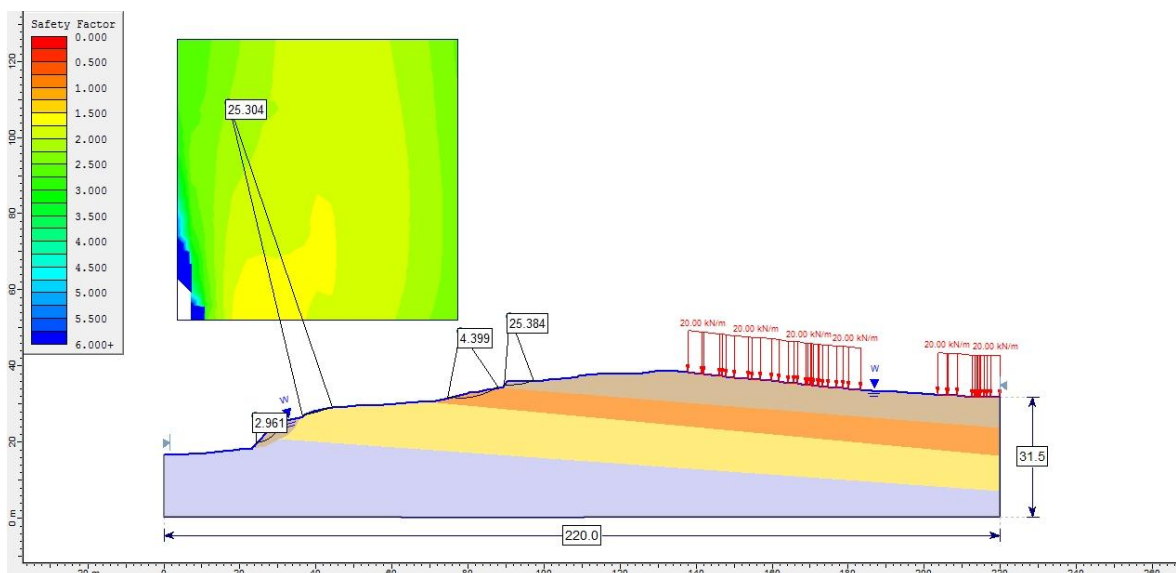
Anexo 171. Perfil 5 modelado SS-CNA -Método Ordinario



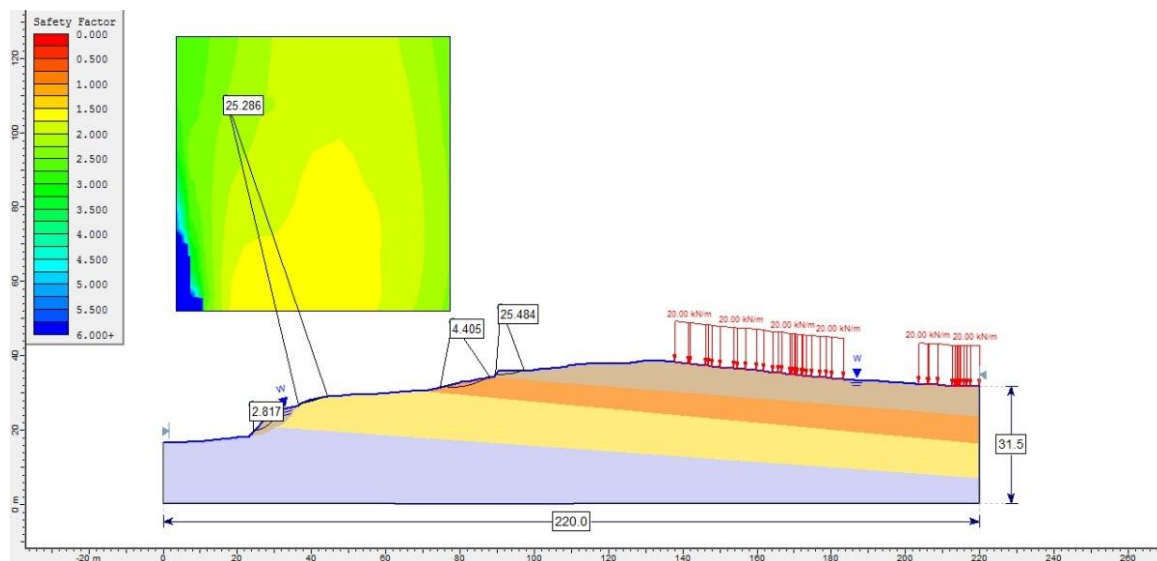
Anexo 172. Perfil 5 modelado SS-CNA -Método de Spencer



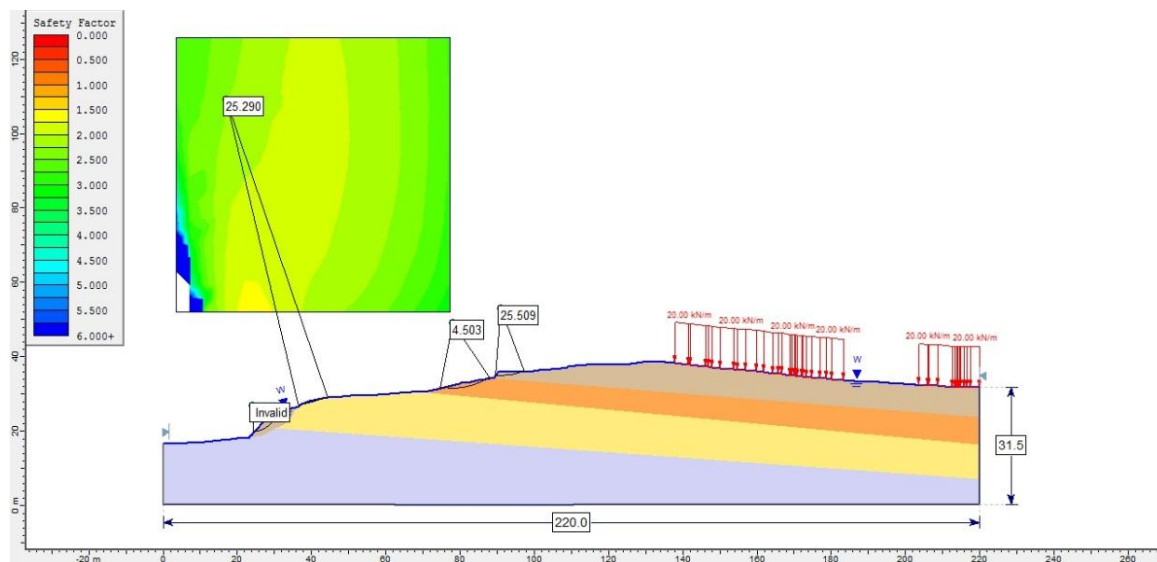
Anexo 173. Perfil 6 modelado SS-CNA -Método de Bishop



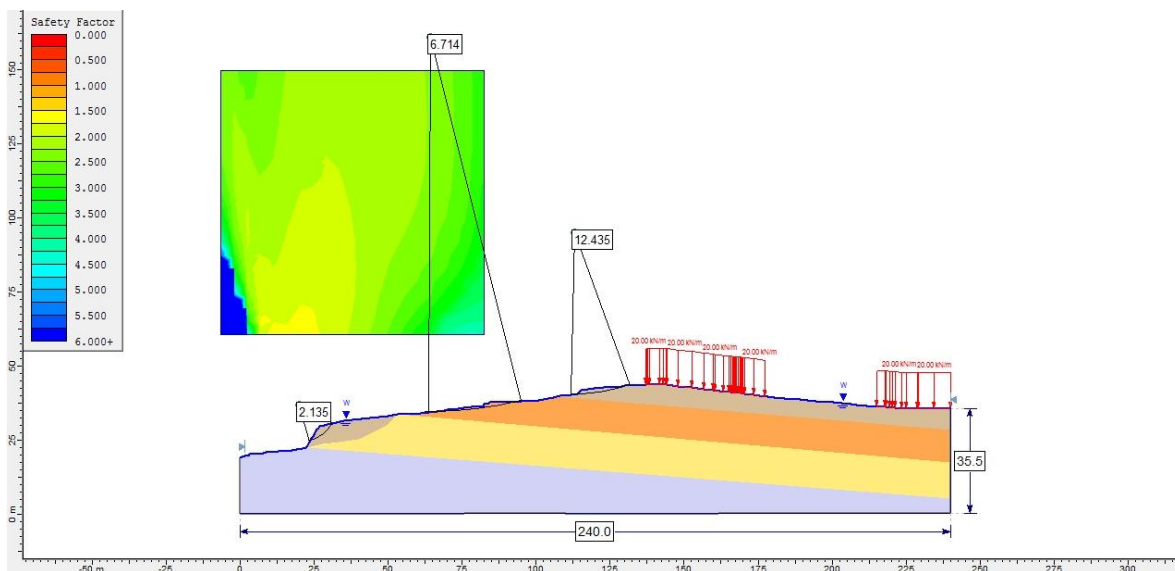
Anexo 174. Perfil 6 modelado SS-CNA -Método de Jambu



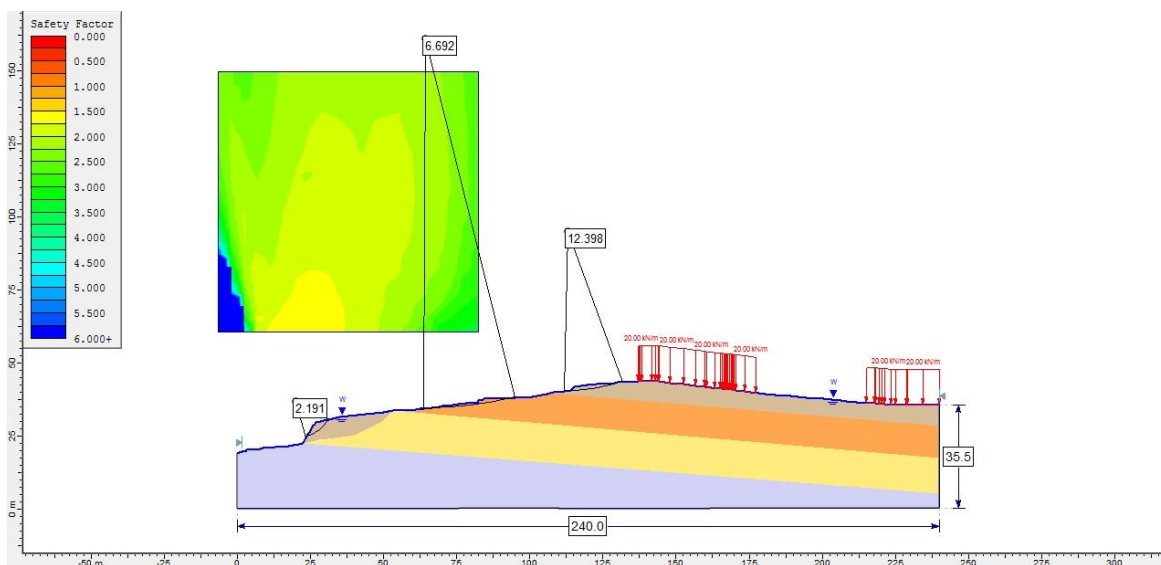
Anexo 175. Perfil 6 modelado SS-CNA -Método Ordinario



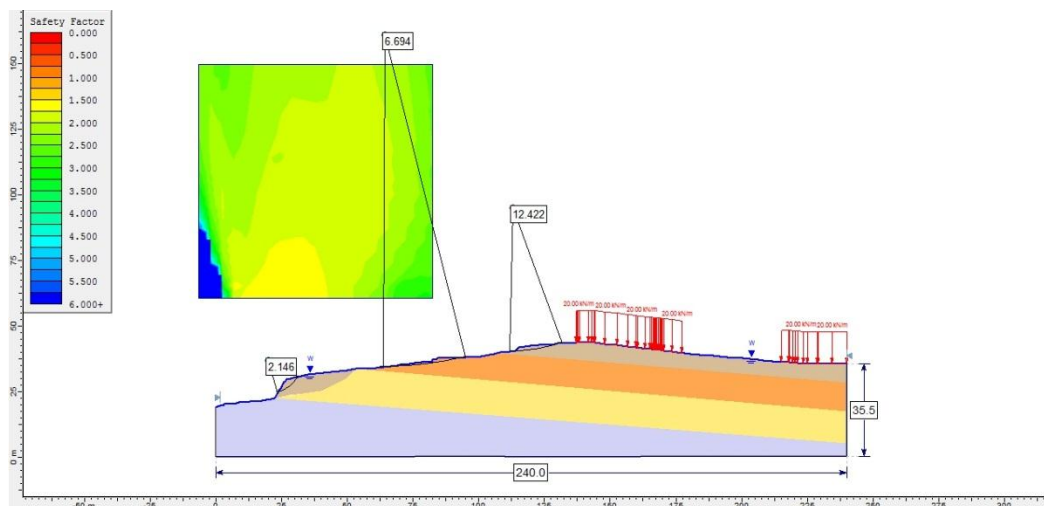
Anexo 176. Perfil 6 modelado SS-CNA -Método de Spencer



