

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS PROBABILÍSTICO APLICADO A LA ESTABILIDAD DE
LOS TALUDES DE LA COSTA VERDE EN EL DISTRITO DE
MAGDALENA DEL MAR**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES:

Gabriel Alejandro Rivera Chanca

Luis Diego Vicuña Ríos

ASESOR:

Juan Pablo Zamora Beyk

Lima, agosto, 2023

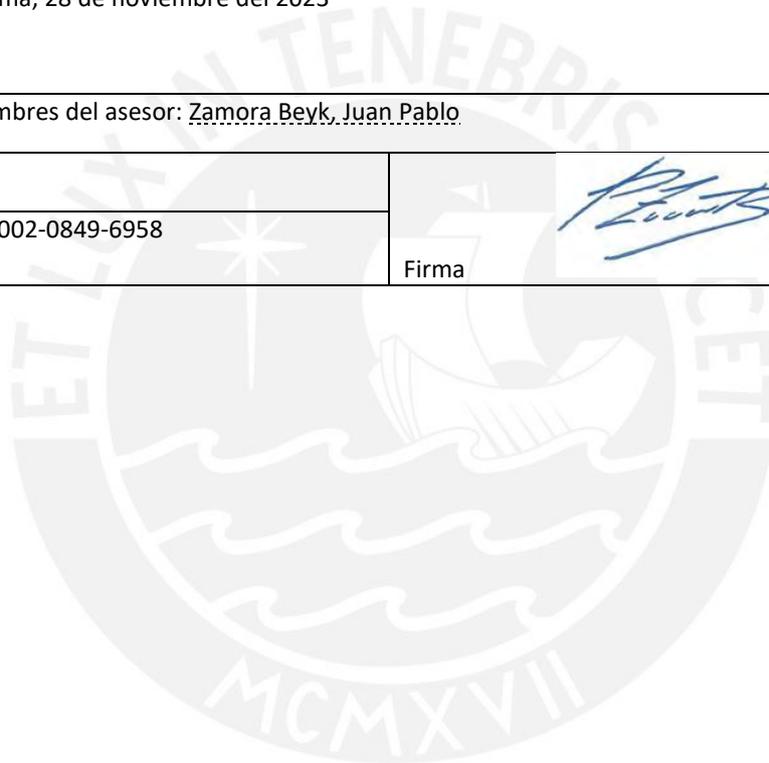
Informe de Similitud

Yo, Juan Pablo Zamora Beyk, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada ANALISIS PROBABILISTICO APLICADO A LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES DE LA COSTA VERDE EN EL DISTRITO DE MAGDALENA DEL MAR, de los autores Gabriel Alejandro Rivera Chanca y Luis Diego Vicuña Ríos, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 15%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 13/11/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 28 de noviembre del 2023

Apellidos y nombres del asesor: <u>Zamora Beyk, Juan Pablo</u>	
DNI: 42867511	
ORCID: 0000-0002-0849-6958	



RESUMEN

Esta investigación tiene como finalidad analizar la estabilidad de los taludes de la Costa Verde en un tramo del distrito de Magdalena del Mar, a través del cálculo probabilístico de falla con el uso del método Monte Carlo mediante el software Slide V6.0. Según estudios anteriores, resulta importante conocer las propiedades de los suelos que componen los taludes, y su variación respecto al parámetro a obtener de cada material que interviene en el cálculo del factor de seguridad, ya que el método determinístico solo toma valores ideales y uniformes de estudios geotécnicos. Por ello, uno de los objetivos específicos y procedimientos a seguir consisten en seleccionar secciones de los taludes de la Costa Verde para el análisis, con sus respectivos parámetros determinísticos (peso unitario, ángulo de fricción, cohesión) y probabilísticos (media, desviación estándar, coeficiente de variación) para el análisis propuesto. En primer lugar, se obtuvieron los factores de seguridad convencionales por métodos de equilibrio límite, y posteriormente, la media de los factores de seguridad para un número de simulaciones mediante el método probabilístico indicado, calculando a partir de estos la probabilidad de falla de las secciones. Asimismo, con el software mencionado se procesaron los análisis bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Finalmente, con los resultados se elaboraron mapas de riesgo para cada condición, interpretando en ellos la estabilidad que tiene el tramo en estudio, el cual viene presentando desprendimientos en los últimos años. De estos se concluye que el método probabilístico muestra una probabilidad de ocurrencia de falla que complementa el factor de seguridad del método determinístico.

Palabras Clave: Probabilidad de Falla, Factor de Seguridad, Costa Verde, Magdalena del Mar, Parámetros Determinísticos y Probabilísticos, Monte Carlo, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price, *Slide*.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Julio y Silvia, por su apoyo y cariño incondicional; a todos los integrantes de mi familia, por siempre tenerme en consideración y brindarme consejos cuando los necesitaba; a las buenas amistades que formé en la universidad, por las experiencias durante esta linda etapa; a nuestro asesor, por su apoyo durante la elaboración del documento.

Gabriel Rivera

A Dios, por permitirme tener salud y vida para conseguir mis metas trazadas; a mi madre, quien siempre estuvo conmigo en los momentos más difíciles, alentándome para seguir adelante; a mi abuelo Julio, que desde el cielo sentí su compañía durante esas largas horas de amanecida llenas de esfuerzo; a mi abuela, quien siempre cuidó de mi salud y me brindó buenos consejos; a mi padre, abuelos, tíos y toda mi familia, quienes me brindaron su apoyo para alcanzar este objetivo; a mis amistades de la universidad y del trabajo, por ser parte del proceso y coincidir durante esta gran etapa que hoy termina; a nuestro asesor, por el apoyo durante la elaboración del presente documento.

Luis Vicuña

¡Por Dios, mi madre y el Hormigón Armado!

ÍNDICE

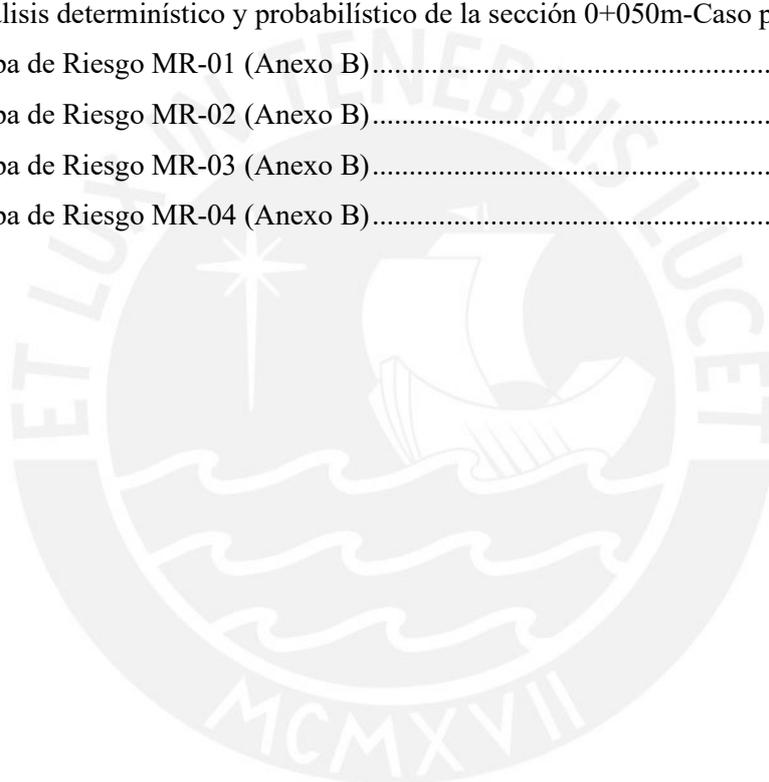
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE ANEXOS.....	viii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación	3
1.2. Antecedentes	4
1.3. Objetivos.....	6
1.4. Hipótesis	7
1.5. Organización.....	7
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	9
2.1. Recolección e interpretación de datos.....	9
2.2. Modelamiento y uso del software Slide V6.0.....	12
2.2.1. Modelamiento de las secciones del talud	12
2.2.2. Método de equilibrio límite.....	13
2.2.3. Método de Monte Carlo	14
2.3. Análisis de resultados	16
2.4. Flujograma de trabajo de tesis	16
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	18
3.1. Suelos.....	19
3.1.1. Parámetros geotécnicos.....	21
3.1.2. Parámetros estadísticos	23
3.1.3. Criterio de falla de Mohr-Coulomb.....	25
3.2. Análisis de estabilidad de taludes	27
3.2.1. Taludes	27
3.2.2. Deslizamientos	28
3.2.3. Análisis del talud.....	30
3.2.3.1. Teoría del Equilibrio Límite.....	31
3.2.3.2. Método de análisis determinísticos	32
3.2.3.3. Método de análisis de Monte Carlo.....	34

CAPÍTULO IV: LA COSTA VERDE.....	37
4.1. Reseña histórica	38
4.2. Geología y geomorfología local	41
4.3. Estudios pasados de los taludes de la Costa -Verde	46
4.4. Acontecimientos recientes	47
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	50
5.1. Secciones del talud de la Costa Verde – Magdalena del Mar.....	50
5.1.1. Levantamiento topográfico.....	51
5.1.2. Condiciones Geotécnicas	54
5.2. Análisis de las Secciones	56
5.2.1. Análisis Estático.....	61
5.2.2. Análisis Pseudo-estático.....	66
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
6.1. Discusión de método de análisis	70
6.2. Comparación e interpretación de resultados	71
6.3. Mapa de riesgo para Magdalena del Mar.....	72
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
7.1. Conclusiones	77
7.2. Recomendaciones	80
REFERENCIAS	82
ANEXO A: PERFILES - ANÁLISIS DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO CON SLIDE	87
ANEXO B: MAPAS DE RIESGO	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Análisis de densidad de edificios con Google Earth.....	11
Figura 2: Métodos de análisis determinísticos utilizables en el Slide V6.0. Fuente: Rocscience, 2018	13
Figura 3: Métodos de búsqueda de superficie de falla en el Slide V6.0.	14
Figura 4: Método Monte Carlo en el software Slide V6.0. Fuente: Rocscience, 2018	15
Figura 5: Flujograma para el Trabajo de Tesis.....	17
Figura 6: Esfuerzos principales en suelos. Fuente: Adaptado de Zegarra, 2016.....	23
Figura 7: Envolvente de falla y parámetros geotécnicos. Fuente: Labuz & Zang, 2012.....	27
Figura 8: Nomenclatura de las partes del talud. Fuente: Suárez, 1998	28
Figura 9: Partes que conforman un deslizamiento. Fuente: Suárez, 1998.....	29
Figura 10: Método ordinario de Fellenius o de Dovelas. Fuente: Aguilar & Zúñiga, 2015.....	32
Figura 11: Diagrama para el factor de corrección con Janbu. Fuente: Suárez. 1998.....	33
Figura 12: Muestreo Monte Carlo, distribución normal. Fuente: Rocscience, 2018.....	35
Figura 13: Probabilidad de falla vs Número de simulaciones. Fuente: Gibson, 2011	36
Figura 14: Talud con pendiente alta en la Costa Verde. Fuente: Google Maps.....	37
Figura 15: Talud con pendiente baja en la Costa Verde. Fuente: Google Maps	38
Figura 16: Balneario de La Perla incluyendo la Av. Costanera en el año 1925. Fuente: PAIN, 2014	38
Figura 17: Planificación de la Costa Verde. Fuente: APCV, 1971	39
Figura 18: Inauguración de los primeros kilómetros del circuito de playas. Fuente: El Comercio, 1984	40
Figura 19: Vista en planta del circuito de playas de la Costa Verde. Fuente: Google Earth.....	41
Figura 20: Plano geomorfológico de Lima, observando el cono de deyección aluvial. Fuente: Guzmán, Zavala & Valenzuela, 1997	42
Figura 21: Columna estratigráfica del acantilado. Fuente: COEN, 2019.....	43
Figura 22: Plano geomorfológico de Lima con leyenda. Fuente: INGEMMET, 2015	46
Figura 23: Desprendimiento en tramo de Costa Verde – Magdalena del Mar. Fuente: Lara, 2019..	48
<i>Figura 24: Sistema de andenería con terrazas en la Costa Verde – Magdalena del Mar. Fuente: Perú 21, 2021</i>	<i>49</i>
Figura 25: Secciones optadas para el análisis. Fuente: Diaz (2008)	50
Figura 26: Tramo de estudio P+000 a P+100. Fuente: Diaz	52
Figura 27: Tramo de estudio P+100 a P+250 y P+250 a P+500. Fuente: Diaz.....	52
Figura 28: Tramo de estudio P+050 a P+150. Año 2006. Fuente: Google Earth.....	53
Figura 29: Tramo de estudio P+050 a P+150. Año 2023. Fuente: Google Earth.....	53

Figura 30: Secciones optadas para el análisis. Fuente: Diaz.....	54
Figura 31: Parámetros definidos para el análisis.....	56
Figura 32: Modelo de la progresiva 0+250 en condiciones pseudo-estáticas. Fuente: Propia.....	58
Figura 33: Mapa de isoaceleraciones de Lima con periodo de retorno de 50 años y 10% probabilidad de excedencia. Unidades: gals. Fuente: IGP, 2014.	60
Figura 34: Curva de convergencia del análisis probabilístico.....	61
Figura 35: Modelo de la sección 0+050m-Caso estático.	62
Figura 36: Análisis determinístico y probabilístico de la sección 0+050m - Caso estático.	63
Figura 37: Probabilidad acumulada vs F.S. en la sección 0+050m - Caso estático.	63
Figura 38: Modelo de la sección 0+050m-Caso pseudo-estático.....	66
Figura 39: Análisis determinístico y probabilístico de la sección 0+050m-Caso pseudo-estático. ..	67
Figura 40: Mapa de Riesgo MR-01 (Anexo B).....	74
Figura 41: Mapa de Riesgo MR-02 (Anexo B).....	74
Figura 42: Mapa de Riesgo MR-03 (Anexo B).....	75
Figura 43: Mapa de Riesgo MR-04 (Anexo B).....	76



LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades índice de los suelos. Fuente: Terzaghi, Peck & Mesri, 1997.....	20
Tabla 2: Valores de los coeficientes de variación. Fuente: Duncan, 2000.....	24
Tabla 3: Parámetros de los componentes del talud de la Costa Verde. Fuente: Propia.....	55
Tabla 4: Valores de los coeficientes de variación adoptados. Fuente: Propia.....	56
Tabla 5: Factores de cargas empleado para el análisis. Fuente: Cañari, 2011	57
Tabla 6: Cargas de gravedad establecidas para cada sección. Fuente: Propia	57
Tabla 7: Resumen de la determinación de la aceleración de análisis. Fuente: Propia	59
Tabla 8: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Janbu. Fuente: Propia	64
Tabla 9: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Spencer. Fuente: Propia	65
Tabla 10: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Morgenstern-Price. Fuente: Propia	65
Tabla 11: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Janbu. Fuente: Propia	67
Tabla 12: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Spencer. Fuente: Propia	68
Tabla 13: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Morgenstern-Price. Fuente: Propia	69
Tabla 14: Parámetros de resistencia empleados en el análisis. Fuente: Propia	78

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: PERFILES – ANÁLISIS DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO CON SLIDE.....	87
Imagen 1: Modelo de la progresiva 0+000 en Slide.....	88
Imagen 2: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.	88
Imagen 3: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.	89
Imagen 4: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.	89
Imagen 5: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.	90
Imagen 6: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.	90
Imagen 7: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.	91
Imagen 8: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.	91
Imagen 9: Modelo de la progresiva 0+050 en Slide.....	92
Imagen 10: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.	92
Imagen 11: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.	93
Imagen 12: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.	93
Imagen 13: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.	94
Imagen 14: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.	94
Imagen 15: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.	95
Imagen 16: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.	95
Imagen 17: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.	96
Imagen 18: Modelo de la progresiva 0+100 en Slide.....	96

Imagen 19: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.	97
Imagen 20: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.	97
Imagen 21: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.	98
Imagen 22: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoeestáticas.	98
Imagen 23: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoeestáticas.	99
Imagen 24: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoeestáticas.	99
Imagen 25: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoeestáticas.	100
Imagen 26: Modelo de la progresiva 0+150 en Slide.....	100
Imagen 27: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.	101
Imagen 28: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.	101
Imagen 29: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.	102
Imagen 30: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoeestáticas.	102
Imagen 31: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoeestáticas.	103
Imagen 32: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoeestáticas.	103
Imagen 33: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoeestáticas.	104
Imagen 34: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoeestáticas.	104
Imagen 35: Modelo de la progresiva 0+200 en Slide.....	105
Imagen 36: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.	105
Imagen 37: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.	106

Imagen 38: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.	106
Imagen 39: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.	107
Imagen 40: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.	107
Imagen 41: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.	108
Imagen 42: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.	108
Imagen 43: Modelo de la progresiva 0+250 en Slide.	109
Imagen 44: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.	109
Imagen 45: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.	110
Imagen 46: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.	110
Imagen 47: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.	111
Imagen 48: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.	111
Imagen 49: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.	112
Imagen 50: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.	112
Imagen 51: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.	113
Imagen 52: Modelo de la progresiva 0+300 en Slide.	113
Imagen 53: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.	114
Imagen 54: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.	114
Imagen 55: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.	115
Imagen 56: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.	115

Imagen 57: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	116
Imagen 58: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	116
Imagen 59: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.....	117
Imagen 60: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.....	117
Imagen 61: Modelo de la progresiva 0+350 en Slide.....	118
Imagen 62: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.....	118
Imagen 63: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.....	119
Imagen 64: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.....	119
Imagen 65: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.....	120
Imagen 66: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	120
Imagen 67: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	121
Imagen 68: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.....	121
Imagen 69: Modelo de la progresiva 0+400 en Slide.....	122
Imagen 70: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.....	122
Imagen 71: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.....	123
Imagen 72: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.....	123
Imagen 73: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.....	124
Imagen 74: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	124
Imagen 75: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	125

Imagen 76: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.....	125
Imagen 77: Modelo de la progresiva 0+450 en Slide.....	126
Imagen 78: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.	126
Imagen 79: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.	127
Imagen 80: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.	127
Imagen 81: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.....	128
Imagen 82: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	128
Imagen 83: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	129
Imagen 84: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.....	129
Imagen 85: Modelo de la progresiva 0+500 en Slide.....	130
Imagen 86: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.	130
Imagen 87: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.	131
Imagen 88: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.	131
Imagen 89: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.....	132
Imagen 90: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	132
Imagen 91: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.....	133
Imagen 92: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.....	133
Imagen 93: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.....	134
ANEXO B: MAPAS DE RIESGO.....	135

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En los años 70, debido a la necesidad de conectar los balnearios de los distritos de Chorrillos, Barranco, Miraflores, San Isidro, Magdalena del Mar, San Miguel y Callao, nació la propuesta de construir la vía Costa Verde. En base a este proyecto, comenzó a ser atractiva la idea de realizar más obras alrededor del proyecto en ejecución. Esto se incentivó por la llamativa vista que se tiene al Océano Pacífico y tuvo como reacción realizar un plan maestro; se buscó sectorizar la Costa Verde en playas, circuito de playas y parte superior del acantilado. En consecuencia, todo el tramo comenzó a llamar la atención turística y urbanística.

Con el transcurso de los años hasta la actualidad, y teniendo presente el constante crecimiento de la población, se construyeron edificaciones y centros de entretenimiento en la parte superior del talud con poca longitud de retiro hacia el acantilado, cada vez más osados en cuanto a diseño arquitectónico, los cuales se encuentran ubicados desde el distrito de Chorrillos hasta San Miguel. Se incluyen como casos particulares un centro comercial sobre el talud en Miraflores, y edificios multifamiliares con similares condiciones en los distritos de Barranco y Magdalena del Mar. Estos presentan la posibilidad de poner en riesgo a los transeúntes y vehículos que circulan por el circuito de playas, debido a su influencia sobre la estabilidad del talud.

Para el diseño de estas edificaciones, los ingenieros tuvieron que realizar estudios geotécnicos y análisis de estabilidad de los taludes que garanticen seguridad. Estos concluyeron en un factor de seguridad dependiendo de los tipos de análisis planteados para obtener la factibilidad de construcción en cada caso. Actualmente, los métodos que se emplean para sus cálculos y forman parte de los análisis no implican características reales de

la composición del suelo o de la variación de resultados de los ensayos realizados, sino parámetros uniformes o ideales para el cálculo de estabilidad. Con estos análisis, se pueden afirmar únicamente si el talud en estudio es estable o tiende a una falla, pero no pueden establecer una probabilidad de falla dependiendo de la variabilidad de los parámetros involucrados para el cálculo de un factor de seguridad. De ser el caso, se podría determinar mediante estos resultados la mejor solución a tomar en cuenta para estabilizar el talud como medida correctiva previo al desarrollo de una obra. Asimismo, es posible realizar un nuevo análisis mediante una metodología que nos permita abarcar la mayor cantidad de información de los taludes.

Adicional a lo explicado, es necesario mencionar que actualmente varios tramos del acantilado de la Costa Verde corren peligro de desprendimientos o fallas por el exceso de edificaciones construidas cerca del mismo. Edificios de varios pisos, complejos deportivos, entre otros, son los causantes de una carga muerta que recae encima del talud. Esto posteriormente se puede idealizar en carga uniformemente distribuida dependiente del número de pisos de cada edificación y el tipo de estructura que cumple determinada función. Adicional a esto, se tiene el alto peligro sísmico en la zona de Lima Metropolitana, debido a su cercanía al proceso de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana que generan esfuerzos de compresión y liberaciones de energía asociadas a sismos (Vela, 2009). Estos factores provocan desprendimientos de material del talud sobre el pie de este, siendo altamente peligroso para la circulación de vehículos sobre el circuito de playas, exponiendo a los conductores a accidentes ante un suceso repentino. Superponiendo estos efectos a la determinación de la estabilidad del talud, se vuelve más difícil que los resultados sean favorables para la aprobación de construcción de estructuras sobre la Costa Verde por parte de las autoridades municipales.

Por último, los cálculos para determinar factores de seguridad asociados a la falla o no de un talud en estudio, se pueden realizar manualmente tomando superficies potenciales de falla. Sin embargo, resultan muy extensos por la cantidad de posibilidades de estas y el respectivo análisis para cada una de ellas. Con el avance de la tecnología y mejores procesadores de información, ahora existen herramientas informáticas (*Slide, GeoSlope, entre otros*) que permiten modelar correctamente las superficies del talud que se pueden considerar como las más críticas. De esta manera, es posible estudiar por tramos las condiciones de sobrecarga, sismo y composición de taludes respecto al tipo de suelo. El presente trabajo de investigación evalúa de manera discreta los taludes presentes en un tramo de la Costa Verde para el distrito de Magdalena del Mar, siendo posible una extensión de la actividad para más secciones, cada vez a menor distancia y con ensayos *in situ* más representativos, que proporcionen resultados más precisos.

1.1. Motivación

Los proyectistas o especialistas en geotecnia realizan los análisis de estabilidad basándose en los métodos determinísticos para calcular la estabilidad del talud sobre el cual se desea construir, a través de métodos generales de equilibrio límite. De acuerdo con lo explicado por Alonso (2005): “Son métodos relativamente simples y proporcionan resultados razonablemente buenos de cara a la evaluación de la estabilidad de un talud” (p.17). Debido a que son aplicados a toda clase de terrenos, solo basta con seguir etapas de cálculo adecuadas y admisibles con los parámetros geotécnicos específicos de la situación a analizar. Cabe mencionar que con esto solo se determinan los factores de seguridad para superficies de falla posibles, considerando únicamente datos uniformes para cada una de las capas según su perfil estratigráfico. Esto es producto de suponer que los suelos son homogéneos y también para la masa que desliza, lo cual da paso al análisis correspondiente (Alonso, 2005). Estos

procedimientos no consideran la variación de los parámetros que influyen en la obtención del factor de seguridad, tales como cohesión, ángulo de fricción interna, densidad del suelo, entre otros.

No obstante, como nuestro caso se trata de los taludes, es fundamental obtener la información cuantitativa y cualitativa que represente adecuadamente el mismo. Se evalúa la existencia de una incertidumbre en geotecnia que se puede atribuir para este caso a la variabilidad de parámetros, la cual está asociada a la precisión con que se obtienen los datos cuantitativos necesarios. Los errores estadísticos, datos tendenciosos, errores en las aplicaciones de los ensayos y la variabilidad espacial de la toma de muestras pueden influir en estos casos (Hidalgo & Pacheco, 2011). Por este motivo, resulta más conveniente establecer una variable dependiente de los parámetros mencionados, brindando un índice de confiabilidad y otros resultados estadísticos en los valores a obtener, asociados a una probabilidad de falla del talud (método probabilístico). De esta manera, con dicho procedimiento matemático y estadístico se logra que los resultados puedan complementar en gran parte la información de un estudio geotécnico. Además, este contribuye con los análisis realizados a los taludes de la Costa Verde ante el peligro de falla, y aporta a la objetividad de la otorgación de factibilidad de un proyecto de construcción en dicha zona. Finalmente, el presente trabajo de investigación nos permitirá mostrar la zonificación de probabilidad de falla con los resultados obtenidos, los cuales se representarán en un mapa de riesgo.

1.2. Antecedentes

El desprendimiento de los acantilados en la Costa Verde puede presentarse por varios motivos. En primer lugar, la proximidad de las edificaciones al acantilado, ya que esto genera mayor probabilidad de ocurrencia de falla por cargas de gravedad. En segundo lugar, la irregularidad estructural de las edificaciones ejecutadas sobre el talud. Finalmente, la

ubicación del Perú, considerada como una zona de alta sismicidad, permite la producción de cargas sísmicas debido a las aceleraciones. Además, según la historia sísmica del país los sismos que ocurren son periódicos por efecto de la fricción de las placas y como consecuencia del proceso de subducción (INGEMMET, 2015); por esta razón, debe considerarse en el análisis de muchos estudios. Ante estos factores, con el desprendimiento del relleno sobre el talud ocurrido en agosto de 2019, en el distrito de Magdalena del Mar, las autoridades se han puesto en alerta debido al riesgo que existe al transitar por esa zona y otras similares. Por este motivo, se están tomando medidas necesarias como la realización de nuevos levantamientos de información en campo; dejando en claro que, por las condiciones geológicas y geodinámicas presentes en los sectores, la zona es muy susceptible frente a derrumbes, desprendimiento de suelo y deslizamientos (COEN, 2019).

Hasta la fecha, no existen estudios probabilísticos realizados al talud de la Costa Verde. Sin embargo, se cuenta con información de otros estudios realizados mediante análisis determinísticos para diferentes distritos en la extensión del proyecto. Pacheco (2006) estudió el tramo del distrito de San Isidro, evidenciando como problema la estabilidad del talud debido a las alturas críticas, cortes y excavaciones. Él elaboró un catálogo de falla documentado fotográficamente.

Urrutia (2008) analizó el talud de la Costa Verde para el distrito de Miraflores, de manera dinámica y por elementos finitos. El fin fue el mismo, calcular factores de seguridad. El adicional que tuvo su trabajo fue la representación de los esfuerzos generados como resultado de la aplicación de un sismo, a través de softwares (GeoSlope y Quake) que incluyan las condiciones y características determinadas.

Finalmente, Díaz (2008) realizó un *back analysis* para obtener juegos de parámetros resistentes del suelo que compone el talud de la Costa Verde en el distrito de Magdalena del

Mar, evaluando la influencia de un lente del material fino en la estabilidad del talud y la influencia del movimiento de tierra en el cálculo del factor de seguridad.

1.3. Objetivos

El objetivo principal es evaluar la probabilidad de falla global del talud de la Costa Verde para el tramo de estudio, comprendido en el distrito de Magdalena del Mar, a través de un análisis probabilístico (Monte Carlo), y como complemento a los Factores de Seguridad (F.S.) calculados con métodos determinísticos (Spencer, Janbu y Morgenstern-Price). A partir de esto, se delimitan los siguientes objetivos específicos para el desarrollo del trabajo de tesis:

- Recolectar datos topográficos y geotécnicos representativos de los taludes para la selección de las secciones a analizar, y su posterior descripción luego del análisis geotécnico
- Evaluar los factores de seguridad asociados a la falla para los perfiles del talud, mediante los métodos de equilibrio límite de Spencer, Janbu y Morgenstern-Price
- Evaluar la probabilidad de falla producto del análisis con el programa Slide V6.0, aplicando el método de Monte Carlo (1944)
- Evaluar cómo se complementan el análisis probabilístico con los resultados determinísticos, mediante un mapa de riesgo para el distrito de Magdalena del Mar

1.4. Hipótesis

El análisis probabilístico complementa al resultado obtenido por el análisis determinístico para la prevención de desastres, asimismo, este brinda más información ante un estudio de prefactibilidad de futuros proyectos mediante la disposición de un mapa de riesgo del tramo estudiado.

1.5. Organización

El desarrollo del presente trabajo de tesis está conformado por los capítulos que explican los detalles específicos de las secciones del presente informe, teniendo como objeto de estudio el talud de la Costa Verde, limitado a un tramo del distrito de Magdalena del Mar. Adicionalmente, para este tramo del circuito de playas se puede establecer progresivas para realizar el correspondiente análisis y elaborar el mapa de riesgo. Se explican los contenidos a continuación:

- Capítulo I, contiene la introducción, descripción del tema, los objetivos principales y específicos para el presente trabajo, hipótesis previas al desarrollo, antecedentes para los desprendimientos y métodos de cálculo, y explicación breve de cada capítulo en general.
- Capítulo II, contiene la explicación del proceso de elaboración del trabajo de tesis. Se incluyen las fases necesarias para lograr los objetivos expuestos en el capítulo anterior. Primero, la recolección e interpretación de datos de entrada, donde se prioriza la caracterización y selección de las secciones de estudio del talud para desarrollar los análisis correspondientes. Segundo, el modelamiento en el programa, dejando en claro los pasos a seguir para el uso del software. Por último, el análisis de

resultados para los datos empleados y cómo sirven estos para las conclusiones del trabajo.

- Capítulo III, contiene el marco teórico del tema a estudiar, donde se define los subtemas necesarios para ampliar mejor el panorama. Cada uno con cierta cantidad de puntos a detallar. Se repasan estudios previos como bibliografía para los taludes, datos geotécnicos y geológicos relevantes para seleccionar los parámetros definitivos previos al cálculo. Además, se brinda la información necesaria sobre los conceptos teóricos que están involucrados en los criterios de falla fundamentales.
- Capítulo IV, contiene el desarrollo del trabajo de tesis. Se resumen los parámetros geotécnicos y estadísticos a emplear para el análisis tanto determinístico como probabilístico, con el programa Slide V6.0. Se procesan las secciones del talud estudiadas en este programa para determinar los factores de seguridad y probabilidades de falla de las superficies.
- Capítulo V, contiene el análisis de resultados en general. Muestra resumidamente los valores obtenidos como datos de salida del software empleado. Además, se compara y verifica la correlación que exista en nuestro caso de estudio, mediante la elaboración de un mapa de riesgo con las probabilidades de falla obtenidas.
- Capítulo VI, contiene las conclusiones de esta investigación, y recomendaciones para estudios futuros en el ámbito de la geotecnia.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

El proceso metodológico es de enfoque prospectivo, ya que requiere la recolección de datos que sean semejantes y representativos al estado actual del talud de la Costa Verde. Además, este estudio es planteado con la finalidad de asociar la probabilidad de falla a los F.S., ambos determinados por el programa Slide V6.0. Por ello, el proceso se resume en recolectar información topográfica: secciones del talud y condiciones de carga; información geotécnica: el ángulo de fricción, la cohesión y el peso específico de los taludes; para analizarlo con el programa antes mencionado a partir de los métodos determinísticos (Spencer, Janbu y Morgenstern-Price) y el método probabilístico (Monte Carlo).

2.1.Recolección e interpretación de datos

Para poder desarrollar el análisis, se debe contar con los datos de entrada necesarios y característicos de la zona de estudio, en este caso del distrito de Magdalena del Mar. Como se quiere finalmente elaborar un mapa de riesgo con progresivas establecidas, es necesario tomar nota o recolectar los parámetros indicados significativos de cada progresiva tentativa a estudiar. Debido a que la estratigrafía es variable conforme se avanza a lo largo del talud de la Costa Verde, se pueden tomar datos que representen un tramo del trazo. Lo ideal sería que los tramos se acorten más y cada uno tenga sus propios estudios.

El primer paso de este proceso metodológico consiste en obtener mediante estudios pasados, los valores que necesitamos para trabajar con el Software Slide V6.0. Estos son los de cohesión, ángulo de fricción y peso específico como principales. Adicionalmente, conviene conocer la clasificación SUCS de cada material que compone el talud, y su estratigrafía para cada sección en estudio. Los valores a seleccionar de las referencias recolectadas son los que estén de acuerdo a las condiciones para cada tipo de suelo.

Lo último mencionado se complementa con el detalle de la sección a procesar, la cual se obtiene mediante levantamientos topográficos. A partir de ellos se obtienen las curvas de nivel, que dependiendo de la exactitud que presenten (separación entre curvas), mostrarán con mayor detalle el talud que queremos analizar, para cada tramo seleccionado. Como detalle adicional, podemos valernos de otros programas como Google Earth para definir datos adicionales que se explicarán a continuación como la sobrecarga de edificios existentes en la parte alta del talud y las áreas asociadas para cada sección de estudio como aproximaciones de fuente confiable.

Tal como se mencionó en el primer párrafo, debemos definir la información que nos servirá para este trabajo, pero conviene conocer en qué casos se va a separar el mismo para el posterior análisis en el programa. Se consideran los estudios en los siguientes casos:

- **Análisis de la sección (determinístico y probabilístico).**

Para esta condición se necesitan las secciones con cada material definido geológica y geotécnicamente (arcillas, gravas, rellenos, etc). Los datos de entrada deben reflejar la caracterización de cada material, con su respectiva media y desviación estándar de acuerdo con cada tipo de ensayo realizado. El resultado va a reflejar la realidad para los taludes de la Costa Verde. Cabe mencionar que el programa es amigable para realizar los cálculos necesarios, por lo que en secuencia de pasos se puede modelar el talud obtenido mediante un levantamiento topográfico con los materiales que la componen geotécnicamente.