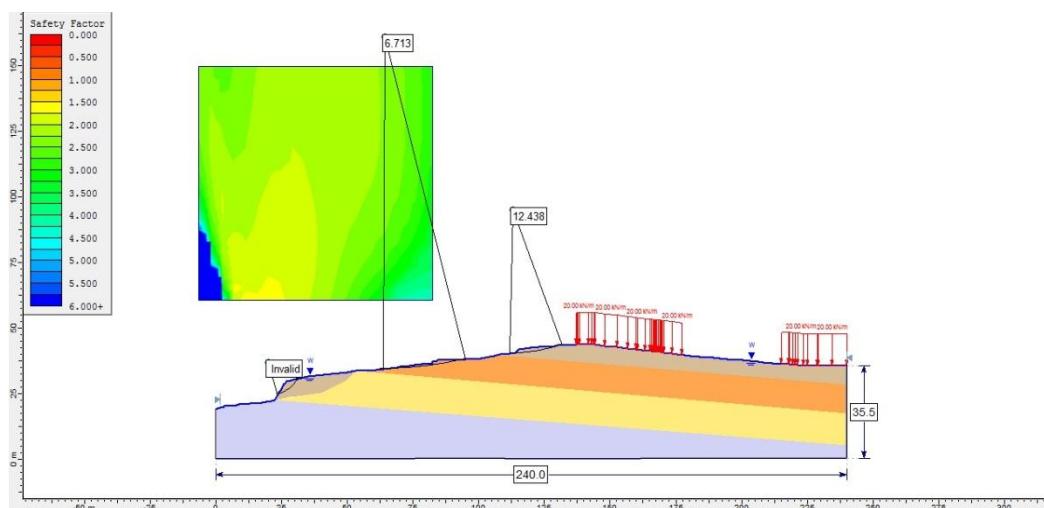
Anexo 177. Perfil 7 modelado SS-CNA -Método de Bishop



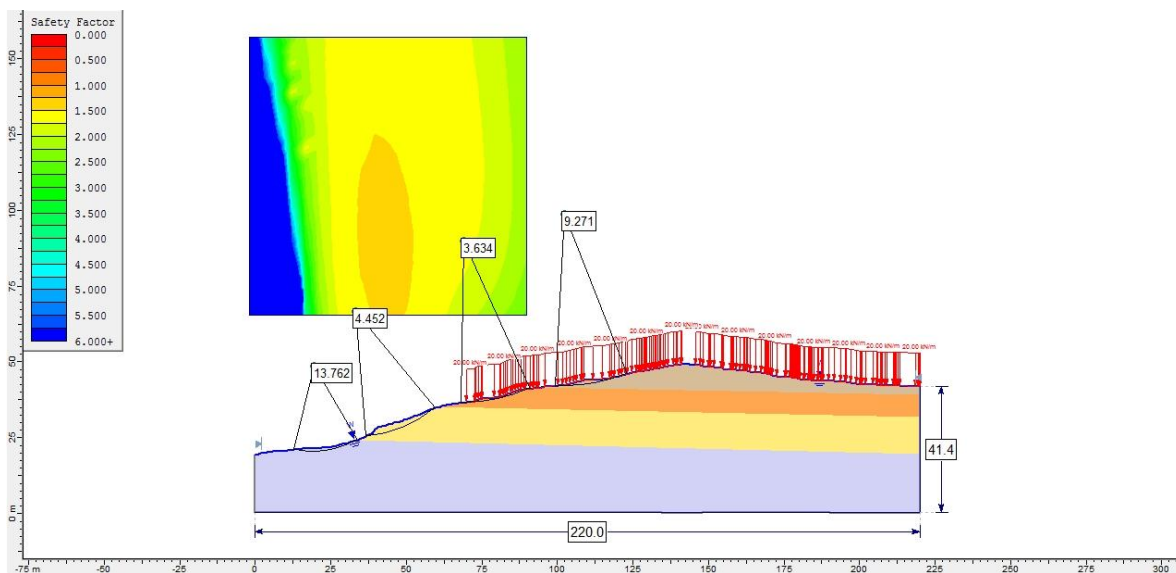
Anexo 178. Perfil 7 modelado SS-CNA -Método de Jambu



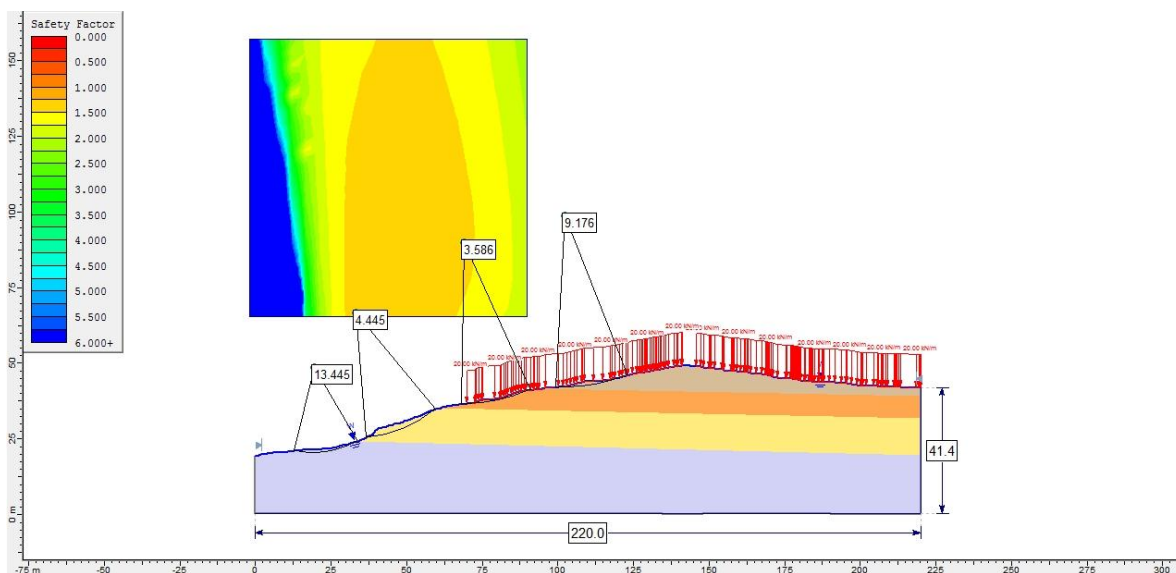
Anexo 179. Perfil 7 modelado SS-CNA -Método Ordinario



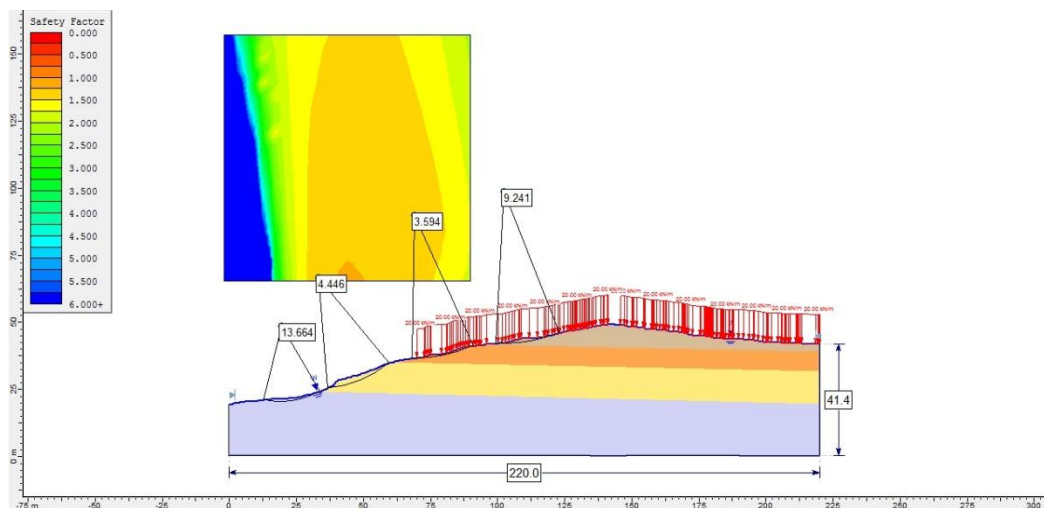
Anexo 180. Perfil 7 modelado SS-CNA -Método de Spencer



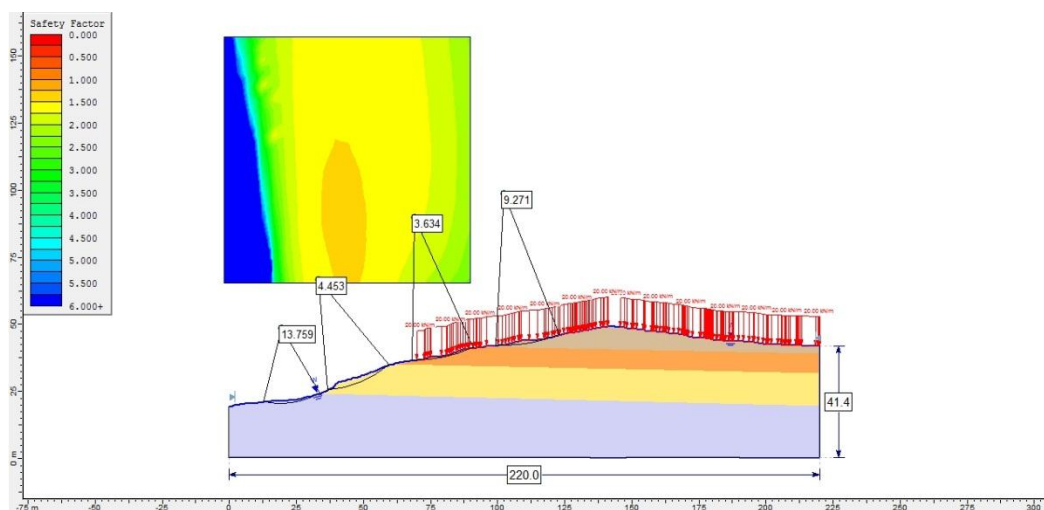
Anexo 181. Perfil 8 modelado SS-CNA -Método de Bishop



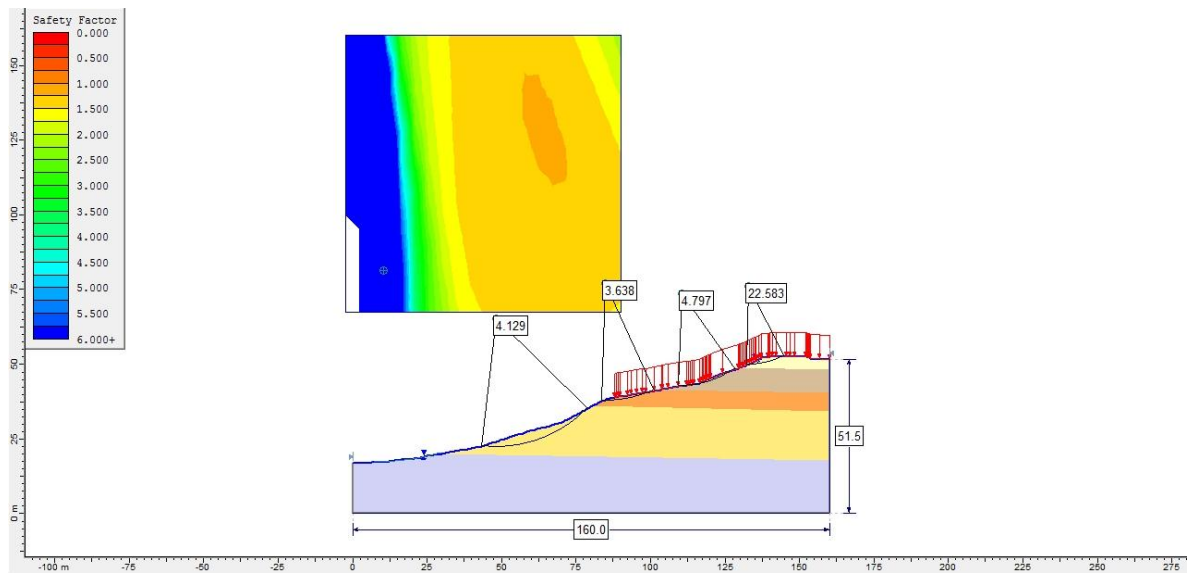
Anexo 182. Perfil 8 modelado SS-CNA -Método de Jambu



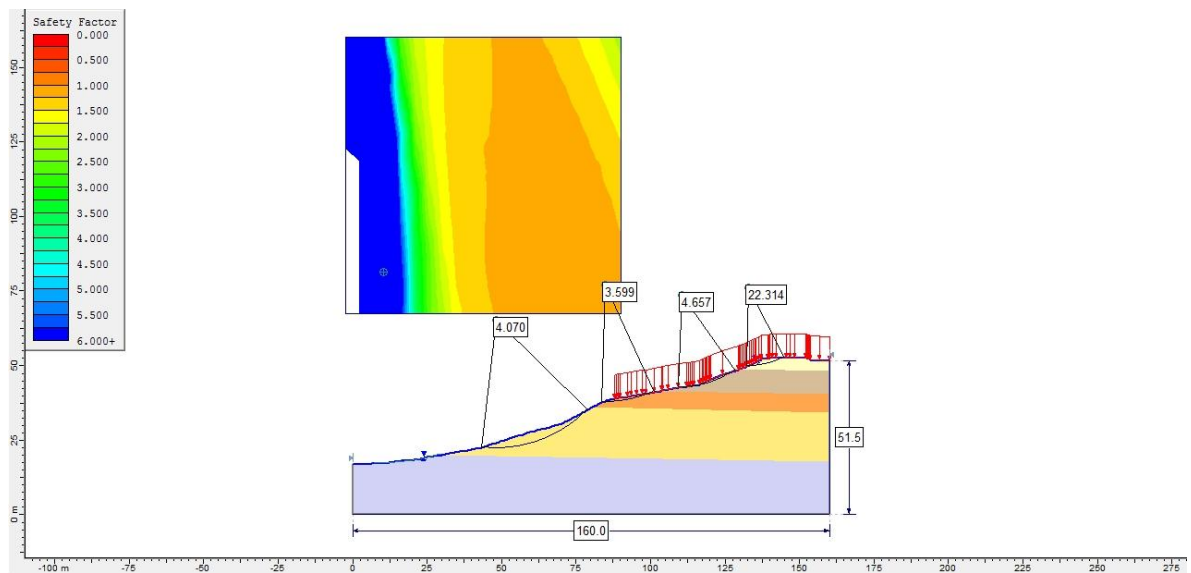
Anexo 183. Perfil 8 modelado SS-CNA -Método Ordinario



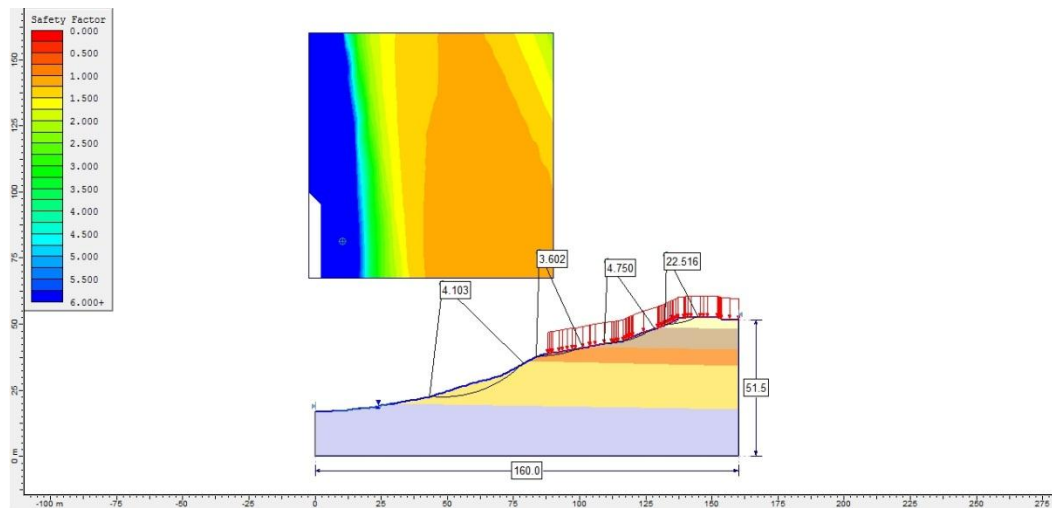
Anexo 184. Perfil 8 modelado SS-CNA -Método de Spencer



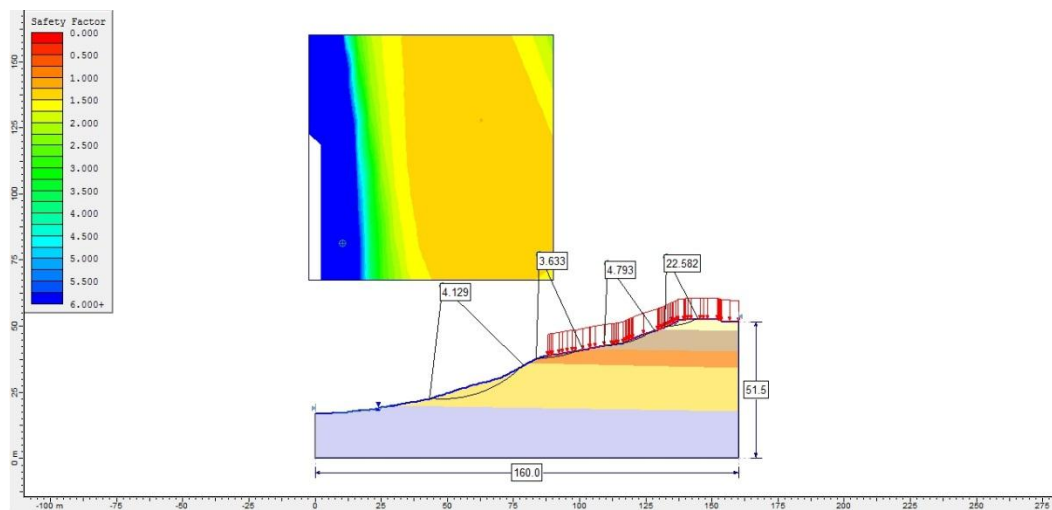
Anexo 185. Perfil 9 modelado SS-CNA -Método de Bishop



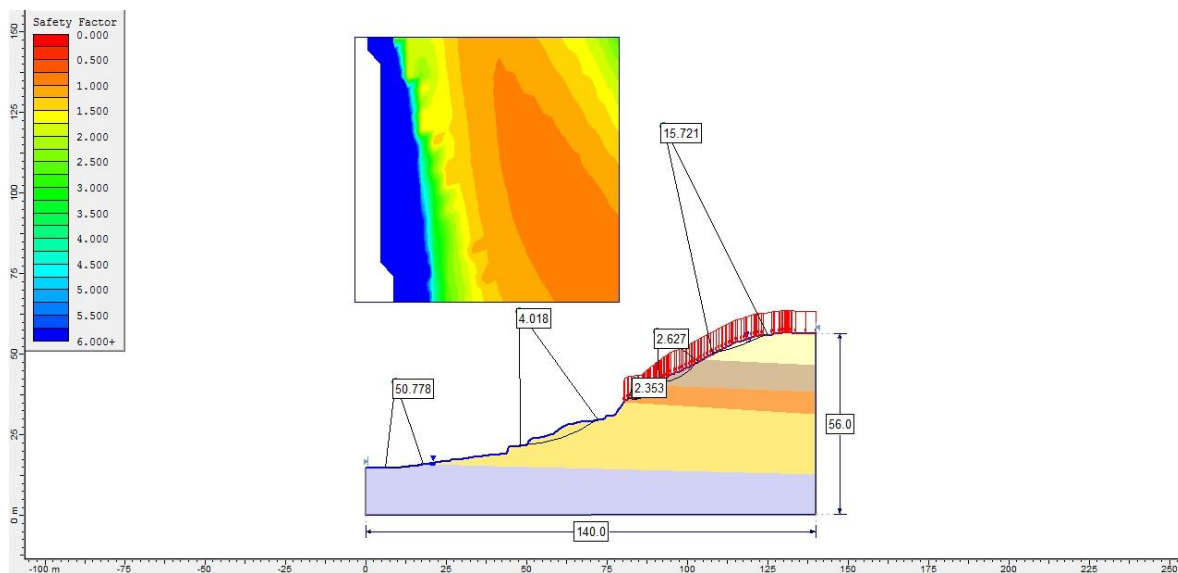
Anexo 186. Perfil 9 modelado SS-CNA -Método de Jambu



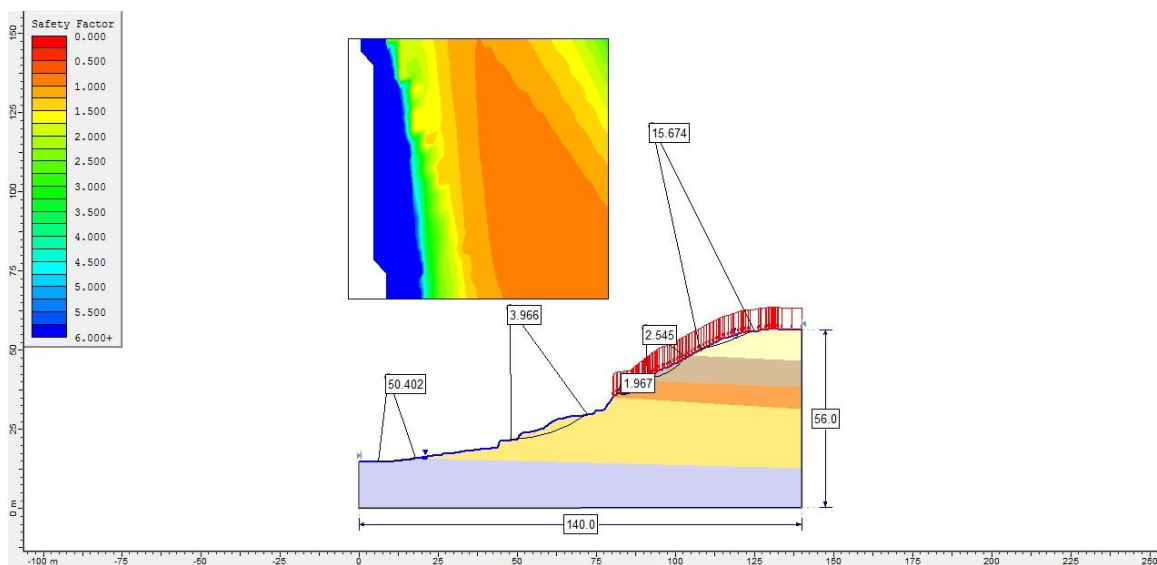
Anexo 187. Perfil 9 modelado SS-CNA -Método Ordinario



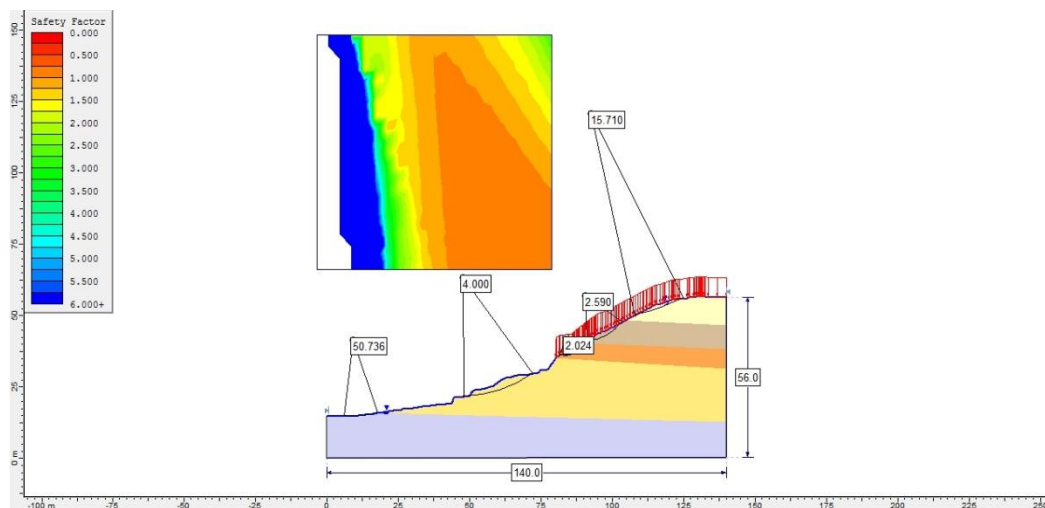
Anexo 188. Perfil 9 modelado SS-CNA -Método de Spencer