- **Análisis con sobrecarga de edificios en la parte superior del talud:**

Esta condición ilustra el problema que afrontan los acantilados con respecto a las edificaciones existentes, donde un gran número de estas genera una fuerza distribuida considerada uniforme. De este modo, para determinar el área estimada sobre la que se ejerce

la carga, se utilizan los datos geográficos emitidos por Google Earth (Figura 1). Además, para su ubicación sobre el acantilado se toma la distancia aproximada de retiro de las edificaciones existentes u otro tipo de obras. Estas dimensiones sirven de referencia para el modelamiento de sobrecargas que van sobre el talud en el modelo de Slide. En el programa se puede colocar una carga vertical sobre la superficie superior del acantilado, donde el valor de cada carga distribuida puede variar dependiendo del tipo de obra existente como pavimentos, edificios o parques. De ser el caso, y dando mayor precisión a los resultados a obtener, se puede recolectar en una visita a campo de estudio, el aproximado de pisos por cada edificio o vivienda, con el cual se puede variar las distribuciones para cada longitud y correr el mismo análisis.



Figura 1: Análisis de densidad de edificios con Google Earth.

- **Análisis pseudo-estático de carga:**

En esta condición se pretende mostrar cómo influyen las sollicitaciones de sismo en las secciones de talud, compuesto por distintos tipos de suelo. Lima es una zona altamente sísmica debido al proceso de subducción entre las placas Nazca y Sudamericana, por ello los sismos son frecuentes en esta zona de la costa. Para este caso, agregado a los parámetros geotécnicos establecidos para cada sección del talud, se necesita la aceleración generada por un sismo con un periodo de retorno determinado y acorde con el estudio a realizar.

Una vez desarrollada la recolección de estos datos necesarios, se interpretan las secciones de acuerdo con los valores de salida (Factores de seguridad, Probabilidad de Falla, etc). Para las secciones escogidas se realiza los análisis mencionados, con detalles de modelado y herramientas a emplear con el software explicadas a continuación como parte del proceso.

2.2. Modelamiento y uso del software Slide V6.0

El programa Slide es un software que calcula factores de seguridad y probabilidad de falla en una sección definida debido a las fallas circulares o no circulares del talud. Por ello, resulta muy práctico su uso, ya que el tiempo emprendido en analizar una sección es corto y permite evaluar varios círculos de falla. Se toma como referencia para la metodología en esta sección el manual de uso para este software de ingeniería geotécnica (Rocscience, 2018).

2.2.1. Modelamiento de las secciones del talud

El modelamiento de las secciones comienza con la obtención del levantamiento topográfico del distrito, donde se aplican cortes cada 50 m que nos permite contar con las secciones para el tramo de estudio. Estas deben ser guardadas en formato .dxf (AutoCad), para luego ser exportadas al software compartiendo del mismo modo la estratigrafía del talud. A partir de ello, se debe definir los materiales de los estratos que se encuentran comprendidos en la sección con sus respectivos parámetros geotécnicos. Este modelamiento nos permite idealizar el comportamiento gravitatorio del talud para todas las secciones de estudio, en las cuales se puede analizar los distintos métodos planteados en el trabajo, puesto que el programa pone a disposición del usuario la colocación de una grilla y la cantidad de cuadrículas que desea considerar en la misma, o bien la búsqueda de talud (*Slope Search*) para áreas específicas del talud a las cuales se les define los límites de las superficies de deslizamiento. Todo esto se hace con la finalidad de tener un muestreo de todos los posibles casos de estudio, siendo el segundo método el empleado para 5000 superficies dentro de la

búsqueda configurada en el software. Además, para cada método se realiza un estudio que incluye las cargas gravitatorias de los edificios ubicados en la superficie y en el otro caso incluye el espectro sísmico de la zona, de manera que permita evaluar su desempeño ante las mismas necesidades del lugar de estudio.

2.2.2. Método de equilibrio límite

Con la designación del centro de origen del círculo de falla, el programa Slide presenta la opción de realizar distintos métodos de análisis (Figura 2). De los anteriores, se va a considerar los métodos determinísticos de Janbu, Spencer y Morgenstern-Price, por ser los más confiables y precisos que los demás (Zamora, 2019), ya que abarcan deslizamientos circulares, no circulares y de otras formas que pueden existir en cualquier sección.

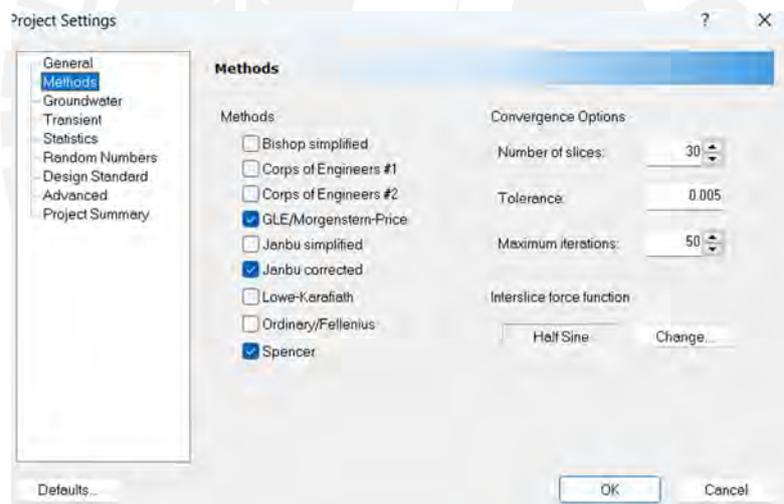


Figura 2: Métodos de análisis determinísticos utilizables en el Slide V6.0. Fuente: Rocscience, 2018

Posteriormente, se procede a configurar las opciones de búsqueda de la superficie, para lo cual aplicaremos el método de búsqueda *Slope Search* (Figura 3). En este, se definen los límites de estudio para un posible deslizamiento por falla tipo circular, al cual mediante una serie de iteraciones mostrarán los resultados más representativos a partir de una considerable cantidad de superficies de deslizamiento probable.

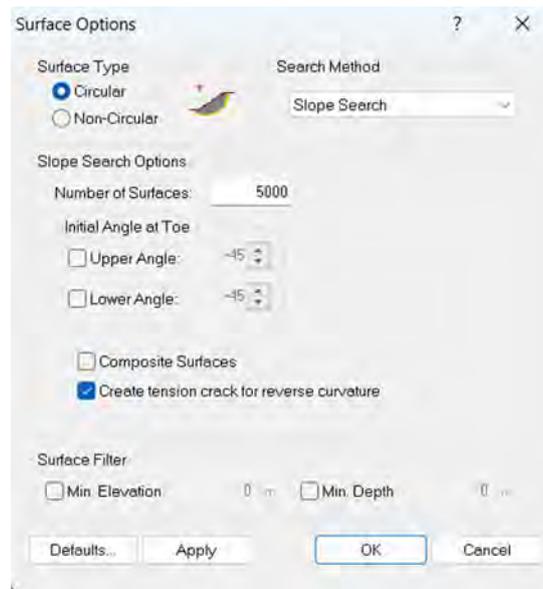


Figura 3: Métodos de búsqueda de superficie de falla en el Slide V6.0.

Fuente: Rocscience, 2018

El cálculo realizado por el programa se basa en el cálculo tradicional del factor de seguridad ante la presencia de un círculo de falla, ya que determina la relación entre los momentos resistentes como el esfuerzo cortante generado por el deslizamiento del talud, con los momentos de oposición como el peso del suelo contenido en el círculo de falla e incluso las cargas gravitatorias de los edificios ubicados en la superficie.

2.2.3. Método de Monte Carlo

Debido a que el programa permite cambiar la configuración del método determinístico al probabilístico, una vez que el talud se encuentre modelado en el software (*Slide*), se procede a cambiar el tipo de análisis por otro llamado Monte Carlo (Figura 4), este permite analizar la variabilidad asignada a los resultados de los ensayos realizados a los estratos que se adoptaron en el modelamiento. Con ello, se denota un rango variable de sus datos y permite que el programa realice el análisis para cada subconjunto de valores. Igualmente, se debe especificar el tipo de muestreo, determinar un número de muestras considerable que nos permita obtener un resultado adecuado y aplicar el tipo de análisis Overall Slope, el cual

selecciona aleatoriamente los parámetros de la sección y realiza el análisis determinístico en las posibles superficies de falla.

M: número de muestras aleatorias y N: número de superficies de falla

Q: Cantidad de iteraciones

$$Q = M \times N$$

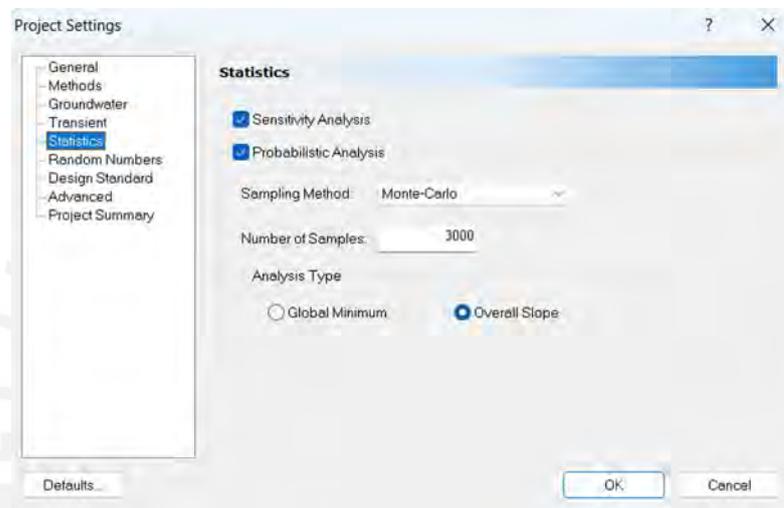


Figura 4: Método Monte Carlo en el software Slide V6.0. Fuente: Rocscience, 2018

Por lo tanto, al activar el análisis probabilístico también se activa una opción adicional de variables aleatorias para cada material, donde se añade los tres parámetros determinados en la recolección de datos y se introduce sus valores promedios, desviaciones estándar y relativas mínimas y máximas para que se obtenga una distribución estadística de cada variable aleatoria.

A continuación, el programa procede a computar e interpretar los datos de la misma manera que el método explicado anteriormente, ya que utiliza las mismas teorías del método determinístico, pero en cambio, este es aplicado para todo el conjunto de parámetros establecidos como una distribución estadística. Esto lleva a obtener como resultados otra distribución estadística en base a los factores de seguridad obtenido por el programa y que

adicionalmente, determina el factor de seguridad promedio de todos los datos computados. Además, desde el enfoque estadístico, el programa determina una probabilidad de falla, basado en el porcentaje entre las muestras que presentan un factor de seguridad menor a 1 con el número total de muestras, y dos índices de confiabilidad, uno asumiendo una distribución estadística normal y la otra distribución lognormal.

2.3. Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados finales del proceso determinístico y probabilístico para los taludes del distrito de Magdalena, se interpretan los mismos para cada sección a través de tablas que complementen los valores de factores de seguridad con probabilidades de falla. Además, se analiza la semejanza mediante ambos métodos, enfocando la aplicación del método de Monte Carlo como el que da mayor importancia a la determinación de la estabilidad de cada talud estudiado.

Finalmente, se elabora con los resultados un mapa de riesgo para el tramo de estudio del distrito, de manera que sea entendible para todo lector. Una posterior difusión de este puede ser de gran apoyo a la prevención de desastres en el acantilado, tomando conciencia y reflexionando sobre futuros proyectos que se quieran realizar o las medidas correctivas a emplear para la estabilización y que salen del tópico del trabajo de investigación. Con esto se materializa el propósito del trabajo de tesis, dando paso final a las conclusiones y recomendaciones del caso.

2.4. Flujograma de trabajo de tesis

Como resumen de la metodología a emplear en este trabajo de tesis, se genera el siguiente flujograma ilustrado en la figura 5, de actividades a realizar para cumplir con los objetivos establecidos en el capítulo anterior.

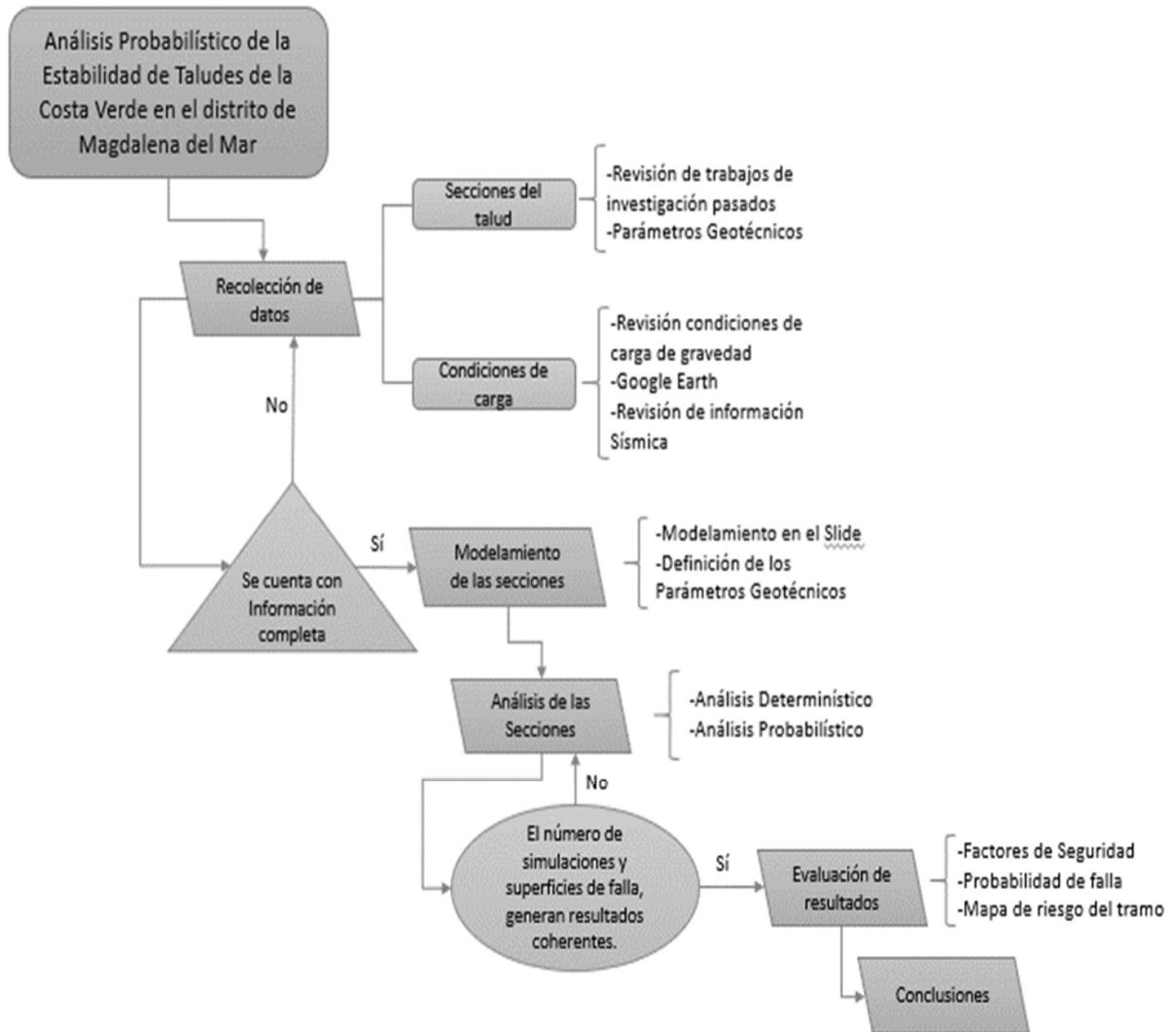


Figura 5: Flujograma para el Trabajo de Tesis.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

En la ingeniería geotécnica, la base de la investigación parte del análisis y reconocimiento del suelo, los cuales sirven para el diseño de cimentaciones superficiales o profundas, tratamientos de terreno, estructuras de suelo reforzado, entre otros. Es importante considerar la complejidad del estudio de suelos, ya que los estudios para obtener los parámetros son realizados con ensayos o correlaciones empíricas; si a esto le agregamos que la naturaleza del suelo puede alterarse, el comportamiento de los suelos depende también del origen en el acomodamiento de las partículas dentro de la muestra (Terzaghi, Peck & Mesri, 1997).

Lambe (1967) sostuvo que la rama de la ingeniería conocida como la mecánica de suelos era en ese entonces relativamente joven, siendo en esa época el inicio de imparticiones de cursos para promover el desarrollo de esta especialidad de la ingeniería. Se proponía en un inicio determinar las propiedades del suelo o material que compone el terreno para luego buscar una solución al problema planteado. Cabe mencionar que se pueden hallar actualmente varias características necesarias para el desarrollo de un proyecto, acomodándose a lo que un especialista necesite de un material para describirlo y desarrollar teorías mediante la práctica. Si orientamos lo explicado a este caso, los métodos determinísticos necesitan de un fundamento o criterio que permita obtener equilibrios de fuerzas y factores de seguridad. Para el caso del método probabilístico es cierto que se requiere más de formulaciones matemáticas, pero no escapa de necesitar parámetros geotécnicos como datos de entrada.

Los taludes pueden ser naturales o diseñados por ingenieros. Estos pueden padecer de varios efectos como gravedad, sismo, sobrecarga, etc. Es por ello, que son susceptibles a diferentes fallas, que pueden perjudicar y ocasionar desastres si es que no se previenen adecuadamente. Para Lima, el caso de la Costa Verde puede ser especial, ya que significa actualmente una vía principal de circulación para unir varios distritos de la capital y corre el riesgo de

desprendimientos por las edificaciones en la parte alta del talud. Ahí recae la responsabilidad de mantener fuera de peligro a todos los seres humanos que transiten por dicha vía. Conocer factores de seguridad y probabilidades de falla es la solución para tomar como referencia cómo está comportándose cada sección de talud en estudio. Esto se logra con ayuda de un software que cumpla con los cálculos usando la teoría de los métodos desarrollados a continuación.

3.1.Suelos

Terzaghi, Peck & Mesri en su libro *Soil Mechanics in Engineering Practice* (1997) explican que los materiales que constituyen la corteza terrestre se pueden separar en dos grupos: Suelos y rocas. Yendo por el lado de los suelos, estos son cualquier agregado natural de partículas minerales separables por medios mecánicos de poca intensidad. Aparte, estos pueden dividirse en dos grupos de acuerdo con su descomposición física o química de las rocas y por origen orgánico (p. 2). Para nuestro estudio, es fundamental conocer características físicas y mecánicas que permitan clasificar los diversos tipos de material y aplicarlos para el caso de la Costa Verde. De esta manera, la descripción del material en estudio permite estimar las propiedades índice de los suelos, como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades índice de los suelos. Fuente: Terzaghi, Peck & Mesri, 1997

Descripción del suelo	Porosidad	Relación	Contenido	Peso Unitario	
	n (%)	de vacíos e	de humedad w (%)	γ_d (g/cm ³)	γ (g/cm ³)
Arena uniforme, suelta	46	0.85	32	1.43	1.89
Arena uniforme, densa	34	0.51	19	1.75	2.09
Arena graduada, suelta	40	0.67	25	1.59	1.99
Arena graduada, densa	30	0.43	16	1.86	2.16
Morena glaciár con partículas de todo tamaño	20	0.25	9	2.12	2.32
Arcilla glaciár blanda	55	1.2	45	-	1.77
Arcilla glaciár resistente	37	0.6	22	-	2.07
Arcilla blanda ligeramente orgánica	66	1.9	70	-	1.58
Arcilla blanda muy orgánica	75	3.0	110	-	1.43
Bentonita blanda	84	5.2	194	-	1.27

w = contenido de humedad del suelo saturado, en por ciento del peso del suelo seco

γ_d = peso unitario del suelo seco

γ = peso unitario del suelo saturado

Los ensayos para establecer la clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y/o *Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) son los más sencillos para iniciar todo estudio en problemas de geotecnia. Lambe en su libro *Soil Testing for Engineers* (1967) brinda el detalle para los procedimientos de ensayo y explica qué son cada una de las propiedades que se obtienen como resultado.

Primero tenemos el peso específico, que es el cociente de peso y volumen de suelo. También tenemos los límites e índices de Atterberg, que se utilizan para poder caracterizar el comportamiento de suelos finos. Zegarra (2016) explica en sus apuntes del curso *Mecánica de Suelos* los estados de consistencia, como fases generales por las que puede pasar el suelo

durante su secado. Sin embargo, no existían criterios que distingan los pasos a cada estado.

Ante este problema, Atterberg establece las primeras convenciones:

- Límite líquido: Definido como el contenido de humedad por debajo del cual el suelo llega a comportarse como plástico. Mediante la copa de Casagrande se puede saber si el suelo pasa de estado plástico a estado líquido.
- Límite plástico: De un estado semisólido pasa el suelo a un estado plástico. Se caracteriza por el agrietamiento de la muestra al amasarse.
- Límite de contracción: Define el paso de estado semi sólido a sólido y viceversa. No se produce reducción adicional de volumen de muestra.

Con estos límites iniciales, se formula el índice de plasticidad como la diferencia entre límite líquido y plástico, así como otros índices que ayudan a definir el material. Además, el principal estudio que se le puede aplicar a una muestra es el ensayo granulométrico. Este consiste en zarandear la muestra de suelo ya sea alterada o inalterada a través de tamices calibrados mediante normas internacionales. Se obtiene como resultado la curva granulométrica que permite hacer una clasificación SUCS. Es cierto que existen aún más ensayos para determinar parámetros índices o geotécnicos en una campaña de exploración, es por ello por lo que a continuación se explican los que necesitaremos como datos de entrada para el desarrollo del trabajo.

3.1.1. Parámetros geotécnicos

De la campaña geotécnica que se realice a un terreno en estudio, como finalidad de un proyecto, se tiene como objetivo principal obtener los parámetros característicos del suelo. Este se somete a varios ensayos de reconocimiento de propiedades índice y mecánicas. Las que nos sirven para el presente trabajo de investigación son tres y son los datos de entrada

principales en el software a emplear para el análisis tanto determinístico como probabilístico. Se debe contar como dato principal con el peso específico (cociente entre el peso y volumen de la muestra), este es característico de cada material, dependiendo de su granulometría y es calculado a partir de la recolección de una muestra. Asimismo, se requiere contar con los parámetros de cohesión y ángulo de fricción, los cuales son característicos en ciertos tipos de suelos.

Característico de los suelos arcillosos, Suárez (1998) explica: “Es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación”. A través de ensayos en suelos no saturados se produce un fenómeno de adherencia, lo cual se deduce como una cohesión aparente. Por ello, es importante determinar el tipo de ensayo a realizar, contemplando las condiciones iniciales indispensables para representar de mejor forma cada caso a analizar.

Por otro lado, los suelos granulares se caracterizan por tener un ángulo de fricción interno, el cual es una representación matemática del coeficiente de rozamiento de estudios físicos, determinado como la tangente del ángulo en cuestión. Este parámetro para suelos granulares sueltos tiene valor igual al ángulo de reposo (Suárez, 1998) y depende de varios factores como: Tipo de mineral constitutivo de partículas, tamaño de los granos, distribución de los granos, densidad, permeabilidad, confinamiento y presión de preconsolidación. Con ambos datos se puede medir la resistencia al corte del suelo, característico por ser crítico para la falla de una estructura geotécnica. Dentro de los ensayos que permiten conocer ambos parámetros explicados, el que permite tener un mejor acercamiento a la realidad de condiciones es el ensayo triaxial. A comparación del de corte directo, el triaxial es mucho más versátil, ya que se puede controlar el drenaje de buena manera y ocasionar que la falla se de en cualquier parte del espécimen (Zegarra, 2016). El mismo autor explica las variables del ensayo, que

pueden ser no consolidado - no drenado (UU), consolidado - no drenado (CU) y consolidado - drenado (CD). De cada uno se obtienen cohesiones y ángulos de fricción interna bajo condiciones más reales. En la figura 6 se muestra el concepto de los esfuerzos principales en los bordes de la muestra a ensayar, y que sirven para el criterio de falla a comentar en esta sección del trabajo.

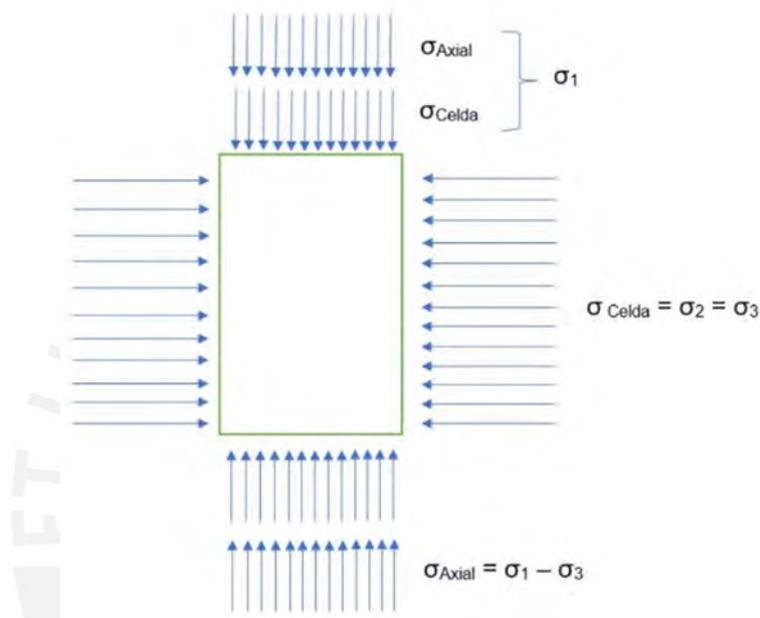


Figura 6: Esfuerzos principales en suelos. Fuente: Adaptado de Zegarra, 2016

Donde,

- σ_{Axial} : Esfuerzo Desviador
- σ_{Celda} : Esfuerzo en Celda
- $\sigma_{1, 2, 3}$: Esfuerzo Axial en ejes X, Y, Z

3.1.2. Parámetros estadísticos

Para poder emplear el método de Monte Carlo en el presente trabajo, es necesario introducir dos conceptos estadísticos imprescindibles, así como las formas en que se aplicarán los mismos para obtener las probabilidades de falla como resultado final. Primero se tiene el valor promedio, el cual se obtiene como la media aritmética: Suma de todos los valores entre

el número de datos. Con esto podemos calcular un nuevo valor: la desviación estándar. Duncan (2000) en su artículo *Factors of safety and reliability in geotechnical engineering* menciona métodos para estimar este parámetro estadístico. Se detallan los tres:

- Base de datos: Cuando la información es suficiente, se puede emplear la formulación estadística de desviación estándar como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X-x)^2}{N-1}} \quad (1)$$

Donde,

- σ : Desviación estándar de la muestra
- X : Media aritmética de la muestra
- x : Dato de la muestra
- N : Cantidad de datos de la muestra

- Coeficientes de variación: Para cada parámetro de suelo y tipo de ensayo in situ, existe un número que expresa su variación. El autor Duncan (2000) explica que otros como Harr (1984), Kulhawy (1992), y otros propusieron los porcentajes adecuados para cada experimento en campo y se ilustran en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de los coeficientes de variación. Fuente: Duncan, 2000

Propiedad o Resultados de ensayos in situ	Coefficiente de variación (%)	Fuente
Peso específico	3 - 7	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Peso unitario sumergido	0 - 10	Lacase and Nadim (1997), Duncan (2000)
Ángulo de fricción efectiva	2 -13	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Resistencia al corte No Drenado	11 - 45	Duncan (2000)
Ratio de resistencias No Drenado	5 - 15	Lacase and Nadim (1997), Duncan (2000)

Índice de Compresión	10 - 37	Harr (1984), Kulhawy (1992), Duncan (2000)
Presión de preconsolidación	10 - 35	Harr (1984), Lacase and Nadim (1997), Duncan (2000)
Coefficiente de permeabilidad de arcilla saturada	68 - 90	Harr (1984), Duncan (2000)
Coefficiente de permeabilidad de arcilla parcialmente saturada	130 - 240	Harr (1984), Benson et al. (1999)
Coefficiente de Consolidación	33 - 68	Duncan (2000)
Ensayo SPT	15 - 45	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Ensayo eléctrico CPT	5 - 15	Kulhawy (1992)
Ensayo mecánico CPT	15 - 37	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Resistencia de prueba del dilatómetro	5 - 15	Kulhawy (1992)
Ensayo de cizallamiento	10 - 20	Kulhawy (1992)

- “*Three-Sigma Rule*”: Duncan explica que Dai & Wang (1992) se valen del hecho que 99.73% de todos los valores en una distribución normal caen dentro de tres desviaciones estándar del promedio. Con esto se puede aplicar el siguiente criterio:

$$\sigma = \frac{HCV-LCV}{6} \quad (2)$$

Donde HCV es el valor máximo obtenido para el parámetro y LCV es el menor valor para el parámetro en estudio.

3.1.3. Criterio de falla de Mohr-Coulomb

De acuerdo con lo explicado por Labuz & Zang (2012): “El criterio de falla de Mohr Coulomb es un conjunto lineal de ecuaciones que describen las condiciones para las cuales fallará un material isotrópico, por efecto de algún esfuerzo principal.” Técnicamente, los resultados de laboratorio son evaluados usando este criterio, siendo la ecuación principal:

$$\tau=c+\sigma*\tan\phi \quad (3)$$

Donde,

- τ : Resistencia al esfuerzo cortante (kN/m²)
- c : Cohesión (kN/m²)
- σ : Esfuerzo normal (kN/m²)
- ϕ : Ángulo de fricción (°)

Donde son de gran importancia los parámetros geotécnicos de cohesión y ángulo de rozamiento. A partir de este concepto, los esfuerzos en los suelos que componen los taludes tendrán mayor probabilidad de falla cuando se acerquen a los admisibles. Ambos autores detallan que estos criterios son notables debido a que se considera un esfuerzo medio en el plano de estudio. Esto resulta importante para materiales como roca y suelo, siendo el último el que vamos a estudiar para el caso de la Costa Verde. De los ensayos de compresión simple o triaxiales, se pueden hallar las tensiones efectivas para el trazo de los círculos de Mohr. Las tangentes de las semicircunferencias plasmadas en la gráfica dan la envolvente de falla. Aquí es donde toma sentido la ecuación lineal explicada en un inicio. La figura 7 muestra un resultado aleatorio con la indicación de los parámetros establecidos para una muestra de suelo: Cohesión y ángulo de fricción interno.

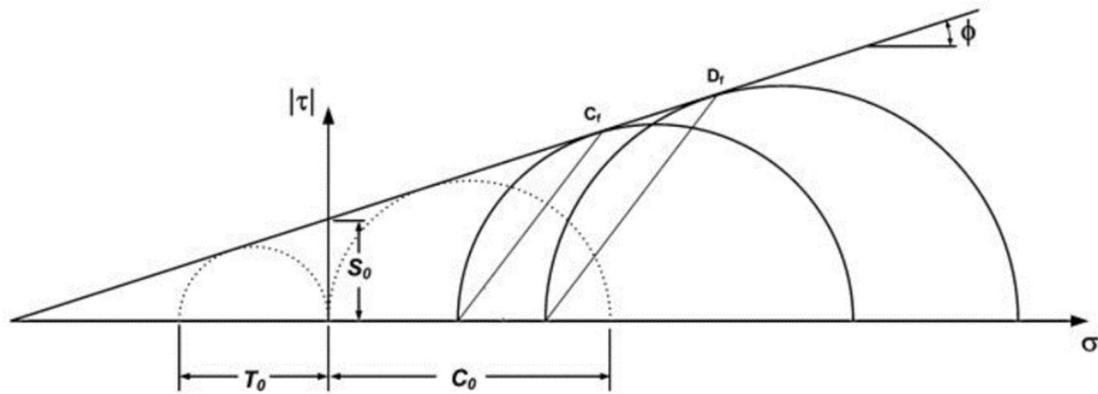


Figura 7: Envolvente de falla y parámetros geotécnicos. Fuente: Labuz & Zang, 2012

Donde,

- T_0 : Resistencia a la tracción uniaxial teórica de Mohr-Coulomb
- c_0 : Resistencia a la compresión uniaxial
- c_f, d_f : Esfuerzos de falla en los Círculos de Mohr
- s_0 : Resistencia inherente al corte (Cohesión)

3.2. Análisis de estabilidad de taludes

3.2.1. Taludes

De acuerdo con De Matteis (2003) un talud se entiende como una superficie inclinada respecto de la horizontal que adoptan las estructuras de tierra. Por el mismo hecho de estar compuestos por suelos, constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio se aplican los problemas de mecánica de suelos, como la resistencia al corte que recae en una superficie de falla si es que se llega a igualar las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes en un esquema de equilibrio. Este puede ser creado de manera natural o de manera artificial como proyecto de ingeniería civil. Además, teniendo presente la antigüedad del talud, puede ser más susceptible a la falla debido a cambios topográficos por el clima, efectos de sismo, cambio en la resistencia y composición de la sección, o efectos antrópicos que

afectan el sostenimiento (Suárez, 1998). La forma y pendiente es característica de cada estructura geotécnica, pero pueden delimitarse elementos o partes de esta (Figura 8).