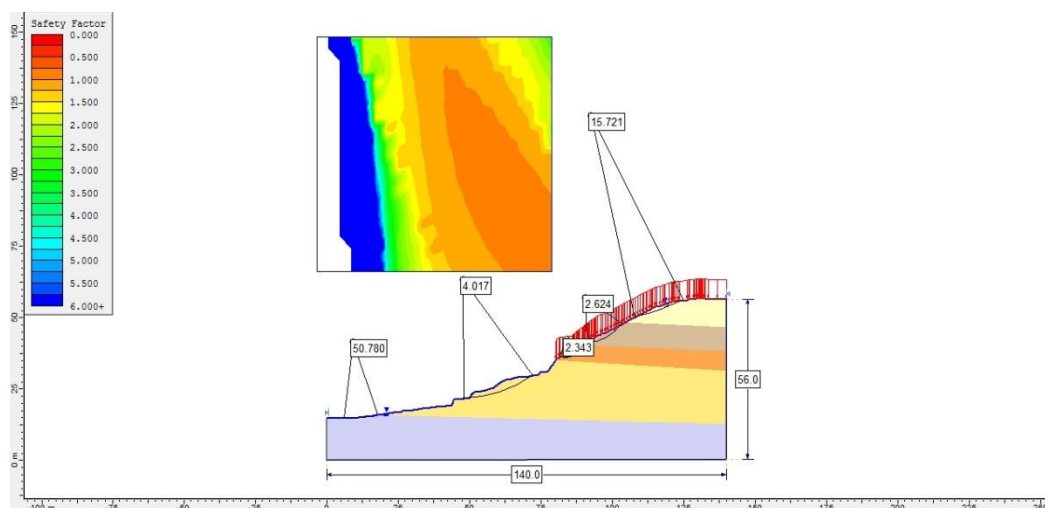
Anexo 189. Perfil 10 modelado SS-CNA -Método de Bishop



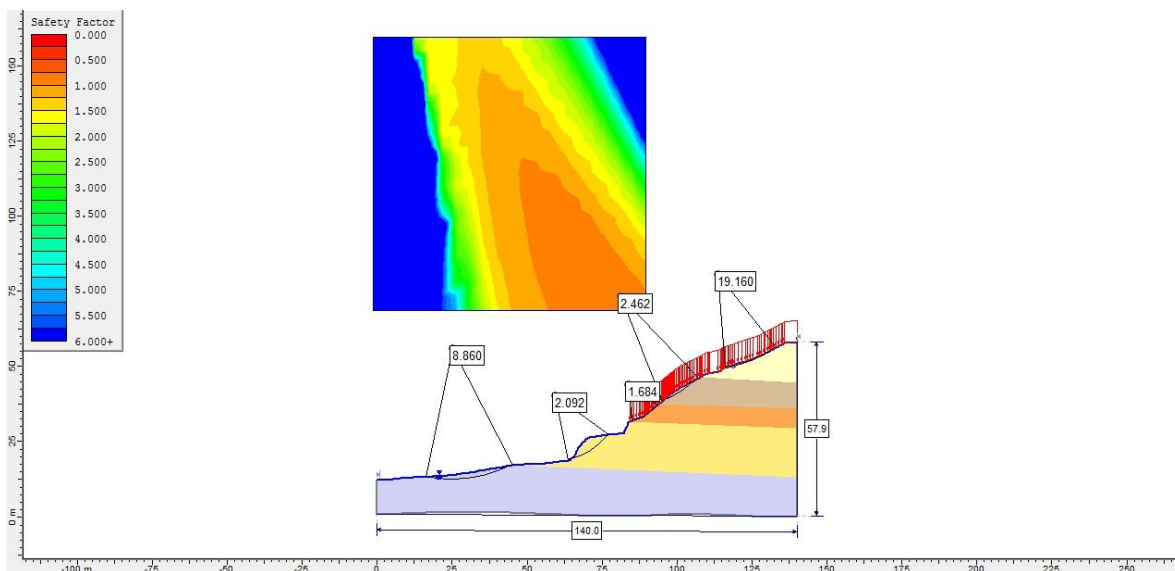
Anexo 190. Perfil 10 modelado SS-CNA -Método de Jambu



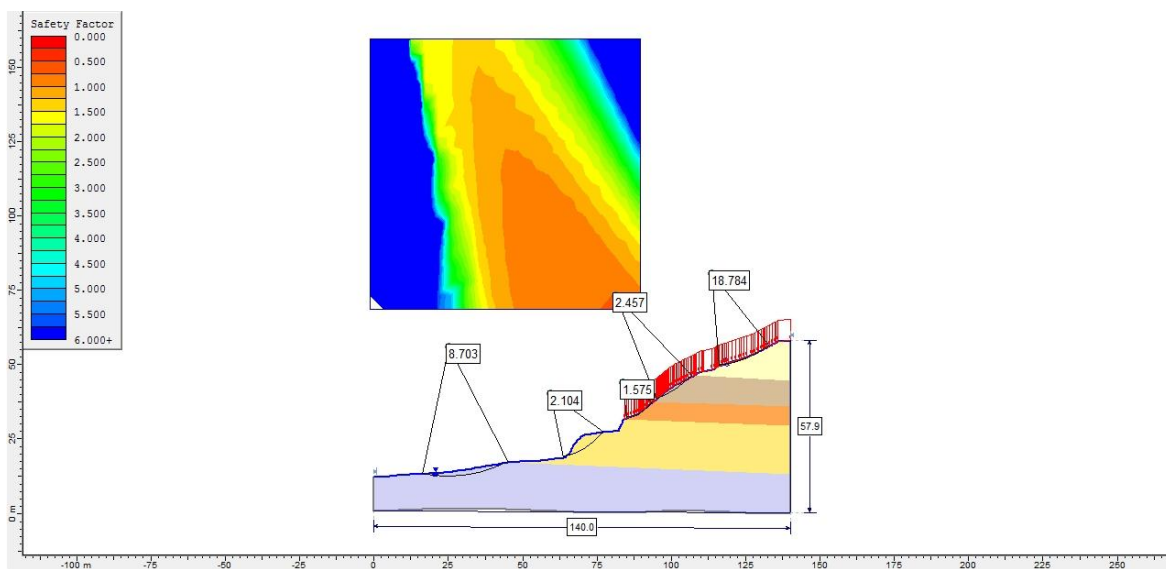
Anexo 191. Perfil 10 modelado SS-CNA -Método Ordinario



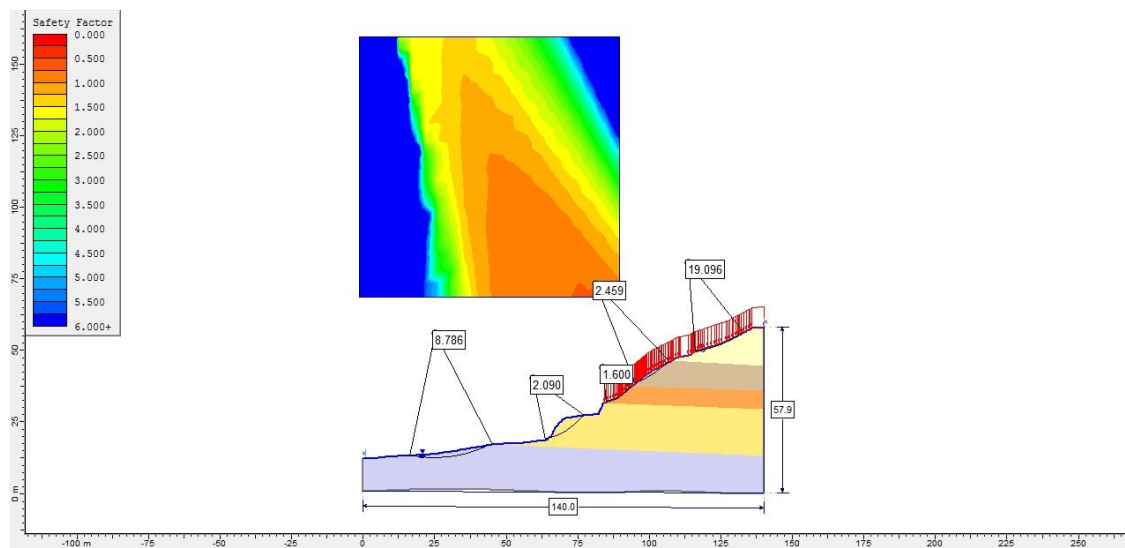
Anexo 192. Perfil 10 modelado SS-CNA -Método de Spencer



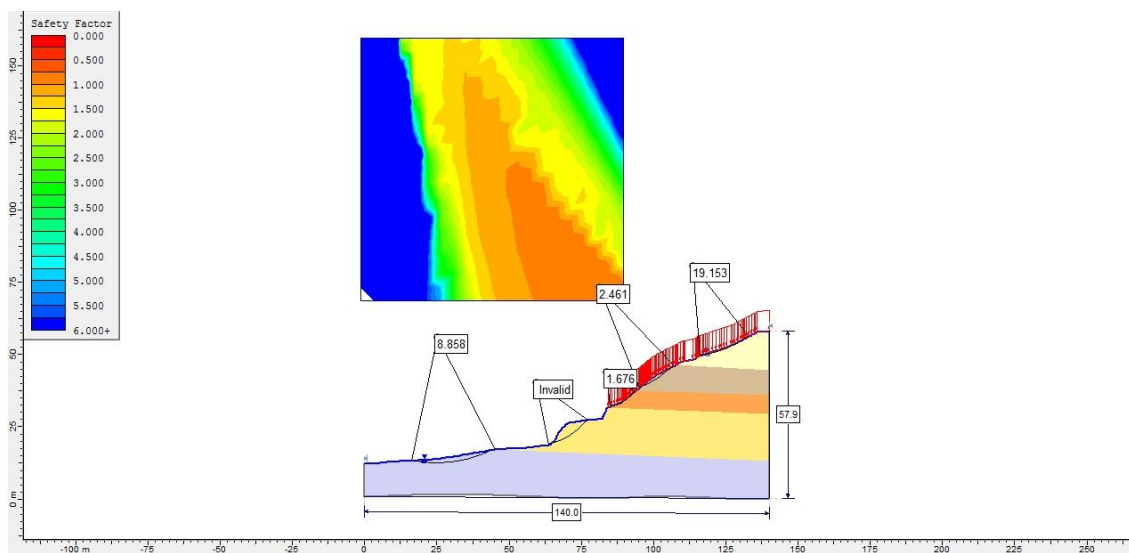
Anexo 193. Perfil 11 modelado SS-CNA -Método de Bishop



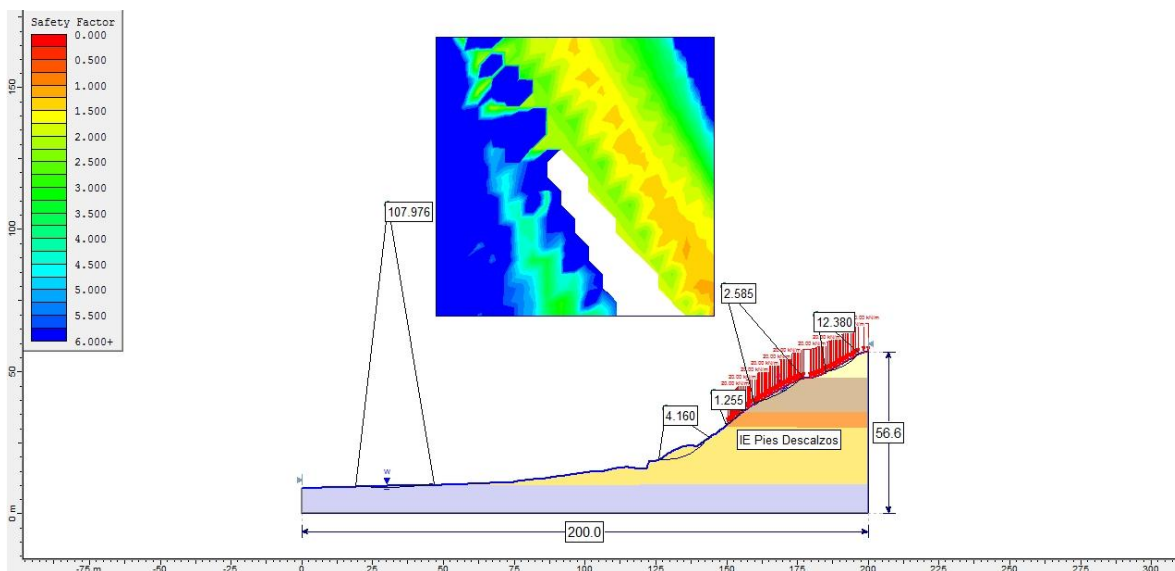
Anexo 194. Perfil 11 modelado SS-CNA -Método de Jambu



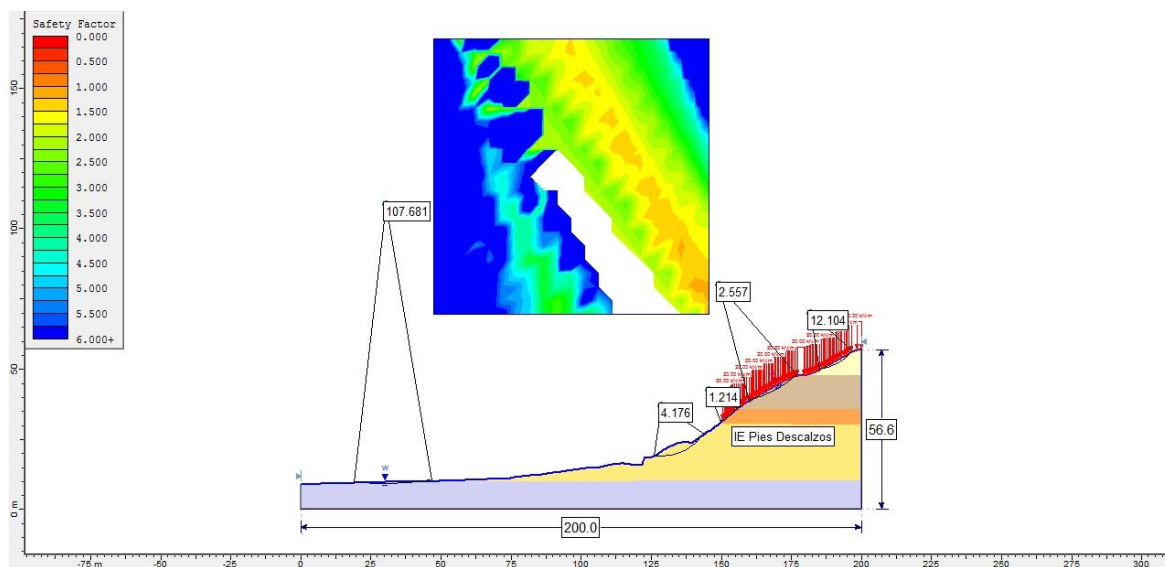
Anexo 195. Perfil 11 modelado SS-CNA -Método Ordinario



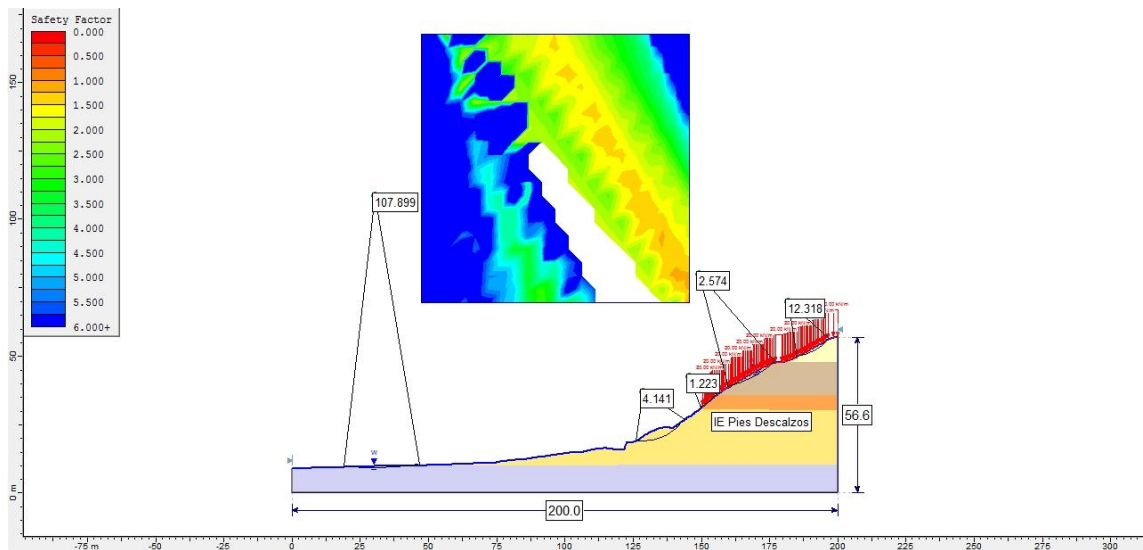
Anexo 196. Perfil 11 modelado SS-CNA -Método de Spencer



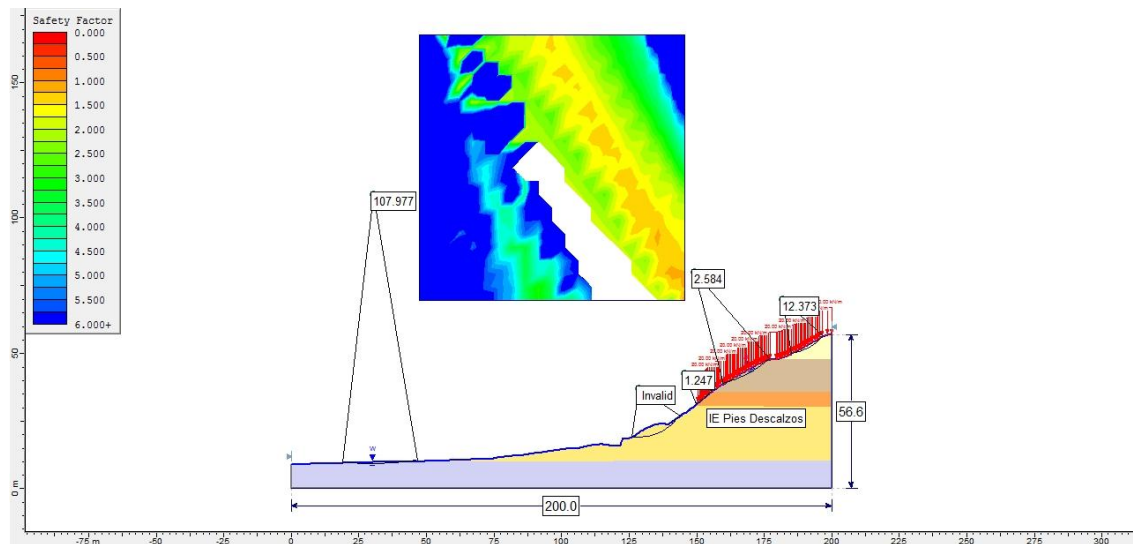
Anexo 197. Perfil 12 modelado SS-CNA -Método de Bishop



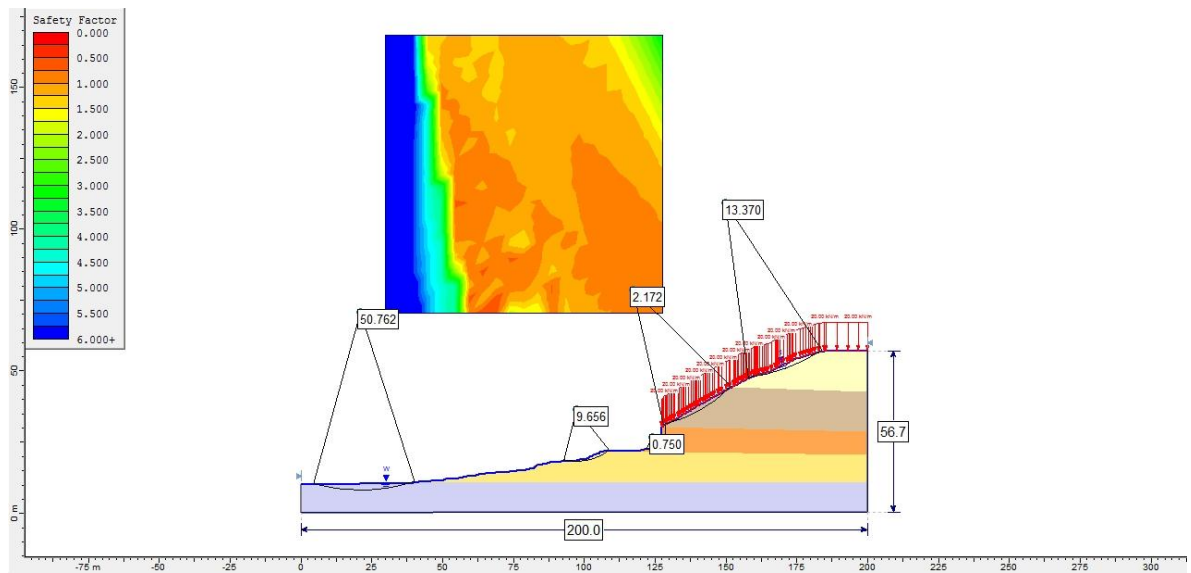
Anexo 198. Perfil 12 modelado SS-CNA -Método de Jambu



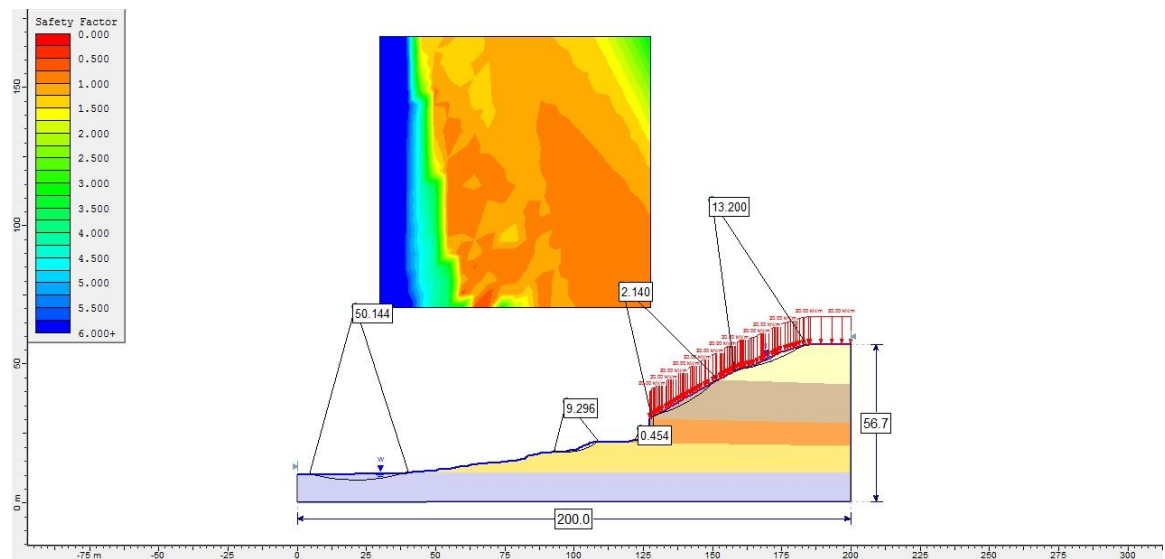
Anexo 199. Perfil 12 modelado SS-CNA -Método Ordinario



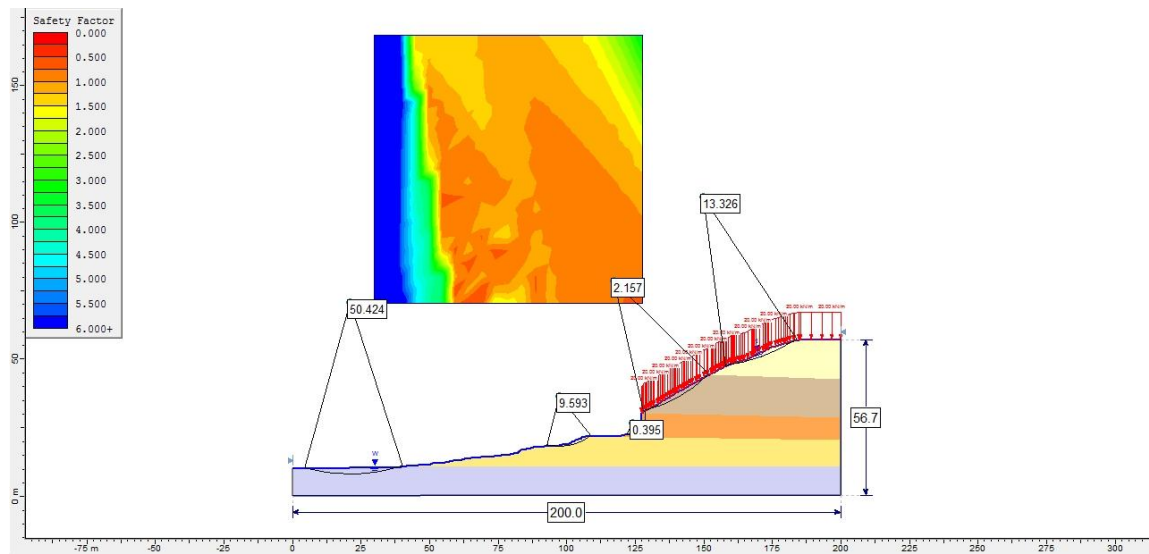
Anexo 200. Perfil 12 modelado SS-CNA -Método de Spencer