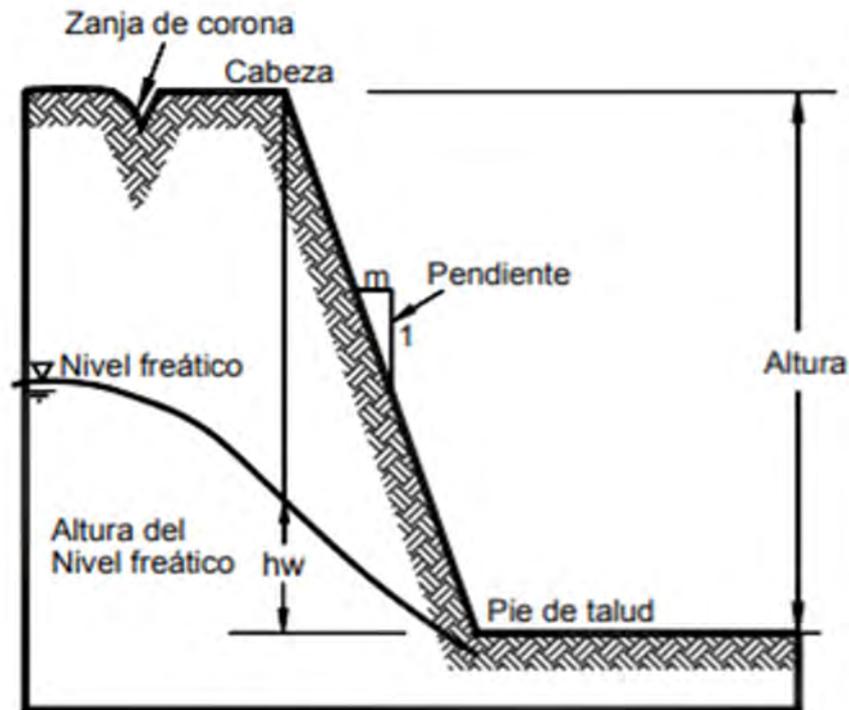


Figura 8: Nomenclatura de las partes del talud. Fuente: Suárez, 1998

3.2.2. Deslizamientos

Por varias condiciones a las que está sometido el talud, adicionando el efecto de cargas gravitacionales e hidráulicas, los movimientos de deslizamiento ocurren a lo largo de las superficies de falla. Esto en caída libre o en flujo (Suárez, 1998). Adicionalmente, se pueden establecer partes representativas del fenómeno de falla, ilustradas en la figura 9.

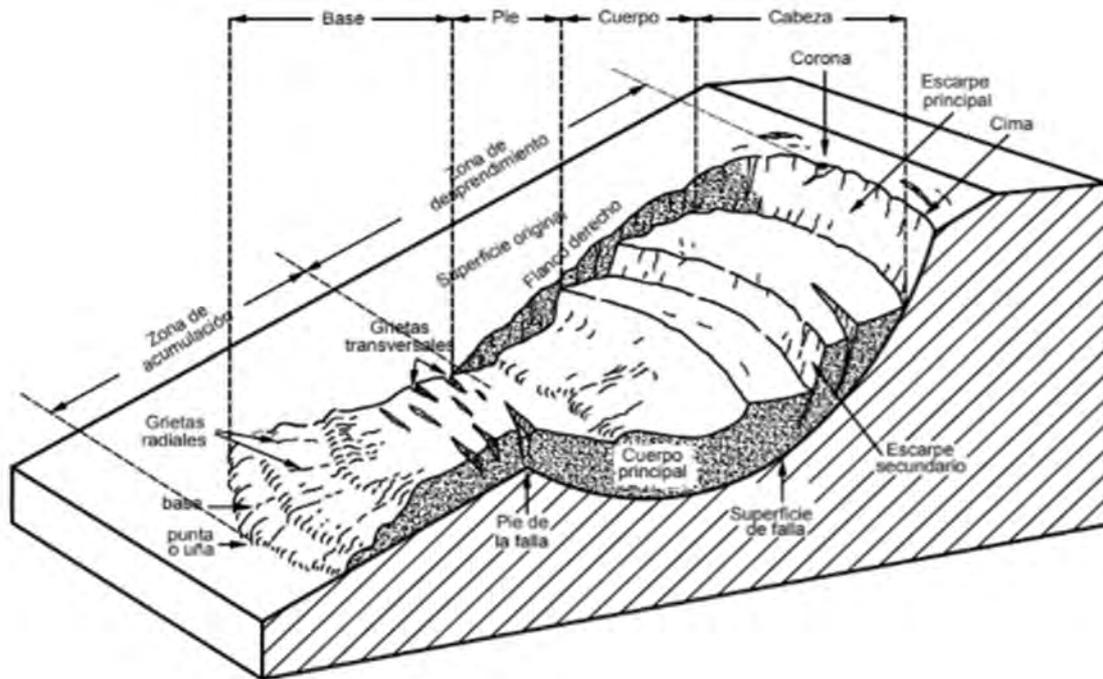


Figura 9: Partes que conforman un deslizamiento. Fuente: Suárez, 1998

Estos deslizamientos son ocasionados de diversas maneras, ya sea de manera rápida o lenta. Según Soriano (2011): “La estabilidad global de una determinada obra se pierde cuando la tensión de corte necesaria para mantenerla es superior a la resistencia al corte del terreno”. En consecuencia, debido a este fenómeno, se produce el deslizamiento de la superficie externa. Además, en base a lo expuesto por el autor, se presenta tres tipos de deslizamientos, por lo que en esta investigación se presentará el análisis en base a un tipo de estos, los cuales pueden ser:

- Deslizamiento según líneas de rotura planas a la superficie del terreno: Se presenta mayormente en los acantilados, donde el suelo se encuentra en forma de recubrimiento a la roca, este suelo ante algunas cargas y lluvias procede a separarse de la roca.

- Deslizamientos circulares: Este tipo, conocido como círculo de pie, se desarrolla sobre el talud mediante formas circulares hasta alcanzar una zona rígida. A su vez, depende de otros factores como inclinación, cargas actuantes, tipo de suelo, etc.
- Deslizamientos no circulares: Caracterizado por no contar con una forma circular, debido a la calidad del terreno y su disposición estratigráfica.

3.2.3. Análisis del talud

El análisis de estabilidad se puede diferenciar según el objetivo principal de estudio. Por un lado, encontramos que según Aguilar y Zuñiga (2015), el mismo se basa en el cálculo de la altura crítica y/o la carga última aplicable para que este llegue al colapso; es decir, este enfoque permite diseñar un talud en base a un factor de seguridad de diseño obtenido de las normas técnicas, el cual depende del uso que se le dará al talud. Por otro lado, se puede realizar un análisis de estabilidad que estudie y determine el factor de seguridad ante fallas circulares o no circulares, con la finalidad de evaluar la factibilidad de los proyectos que se deseen realizar en la zona. Por lo tanto, ambos procesos son parecidos debido a los parámetros utilizados en ambos casos, e incluso por la situación final a analizar; es decir, cuando este llegue al colapso. Este estudio es de gran utilidad para los ingenieros, ya que es utilizado para diseñar cortes de taludes en las carreteras, en las excavaciones masivas realizadas en proyectos inmobiliarios o mineros, debido a que estos requieren tener al suelo en una determinada pendiente. Finalmente, la estabilidad de los taludes es analizada tanto por métodos determinísticos como probabilísticos, estos han sido desarrollados por diversos autores que hacen posible realizar su respectivo análisis en base a la teoría que establece el método de Equilibrio Límite.

3.2.3.1. Teoría del Equilibrio Límite

Según Aguilar y Zuñiga (2015), la teoría del método de equilibrio límite o límite de equilibrio, permite el cálculo de un factor de seguridad en base a unos parámetros como el peso específico, ángulo de fricción y la cohesión del suelo. Este procedimiento se basa en la obtención de una relación entre los esfuerzos resistentes y actuantes aplicados sobre el talud bajo distintas condiciones de cargas o situación sísmicas. Por ello, el factor de seguridad, definido por Fellenius en 1922, indica un valor de falla ante una situación con el peor comportamiento que presente el talud.

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}} \dots (4)$$

Esta expresión, tiende a simplificarse dependiendo del tipo de falla que se presente, ya que en caso de una falla circular estos términos son determinados por la sumatoria de momentos resistentes entre la sumatoria de los momentos actuantes. Sin embargo, la relación toma mayor sentido si se relaciona con la teoría de Fellenius, conocido como método de Dovelas, quien estableció un proceso de cálculo aplicado a la masa que comprende el círculo de falla. Este proceso comienza por la partición mediante rebanadas de la falla circular (Figura 10), luego se calcula el peso que genera esa masa, con la cual se determina el momento actuante del talud. El cálculo de los momentos resistentes corresponde a la fricción generada por la cohesión del suelo, el cual recibe se presenta tangencialmente al círculo de falla. Cabe mencionar que la principal incógnita sería en ubicar el centro de origen del círculo de falla, ya que, al asumir la ubicación de ellos, genera un cálculo independiente para cada uno y que finalmente muestra resultados diferentes. Es por ello, que existen programas informáticos que mediante un proceso iterativo presenta la facilidad de realizar dichos cálculos. Finalmente, Aguilar y Zuñiga (2015) afirman que el método presenta algunas limitaciones

que son requeridas para poder realizar los cálculos; por ejemplo, los esfuerzos son distribuidos uniformemente, modelamiento estático y uso de material isotrópico.

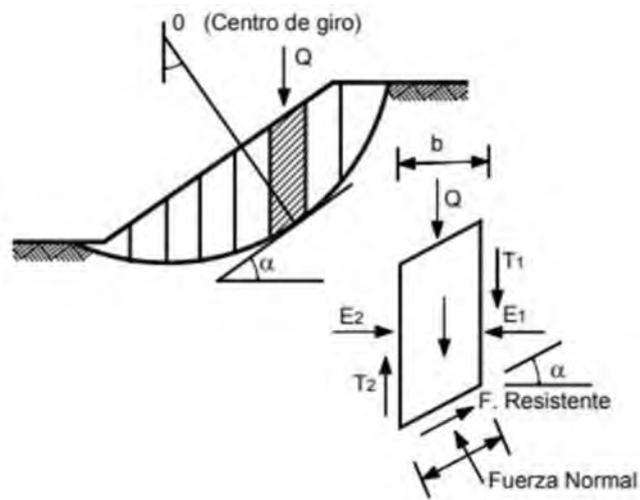


Figura 10: Método ordinario de Fellenius o de Dovelas. Fuente: Aguilar & Zúñiga, 2015

Donde,

- Q : Carga aplicada a la dovela
- E₁, E₂ : Fuerzas normales a la dovela
- T₁, T₂ : Fuerzas cortantes a la dovela
- b : Ancho de dovela
- α : Pendiente del talud

3.2.3.2. Método de análisis determinísticos

Existen diferentes métodos de análisis, los cuales parten del método de Fellenius pero con la diferencia que algunos presentan más limitaciones que otros. Estas limitaciones se diferencian en las asunciones tomadas por cada uno, algunos toman como superficies de falla una sección circular y otros llegan a adoptar superficies de falla no circulares. Del mismo modo, existen métodos que no y otros que si consideran las fuerzas cortantes generadas entre cada rebanada generada por el método de Dovelas. En consecuencia, se optó por considerar

las teorías planteadas por Janbu, Spencer y Morgenstern-Price como métodos principales de estudio, debido a la precisión y a las características que presentan (Zamora, 2019). Según Suárez (1998) estos métodos se diferencian de la siguiente manera; por un lado, Janbu, determina el factor de seguridad sin considerar las fuerzas cortantes entre dovelas. Mientras que el método de Morgenstern-Price asume una función arbitraria para estas fuerzas cortantes. Finalmente, Spencer incluye la asunción de la inclinación de las fuerzas laterales debe ser las mismas para cada tajada, pero a su vez son despreciables.

$$F. S. = \frac{f_0 \sum \{c*b + W*\tan\alpha \frac{1}{\cos\alpha+m*a}\}}{\sum(W*\tan\alpha)} \quad (6)$$

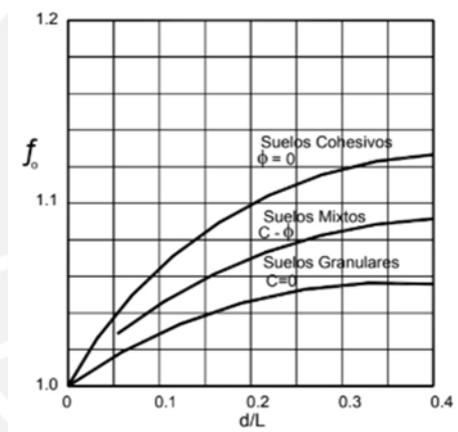


Figura 11: Diagrama para el factor de corrección con Janbu. Fuente: Suárez. 1998

Donde,

- f_0 : Factor de corrección
- W : Peso de la dovela
- c : Cohesión
- b : Ancho de dovela
- α : Pendiente del talud

3.2.3.3. Método de análisis de Monte Carlo

El método de Monte Carlo (1949), utiliza la simulación de variables aleatorias que permiten resolver diferentes problemas matemáticos e ingenieriles; este presenta dos distintivos, por un lado, se tiene el algoritmo aplicado al programa Slide, el cual realiza la prueba aleatoria a partir de la creación de los límites del talud que abarcan las áreas de este, donde se tienen mayores facilidades para la generación de una falla circular. Por otro lado, el método presenta un margen de error definido por la raíz cuadrada de la relación entre una constante D y el número de muestras, entonces, el resultado será más exacto cuando más muestras se analicen, el cual tiende entre 5% a 10% (Marciales & Torres, 2018).

Su aplicación se basa en métodos probabilísticos, ya que utiliza variables aleatorias que dependen de los parámetros explicados en el acápite anterior, quienes establecen una función de densidad que es analizado mediante una distribución normal (Figura 12). Según Marciales y Torres (2018), el estadístico Harr establece una fórmula que permite determinar el número de muestras necesario para obtener una precisión específica. Posteriormente, la expresión de Monte Carlo para analizar la estabilidad del talud es reconocido como un método más interactivo, debido a la posibilidad de realizar cambios entre sus parámetros, que a la vez cambia la función de probabilidad.

$$P_f = P(F) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I [\min_w FS_w (x_i) < 1 \equiv P_F^{MCS}] \quad (20) \quad (7)$$

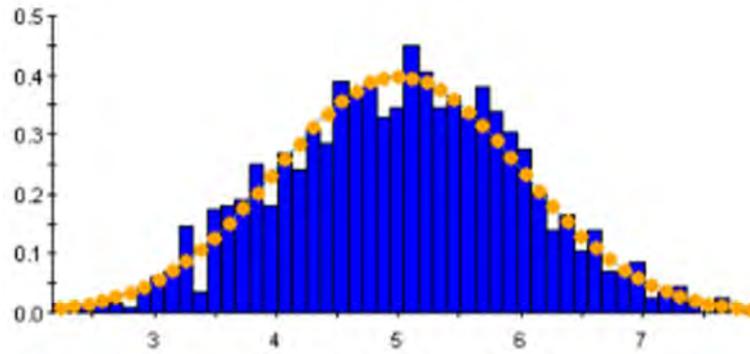


Figura 12: Muestreo Monte Carlo, distribución normal. Fuente: Rocscience, 2018

Para Cruz, Durand y Romero (2004), en términos generales el método de Monte Carlo proporciona soluciones aproximadas para varios tipos de problemas matemáticos en muestras estadísticas. En la práctica, ha resultado un buen complemento a desarrollos determinísticos, así como aquellos de neta estructura probabilística. Este fue llamado así por la alusión a la ciudad y principado de Mónaco, donde anteriormente las iteraciones que se realizaban para dar con las aproximaciones estadísticas, en cualquier ámbito con los cálculos respectivos, eran demasiadas. En consecuencia, provocaba inconvenientes y fatiga debido al tiempo que se necesitaba para obtener los resultados de todas las simulaciones. En la actualidad este tiempo se puede ver reducido a segundos gracias a la potencia de los ordenadores con procesadores cada vez más rápidos de acorde al avance de la tecnología. Algunas de las aplicaciones explicadas por los mismos autores para el método se pueden ver en la medicina, para entender cómo trabajan las medicinas en los sistemas inmunológicos y metabolismos del cuerpo humano; tratamiento de cáncer, para determinar la dosis adecuada de neutrones junto con el espectro de energía que se debe suministrar para eliminar el tumor maligno; economía, para simular los valores de los parámetros económicos y determinar una distribución de probabilidad para una tasa de ganancia; y en inversiones, para tomar en cuenta durante las simulaciones la volatilidad e imprecisión de los mercados en cuanto a acciones y bonos.

En cuanto a la distribución de probabilidad, esta requiere de datos de entrada para efectuar las simulaciones. Ello implica valores mínimos y máximos, uno medio, desviación estándar para la muestra de cada parámetro variable, y valor esperado luego de una serie de experimentos. Esto resultará en una función que describe la probabilidad de que la variable a examinar adopte un valor objetivo. Como preámbulo a los cálculos a realizar en el presente trabajo de tesis, podemos decir que en la distribución normal a aplicar se necesitaría de desviaciones estándar y medias para las variables aleatorias, así como establecer valores límite para establecer la falla ($FS < 1.00$) o el éxito en las simulaciones ($FS > 1.00$).

Adicionalmente, un factor influyente para determinar la confiabilidad de los resultados depende de la cantidad de simulaciones que se hagan para cada caso. Tomando como referencia los ensayos realizados por Gibson (2011), se puede evidenciar que se debe considerar una cantidad considerable de simulaciones para que el factor de seguridad promedio tienda a ser semejante a los factores de seguridad mínimo y máximo (Figura 13).

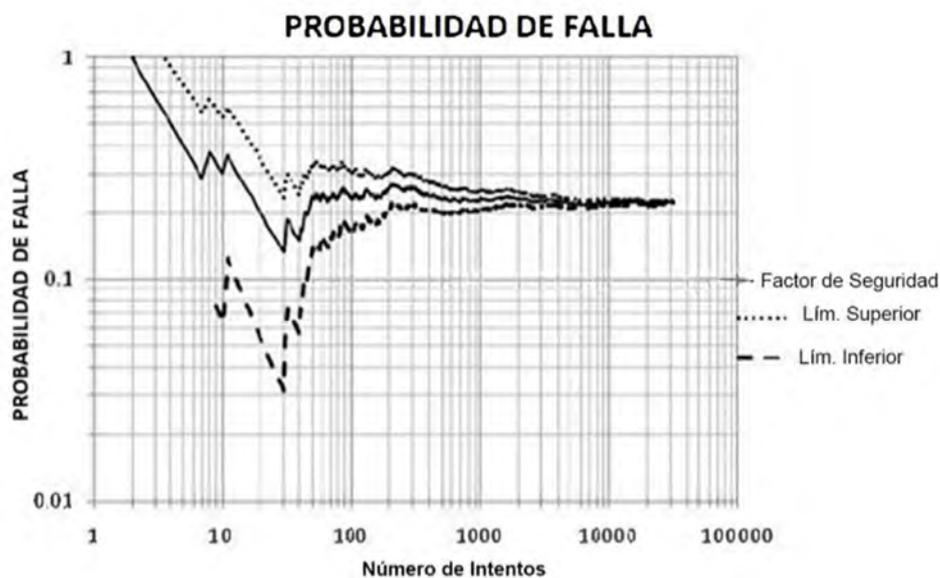


Figura 13: Probabilidad de falla vs Número de simulaciones. Fuente: Gibson, 2011

CAPÍTULO IV: LA COSTA VERDE

La parte superior de los taludes de la Costa Verde, también denominado malecón, es considerado como un mirador debido a los 50 metros de altura que posee, esto lo convierte en un atractivo turístico e incluso un territorio de inversión que atrae a empresas inmobiliarias. Se caracteriza por sus pendientes, las cuales varían a lo largo de la zona de estudio, existiendo taludes empinados; es decir, su inclinación tiende a un valor cercano de 90 grados (Figura 14); también existen taludes que no se encuentran muy empinados, con inclinaciones entre 20 y 60 grados con respecto a la horizontal (Figura 15). Asimismo, estos taludes presentan agentes de degradación que afectan su estabilidad, tales como: la erosión ocasionada por las brisas marinas, los pesos de las edificaciones cercanas al proyecto como vías de circulación y parques que generan una presión adicional en el suelo, entre otros por factores climatológicos.



Figura 14: Talud con pendiente alta en la Costa Verde. Fuente: Google Maps



Figura 15: Talud con pendiente baja en la Costa Verde. Fuente: Google Maps

4.1. Reseña histórica

La visión de tener una vía que una Chorrillos con La Punta (Callao) partió desde el gobierno de Augusto B. Leguía (1919 – 1930), quien además era de la idea de modernizar Lima y promover la expansión cerca a esta vía frente al mar. Es así como su proyecto, hasta antes del golpe de Estado, comprendió la Avenida Costanera (Figura 16), desde Callao hasta la Avenida Brasil en Magdalena del Mar. Se puede considerar este hecho como el impulsador del inicio de la construcción de la Costa Verde (TV Perú, 2020).



Figura 16: Balneario de La Perla incluyendo la Av. Costanera en el año 1925. Fuente: PAIN, 2014

La formación del circuito de playas fue en dirección sur-norte de Lima; en el año 1957 el arquitecto e inspector de obras públicas del distrito de Miraflores, Ernesto Aramburú, quien, a partir del surgimiento del incremento del tránsito de las vías centrales de la ciudad, planeaba

una vía expresa subterránea desde el monumento Grau hasta la quebrada de Armendáriz y luego agregarle la inclusión de otra vía expresa que una los balnearios de Lima entre los distritos de San Isidro y Barranco. Es así como este proyecto desde los años sesenta constó de una excavación masiva, donde la tierra extraída de la construcción de la Vía Expresa Paseo de la República, obra ejecutada durante la gestión municipal de Luis Bedoya Reyes, fue transportada como relleno que formó parte del proceso del circuito de playas Costa Verde.

El arquitecto Augusto Ortiz de Zevallos en el documental “Costa Verde, historia y desarrollo urbano” (2020) explica que, al cabo de un tiempo la construcción de espigones con material del Panóptico de Lima permitió, con ayuda de los oleajes, la consolidación de los materiales arrojados al mar; en consecuencia, se verificó el alejamiento de las olas y la formación de la explanada. Asimismo, la historiadora Delfina Álvarez Calderón testifica como los acantilados despertaron el interés de la población, ya que la visión de Aramburú era llenar de áreas verdes la superficie de los acantilados, y lo iba consiguiendo gracias a los viveros con los que contaba para sembrar y posteriormente trasplantar al proyecto. Además, se planeó la construcción de bajadas peatonales y vehiculares que permiten la conexión entre los distritos aledaños con las playas (Figura 17), el cual fue un boom para la ciudadanía debido a que ya no podían ser considerados como personas que vivían a espaldas del mar (APCV, 1971).



Figura 17: Planificación de la Costa Verde. Fuente: APCV, 1971

Posteriormente, en el año 1984 el alcalde de Miraflores, Luis Bedoya de Vivanco, inauguró la vía doble de los primeros cinco kilómetros del circuito de playa (Figura 18), evento en el que el reconocido arquitecto, Ernesto Aramburú, recibió una medalla cívica otorgada por el alcalde, agradeciéndole por el trabajo realizado a lo largo de ese tiempo para el distrito (APCV, 1984).

Ante tan majestuosa obra realizada en los años 80, se empezó a plantear la zonificación urbana de los distritos e incluso se comenzó a elaborar centros recreativos, como parques, miradores, etc. En consecuencia, se marca el comienzo de una etapa de aprovechamiento económico y turístico en la zona. El enfoque paisajístico es considerado como el causal del crecimiento inmobiliario a lo largo de los acantilados de la Costa Verde y de la posible inestabilidad del talud a un futuro próximo.



Figura 18: Inauguración de los primeros kilómetros del circuito de playas. Fuente: El Comercio, 1984

Luego, debido a la factibilidad demostrada por el ambicioso proyecto, poco a poco fueron sumándose más distritos como Magdalena, San Miguel y otros del Callao, con la finalidad de lograr nuevas playas y que les permita establecer una conexión entre los distritos mediante

el circuito de playas. El historiador Juan Luis Orrego (2020) explica que, a partir del año 2000, la zona de San Isidro, Magdalena del Mar y San Miguel ganaron terreno al mar a raíz de la construcción de la estación central del Metropolitano. En lo sucesivo y hasta la actualidad, se pudo evidenciar cómo se desarrollaron los proyectos de ampliación de la vía expresa Costa Verde desde San Miguel hasta La Punta (Figura 19), desde el año 2010. El último tramo ejecutado se culminó a fines del año 2022, esto permite actualmente que el tránsito vehicular desde Chorrillos hasta el Callao se reduzca a un lapso de 25 minutos.



Figura 19: Vista en planta del circuito de playas de la Costa Verde. Fuente: Google Earth

4.2. Geología y geomorfología local

El talud actual de la Costa Verde es producto de la erosión marina, fluvial y eólica e incluso debido a las explosiones que dieron lugar a la construcción del circuito de playas. Sin embargo, en cuanto su morfología, este talud proviene del asentamiento del abanico aluvial y fluvial del río Rímac (Figura 20), el cual se empieza desde un tramo ubicado en la localidad oriental de Ate y se desencadena en los acantilados que colinda con el océano Pacífico

abarcando un área de 300 km² (Villacorta et al, 2015). Por el norte, el cono de deyección del río colindó con el río Chillón; mientras que, por el Sur, se extendió hasta el límite con el Morro Solar. Además, su perfil longitudinal al truncarse en la Costa Verde por el acantilado termina en una línea imaginaria existente entre el Morro Solar y la isla San Lorenzo por debajo del nivel del mar. Mientras tanto, el perfil transversal presenta varios tramos con concavidades y convexidades producidos por el oleaje, el cual varía con respecto a la altura del acantilado (Guzmán, Zavala & Valenzuela, 1997). Por ello, los perfiles de la Costa Verde presentan a lo largo del circuito de playas pendientes que se encuentran entre 20° y 90°.

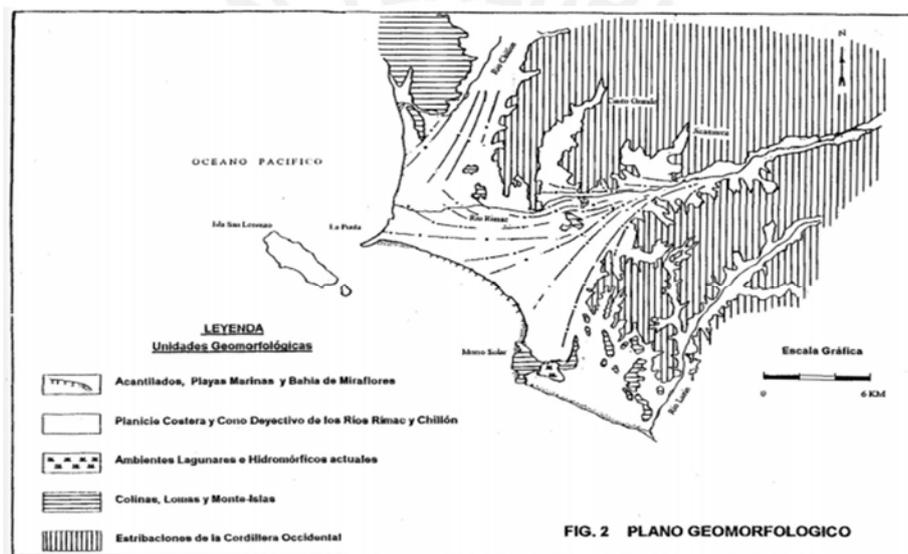


Figura 20: Plano geomorfológico de Lima, observando el cono de deyección aluvial. Fuente: Guzmán, Zavala & Valenzuela, 1997

Asimismo, su variación granulométrica permite identificar las zonas con diferentes tipos de suelo en consecuencia de la sedimentación de los rellenos que fueron traídos por la deyección aluvial. Zegarra (2016) indica que a través de los estudios realizados en el talud de la Costa Verde este posee en su mayor parte grava mal graduada con poca presencia de finos y algunas lentes de arena arcillosas, los cuales por la presencia de finos se fueron aglomerando entre ellos. Cabe resaltar que, también se encuentra la presencia de cantos rodados de origen

volcánico, los cuales se encuentran distribuidos por todo Lima. A lo largo del circuito de playas, las capas estratigráficas presentan diferentes espesores y tamaños, lo que significa que tuvieron secuencias de sedimentación en diferentes años, esto genera que cada secuencia de sedimentación sea diferente a las demás. Igualmente, se encuentran cantos rodados con diferentes morfometría; esta forma de clasificación se basa en la medición de sus parámetros morfométricos que los diferencia conforme se determina un índice de Cailleux. Con este nuevo parámetro, según los estudios de Martínez (2007), se pudo diferenciar los cantos rodados existentes en el talud de la Costa Verde y con ello calcular porcentajes de los diferentes materiales encontrados que representan a la totalidad del material que existe en el talud de estudio.

Además, en base a otros estudios se concluye que el talud contiene lentes de arena, estos se encuentran entre capas gravosas unidas por aglomerantes que presentan arcillas y limos. Se puede observar en la Figura 21, la inclinación leve que presenta cada lente e incluso la diferencia que existe entre los espesores de la capa gravosa y del lente. Gracias a un reconocimiento litológico del talud, especialistas indicaron que se pudo encontrar cuarzos en pequeñas cantidades, algunas intrusiones de andesitas y principalmente rocas graníticas (Guzmán, Zavala & Valenzuela, 1997).

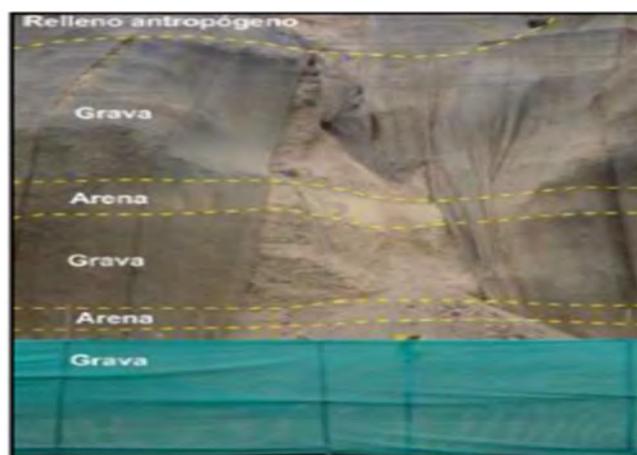


Figura 21: Columna estratigráfica del acantilado. Fuente: COEN, 2019

Por otro lado, debido a la evolución de la tecnología, poco a poco fue posible obtener más información de la geología y geomorfología, es por ello que instituciones como el INGEMMET en base a su estudio, pudieron representar mediante el uso de mapas (Figura 22) la situación geológica de Lima. Asimismo, estos mapas muestran que la formación de la zona de estudio (Costa Verde) forma parte de un depósito de origen parafluvial (Zona verde en la Figura 22); según INGEMMET (2015), el objetivo principal de su elaboración es de empalmar digitalmente los polígonos y generar tablas básicas de atributos para cada unidad lito estratigráfica, características estructurales y secciones geológicas; es decir, poder igualar las diferencias encontradas entre los estudios realizados en fallas, pliegues, rumbos y buzamientos.





Figura 22: Plano geomorfológico de Lima con leyenda. Fuente: INGEMMET, 2015

4.3. Estudios pasados de los taludes de la Costa -Verde

Conociéndose el origen de los taludes, al transcurso de los años es de conocimiento público que existen incidentes fortuitos, producto de los factores ya mencionados. Estos incidentes lamentablemente causan perjuicios tanto al ciudadano como al estado del bien común, es por ello que, debido al desprendimiento ocurrido en el mes de agosto del 2019 en el distrito de

Magdalena del Mar, las municipalidades declararon en emergencia la estabilidad del talud con lo que se esperaba que se realicen estudios que permitan mejorar la situación actual. Sin embargo, actualmente los estudios realizados en la Costa Verde han sido gracias a: Las investigaciones de universidades y organizaciones, las cuales se evidencian, por ejemplo, con los resultados de parámetros de resistencia para los taludes; y los proyectos inmobiliarios y/o de entretenimiento que han sido realizados al borde de los taludes, ya que para la obtención de los permisos de construcción se requiere una memoria de cálculo que explique las medidas que se usarán en el proyecto para no afectar la estabilidad del talud. Entonces, entre los cálculos importantes se encontraba el factor de seguridad ante el deslizamiento del talud, este es obtenido mediante programas informáticos que iteran todas las posibles fallas circulares y se calcula un valor representativo mediante el método escogido. De este modo, se pone como ejemplo el estilo de cálculo en la tesis de Raygada (2011), quien mediante el método determinístico de equilibrio límite realizó el análisis de la estabilidad de taludes en el programa SLIDE para el talud inferior del centro comercial de Miraflores y se obtuvieron factores de seguridad (F. S.) entre 1.03 y 1.72 en el caso estático y F. S. entre 0.72 y 1.14 para el caso pseudo-estático.

Así como también es necesario determinar el factor de seguridad, un paso previo al cálculo y al modelamiento del talud se basa en determinar la aceleración con la que se realizará el análisis pseudo-estático. Según el estudio de Cañari y Alva (2011), se determinó para un sismo de diseño de 0.30 a 0.33g, ya que estableció una relación lineal entre dos datos de un sismo con periodo de retorno de 500 años y una aceleración máxima de 0.44g, y otro sismo con un periodo de retorno de 1000 años y una aceleración de 0.53g.

4.4. Acontecimientos recientes

Cabe mencionar que, debido a la susceptibilidad en algunos tramos de los taludes en la Costa Verde, existieron varias alertas de desprendimientos y deslizamientos de tierras durante los últimos años. Entre ellos uno de los últimos sucesos más sonados, fue el desprendimiento en el talud de la zona de Magdalena del Mar, ocurrido en el mes de agosto del 2019 durante los Juegos Panamericanos (Figura 23). Defensa Civil determinó que el desprendimiento se debió a la existencia de una grieta en la zona. Esto generó repercusión en las municipalidades de cada distrito, por ello ahora algunos ingenieros han planteado opciones para mitigar los riesgos (Lara, 2019).



Figura 23: Desprendimiento en tramo de Costa Verde – Magdalena del Mar. Fuente: Lara, 2019

De todas las medidas de mitigación consideradas para ese desprendimiento, la Municipalidad de Lima optó por la construcción de un sistema de andenería de cinco terrazas (Figura 24), el cual implementaría al distrito con un nuevo malecón y mirador y a su vez cumplir con su propósito principal de evitar futuros desprendimientos (Muñoz, 2019). Asimismo, como medida de prevención la Municipalidad aprobó la Ordenanza N° 2184, la cual precisa un área de intangibilidad de 120 metros de ancho a partir del borde de la corona (El Peruano, 2019).



Figura 24: Sistema de andenería con terrazas en la Costa Verde – Magdalena del Mar. Fuente: Perú 21, 2021



CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

5.1. Secciones del talud de la Costa Verde – Magdalena del Mar

El tramo seleccionado está comprendido entre las intersecciones del Jr. Yungay y la Av. Brasil abarcando una extensión de 500 m. Es considerado importante puesto que uno de los desprendimientos más recordados en estos acantilados se encuentra ubicado en este distrito. De este modo, dada la información recolectada de trabajos anteriores en esta zona, se decidió optar por secciones espaciadas cada 50 m de acuerdo con el trabajo de tesis realizado por Díaz (2008), con el objetivo de generar resultados más precisos que indiquen el estado en el que se encontraba antes del desprendimiento. Asimismo, las progresivas establecidas por Díaz (Figura 25) poseen diferentes características que permitirán la variabilidad de resultados a lo largo de su extensión, debido a las diferentes consideraciones como sus respectivas cargas de gravedad, estratificación del suelo y la geometría del talud. Su modelado en el software permite agrupar estas características para realizar los análisis solicitados.

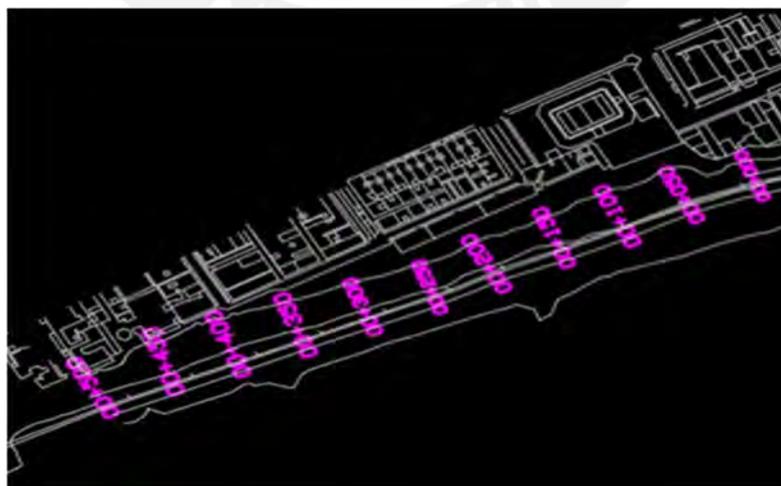


Figura 25: Secciones optadas para el análisis. Fuente: Díaz (2008)

El presente capítulo expone la forma y presentación de los datos necesarios para alcanzar el objetivo de este trabajo de tesis, donde se presentará tanto los datos optados para el estudio como el análisis y resultados obtenidos de estos.

5.1.1. Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico de la zona se encuentra representado por curvas de nivel cada dos metros, al cual se realiza un corte perpendicular a la vía del circuito de playas para obtener la sección mediante la unión de las cotas de los puntos intersectados; de esta manera se establecen 11 secciones a lo largo del tramo de estudio espaciadas cada 50 m, dentro de las cuales existen secciones con pendientes críticas de aproximadamente 70 grados que posteriormente a más altura su inclinación va disminuyendo, como otras que presentan gran cantidad de relleno en la parte superior. Además, según Díaz (2008), producto de la investigación en campo se pudo observar tres componentes presentes en el talud, a los cuales los nombraremos conglomerados, lentes y relleno de la sección. Estos generan diferentes condiciones de estabilidad conforme se comprueba su presencia, como por ejemplo dentro de las progresivas P+000 a P+100 (Figura 26), tramo donde ocurrió el desprendimiento en el mes de agosto del 2019, se presentan estos tres componentes; denominados como conglomerado de grava mal gradada ligeramente arcillosa, lentes de arcilla-limosas y relleno ubicado en la zona superior.

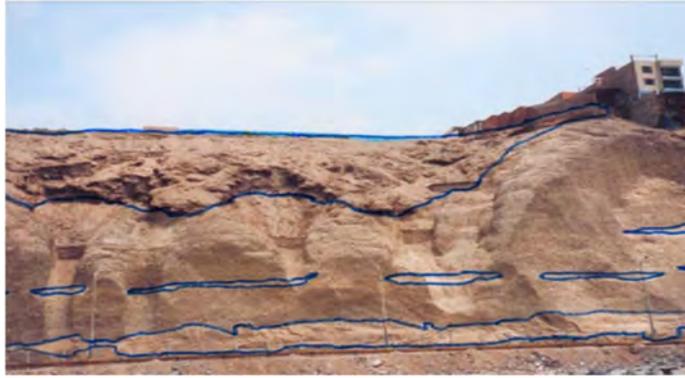


Figura 26: Tramo de estudio P+000 a P+100. Fuente: Diaz

Asimismo, la geometría del resto del tramo presenta los mismos componentes; sin embargo, los tramos P+100 a P+250 y P+250 a P+500 (Figura 27) presentan pendientes empinadas al comienzo del talud y que luego disminuye conforme se llega al nivel de la cresta. Además, estas presentan relleno en menor cantidad a comparación del tramo anterior.

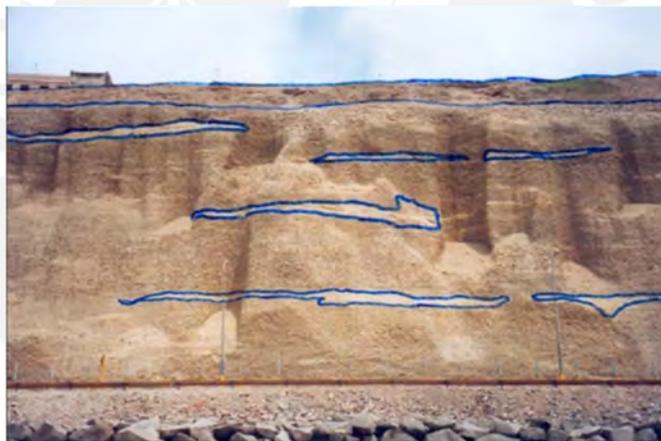


Figura 27: Tramo de estudio P+100 a P+250 y P+250 a P+500. Fuente: Diaz

Finalmente, las secciones tomadas del estudio del ingeniero Díaz (2008) presentan variaciones por el desprendimiento que hubo en el año 2019 entre las progresivas P+050 y P+150, ya que actualmente se cuenta con terrazas construidas por la Municipalidad de Lima (Figuras 27 y 28). En consecuencia, como este estudio abarca la topografía de ese año (Antes del incidente), las secciones serán modeladas y exportadas al software para posteriormente obtener los resultados de los análisis tal como se presenta en el documento de Díaz (Figura 30).



Figura 28: Tramo de estudio P+050 a P+150. Año 2006. Fuente: Google Earth



Figura 29: Tramo de estudio P+050 a P+150. Año 2023. Fuente: Google Earth

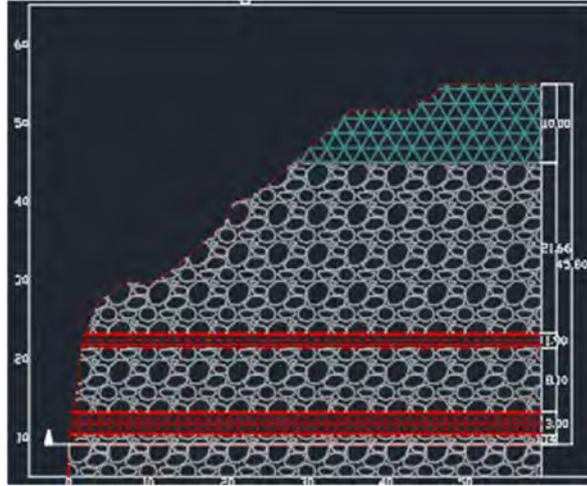


Figura 30: Secciones optadas para el análisis. Fuente: Diaz

5.1.2. Condiciones Geotécnicas

El estudio de los taludes mediante el programa requiere de una serie de parámetros definidos en el marco teórico, que depende del tipo de análisis que se va a realizar, ya que para un estudio determinístico basta con el peso específico, ángulo de fricción y cohesión de cada material, mientras que para un estudio probabilístico utiliza la misma información, pero con la implementación de una desviación estándar que proviene de la variabilidad que presentan la realización de ensayos *in situ*.

Dentro del primer estudio, para los parámetros especificados anteriormente, se pudo contar con bibliografía de estudios realizados a lo largo de la Costa Verde, donde los autores desarrollan un *Back Analysis* con la finalidad de poder completar las características necesarias. Este análisis consiste en modelar una sección crítica del talud sobre el que se realizan varias iteraciones manteniendo dos parámetros constantes y el otro como variable, con la finalidad de evaluar el juego de parámetros que generen un F.S. igual a uno. Asimismo, cabe precisar que para la presente tesis se consideran cuatro autores que estudiaron la estabilidad de taludes, por lo que se tomarán como datos necesarios los resultados finales de los trabajos de las distintas autorías (Tabla 3).

Tabla 3: Parámetros de los componentes del talud de la Costa Verde. Fuente: Propia

Componente del Talud	Peso Específico (kN/m ³)	Ángulo de Fricción (Ø)	Cohesión (kN/m ²)	Referencia
Conglomerado de Roca	22.60	40.00	78.50	Díaz (2008)
	20.60	40.00	54.00	Cañari y Alva (2001)
	22.85	60.00	68.65	Urrutia (2008)
	22.60	42.50	58.90	Pacheco (2006)
Lente de Finos	15.00	22.00	82.40	Díaz (2008)
	16.70	28.50	88.30	Cañari y Alva (2008)
Relleno	18.00	25.00	0.00	Díaz (2008)
	21.00	40.50	0.00	Pacheco (2006)

Producto de la recolección de datos realizada, esta tesis optará por considerar como parámetros a los especificados en el trabajo de investigación realizado por el ingeniero Díaz, debido a que sus estudios se ven representados en las mismas secciones geométricas dispuestas en este capítulo. Además, Díaz al buscar medidas de solución a los taludes, también realiza un *Back Analysis* para determinar todos los parámetros necesarios para el objetivo principal de esta tesis; asimismo, la recolección de datos realizada por Díaz también se encuentra basado en investigaciones anteriores el ensayo de corte directo *in situ* realizado por Cañari y Alva (2011).

Por otro lado, se sabe que el estudio probabilístico considera la variación de los parámetros dentro del talud, ya que estos no se encuentran de manera uniforme; por este motivo se asemejará esa variación a la de los resultados provenientes de ensayos *in situ*, los cuales también presentan variabilidad que está acorde a la manipulación de las muestras al momento de realizar las pruebas. Esta variabilidad está representada en la tabla 2 (Cap. 3, p. 24). Por lo tanto, para nuestros parámetros estableceremos valores intermedios que permitan determinar una desviación estándar moderada con respecto a la media adoptada del caso determinístico.

Tabla 4: Valores de los coeficientes de variación adoptados. Fuente: Propia

Propiedad o Resultado de ensayos insitu	Coficiente de variación (%)
Peso específico	5
Ángulo de fricción efectiva	7.5
Cohesión en condiciones no drenadas	28

La desviación estándar es calculada como el coeficiente de variación multiplicado por la media definida para el material. Los relativos mínimos y máximos son determinados con la desviación estándar, ya que se elige como método de estimación de parámetros estadísticos la “Three-Sigma Rule”, la cual establece estos datos igual a tres veces la desviación estándar. Por consiguiente, estos serán presentados en la siguiente figura proporcionada por el Slide:

#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
1	<input type="checkbox"/> Relleno	Cohesion	^ Normal	0	0	0	0
2	<input type="checkbox"/> Relleno	Phi	^ Normal	25	1.875	5.625	5.625
3	<input type="checkbox"/> Relleno	Unit Weight	^ Normal	18	0.9	2.7	2.7
4	<input type="checkbox"/> Conglomerado	Cohesion	^ Normal	78.5	21.98	65.94	65.94
5	<input type="checkbox"/> Conglomerado	Phi	^ Normal	40	3	9	9
6	<input type="checkbox"/> Conglomerado	Unit Weight	^ Normal	22.6	1.13	3.39	3.39
7	<input checked="" type="checkbox"/> Arcilla	Cohesion	^ Normal	82.4	23.072	69.216	69.216
8	<input checked="" type="checkbox"/> Arcilla	Phi	^ Normal	22	1.65	4.95	4.95
9	<input checked="" type="checkbox"/> Arcilla	Unit Weight	^ Normal	15	0.75	2.25	2.25

Figura 31: Parámetros definidos para el análisis.

5.2. Análisis de las Secciones

El software Slide permite al usuario realizar distintos tipos de análisis a los taludes de estudio, estos se adecuan a las exigencias que se desea presentar en la investigación de este. Por ello como condiciones de estudio se opta por desarrollar el análisis estático y pseudo-estático. El primero se caracteriza por establecer condiciones de cargas de gravedad sobre el modelo,

donde estas se encuentran definidas según el uso existente sobre el talud. Raygada (2011) recomienda realizar un metrado de cargas para las construcciones aledañas, asimismo, para instalaciones públicas existentes, se establece un factor de carga que permite idealizar sus características en el modelo, donde se considera la influencia de estos factores para un ancho de un metro. Estos valores se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Factores de cargas empleado para el análisis. Fuente: Cañari, 2011

Espacios en uso	Factor de Carga
Pavimento	7 kN/m ²
Jardines y/o parques	6 kN/m ²
Áreas construidas (por piso)	10 kN/m ²

Además, así como todas las secciones de estudio presentan diferencias en su geometría, estas también se encontrarán afectadas por distintas distribuciones de carga acorde al uso del terreno. La Tabla 7 muestra las cargas de gravedad aplicadas para cada sección de los taludes.

Tabla 6: Cargas de gravedad establecidas para cada sección. Fuente: Propia

Perfil	Secciones	Valor de Carga (kN/m ²)	Descripción
1	0 + 000 m	45	A lo ancho de toda la corona (30 m).
2	0 + 050 m	6	A lo ancho de toda la corona (25 m).
3	0 + 100 m	6	A lo ancho de toda la corona (25 m).
4	0 + 150 m	7	Pasado los 6 m del borde de la corona (25 m).
5	0 + 200 m	13	A lo ancho de toda la corona (25 m).
6	0 + 250 m	13	A lo ancho de toda la corona (25 m).
7	0 + 300 m	7	A lo ancho de toda la corona (25 m).

8	0 + 350 m	7 y 20	Pav. los primeros 13m y Const. el resto (25m).
9	0 + 400 m	7 y 30	Pav. los primeros 10m y Const. el resto (25m).
10	0 + 450 m	20	Pasado los 4 m del borde de la corona (25 m).
11	0 + 500 m	20	A lo ancho de toda la corona (30 m).

Por otro lado, para el análisis pseudo-estático se requiere de la simulación de un evento sísmico que otorgue cargas de sismo al talud (Figura 32) y se vea representado en un factor de seguridad menor que en el caso estático. Es por ello, dado el mapa sismográfico de las isoaceleraciones determinadas por Castillo y Alva (1993), Gamarra y Aguilar (2009), y homogeneizadas para ser publicadas por el IGP en el año 2014; se tomará la aceleración máxima de la zona de acuerdo con la ubicación de los taludes, el cual considera un periodo de retorno de 50 años y 10% de probabilidad de excedencia.

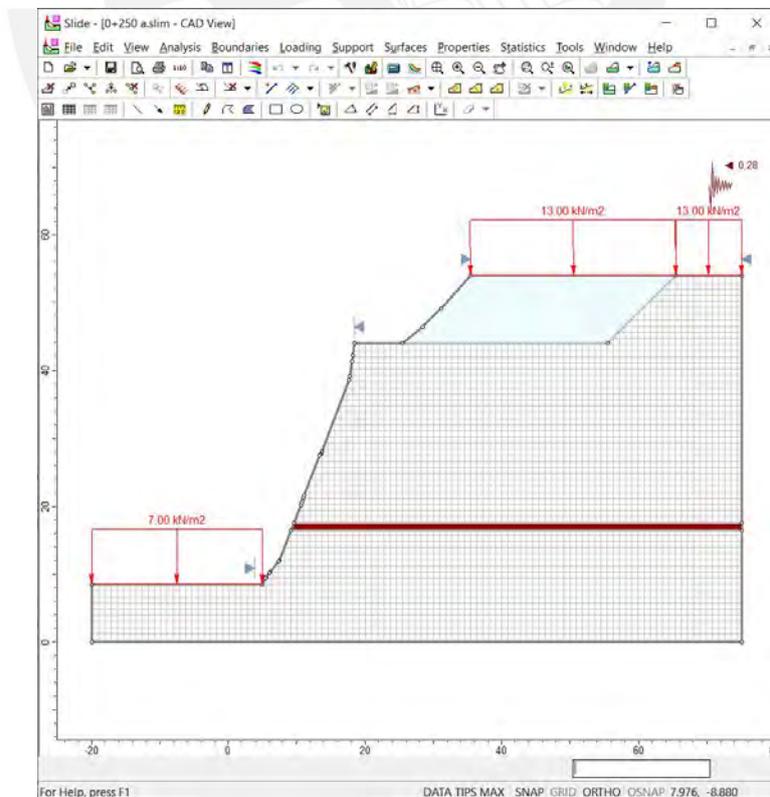


Figura 32: Modelo de la progresiva 0+250 en condiciones pseudo-estáticas. Fuente: Propia

De la figura 33 se puede tomar un valor de 420 gals para la costa de la ciudad de Lima (ubicación de los taludes de estudio), por lo que se puede expresar en 0.42g en unidades de gravedad. Además, cabe precisar que siendo esta la aceleración máxima esta no será considerada como la aceleración del análisis, puesto que este representa según la escala de Mercalli un sismo moderado a fuerte que resultaría claramente el desprendimiento o probabilidad de falla del talud al 100%. Asimismo, Marcuson y Frankley (1983), recomiendan que en análisis pseudo-estáticos se utilice una aceleración de análisis determinada dentro del rango de un tercio y dos tercios de la aceleración máxima (PGA) establecida por el mapa de isoaceleraciones. Por ello, como aceleración de análisis consideraremos la determinada por los dos tercios del PGA (Tabla 7), debido a que este valor representa una situación más crítica, de este modo ejerce un daño moderado según la escala de Mercalli.

Tabla 7: Resumen de la determinación de la aceleración de análisis. Fuente: Propia

Aceleración Máxima (PGA)	0.42g
Aceleración de Análisis Mínima (1/3PGA)	0.14g
Aceleración de Análisis Máxima (2/3PGA)	0.28g
Aceleración de Análisis para la Tesis	0.28g



Figura 33: Mapa de isoaceleraciones de Lima con periodo de retorno de 50 años y 10% probabilidad de excedencia. Unidades: gals. Fuente: IGP, 2014.

Finalmente, como se menciona anteriormente, una particularidad del software se trata sobre la cantidad de simulaciones que debe efectuar al momento de someter el talud al análisis probabilístico, debido a que el método de Monte Carlo requiere de esta cantidad para comenzar con los análisis y arrojar una probabilidad de falla. Esta probabilidad es de carácter variable ya que a menor cantidad de simulaciones se presenta mayor incertidumbre, mientras que a mayor cantidad se genera una probabilidad de falla constante (Figura 34). Por ello, este trabajo de tesis contará con 3,000 simulaciones que permite obtener una probabilidad de falla constante.

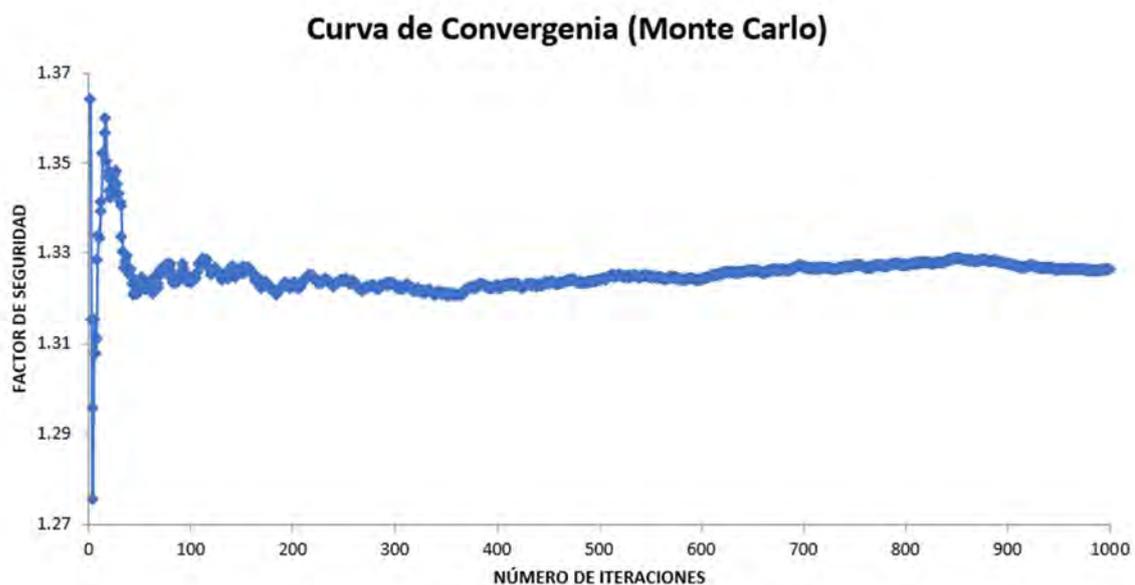


Figura 34: Curva de convergencia del análisis probabilístico.

5.2.1. Análisis Estático

En el presente inciso, se mostrará el desarrollo del análisis determinístico de la sección ubicada en la progresiva 0 + 050 m, debido a que esta se encuentra cerca de la zona donde ocurrió el desprendimiento en el mes de agosto del 2019. Cabe mencionar, que los materiales fueron definidos con los parámetros existentes en la tesis de Díaz (2008), e incluso se tuvo que ampliar la sección para realizar un análisis que pueda ser afectado por cargas de gravedad de las instalaciones, en este caso un parque en la corona y el pavimento en la base del

acantilado. En la figura 35 se puede apreciar el modelo de dicha sección con las cargas ejercidas sobre el talud.

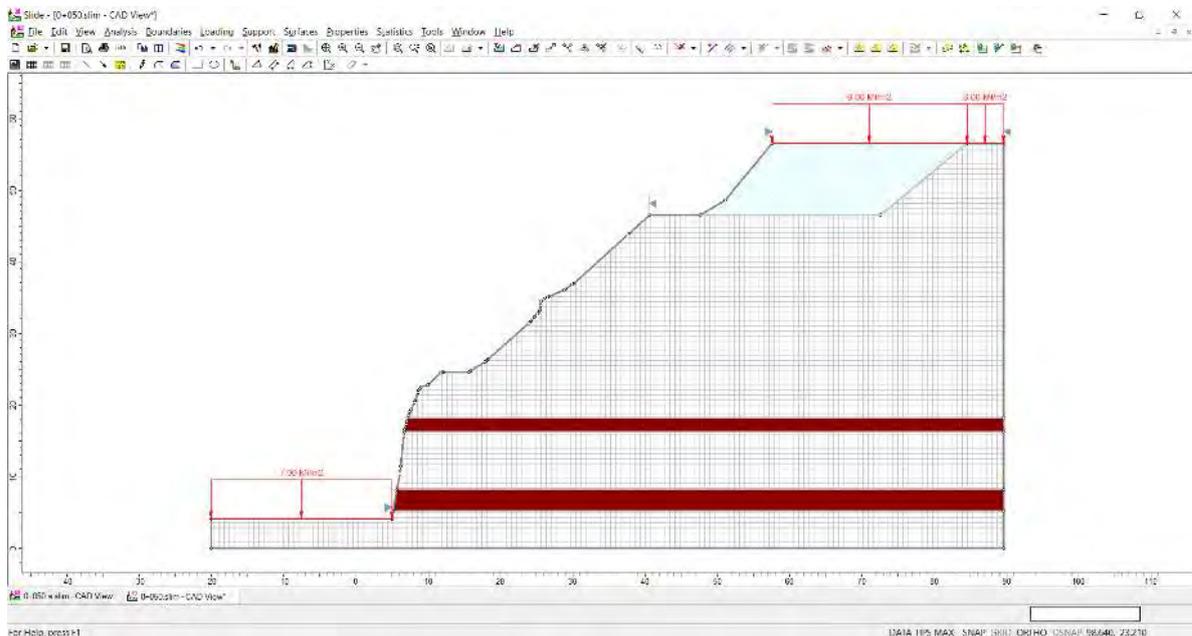


Figura 35: Modelo de la sección 0+050m-Caso estático.

El análisis realizado por el software Slide para el caso determinístico itera todas las superficies de falla designadas (5,000) considerando al suelo como parámetros isotrópicos. Mientras que, para el caso probabilístico, este itera todas las superficies de falla, en conjunto a una cantidad configurada de simulaciones (3,000) sobre el factor de seguridad; es decir, las simulaciones de Monte Carlo se encargan de variar los parámetros geotécnicos para cada superficie de falla. En consecuencia, se obtiene una curva acumulada de probabilidad de falla acorde a la cantidad de casos en que el factor de seguridad resultó menor del caso considerado como límite para estabilidad. El resultado de este análisis se presenta en las figuras 36 y 37; para la progresiva 0+050, por ejemplo, se obtiene una probabilidad acumulada de que el F.S. sea menor a 1.50 de 48.58%.

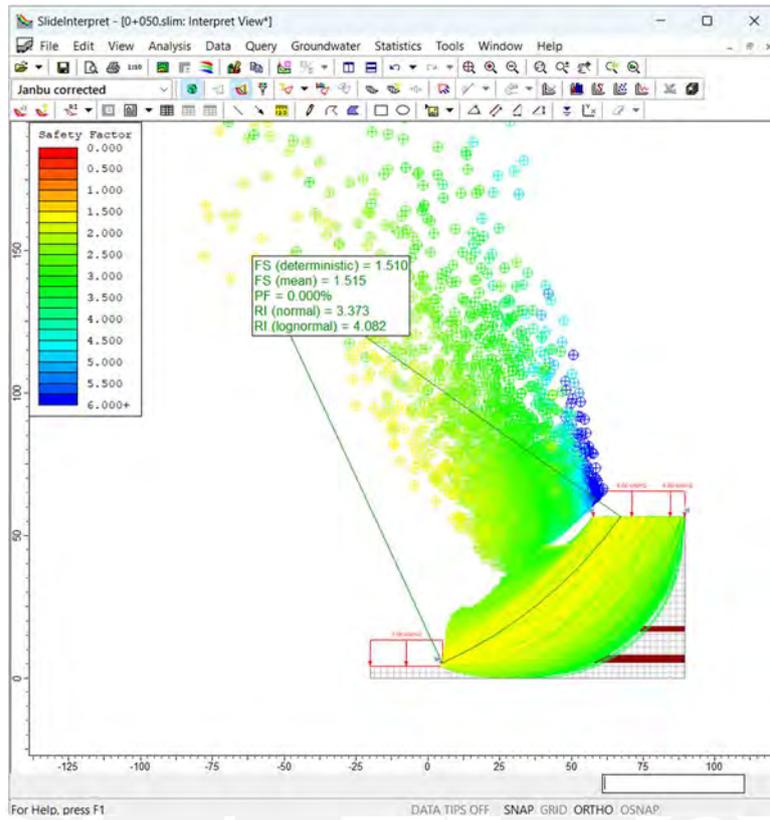


Figura 36: Análisis determinístico y probabilístico de la sección 0+050m - Caso estático.

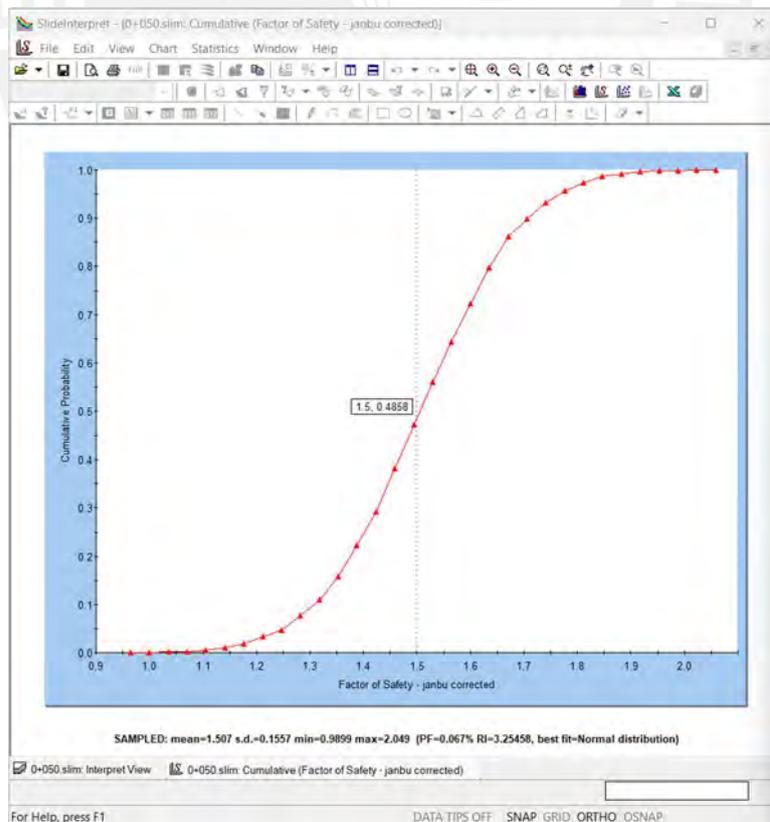


Figura 37: Probabilidad acumulada vs F.S. en la sección 0+050m - Caso estático.

Finalmente, el proceso explicado anteriormente es aplicado a todas las secciones de estudio, dando como resultados los factores de seguridad tanto para los diferentes métodos de análisis (Janbu, Spencer, Morgenster-Price), como para sus aplicaciones en conjunto del análisis probabilístico (Monte Carlo). Estos resultados son plasmados en las siguientes tablas resumen.

Método de Janbu

Tabla 8: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Janbu. Fuente: Propia

Progresiva del Talud (m)	Anál. Determinístico		Anál. Probabilístico	
	F. S.	F. S.	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.00)	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.50)
0 + 000	1.304	1.305	1.50	93.16
0 + 050	1.510	1.515	0.00	48.58
0 + 100	1.481	1.480	0.00	56.74
0 + 150	1.256	1.259	6.90	91.42
0 + 200	1.282	1.287	4.63	90.11
0 + 250	1.208	1.211	9.40	97.13
0 + 300	1.212	1.217	8.73	96.84
0 + 350	1.270	1.274	3.43	92.97
0 + 400	1.280	1.280	2.17	93.09
0 + 450	1.254	1.255	1.13	94.93
0 + 500	1.254	1.255	2.13	96.71

Método de Spencer

Tabla 9: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Spencer. Fuente: Propia

Progresiva del Talud (m)	Anál. Determinístico		Anál. Probabilístico	
	F. S.	F. S.	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.00)	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.50)
0 + 000	1.382	1.380	0.72	80.67
0 + 050	1.499	1.507	0.00	51.38
0 + 100	1.465	1.453	0.00	58.33
0 + 150	1.289	1.284	5.86	87.33
0 + 200	1.333	1.339	3.20	84.61
0 + 250	1.243	1.241	7.80	94.82
0 + 300	1.237	1.242	7.57	95.72
0 + 350	1.274	1.249	5.34	90.61
0 + 400	1.278	1.284	2.49	92.87
0 + 450	1.270	1.273	0.31	90.52
0 + 500	1.270	1.273	2.19	94.96

Método de Morgenstern-Price

Tabla 10: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Morgenstern-Price. Fuente: Propia

Progresiva del Talud (m)	Anál. Determinístico		Anál. Probabilístico	
	F. S.	F. S.	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.00)	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.50)
0 + 000	1.319	1.321	1.37	89.87
0 + 050	1.497	1.502	0.00	52.64
0 + 100	1.461	1.463	0.00	62.34
0 + 150	1.276	1.268	6.91	90.40
0 + 200	1.296	1.277	6.32	88.79

0 + 250	1.222	1.220	11.67	96.22
0 + 300	1.211	1.225	9.30	96.42
0 + 350	1.272	1.258	4.05	92.22
0 + 400	1.295	1.296	0.94	94.31
0 + 450	1.244	1.245	1.53	94.66
0 + 500	1.244	1.245	2.72	97.31

5.2.2. Análisis Pseudo-estático

En el presente inciso, se muestra el desarrollo del análisis determinístico de la sección ubicada en la progresiva 0 + 050 m, debido a que esta se encuentra cerca de la zona donde ocurrió el desprendimiento en el mes de agosto del 2019. Cabe mencionar, que se le añadió una aceleración para el análisis especificado anteriormente, el cual aplicará cargas de sismo junto a las cargas de gravedad para cada sección analizada. En la figura 38 se puede apreciar el modelo de dicha sección con las cargas ejercidas sobre el talud y la aceleración de sismo horizontal.