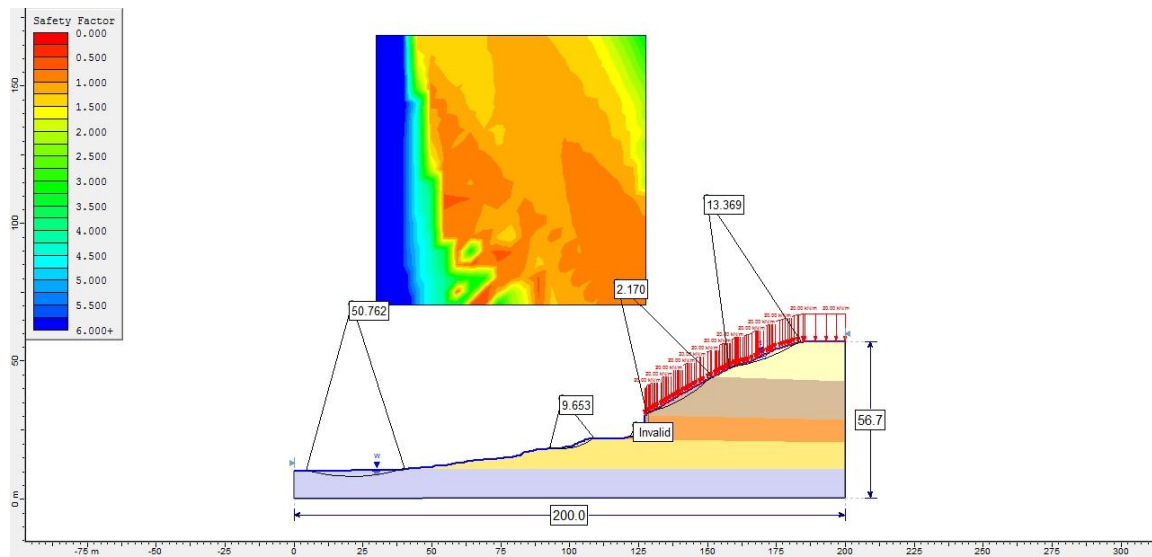
Anexo 201. Perfil 13 modelado SS-CNA -Método de Bishop



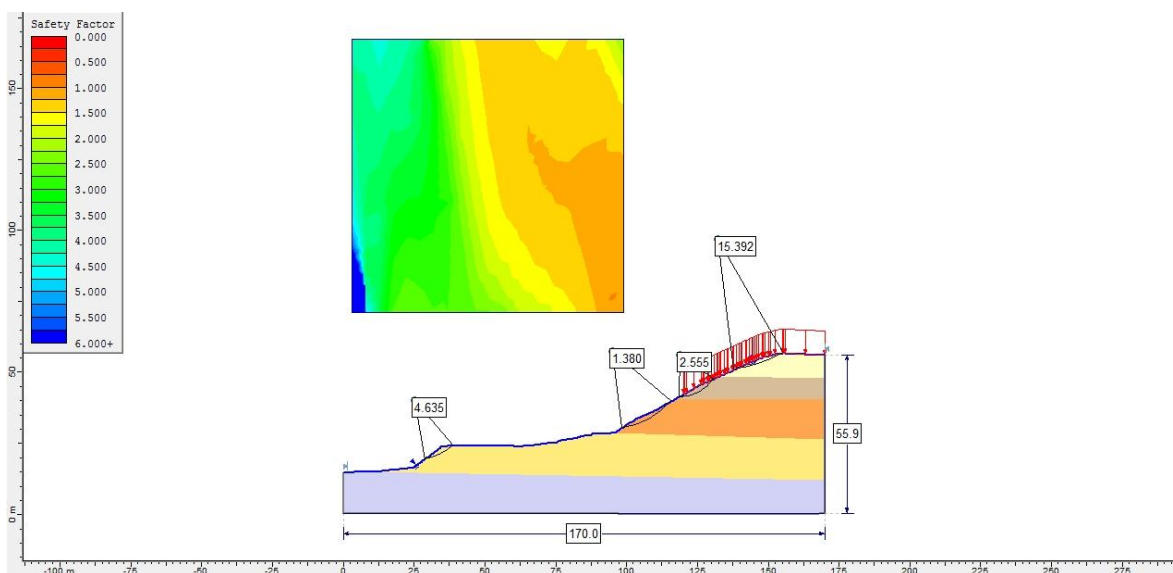
Anexo 202. Perfil 13 modelado SS-CNA -Método de Jambu



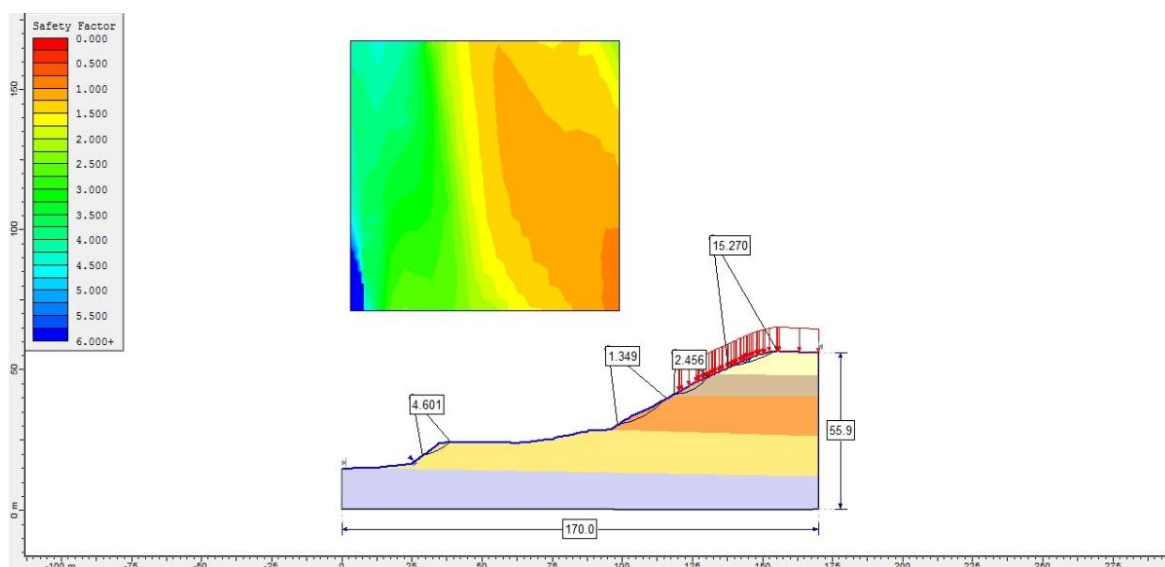
Anexo 203. Perfil 13 modelado SS-CNA -Método Ordinario



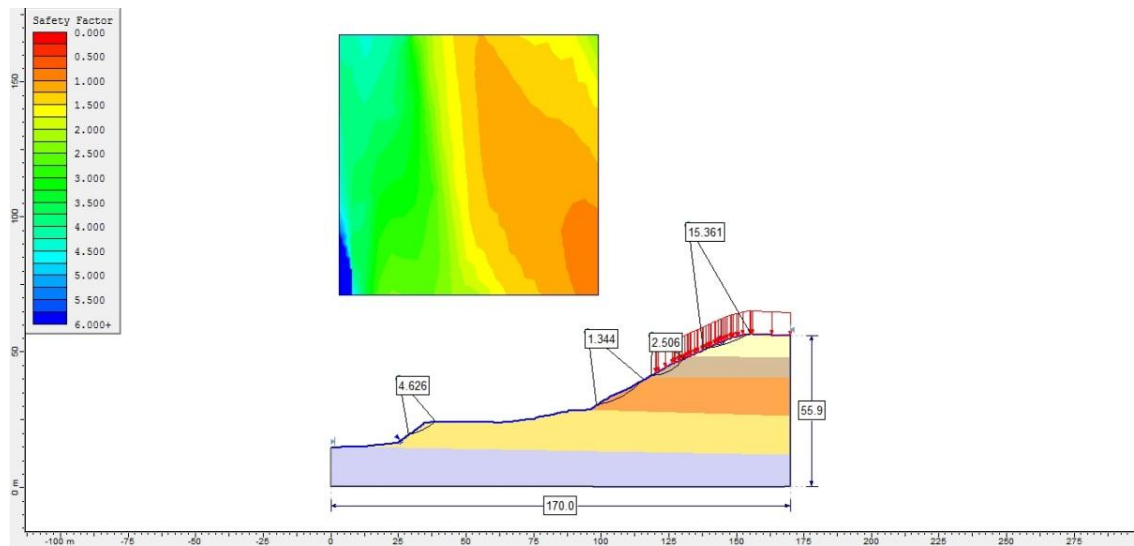
Anexo 204. Perfil 13 modelado SS-CNA -Método de Spencer



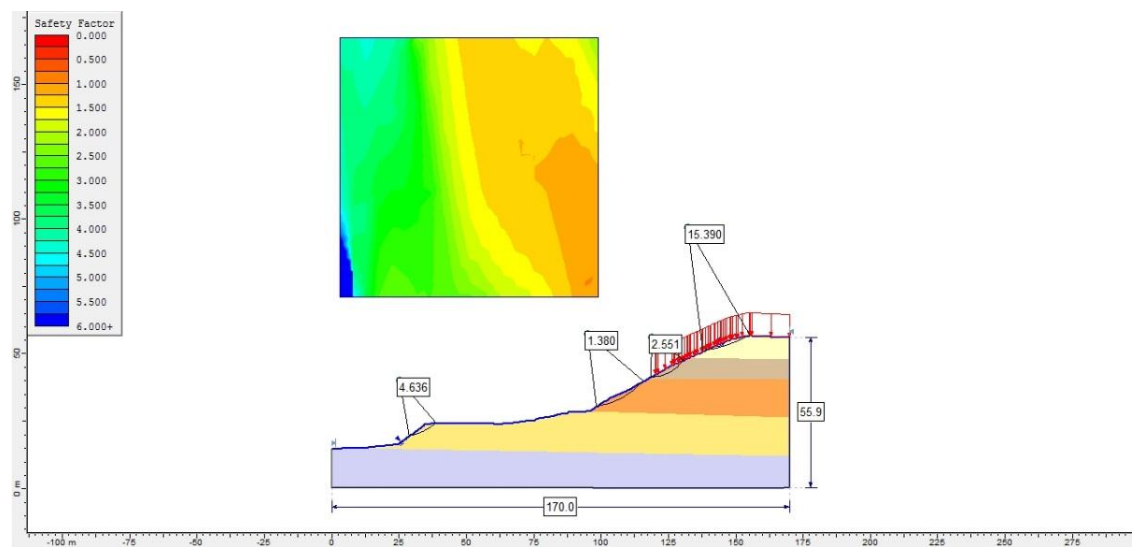
Anexo 205. Perfil 14 modelado SS-CNA -Método de Bishop