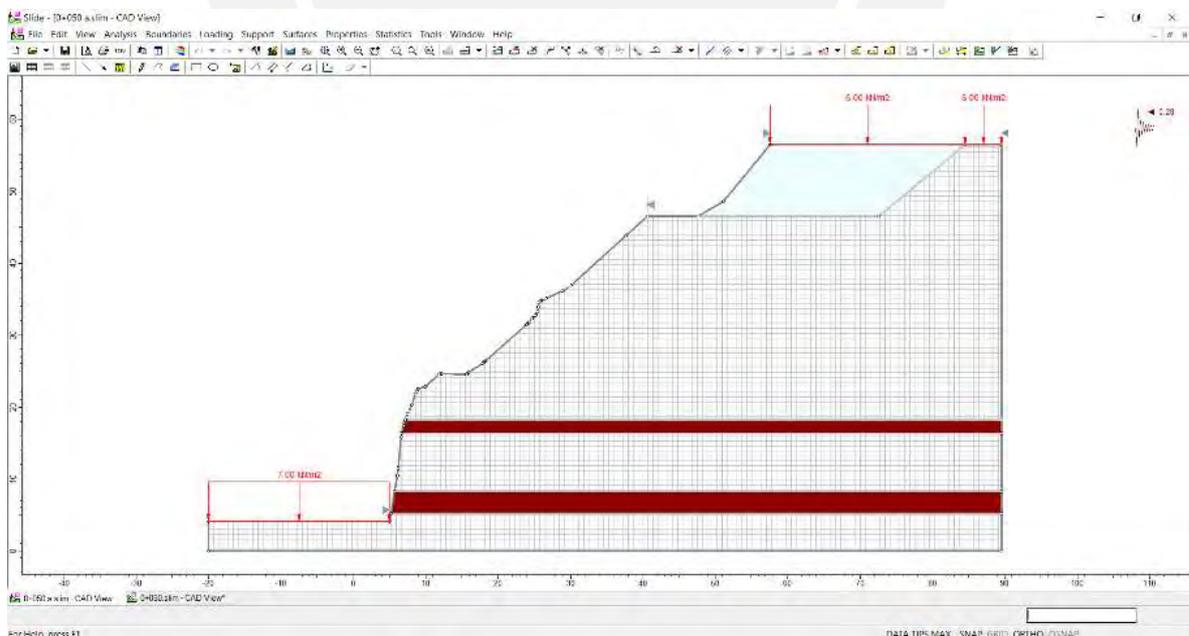


Figura 38: Modelo de la sección 0+050m-Caso pseudo-estático.

El análisis de la sección realizado por el Slide, determina del mismo modo que en el caso estático, los factores de seguridad para ambos análisis y una probabilidad de ocurrencia de falla. El resultado de este análisis se presenta en la siguiente figura:

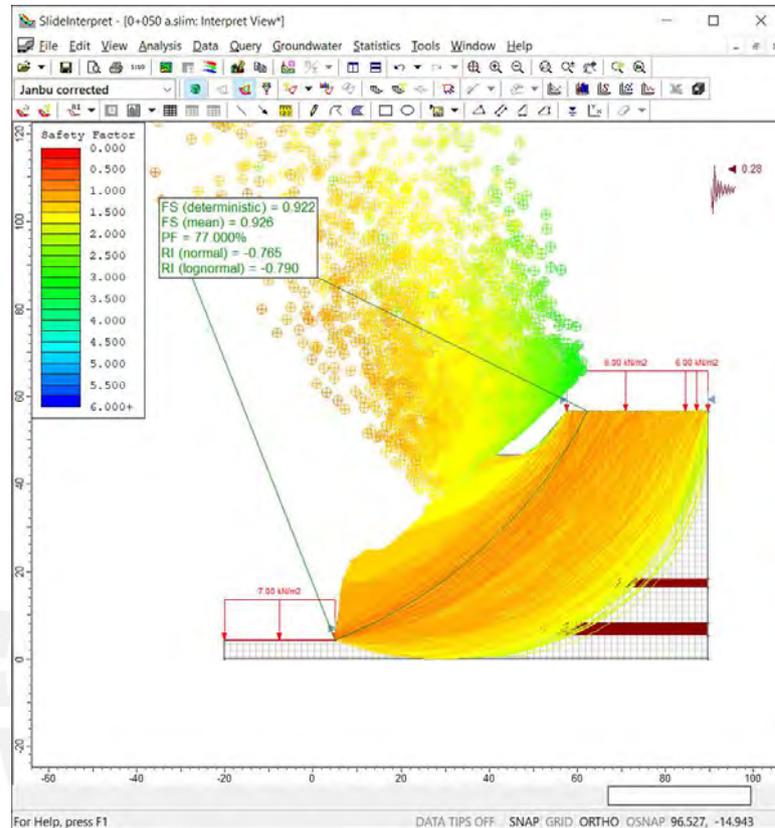


Figura 39: Análisis determinístico y probabilístico de la sección 0+050m-Caso pseudo-estático.

Método de Janbu

Tabla 11: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Janbu. Fuente: Propia

Progresiva del Talud (m)	Anál. Determinístico		Anál. Probabilístico	
	F. S.	F. S.	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.00)	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.25)
0 + 000	0.855	0.855	92.63	100.00
0 + 050	0.922	0.926	77.00	100.00
0 + 100	0.930	0.934	75.73	100.00
0 + 150	0.839	0.842	92.63	100.00

0 + 200	0.843	0.845	91.57	100.00
0 + 250	0.797	0.799	96.17	100.00
0 + 300	0.785	0.778	97.47	100.00
0 + 350	0.824	0.826	93.47	100.00
0 + 400	0.821	0.823	96.57	100.00
0 + 450	0.829	0.831	96.90	100.00
0 + 500	0.811	0.812	97.07	100.00

Método de Spencer

Tabla 12: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Spencer. Fuente: Propia

Progresiva del Talud (m)	Anál. Determinístico		Anál. Probabilístico	
	F. S.	F. S.	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.00)	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.25)
0 + 000	0.958	0.958	64.43	98.68
0 + 050	1.008	1.030	48.70	90.55
0 + 100	1.047	0.966	64.03	92.30
0 + 150	0.918	0.976	60.27	93.99
0 + 200	0.966	0.975	60.57	95.92
0 + 250	0.939	0.971	59.40	92.35
0 + 300	0.951	1.016	46.73	88.35
0 + 350	0.995	0.990	54.80	92.45
0 + 400	0.941	0.963	59.80	96.41
0 + 450	0.989	0.958	63.77	97.33
0 + 500	0.907	0.947	64.37	98.50

Método de Morgenstern-Price

Tabla 13: Resumen de los resultados obtenidos por la aplicación del método Morgenstern-Price. Fuente: Propia

Progresiva del Talud (m)	Anál Determinístico		Anál Probabilístico	
	F. S.	F. S.	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.00)	Prob. de Ocurrencia (F.S. < 1.25)
0 + 000	0.917	0.916	80.52	99.88
0 + 050	0.952	0.963	62.80	99.48
0 + 100	0.970	0.956	70.37	99.77
0 + 150	0.879	0.900	78.30	99.32
0 + 200	0.902	0.877	88.12	99.45
0 + 250	0.878	0.880	81.37	99.83
0 + 300	0.897	0.909	73.87	99.34
0 + 350	0.906	0.874	92.08	99.25
0 + 400	0.859	0.828	97.41	99.97
0 + 450	0.906	0.872	93.49	99.77
0 + 500	0.839	0.843	93.20	100.00

Para mayor detalle de los resultados, revisar el Anexo A con los modelos por perfil y sus respectivos valores de FS y probabilidad de ocurrencia de falla.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta una discusión de los resultados que se obtienen de los análisis de estabilidad de las secciones propuestas en el capítulo anterior, en el cual se han aplicado métodos determinísticos y probabilístico. Esto permite estudiar el perfil de modo que se determinó el factor de seguridad ante una falla global; es decir, una falla debido al desplazamiento de todo el talud. Asimismo, estas secciones consideran la influencia de las cargas ejercidas por las instalaciones tanto en la base como la corona del perfil, e incluso las fuerzas generadas por un sismo con tiempo de retorno de 50 años y probabilidad de excedencia de 10%.

6.1. Discusión de método de análisis

La obtención de resultados es respaldada por tres metodologías para determinar el factor de seguridad del perfil. Estas son Janbú, Spencer y Morgenstern-Price, las cuales parten de la teoría tradicional de Fellenius; de este modo, cada uno poseen sus particularidades puesto que unos consideran un cálculo más simplificado que otros. Cabe resaltar que, Janbú al facilitar la omisión de las fuerzas laterales entre dovelas permite realizar los cálculos de manera más sencilla. Mientras tanto, Morgenstern-Price lo considera mediante una ecuación arbitraria y Spencer mediante una variable despreciable, que a la vez son determinadas por softwares especializados. En base a la comparación realizada por Suarez (1998), el presente trabajo de investigación optará por tomar los resultados obtenidos según la metodología definida por Spencer (1967), debido a que este considera un método matemático más riguroso con procedimientos que satisfacen al equilibrio, por consiguiente, se obtienen factores de seguridad de mayor confianza.

6.2. Comparación e interpretación de resultados

Dado los perfiles estipulados en el desarrollo de esta investigación y la información brindada por diversos autores para asentar los parámetros geotécnicos necesarios para el análisis de estabilidad, se establece realizar el desarrollo de dos casos: estático y pseudo-estático para cada progresiva con el fin de evaluar el factor de seguridad calculado por el software Slide.

De los análisis de estabilidad realizados (Anexo A), para el caso estático según el método determinístico de Spencer, se observa que el perfil 2 se acerca al factor de seguridad recomendado contemplando las cargas establecidas sobre esa sección, puesto que el F.S. resulta muy cercano a 1.50. Por otro lado, los demás perfiles presentan un factor de seguridad mayor a la unidad y menor al recomendado para la Norma E.050 (RNE, 2020) por lo que estos taludes implican riesgo en las condiciones de cargas actuales.

Por otro lado, para el caso pseudo-estático y aplicando el mismo método anterior, se observa que los perfiles 2 y 3 con las cargas aplicadas, son considerados como taludes estables, puesto que sus F.S. resultan mayor a 1.00, por lo que la resistencia al corte es mayor a las tensiones actuantes que podrían ocasionar un deslizamiento. En cambio, los perfiles 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 presentan F.S. menores a la unidad, lo que implica riesgo elevado ante la ocurrencia de un sismo.

Sin embargo, cabe destacar que el objetivo principal de nuestra tesis requiere el análisis de estabilidad incluyendo la implementación del método probabilístico propuesto por Monte Carlo (1944), el cual realiza el análisis de estabilidad considerando la variabilidad de los parámetros geotécnicos. Para ello, de los resultados obtenidos (Anexo A), en el caso estático se presentan los factores de seguridad con sus probabilidades de ocurrencia de falla comparándolo con un F.S. menor a 1.50. Se observa que el perfil 2 es el único estable para dicho caso, puesto que el F.S. resulta mayor a 1.50 y una probabilidad de 51.38%. Del mismo

modo, para el caso del perfil 3, este presenta un F.S. de 1.453 y una probabilidad de 58.33%; para el caso del perfil 1, este resulta un F.S. de 1.380 y una probabilidad de falla de 80.67%. Los perfiles restantes, en cambio, presentan un F.S. entre 1.20 a 1.30, asimismo, resultan con una probabilidad de ocurrencia de falla aproximadamente entre 84.61% a 95.72%. Cabe mencionar que, dadas las condiciones de carga actuales de cada perfil, al no encontrarse afectados por cargas gravitatorias mayores debido a una ejecución de un nuevo proyecto, la probabilidad de falla basada en la comparación de los resultados con un F.S. menor a 1.00 se encuentra en un rango de 0.00% a 7.80%.

Por otro lado, para el caso pseudo-estático se presentan los factores de seguridad con sus probabilidades de ocurrencia a la falla con respecto a un F.S. menor a 1.00. Se puede observar que los perfiles 2 y 7 son considerados como taludes estables, puesto que sus F.S. resultan mayor a 1.00 con probabilidades de incidencia a la falla de 48.70% y 46.73% respectivamente. En cambio, los perfiles restantes presentan F.S. menores a la unidad, lo que implica un mayor riesgo ante un sismo. De este modo sus probabilidades de falla resultan mayores al 54.80%.

Los factores de seguridad, según el método de Monte Carlo, se presentan como el promedio de cada F.S. obtenido en las simulaciones realizadas por el software. Es importante señalar la existencia de resultados atípicos que afectan la probabilidad de falla global del talud. Así, los resultados reflejan un análisis estadístico y probabilístico, estableciendo un F.S límite de 1.00. Valores por debajo de este indican indicios de falla.

6.3. Mapa de riesgo para Magdalena del Mar

Los acantilados de la Costa Verde son estables en condiciones estáticas según los resultados obtenidos, pero debido a los factores que generan su degradación como las construcciones en los acantilados, la erosión marina y otros, estos se encuentran en riesgo, por lo que un

sismo de gran magnitud podría ocasionar desprendimientos en algunas zonas. Por tal motivo, como objetivo de nuestra investigación proponemos un mapa de riesgo con los resultados obtenidos, el cual advierte a futuros proyectistas de los riesgos que pueden estar corriendo al desarrollar una obra tipo inmobiliario y/o recreacional. De este modo, dicho proyectista contemplará en su estudio de mecánica de suelos la importancia que tiene el talud y tratará de tomar todas las medidas necesarias para no perjudicarlo.

En consecuencia, para el caso estático; es decir, estado natural del acantilado, se presentan los mapas de riesgo (MR-01 y MR-02), cuya diferencia consiste en los criterios mínimos para garantizar la estabilidad del talud. En el primer caso, el Reglamento Nacional de Edificaciones establece que el F.S. no debe ser menor a 1.50, valor óptimo para el diseño de edificaciones sobre el talud (RNE, 2020); frente a la cantidad total de F.S. determinado por todas las simulaciones realizadas por Monte Carlo, resulta en una probabilidad de ocurrencia de falla desfavorable para el requerimiento de la RNE. Por otro lado, el segundo caso representa el estado límite teórico, es decir, el F.S. mínimo para que el talud sea estable es la unidad; por ello en el mapa MR-02 se evidencian resultados favorables para este caso.

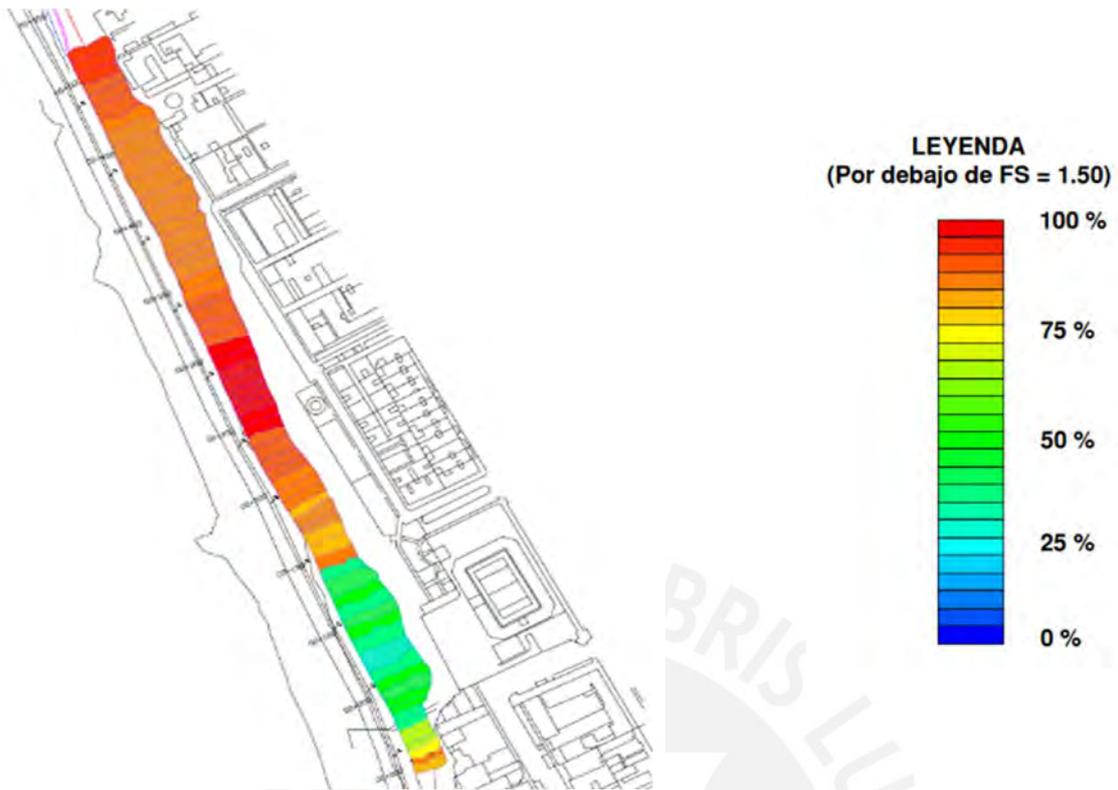


Figura 40: Mapa de Riesgo MR-01 (Anexo B)

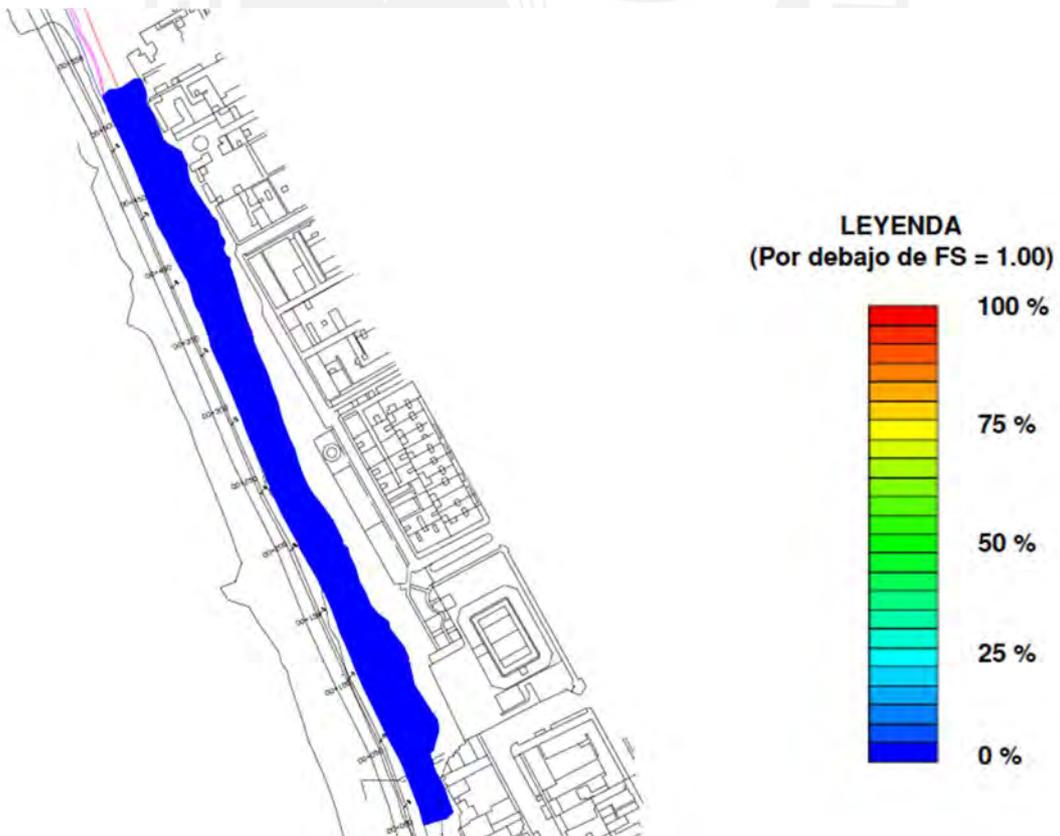


Figura 41: Mapa de Riesgo MR-02 (Anexo B)

Para el caso pseudo-estático; situación en la que ocurre un sismo con aceleración de 0.28g (2/3 de la $a_{m\acute{a}x}$). Se presentan los mapas de riesgo (MR-03 y MR-04). En el primer caso, el RNE establece que el F.S. no debe ser menor a 1.25, valor óptimo para el diseño de edificaciones sobre el talud en condiciones sísmicas (RNE, 2020); frente a la cantidad total de F.S. determinado por todas las simulaciones realizadas por Monte Carlo, resulta en una probabilidad de ocurrencia de falla muy desfavorable para el requerimiento de la RNE. Por otro lado, el segundo caso representa el estado límite teórico, es decir, el F.S. mínimo para que el talud sea estable es la unidad, por ello resulta una probabilidad de ocurrencia de falla moderada a lo largo de la zona de estudio.

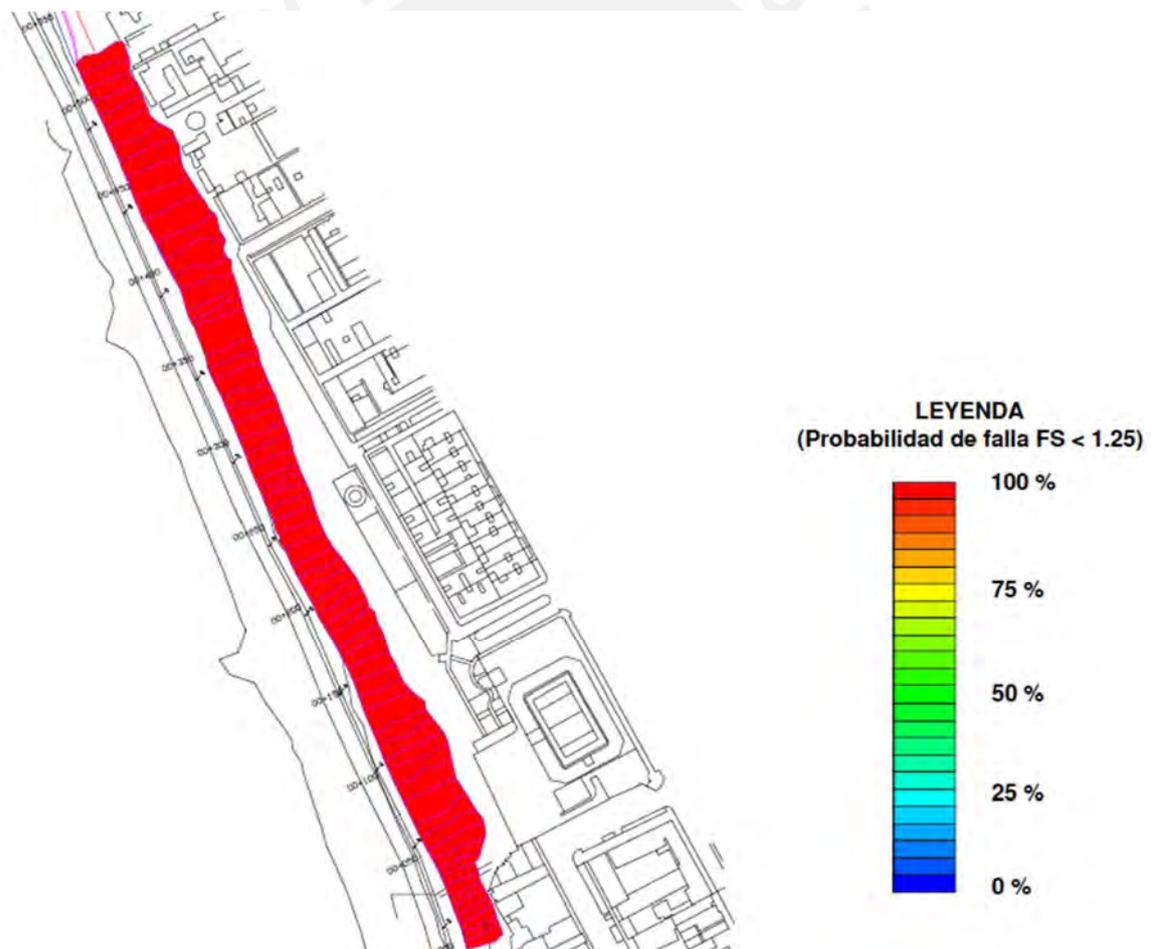


Figura 42: Mapa de Riesgo MR-03 (Anexo B)

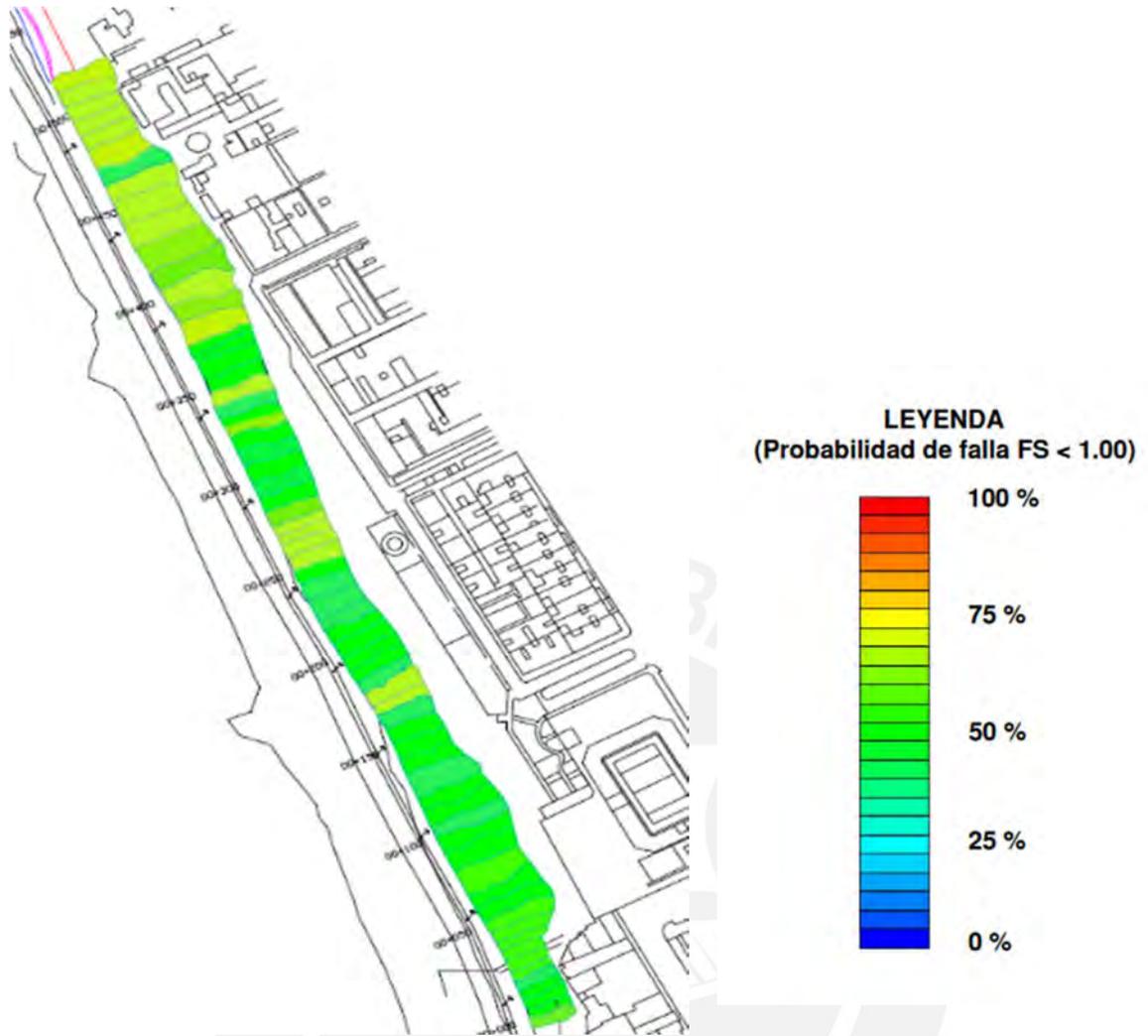


Figura 43: Mapa de Riesgo MR-04 (Anexo B)

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Centrándonos en el tramo de Magdalena del Mar, observamos a través de los perfiles topográficos recolectados que son de pendientes altas (Inclinaciones de 50°-90°). Estos, además de resistir en la corona cargas de gravedad producto de edificaciones, parques, pavimentos, etc, tienen también que soportar fenómenos eventuales como las sollicitaciones sísmicas producto de la cercanía a un fenómeno de subducción y la erosión. A pesar de que en la actualidad se cuentan con mallas que reducen el peligro frente a fallas locales y desprendimientos de piedras, las fallas globales pueden producirse según lo demostrado en los capítulos anteriores. Además, teniendo en cuenta un silencio sísmico en la ciudad de ya bastante tiempo, el suceso tiene mayor probabilidad de ocurrencia.

Es primordial pensar en el bienestar de los ciudadanos que circulan por nuestra zona de estudio, por lo tanto, complementar con una información como la probabilidad de falla del talud a lo largo del tramo del distrito es un buen inicio para tomar conciencia de los futuros proyectos a construir.

Los parámetros de resistencia (Ángulo de fricción interna, cohesión y peso unitario del suelo) involucrados en el cálculo de la estabilidad de un talud en la realidad no son uniformes, pero para fines determinísticos se les considera como tal. Es ahí donde hemos verificado un método que complementa a la información clásica de falla, limitada a sí o no cuando se trata de responder por la estabilidad global o local del talud. Este se apoya con el uso de un intervalo de valores para los parámetros de resistencia. Según lo leído, los autores de este documento consideran más apropiados los indicados en la Tabla 14. Asimismo, se sugiere

para el caso pseudoestático un valor de 0.28 veces la aceleración de la gravedad, resultado de los dos tercios de la aceleración máxima aplicable al distrito de Magdalena del Mar.

Tabla 14: Parámetros de resistencia empleados en el análisis. Fuente: Propia

Componente del Talud	Peso Unitario (kN/m ³)	Ángulo de Fricción (Ø)	Cohesión (kN/m ²)	Referencia
Conglomerado de Roca	22.60	40.00	78.50	Díaz (2008)
Lente de Finos	15.00	22.00	82.40	
Relleno	18.00	25.00	0.00	

El software Slide permite delimitar zonas de los taludes según la probabilidad de falla. Además, nos permite calcular la probabilidad de ocurrencia de falla, de manera que permita calificar cualitativamente los taludes estudiados. También resulta más comprensible, para quien lo escuche en primera instancia, decir en tanto por ciento cómo será el comportamiento de la sección luego de su respectivo análisis. Con ello se pueden centrar esfuerzos en secciones más críticas, que en aquellas que aún pueden esperar por resistir las cargas y teniendo probabilidades de falla un poco más bajas.

A lo mencionado se le agrega que, con los tres métodos empleados se pueden obtener resultados coherentes; sin embargo, Morgenstern Price y Spencer consideran fuerzas actuantes entre dovelas que los harían ser los métodos con resultados más sincerados. En consecuencia, dado los diferentes autores y los resultados obtenidos, se opta por el método de análisis de Spencer (1967) puesto que Morgenstern Price deriva de esta.

Siendo la Costa Verde inaugurada hace varios años atrás, ninguno de los que pensaron en su diseño final imaginaron que habría una cantidad enorme de edificios bordeando la corona del talud en toda su extensión. Esto trajo consigo rellenos no controlados de material granular que, de acuerdo con nuestros modelos, generan desprendimientos pequeños. Pero,

centrándonos en fallas globales (circulares de acuerdo con nuestra configuración de Slide explicada en la metodología) se encontraron superficies de falla con factores de seguridad por cada simulación de Monte Carlo, bajos. Es cierto que hemos podido detectar perfiles con sus progresivas en peligro frente a un sismo con tiempo de retorno de 50 años y probabilidad de excedencia de 10%; pero debemos tener en mente que estos taludes estarán por mucho más tiempo, así que con uno de mayor tiempo de retorno podría mostrarnos otras secciones a considerar en un posible refuerzo de taludes.

Además, es importante mencionar que, para condiciones estáticas, la estabilidad de un talud sobre el cual se prevé elaborar un proyecto de edificación debe tener un valor de FS mayor a 1.50 (RNE, 2020). De acuerdo con el capítulo anterior, y en el mapa adjunto en los anexos, este hecho no se cumple para varios tramos de los 500 metros analizados. La probabilidad de ocurrencia, que para nuestro caso es el cociente de casos de éxito (FS menor a 1.50) y el total de casos (3,000 simulaciones para cada perfil en el capítulo 5), presenta un promedio de 58.81%. Con ello se puede establecer la necesidad de implementar medidas más estrictas para otorgar permisos de construcción cercanos al acantilado de la Costa Verde. Prohibir las construcciones de edificios a por lo menos 120 metros debe ser aplicado. Si bien no podemos hacer nada con los existentes, podemos evitar que se sobrecarguen aún más los espacios.

Asimismo, el desprendimiento acontecido en el 2019 durante los Juegos Panamericanos guarda relación con los resultados obtenidos en el capítulo 5 (p. 65), ya que entre las progresivas 0+050 y 0+150 se obtiene como factor de seguridad promedio de 1.41 con un rango de probabilidad de ocurrencia a fallar de 51.38 y 87.33%. Por lo tanto, si bien los métodos determinísticos aseguraban la estabilidad del talud, el método probabilístico permitió determinar una probabilidad de ocurrencia de falla moderada.

Por otro lado, para condiciones pseudoestáticas, la estabilidad de un talud sobre el cual se va a construir un proyecto debe tener un valor de FS mayor a 1.25 (RNE, 2020). De acuerdo con el capítulo anterior, se define la probabilidad de ocurrencia como el cociente de casos de éxito (FS menor a 1.25) y el total de casos (3,000 simulaciones para cada perfil en el capítulo 5), presenta un promedio de 100%.

Además, aplicando el FS teórico del programa (FS=1), permite evidenciar para condiciones estáticas resultados favorables ya que la probabilidad de ocurrencia a la falla promedio tiende a 0%; sin embargo, para condiciones pseudoestáticas, la probabilidad de ocurrencia a la falla resulta mayor a 54.80%.

Finalmente, el mapa de riesgo resulta una excelente idea para su rápida difusión y comprensión por parte de los lectores. Tiene facilidad de una leyenda por colores y resulta sencillo explicar los resultados del trabajo como se hizo líneas arriba.

7.2.Recomendaciones

Se recomienda a partir de los resultados obtenidos para las secciones en el distrito, ampliar el recorrido del mapa de riesgo adjunto (Anexo B) hasta los límites de San Miguel por el norte y San Isidro por el sur. Además, hacer discreto el análisis de perfiles del talud permitiría afinar el mapa ya mencionado.

Por otro lado, para siguientes investigaciones de los F.S. y la probabilidad de falla de los taludes, quedaría como motivación ahora estudiar cada sección a detalle bajo las condiciones planteadas aquí o con algún dato relevante para el diseño de algún talud. Esto mejor conocido como fallas locales, su búsqueda puede resultar interesante por la topografía de las secciones, cosa que puede demandar algo más de tiempo para nuestras 11 secciones de análisis.

Por último, los datos recolectados en esta tesis se encuentran referenciados de otros autores. Dado que las secciones analizadas provienen de estudios predecesores a los desprendimientos suscitados en el año 2019, resultaría conveniente realizar nuevos perfiles geotécnicos junto a más ensayos distribuidos en la sección, con la finalidad de conocer los parámetros de resistencia de los suelos involucrados en las superficies de falla a calcular e identificar como afectaría la aplicación de la incertidumbre espacial.



REFERENCIAS

- Alonso E. (2005). Estabilidad de taludes. *Universidad Politécnica de Cataluña*. Barcelona, España. Recuperado el 14 de noviembre de 2019 en: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250339/2015/Tema5--Taludes.pdf
- APCV (2019). Foro Costa Verde: Visión del Arquitecto Ernesto Aramburú Menchaca. Recuperado el 19 de noviembre de 2019 de https://apcvperu.gob.pe/files/otros/Historia_de_la_Costa_Verde_por_el_Arq.Ernesto_Aramburu.pdf
- Cañari M., Alva J. (2011). Análisis de la estabilidad de taludes de la Costa Verde. *Universidad Nacional de Ingeniería*. Lima, Perú
- COEN (2019). Peligro inminente por derrumbe en los acantilados de la Costa Verde – Lima. Reporte de peligro inminente N° 089. Ministerio de Energía y Minas. Lima, Perú.
- Cruz, L., Durand, J., Romero, R. (2004). El método de Monte Carlo. *Instituto de Ciencias Básicas de la Universidad Veracruzana*. Veracruz, México.
- De Matteis A. (2003). Estabilidad de taludes. *Universidad Nacional de Rosario*. Rosario, Argentina.
- Díaz J. (2008). Estabilización del talud de la Costa Verde en la zona del distrito de Magdalena (Tesis de pregrado). *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Lima, Perú.

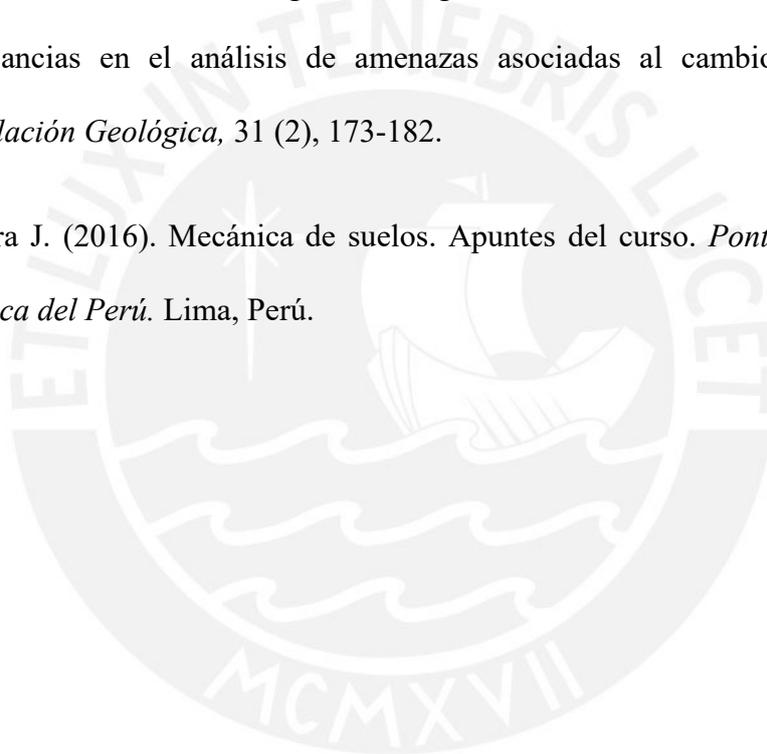
- Duncan J. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *ASCE*, 126(4), 307-316.
- El Comercio (2021). Costa Verde: Así es la polémica obra con “andenes” en Magdalena que ejecutó la MML. *Diario El Comercio*. Lima. Recuperado de <https://elcomercio.pe/lima/obras/costa-verde-asi-es-la-obra-de-la-municipalidad-de-lima-con-andenes-en-el-malecon-castagnola-que-genera-controversia-magdalena-del-mar-jorge-munoz-alcalde-de-lima-accidentes-en-la-costa-verde-nndc-noticia/>
- El Peruano (2019). Ordenanza N° 2184-2019. *Diario El Peruano*, p. 74-76.
- Gibson W. (2011). Probabilistic Methods for Slope Analysis and Design. *Australian Geomechanics Journal*. p. 4.
- Guzmán A., Zavala B., Valenzuela G. (1997). Estudio de la seguridad física de los acantilados de la Costa Verde. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico*. Lima, Perú.
- Hidalgo C., Pacheco A. (2011). Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: Aplicación. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18), p. 69-78.
- INGEMMET (2015). Peligros geológicos en el área de Lima Metropolitana y la región Callao. *Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico*. Lima, Perú. Recuperado el 10 de noviembre de 2019 en <https://hdl.handle.net/20.500.12544/309>
- IGP (2014). Evaluación del Peligro Sísmico en Perú. *Informe Preliminar*. Lima, Perú.
- Labuz F., Zang A. (2012). Mohr-Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 975-979.

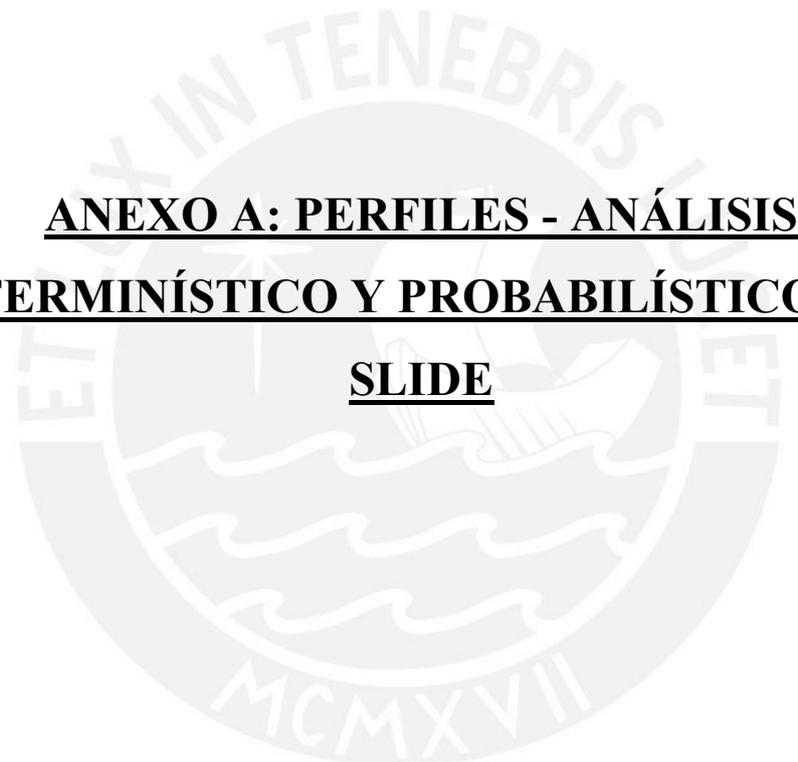
- Lambe W. (1967). Soil testing for engineers. *The Massachusetts Institute of Technology*.
- Lara G. (2019, 9 de agosto). Riego por talud en la Costa Verde y las posibles causas del derrumbe. El Comercio. Recuperado de <https://elcomercio.pe/lima/sucesos/panamericanos-lima-riesgo-talud-costa-verde-informe-ecpm-noticia-663453-noticia/>
- Marcuson, W., Frankley, A. (1983). Seismic design, analysis and remedial measures to improve stability of existing earth dams. *Washington: U.S. Army Engineers*.
- Martínez A. (2007). Conglomerado de Lima Metropolitana en cimentaciones. *Conferencia Internacional en Ingeniería Sísmica*. Lima, Perú.
- Pacheco A. (2006). Estabilización del talud de la Costa Verde en la zona del distrito de San Isidro (Tesis de pregrado). *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Lima, Perú.
- Programa de Apoyo a la Iniciación de la Investigación (PAIN) (2015). La ciudad y el mar: la avenida Costanera entre la Lima Aristocrática y la Lima del Oncenio (1917-1930). *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Lima, Perú.
- Raygada L. (2011). Análisis de estabilidad y deformaciones en el acantilado de la costa verde (Tesis de pregrado). *Universidad Nacional de Ingeniería*. Lima, Perú.
- Rocscience (2018). Slide 2018: 2D Limit Equilibrium Analysis of Slope Stability. Recuperado el 10 de octubre de 2019 del sitio web https://www.rocscience.com/help/slide2/pdf_files/tutorials

- SENCICO (2020). Norma E.050: Suelos y Cimentaciones. *Servicio Nacional de Capacitación para la industria de la Construcción*. Lima, Perú.
- Soriano, A. (2011). Estabilidad de taludes en suelo, métodos clásicos de cálculo (Texto de clase). *Universidad Politécnica de Madrid*. Madrid, España
- Suárez J. (1998). Deslizamientos: Análisis geotécnico - Capítulo 4. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. *Publicaciones UIS*. Bucaramanga, Colombia.
- Suárez J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. *Publicaciones UIS*. Bucaramanga, Colombia.
- Torres C. & Marciales F. (2018). Análisis de probabilidad de falla en taludes en el tramo alto medio de la cuenca del Río Únete, municipio de Aguazul, vereda La Vegana. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia.
- Terzaghi K., Peck R., & Mesri G. (1997). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Third edition. New York: John Wiley & Sons.
- TV PERÚ (CANAL 7) (2020) “Costa Verde, historia y desarrollo urbano”. *Sucedió en el Perú*. Lima. Emisión: 22/02/2020.
- Urrutia P. (2008). Análisis dinámico de estabilidad por elementos finitos de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores (Tesis de pregrado). *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Lima, Perú.
- Vargas R. (2013). Análisis de la influencia de la variabilidad de los parámetros geotécnicos en el diseño geotécnico de muros de contención, utilizando el método

Monte Carlo (Tesis de pregrado). *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Lima, Perú.

- Vela C. (2009). Subdivisión de la Placa de Nazca en tres nuevas placas tectónicas y su incidencia con la sismicidad peruana actual. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 23, p. 77-87.
- Villacorta S., De Torres T., Pérez C., Llorente M., Ayala L. (2015). Estudio preliminar de la evolución geomorfológica del abanico aluvial de Lima (Perú) e implicancias en el análisis de amenazas asociadas al cambio climático. *Serie Correlación Geológica*, 31 (2), 173-182.
- Zegarra J. (2016). Mecánica de suelos. Apuntes del curso. *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Lima, Perú.





ANEXO A: PERFILES - ANÁLISIS
DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO CON
SLIDE

➤ Perfil 1 (Progresiva 0+000)

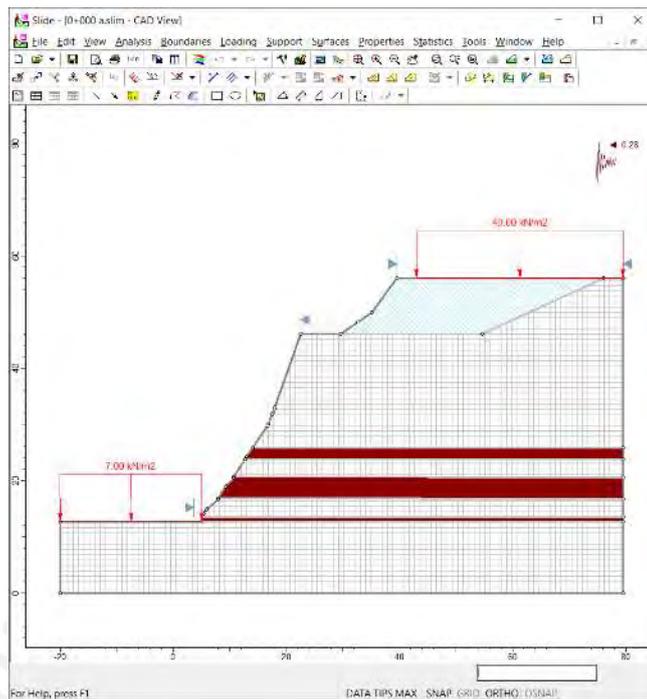


Imagen 1: Modelo de la progresiva 0+000 en Slide.

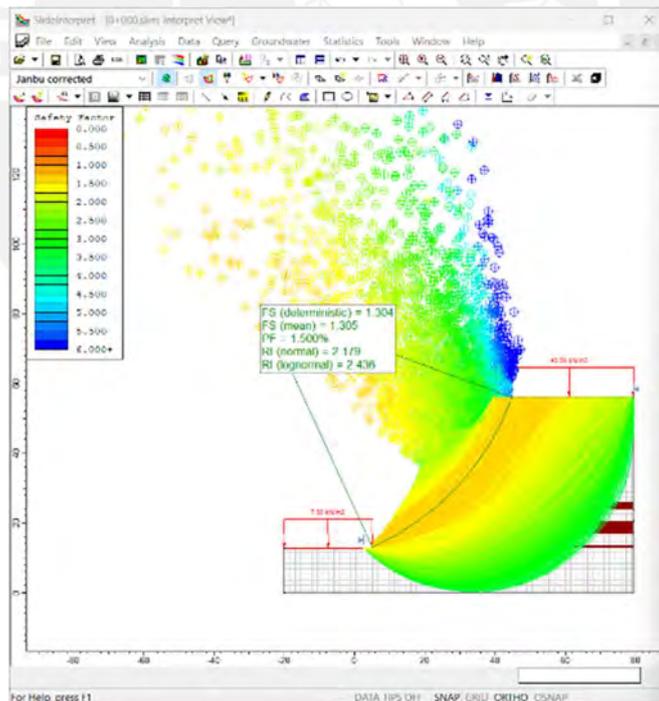


Imagen 2: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

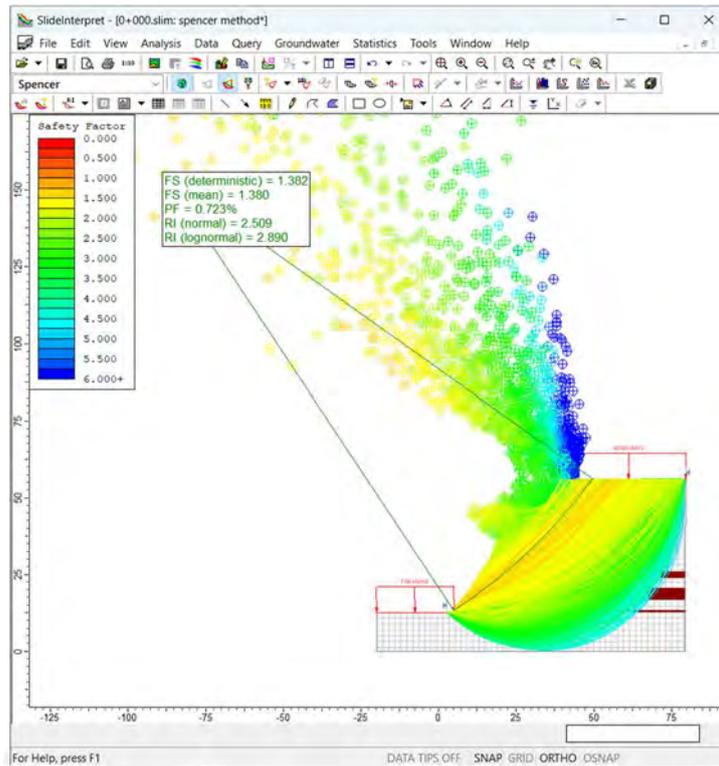


Imagen 3: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

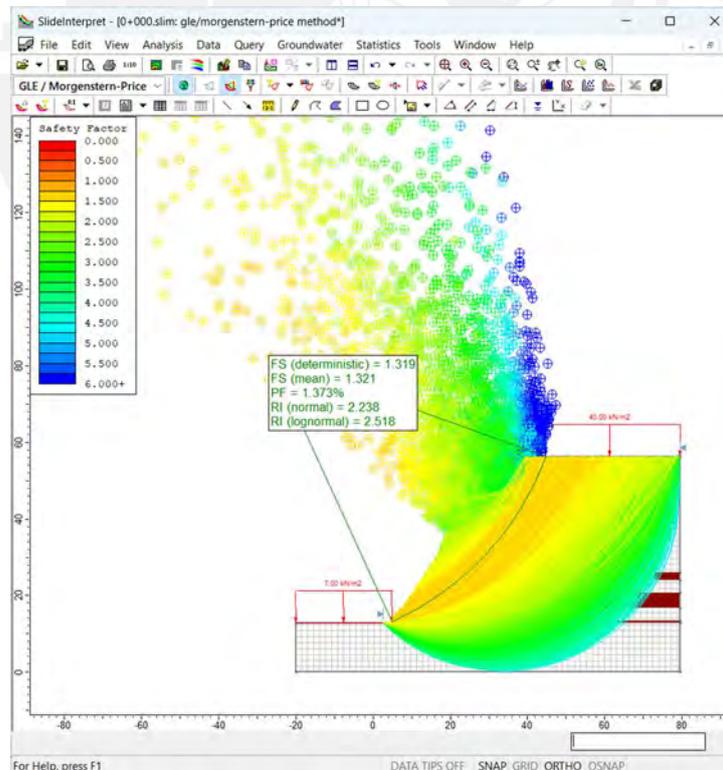


Imagen 4: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

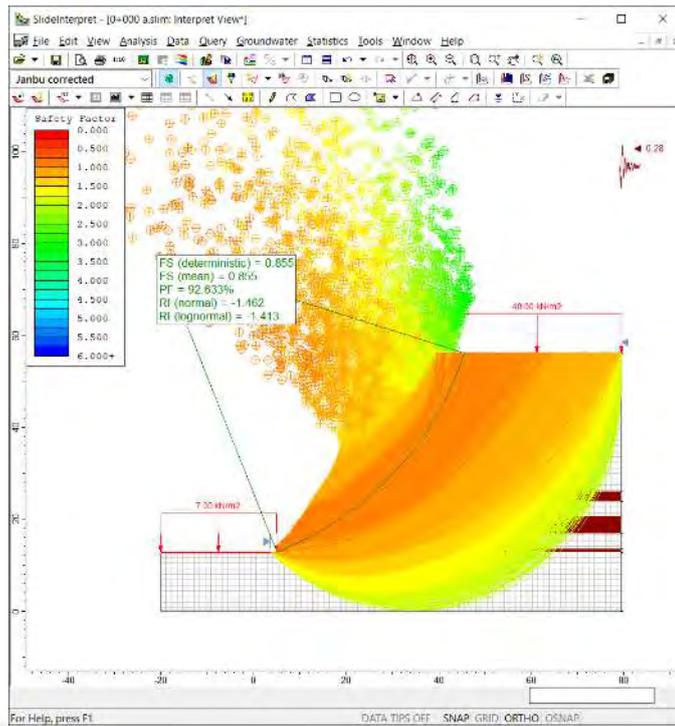


Imagen 5: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

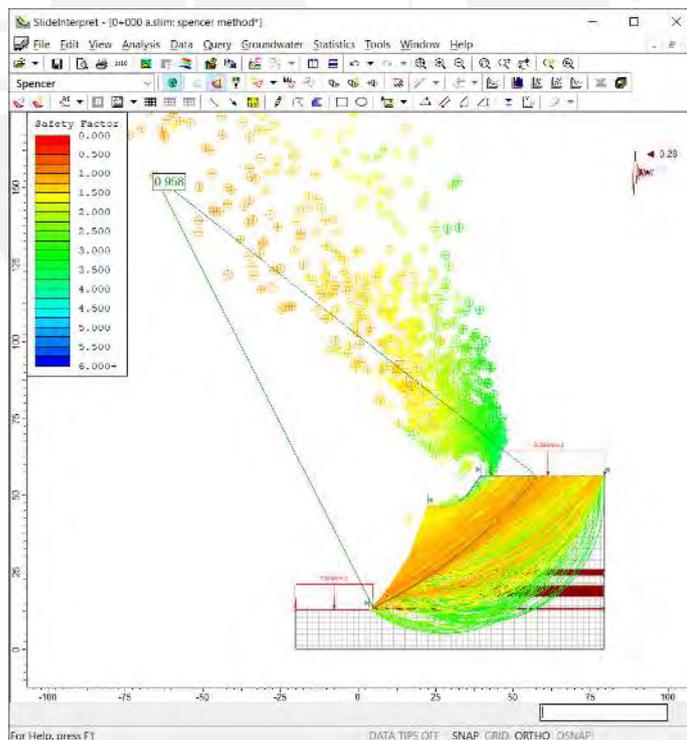


Imagen 6: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

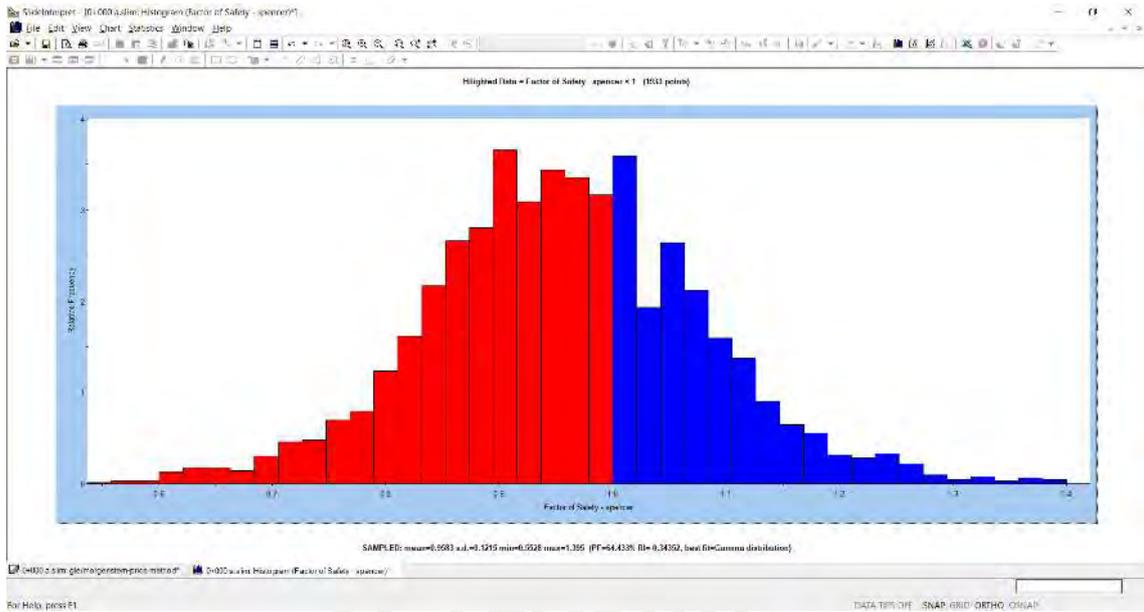


Imagen 7: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

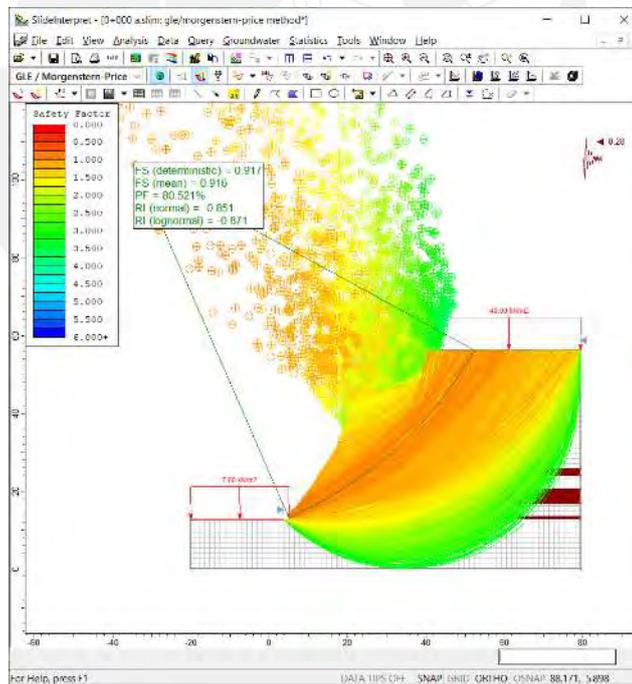


Imagen 8: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

➤ Perfil 2 (Progresiva 0+050)

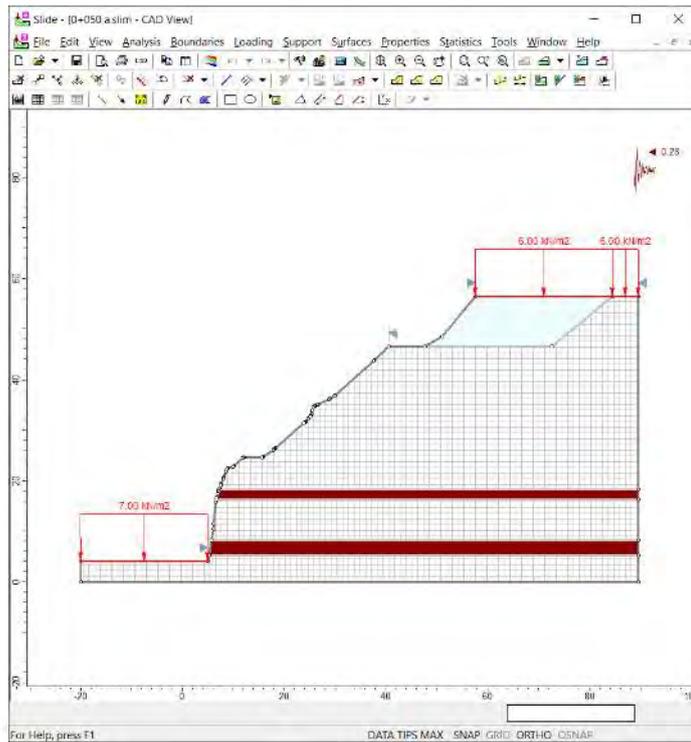


Imagen 9: Modelo de la progresiva 0+050 en Slide.