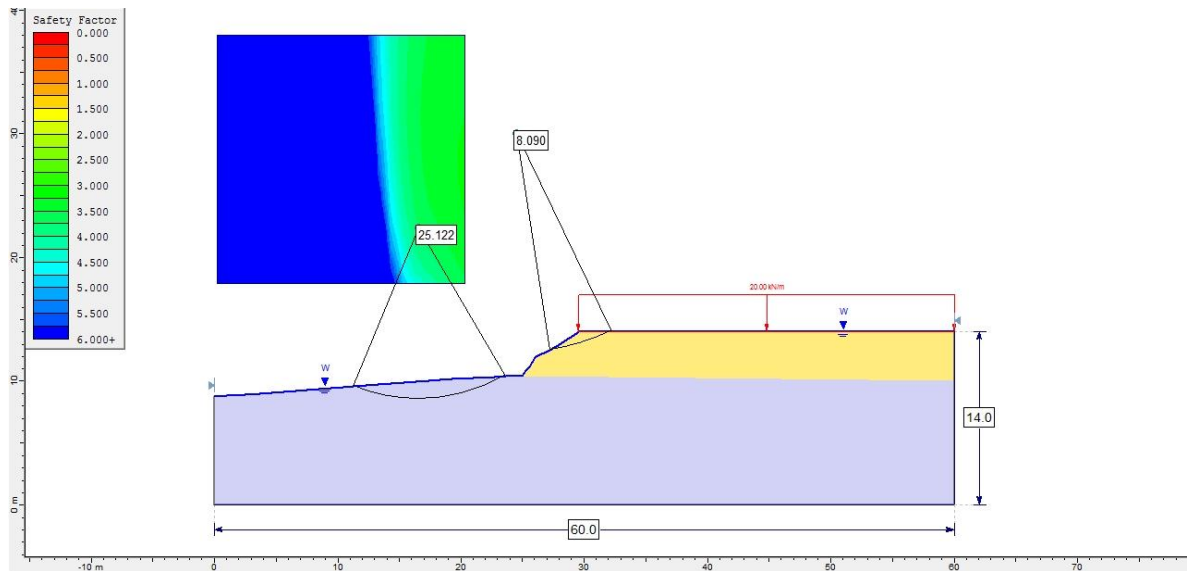
Anexo 206. Perfil 14 modelado SS-CNA -Método de Jambu



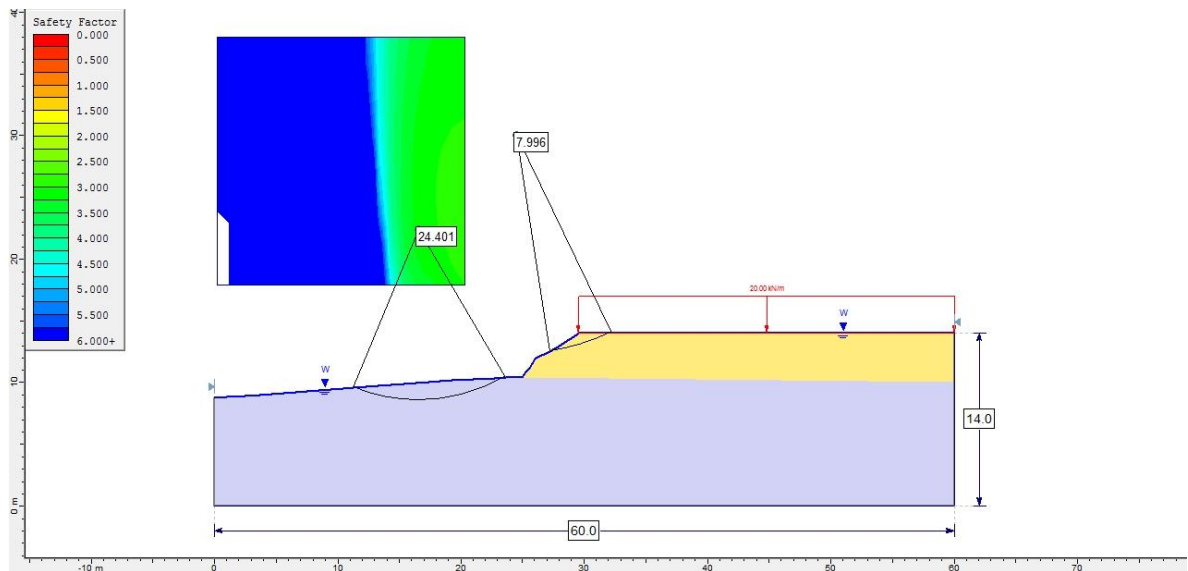
Anexo 207. Perfil 14 modelado SS-CNA -Método Ordinario



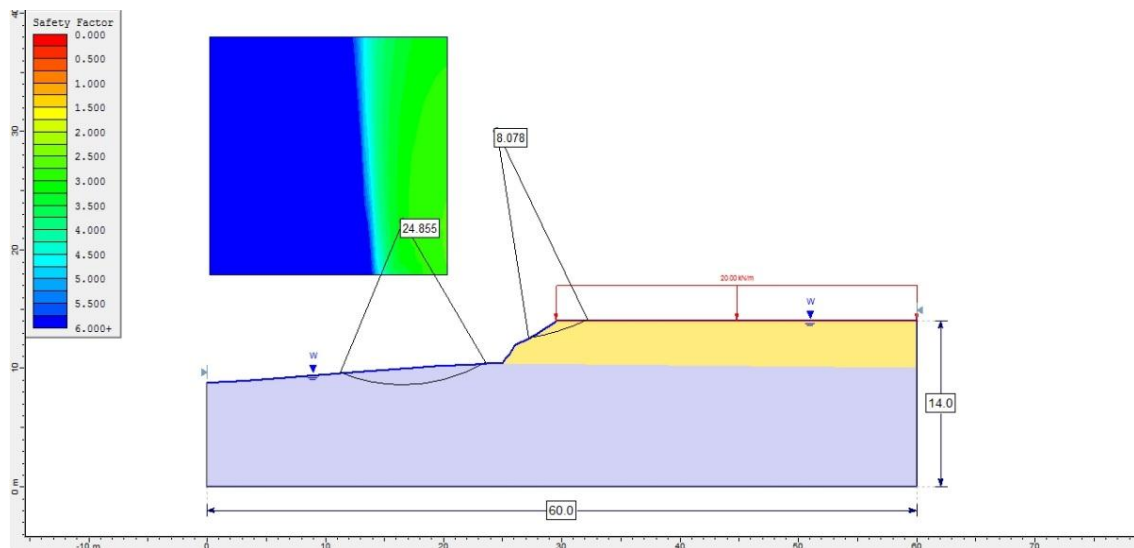
Anexo 208. Perfil 14 modelado SS-CNA -Método de Spencer



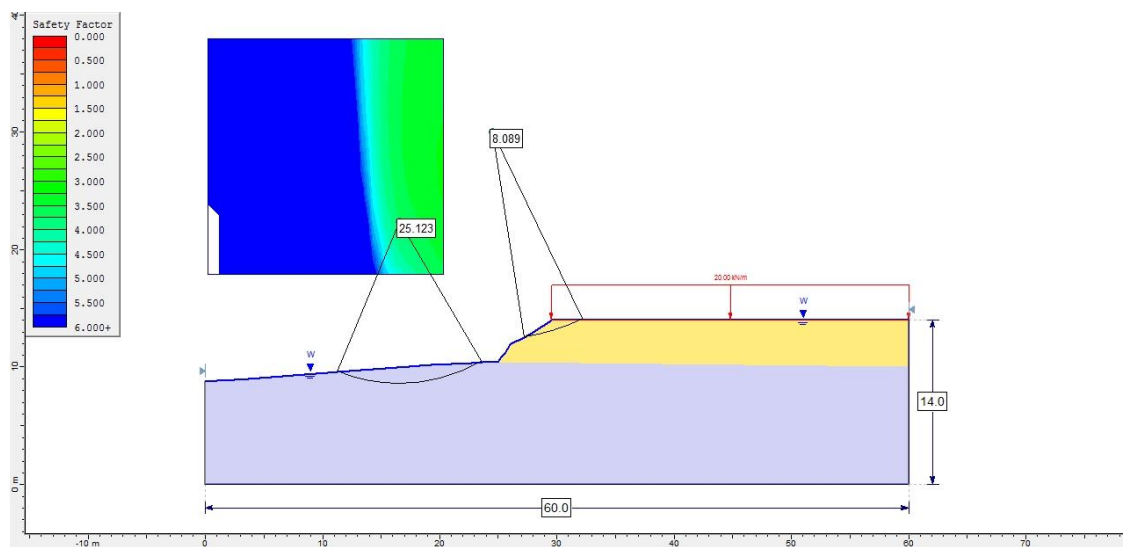
Anexo 209. Perfil 15 modelado SS-CNA -Método de Bishop



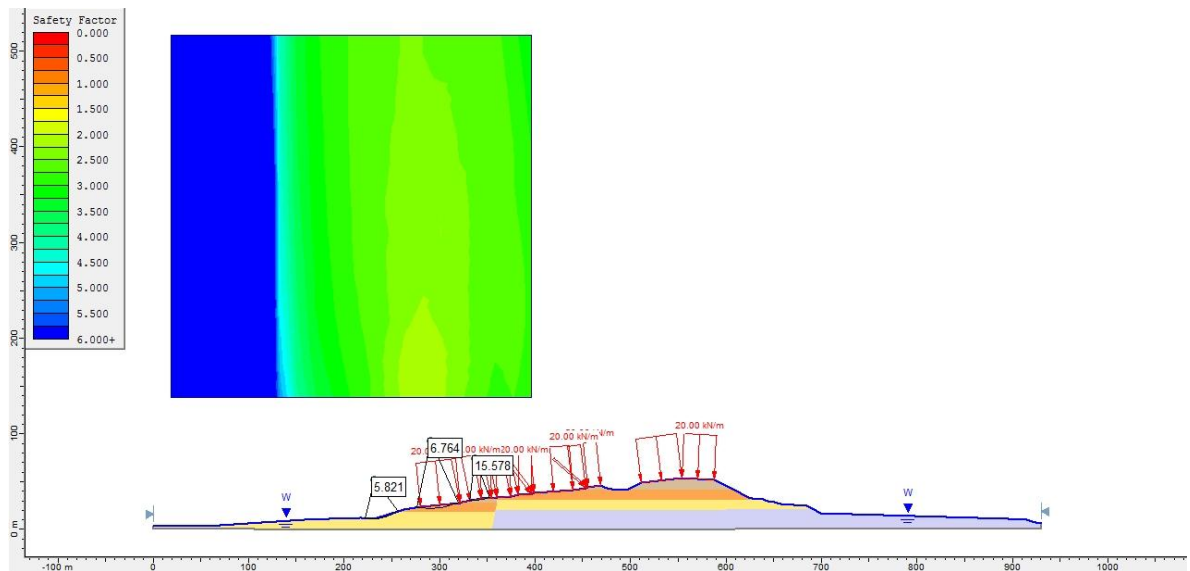
Anexo 210. Perfil 15 modelado SS-CNA -Método de Jambu



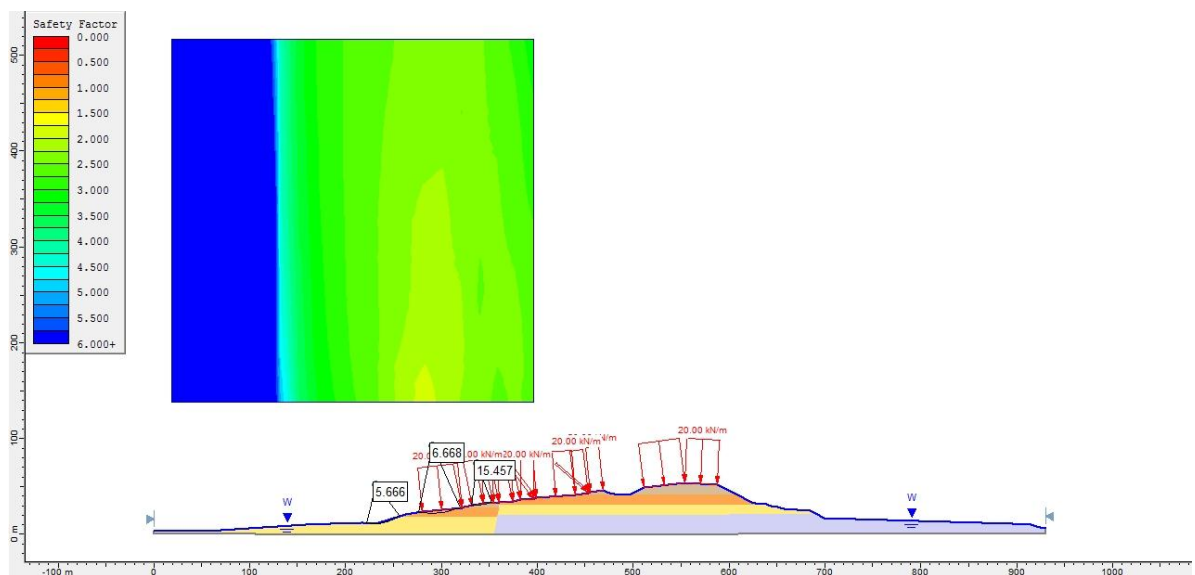
Anexo 211. Perfil 15 modelado SS-CNA -Método Ordinario