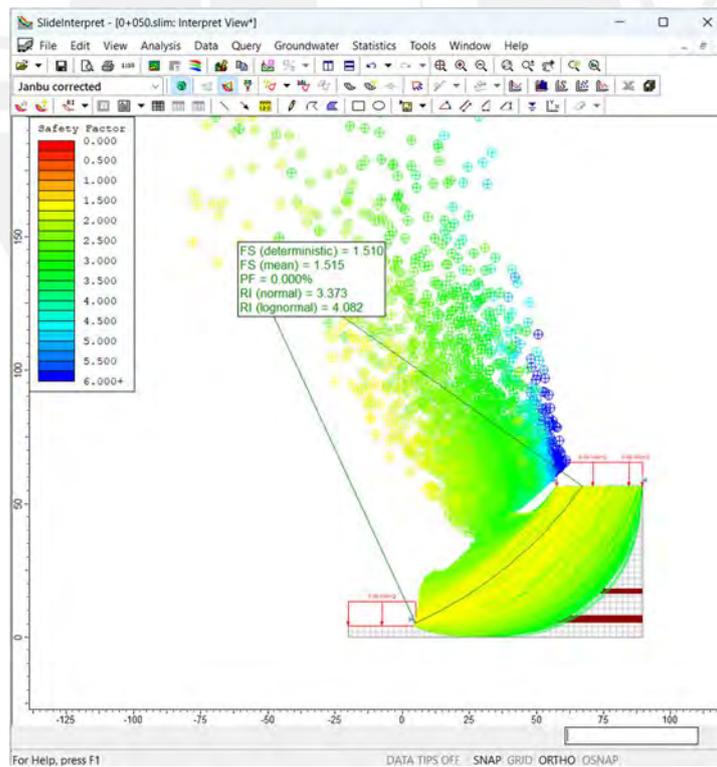


Imagen 10: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

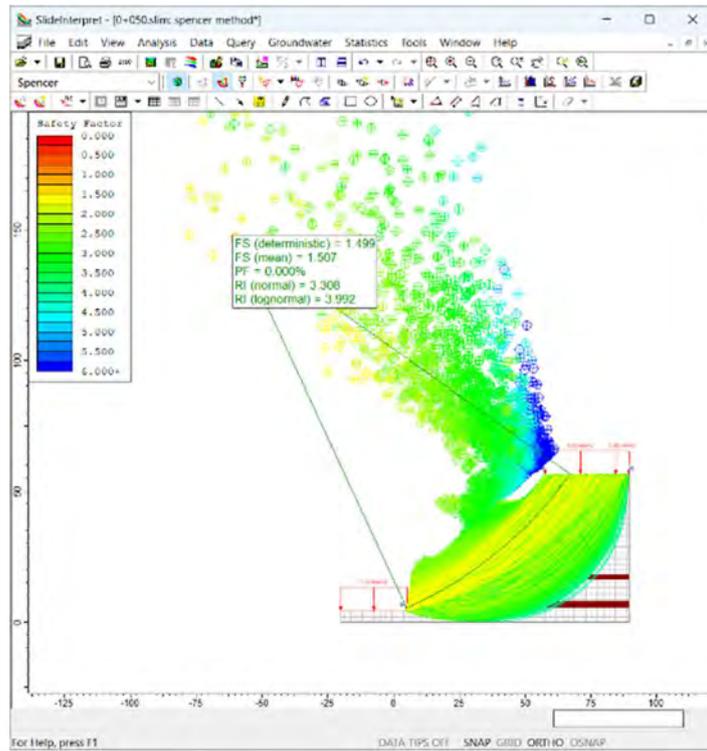


Imagen 11: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

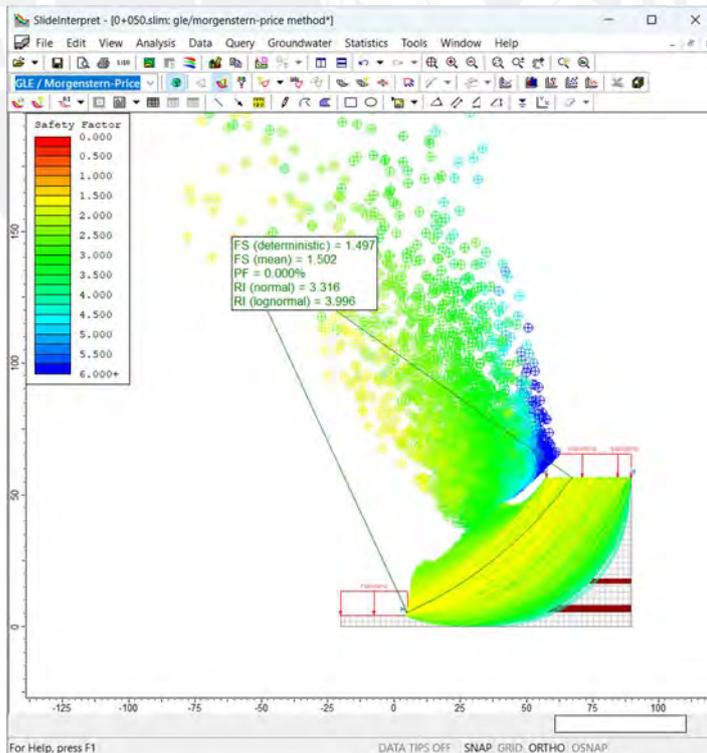


Imagen 12: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

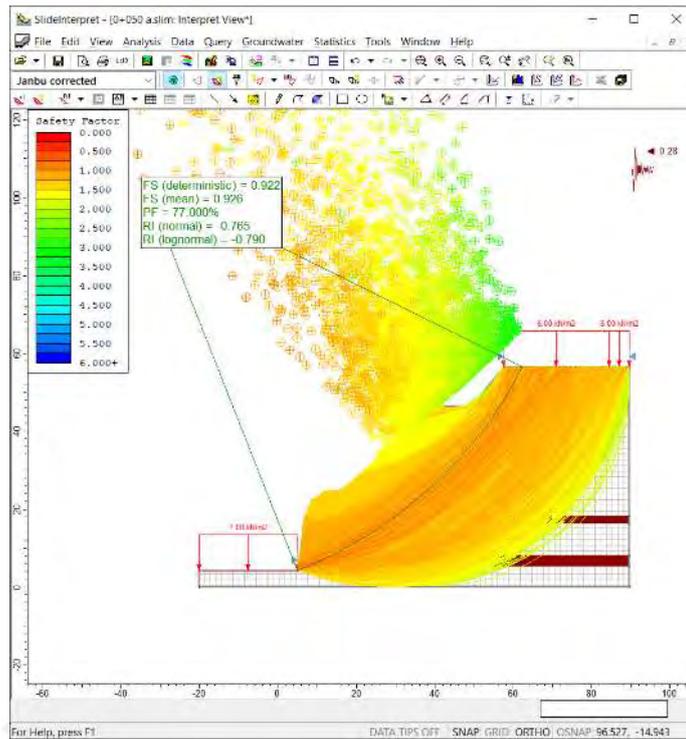


Imagen 13: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

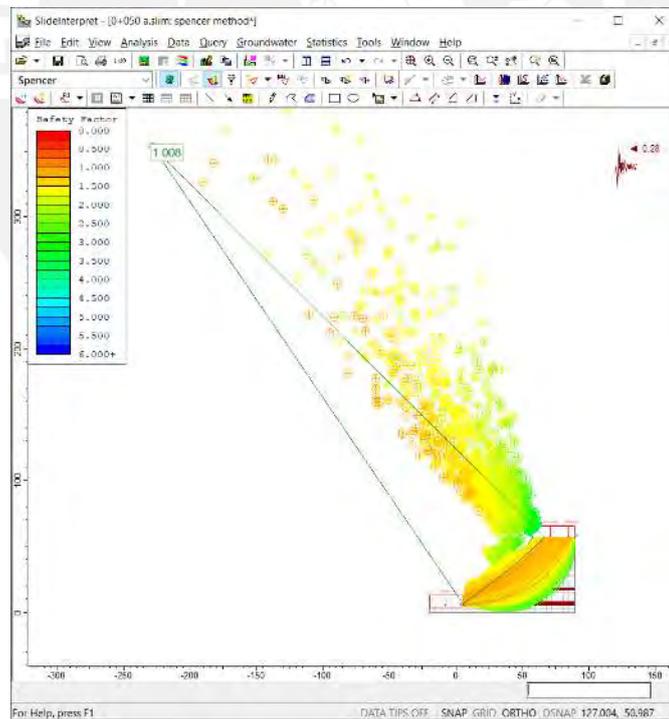


Imagen 14: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

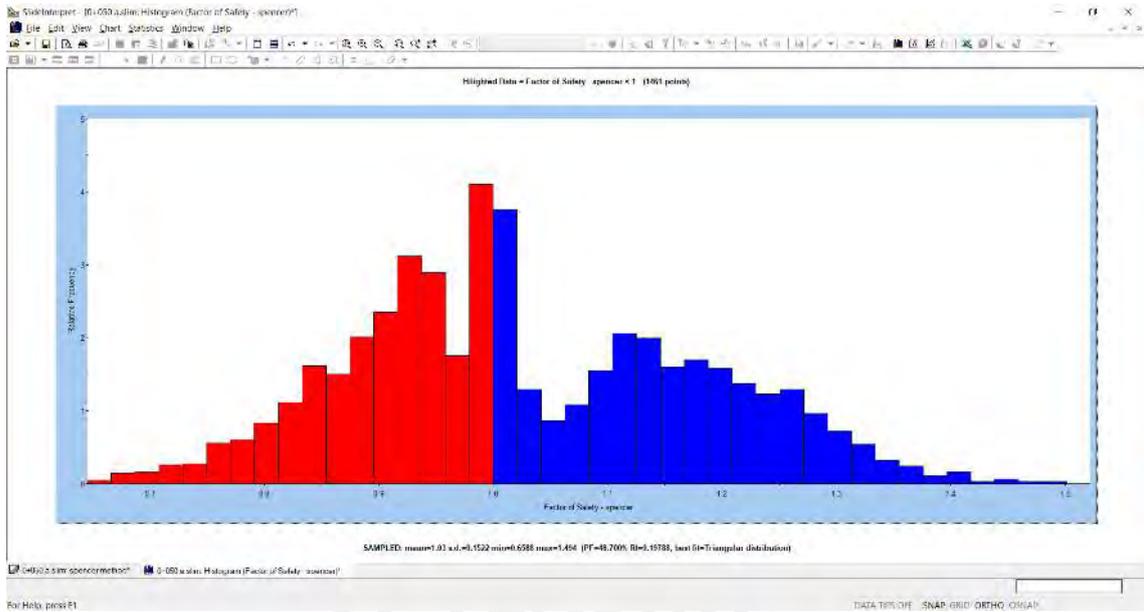


Imagen 15: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

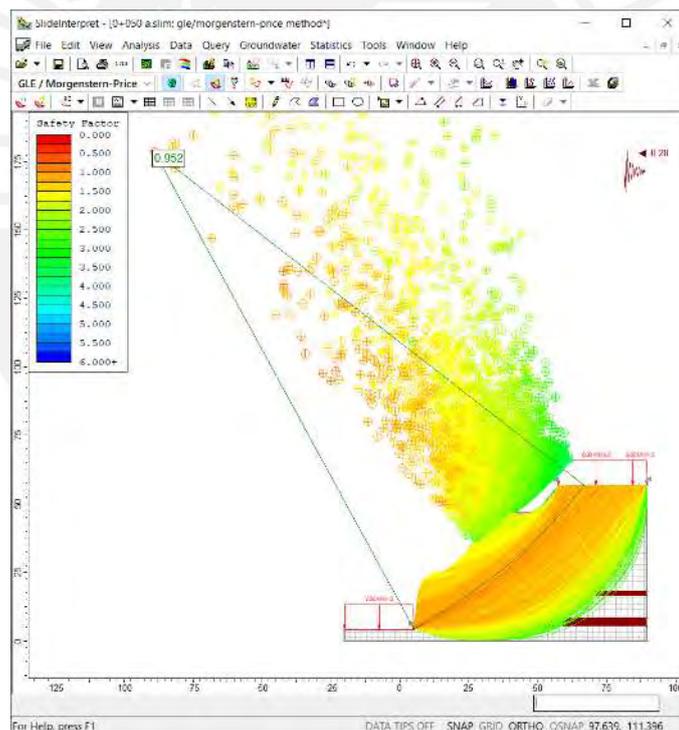


Imagen 16: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

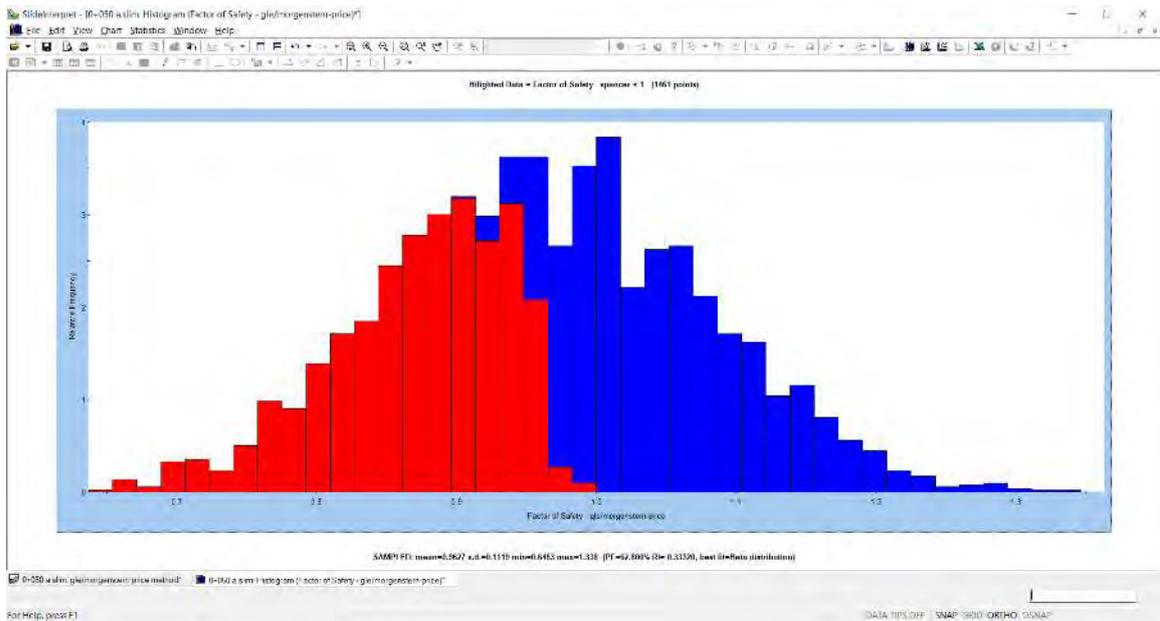


Imagen 17: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

➤ Perfil 3 (Progresiva 0+100)

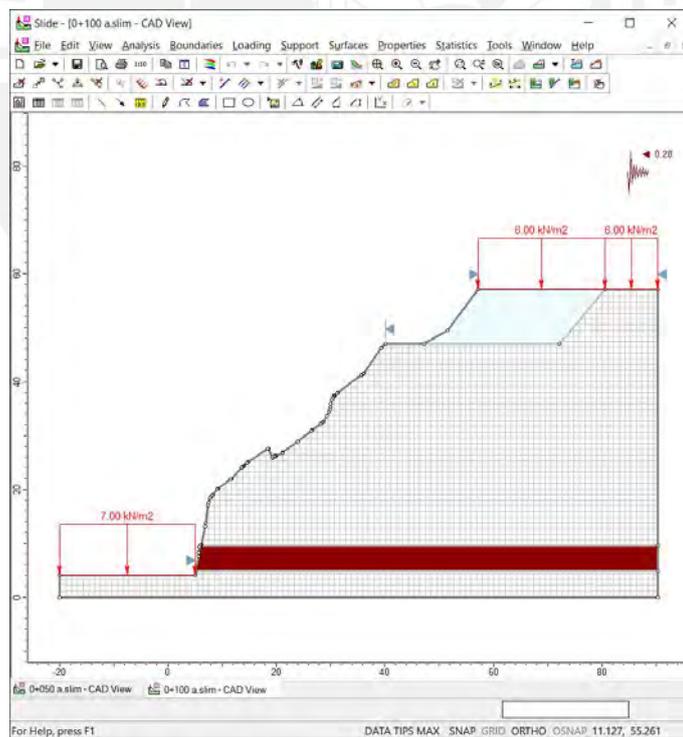


Imagen 18: Modelo de la progresiva 0+100 en Slide.

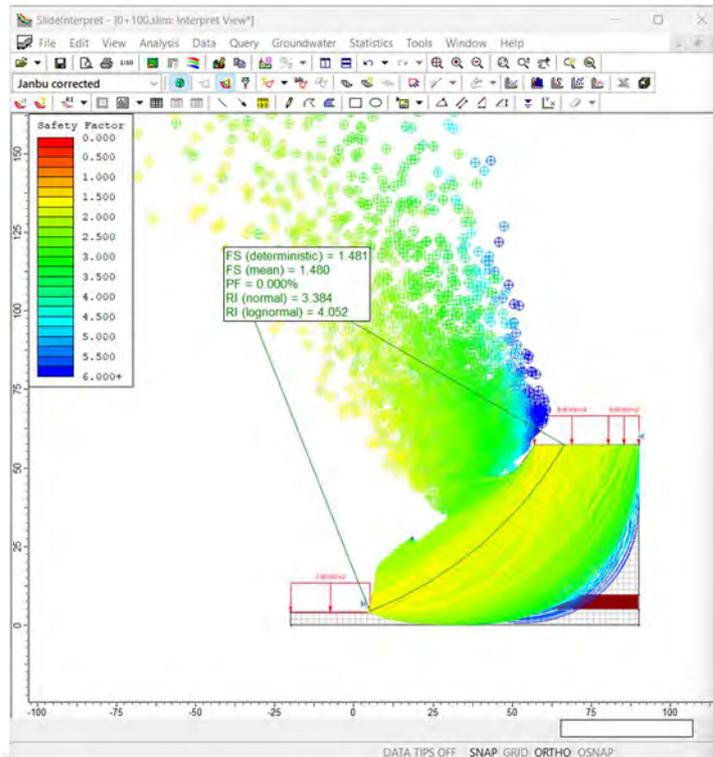


Imagen 19: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

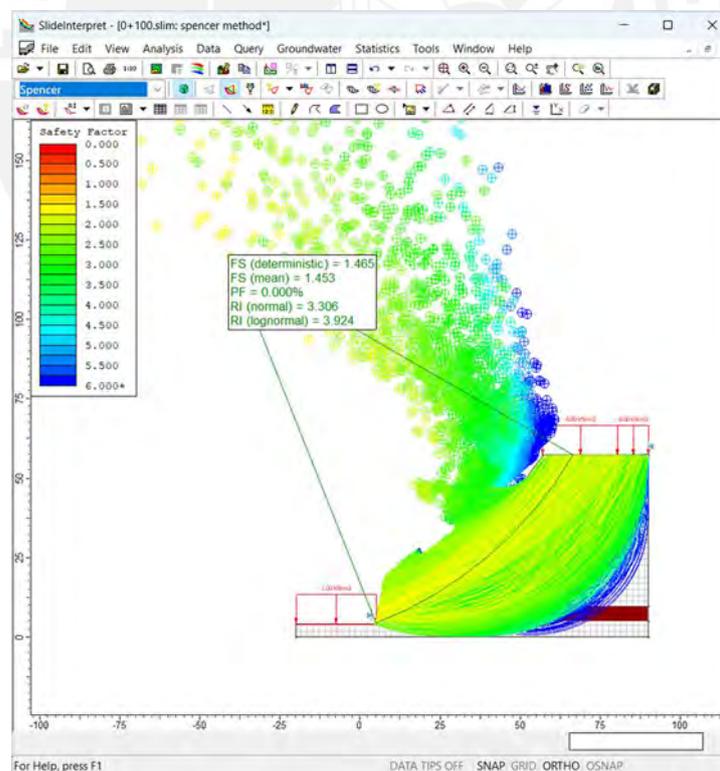


Imagen 20: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

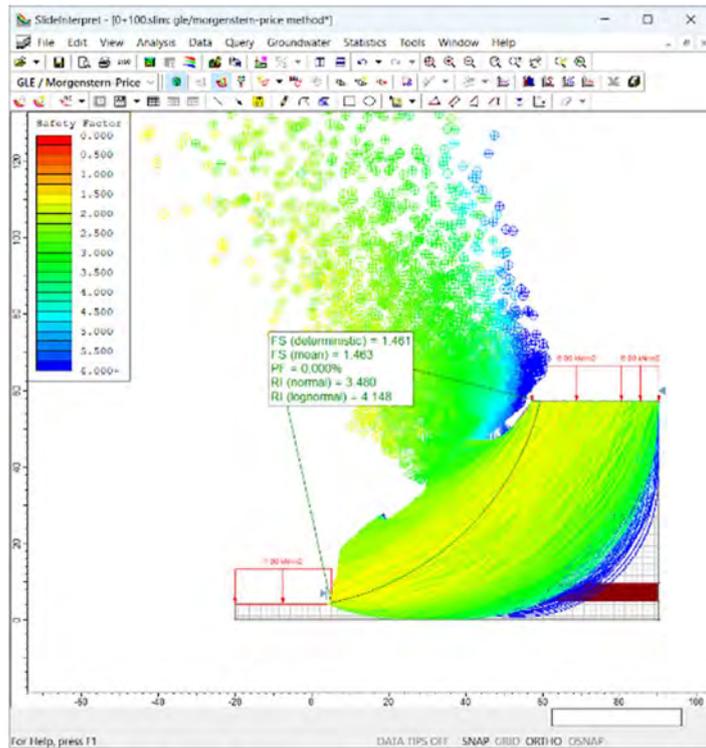


Imagen 21: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

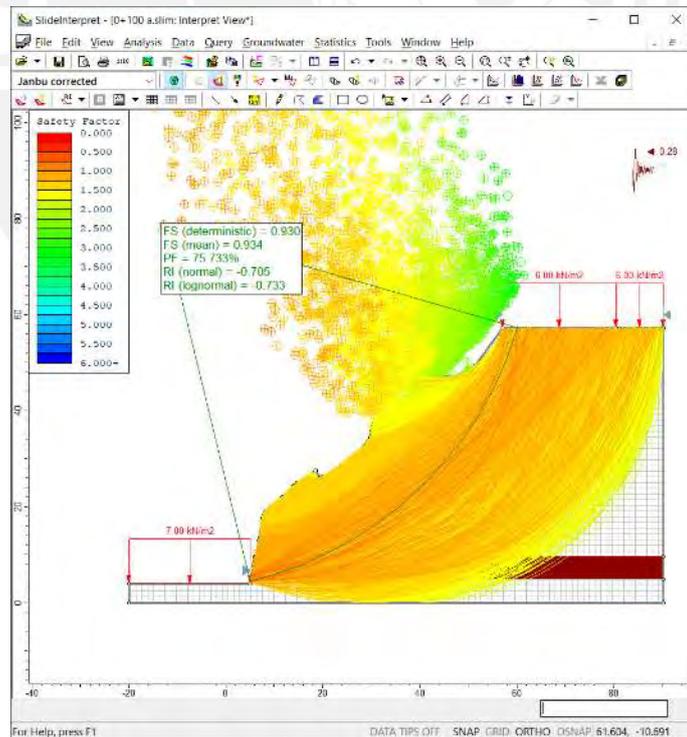


Imagen 22: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

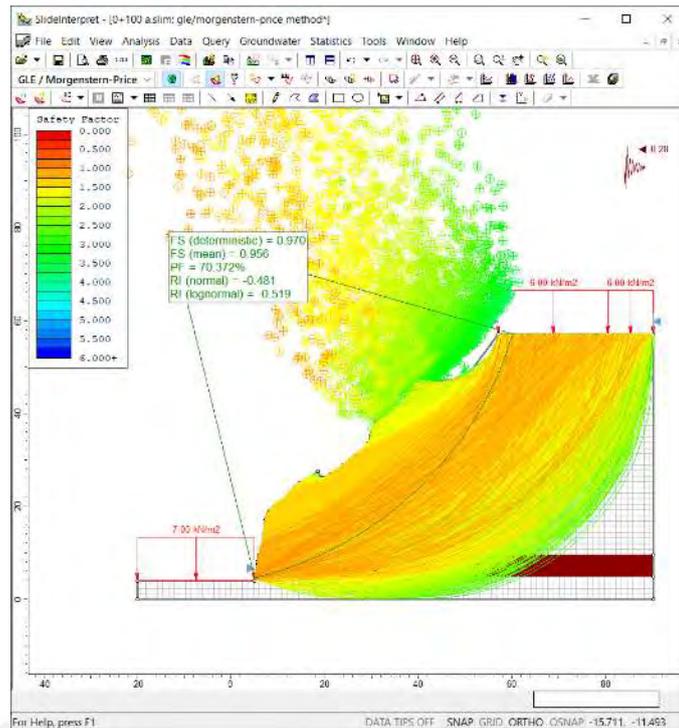


Imagen 25: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

- Perfil 4 (Progresiva 0+150)

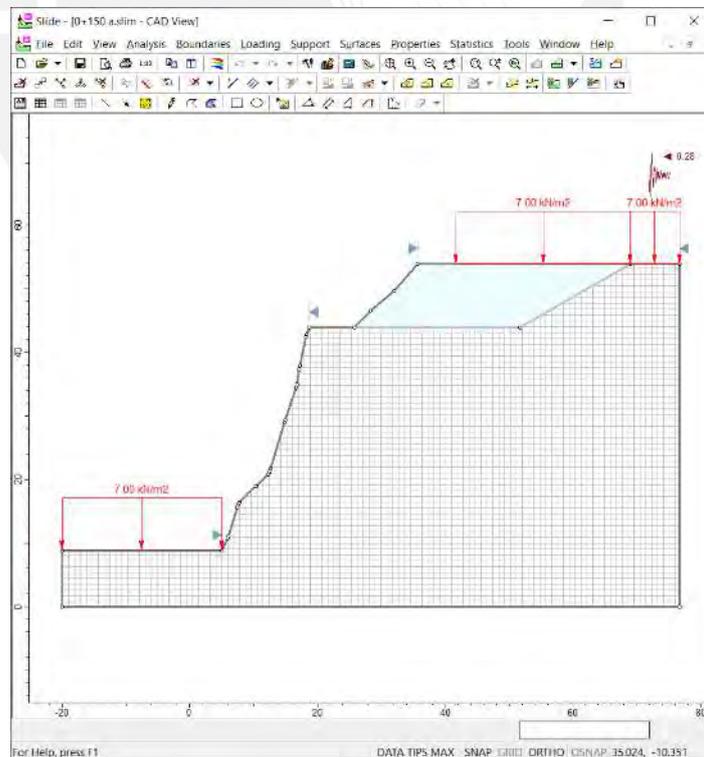


Imagen 26: Modelo de la progresiva 0+150 en Slide.

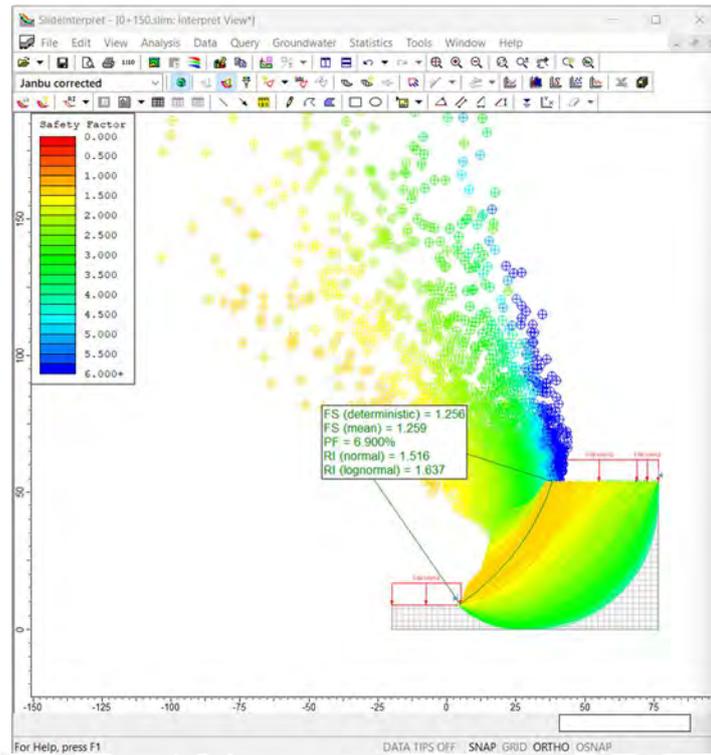


Imagen 27: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

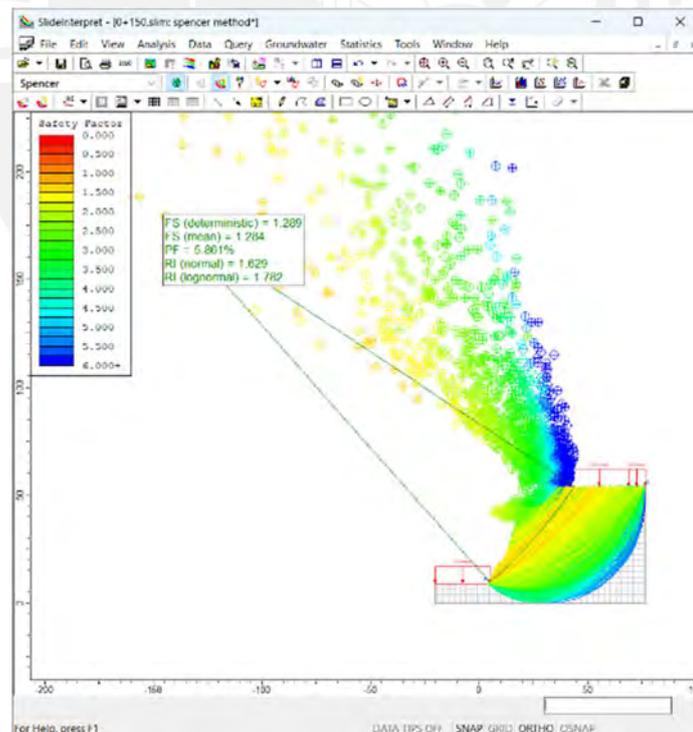


Imagen 28: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

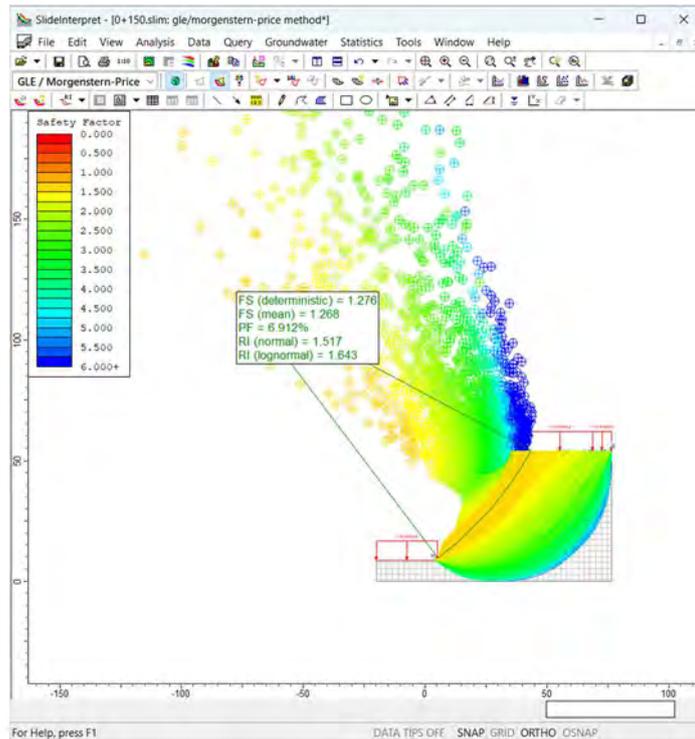


Imagen 29: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

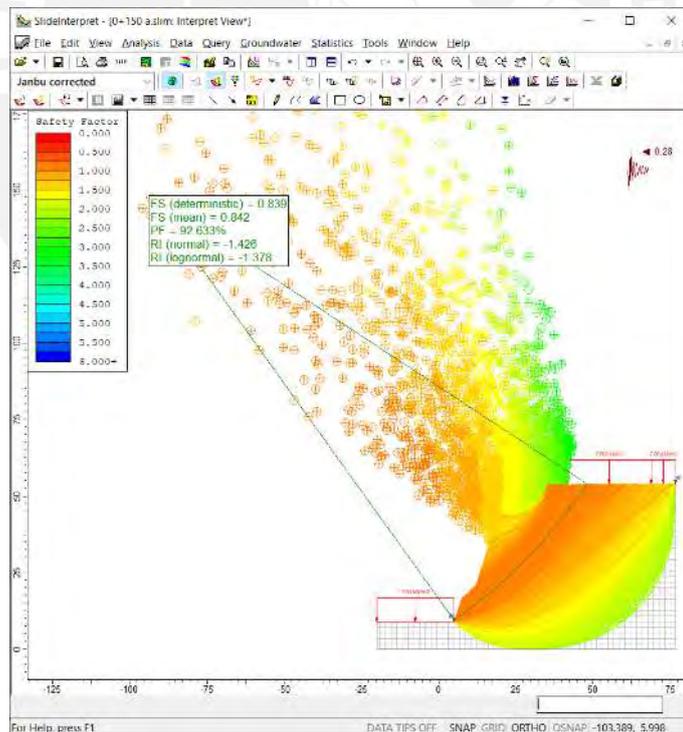


Imagen 30: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

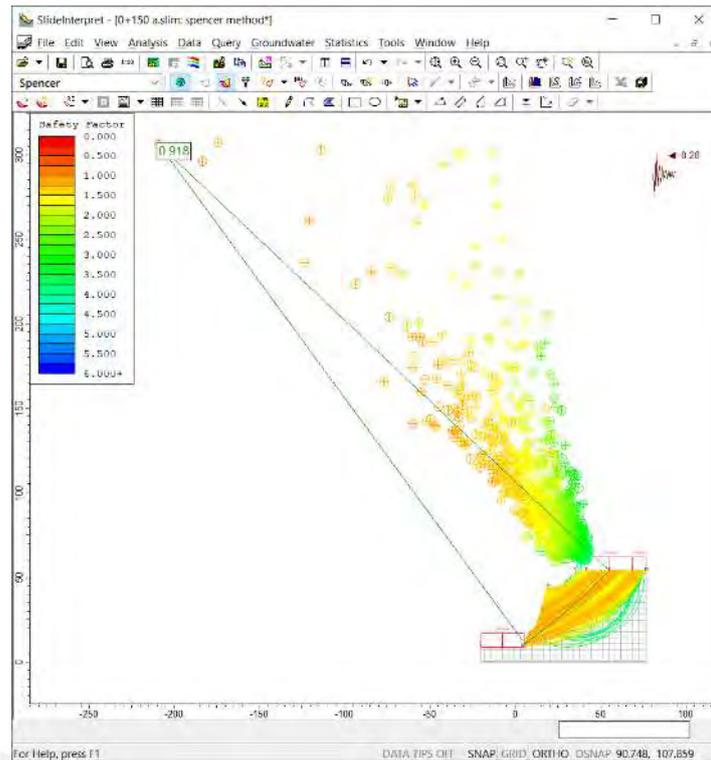


Imagen 31: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

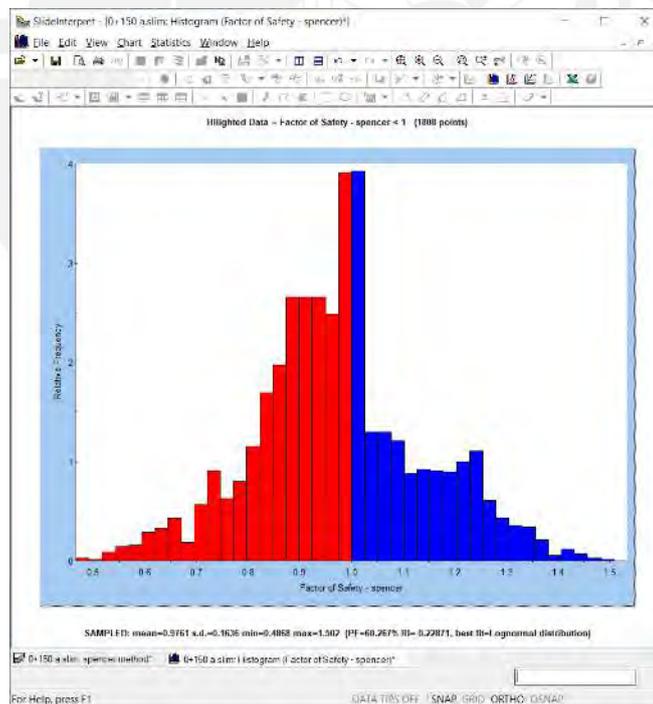


Imagen 32: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

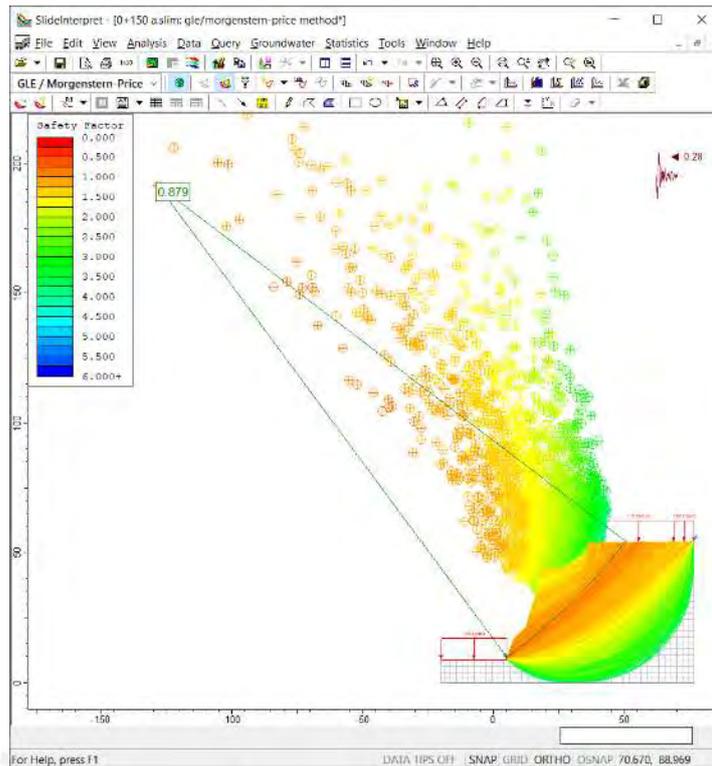


Imagen 33: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

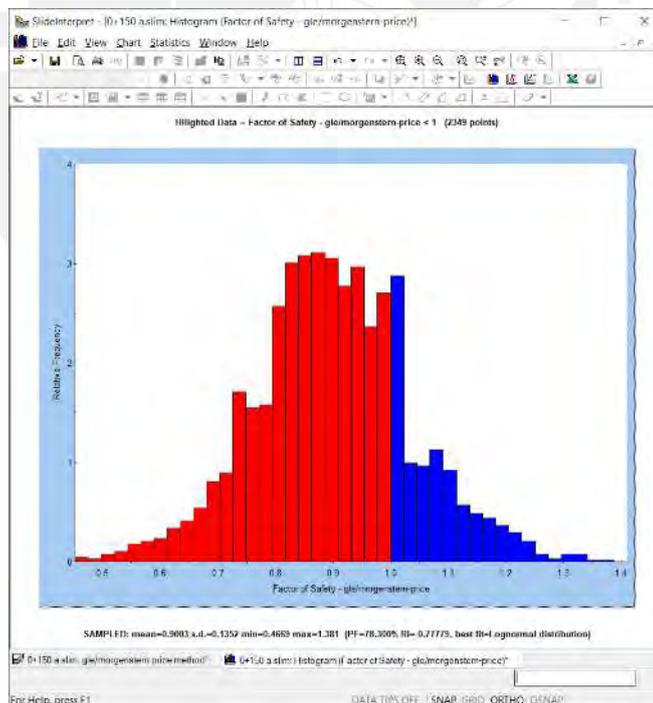


Imagen 34: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

➤ Perfil 5 (Progresiva 0+200)

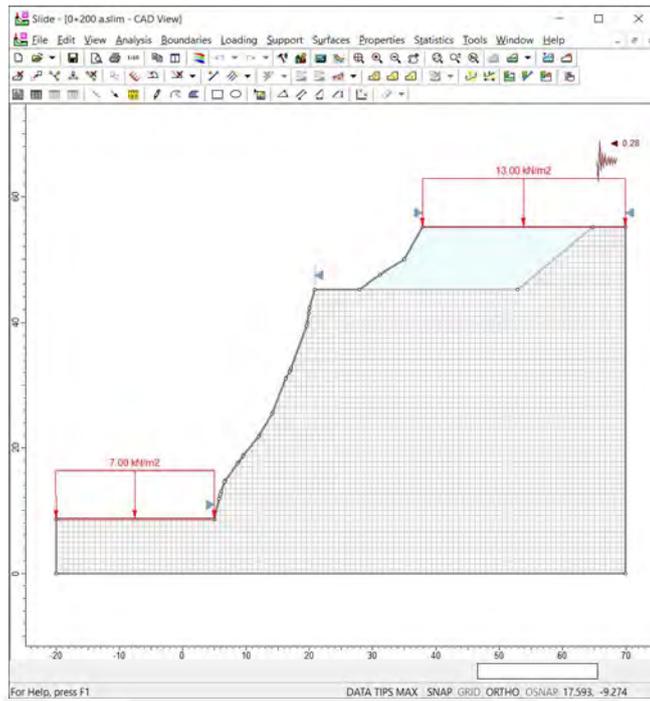


Imagen 35: Modelo de la progresiva 0+200 en Slide.