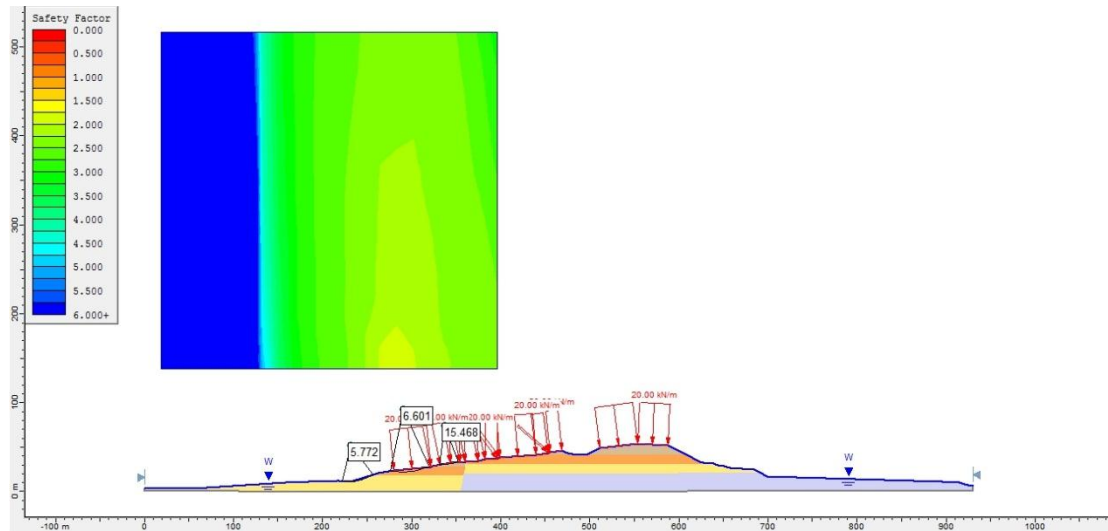
Anexo 212. Perfil 15 modelado SS-CNA -Método de Spencer



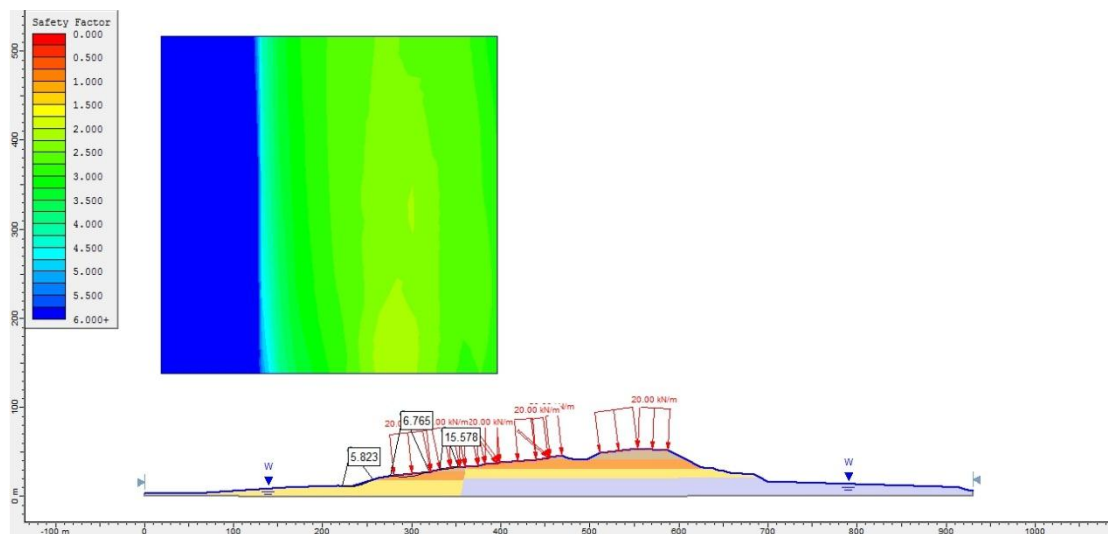
Anexo 213. Perfil A N-S modelado SS-CNA -Método de Bishop



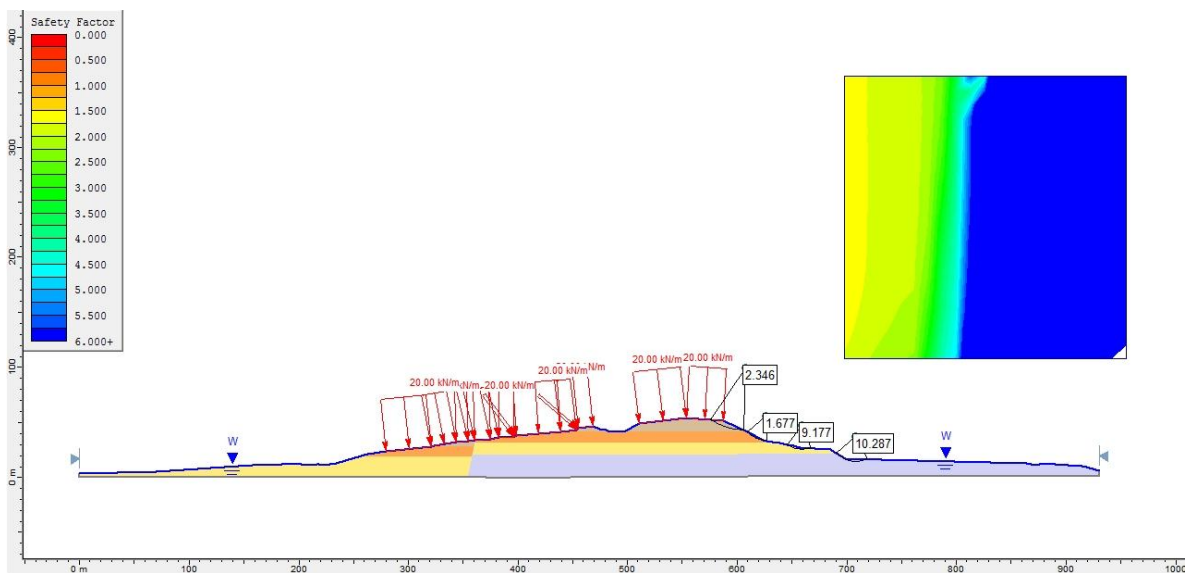
Anexo 214. Perfil A N-S modelado SS-CNA -Método de Jambu



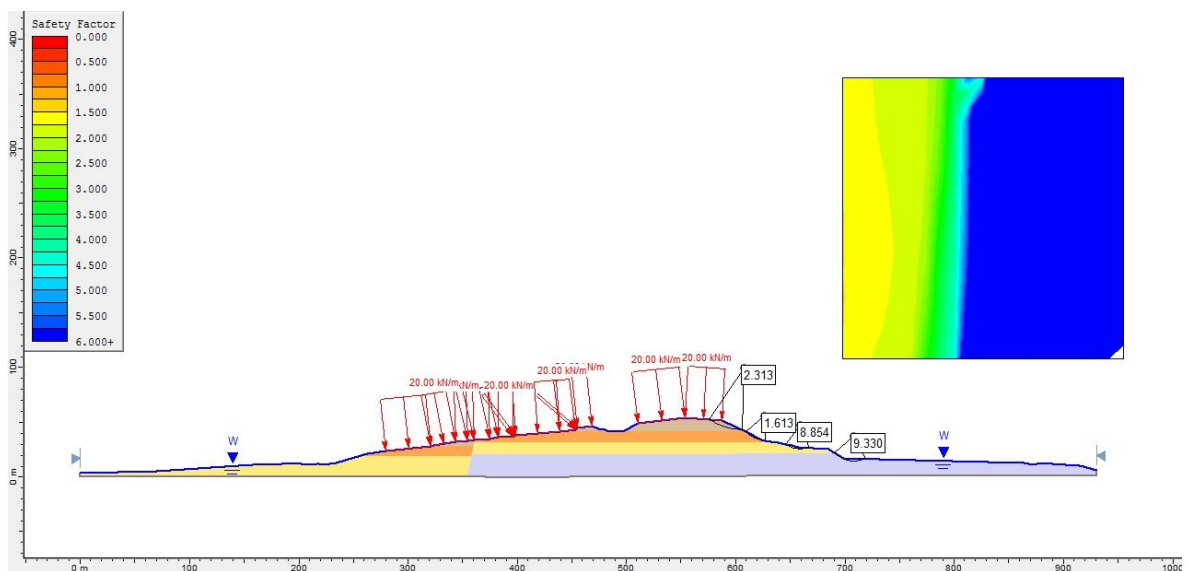
Anexo 215. Perfil A N-S modelado SS-CNA -Método Ordinario



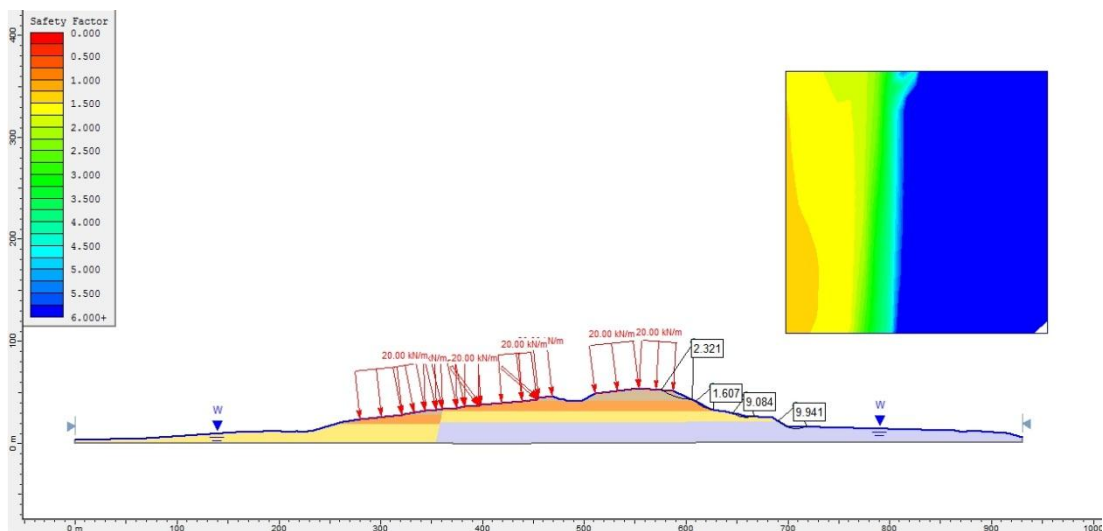
Anexo 216. Perfil A N-S modelado SS-CNA -Método de Spencer



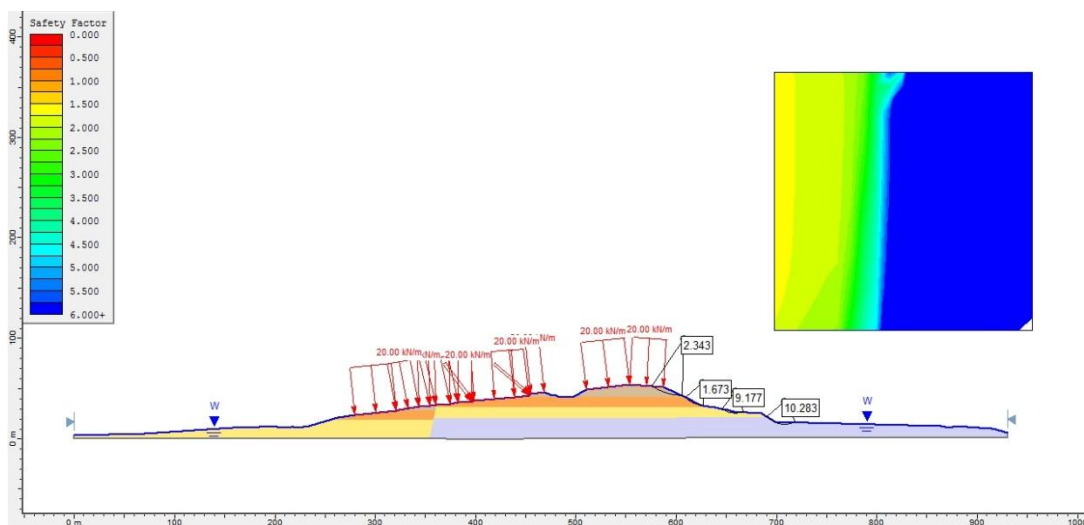
Anexo 217. Perfil A S-N modelado SS-CNA -Método de Bishop



Anexo 218. Perfil A S-N modelado SS-CNA -Método de Jambu



Anexo 219. Perfil A S-N modelado SS-CNA -Método Ordinario



Anexo 220. Perfil A S-N modelado SS-CNA -Método de Spencer