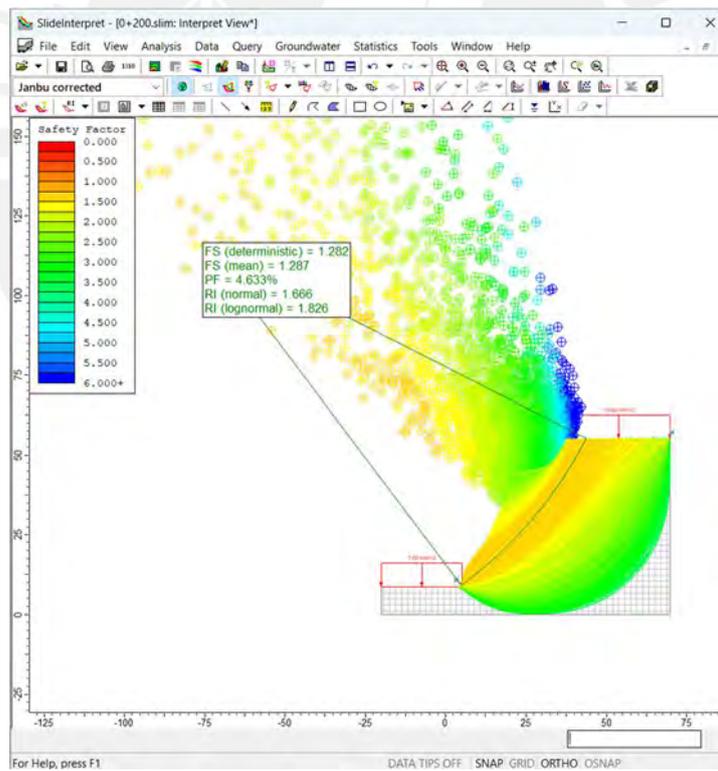


Imagen 36: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

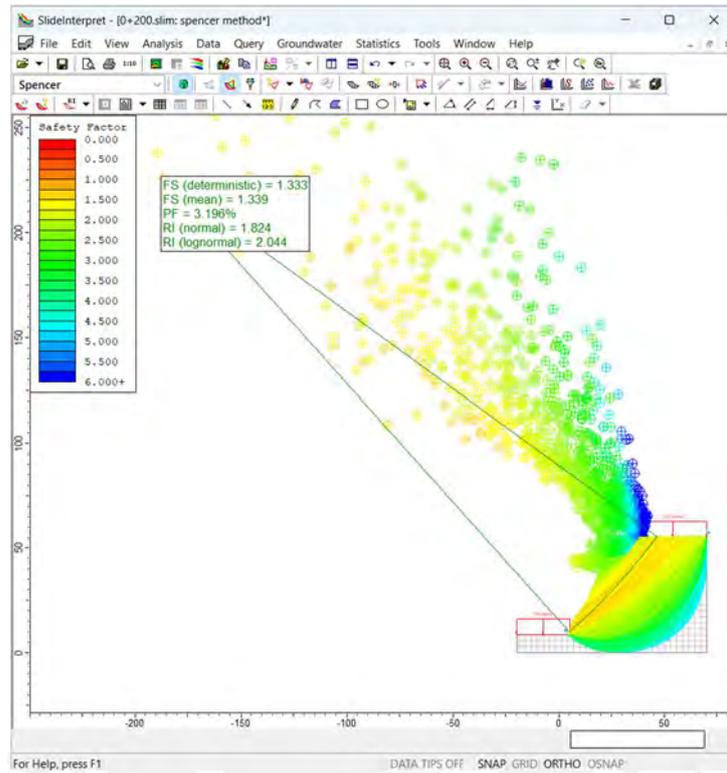


Imagen 37: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

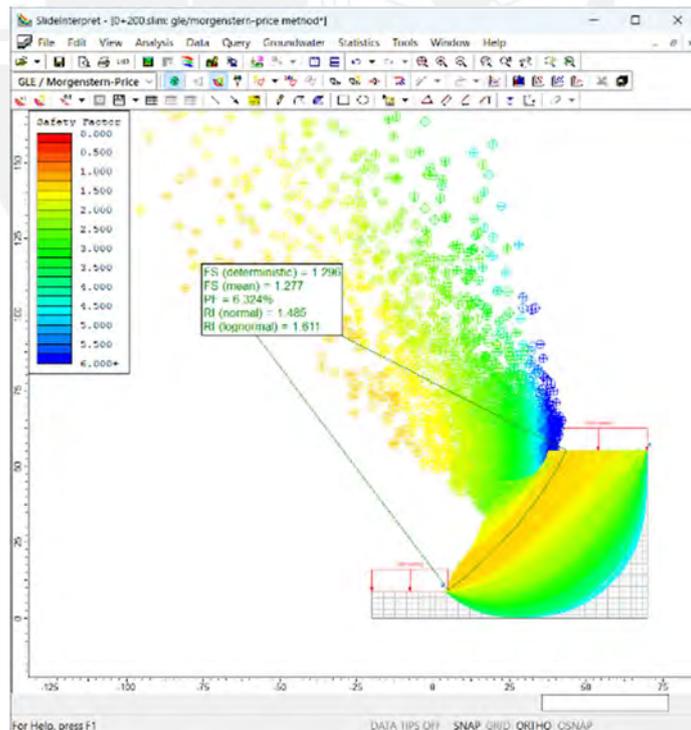


Imagen 38: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

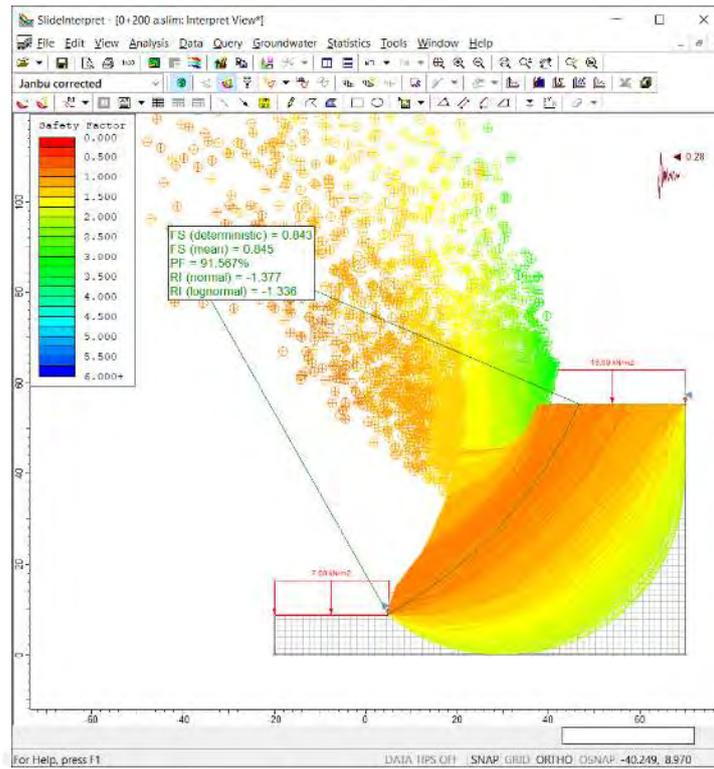


Imagen 39: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

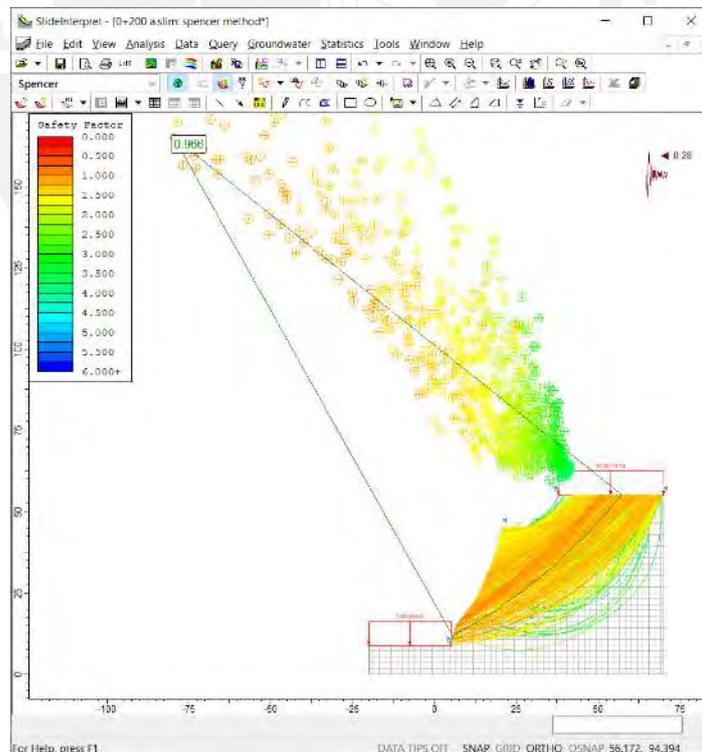


Imagen 40: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

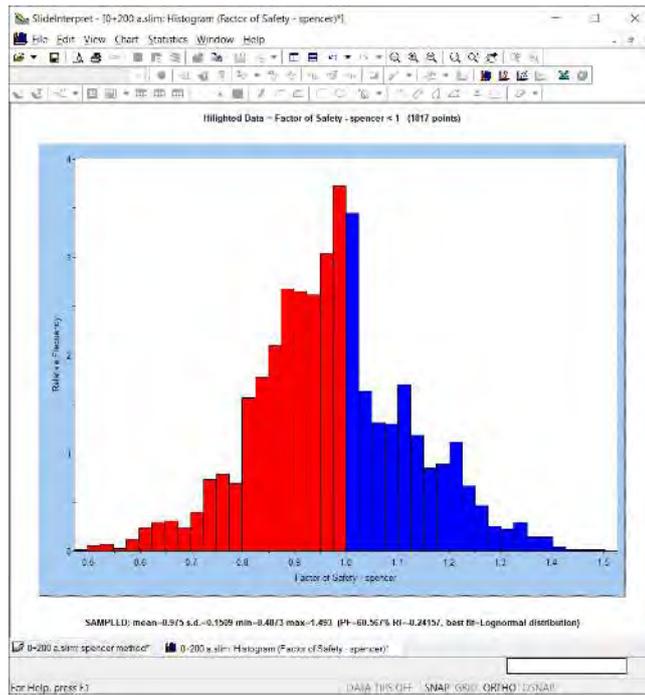


Imagen 41: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

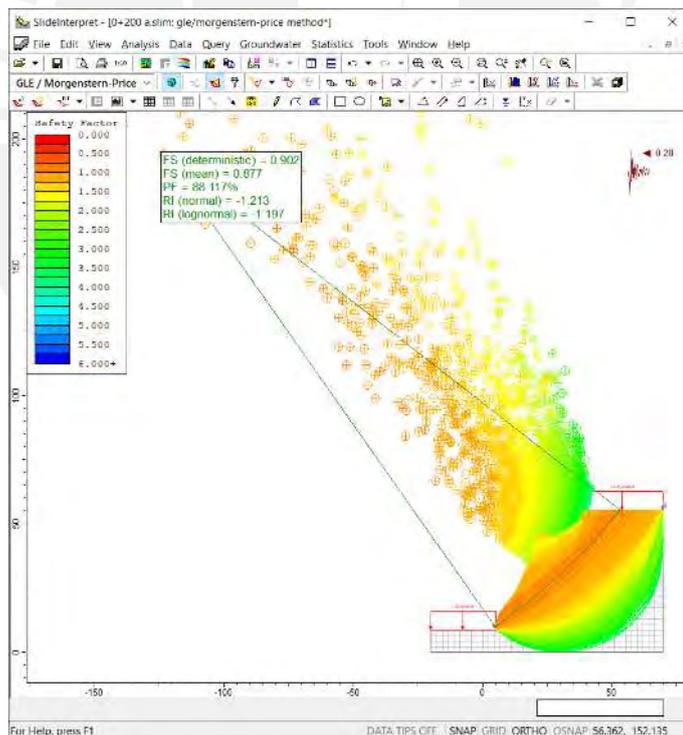


Imagen 42: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

- Perfil 6 (Progresiva 0+250)

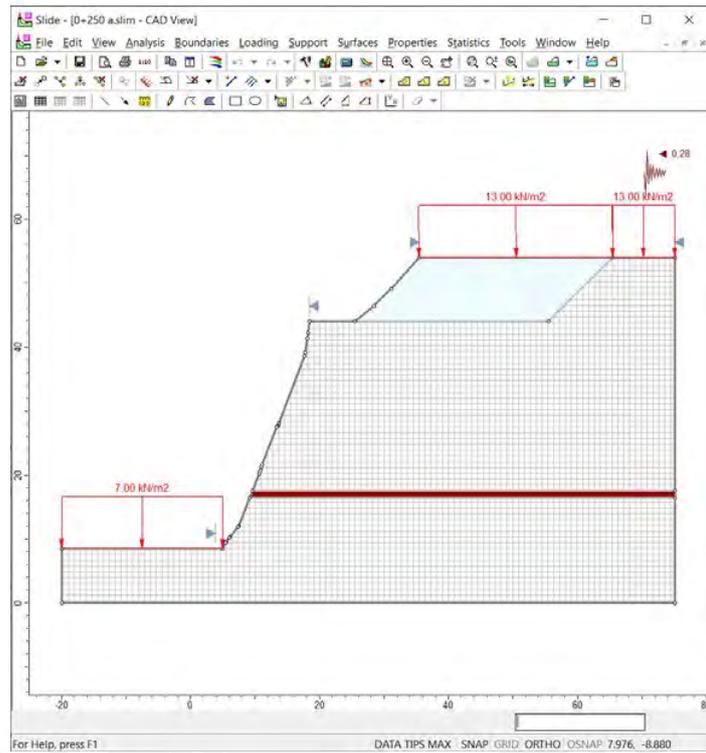


Imagen 43: Modelo de la progresiva 0+250 en Slide.

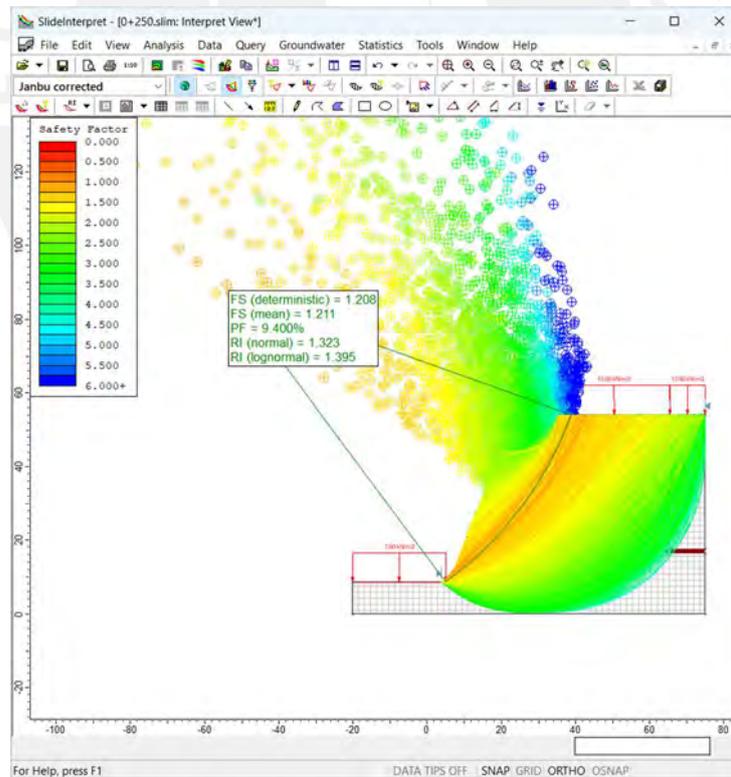


Imagen 44: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

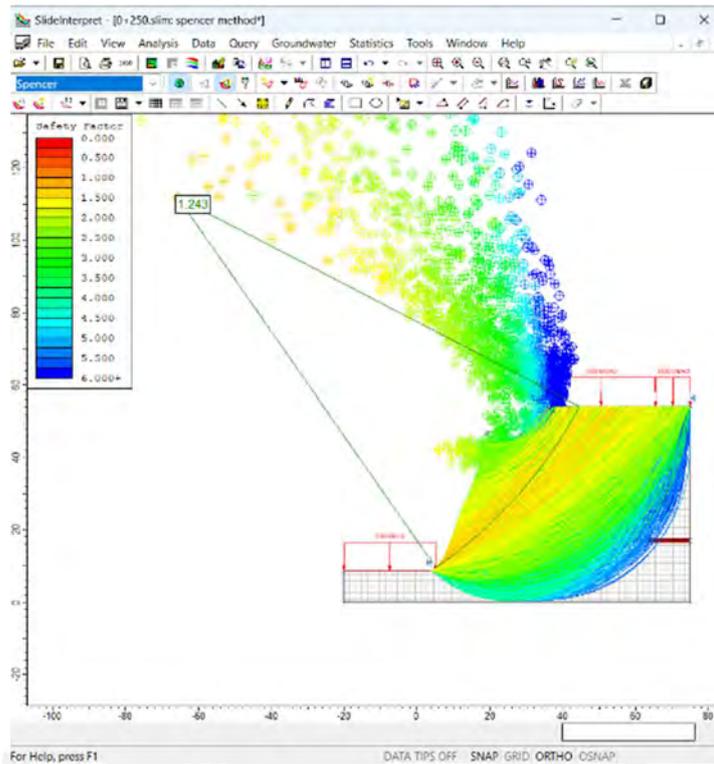


Imagen 45: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

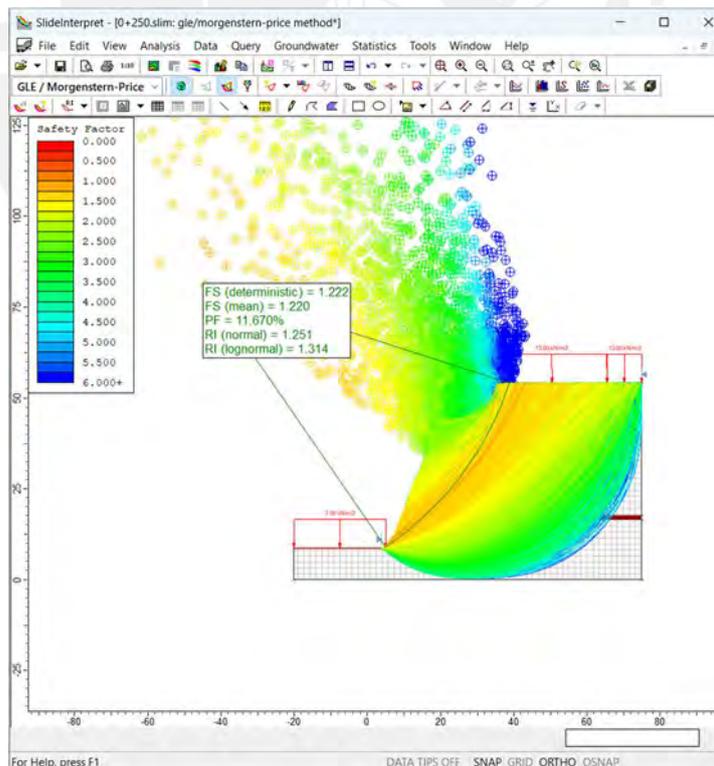


Imagen 46: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

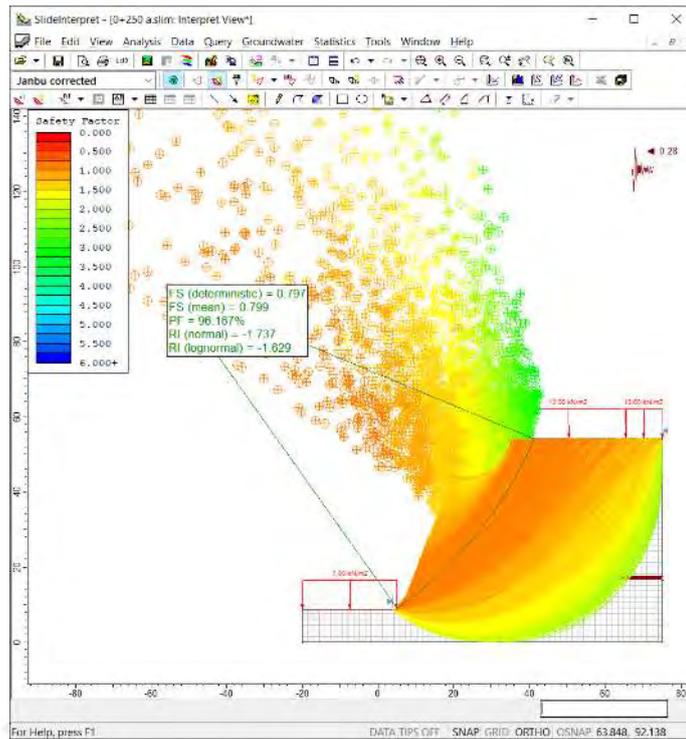


Imagen 47: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

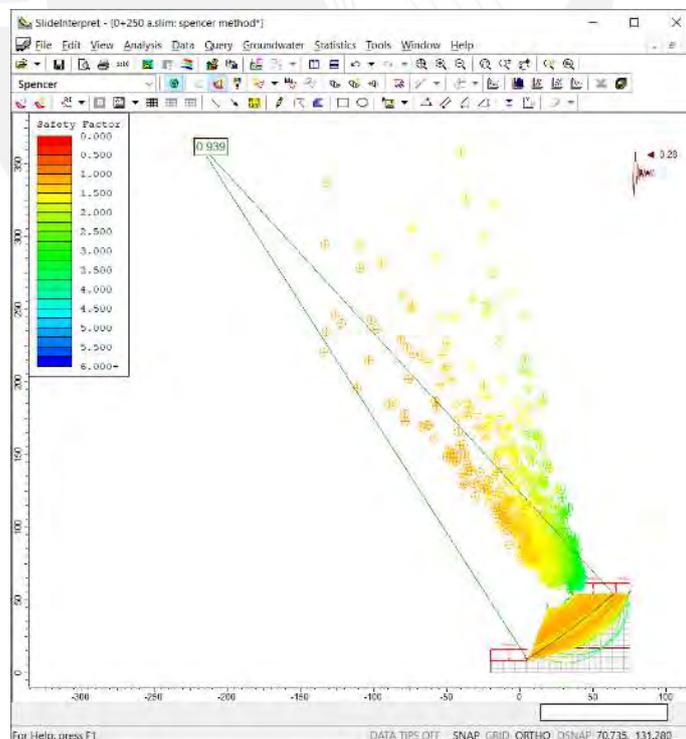


Imagen 48: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

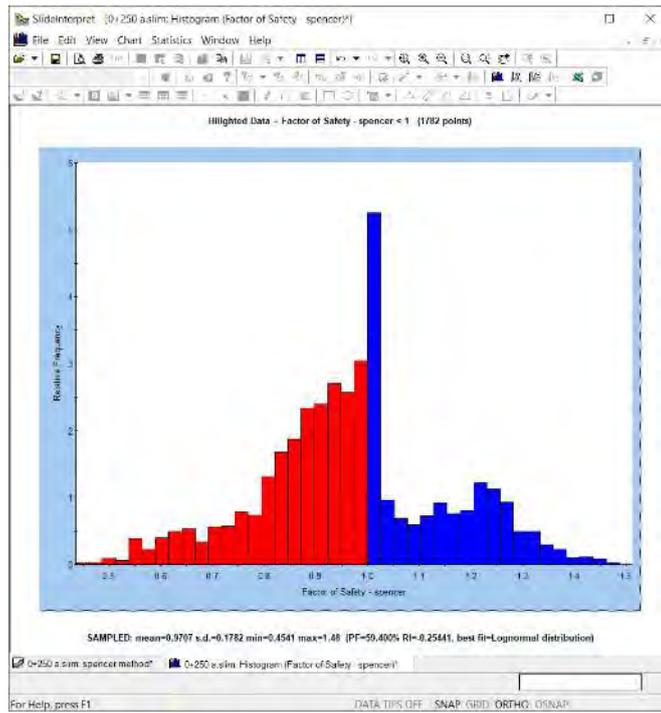


Imagen 49: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

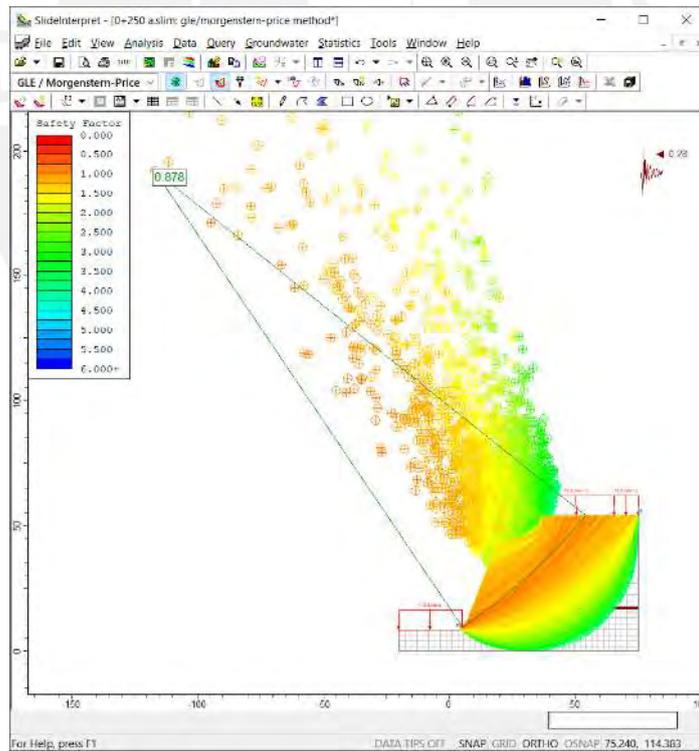


Imagen 50: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

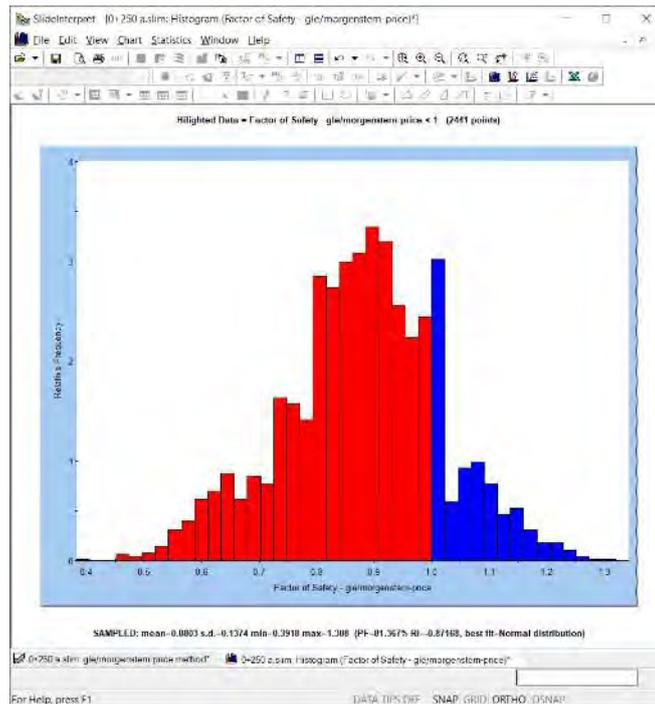


Imagen 51: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

➤ Perfil 7 (Progresiva 0+300)

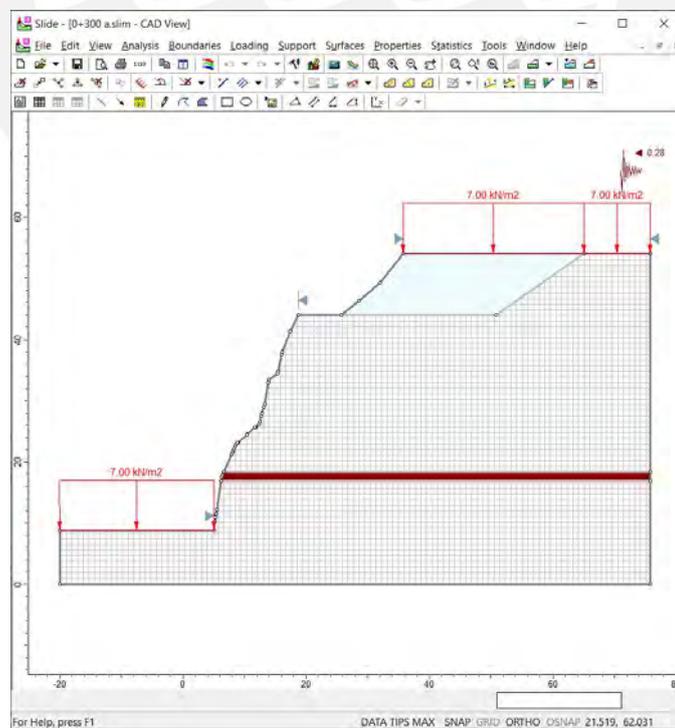


Imagen 52: Modelo de la progresiva 0+300 en Slide.

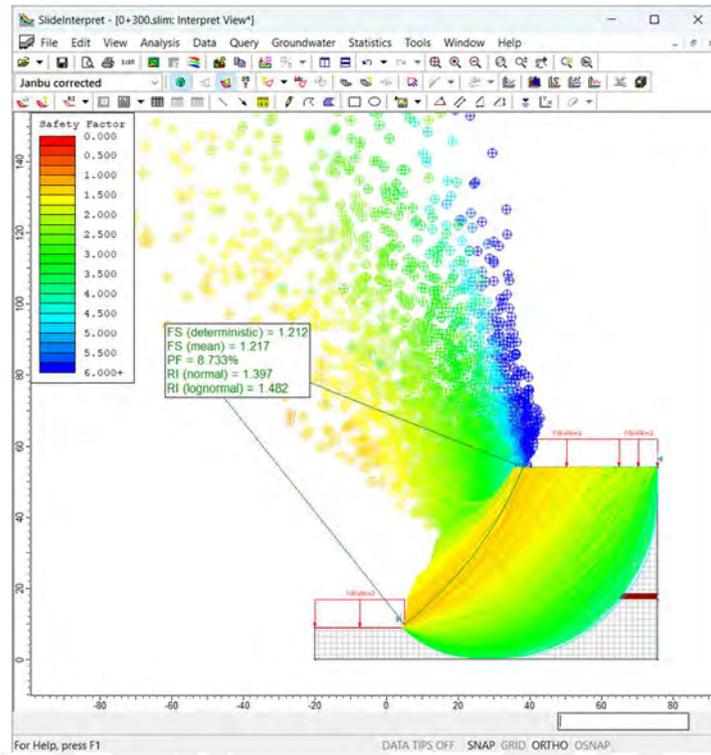


Imagen 53: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

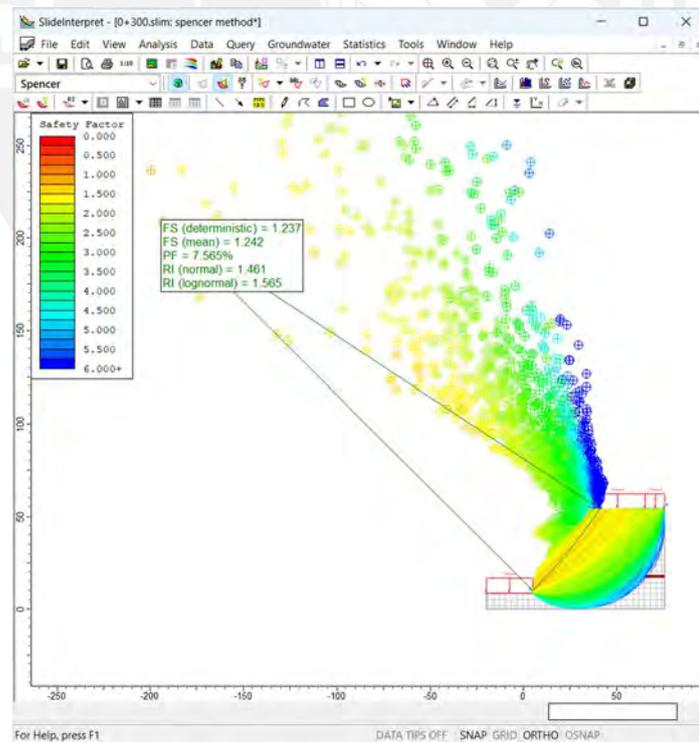


Imagen 54: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

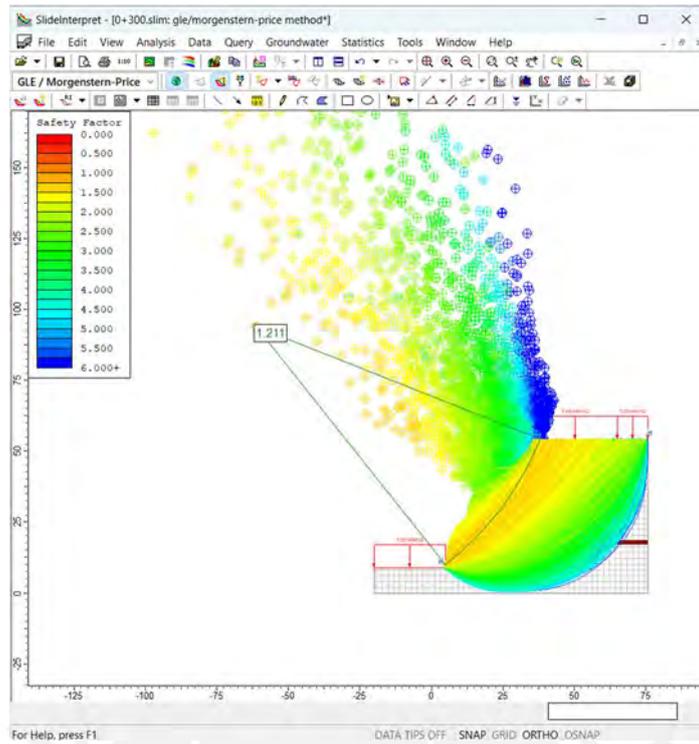


Imagen 55: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

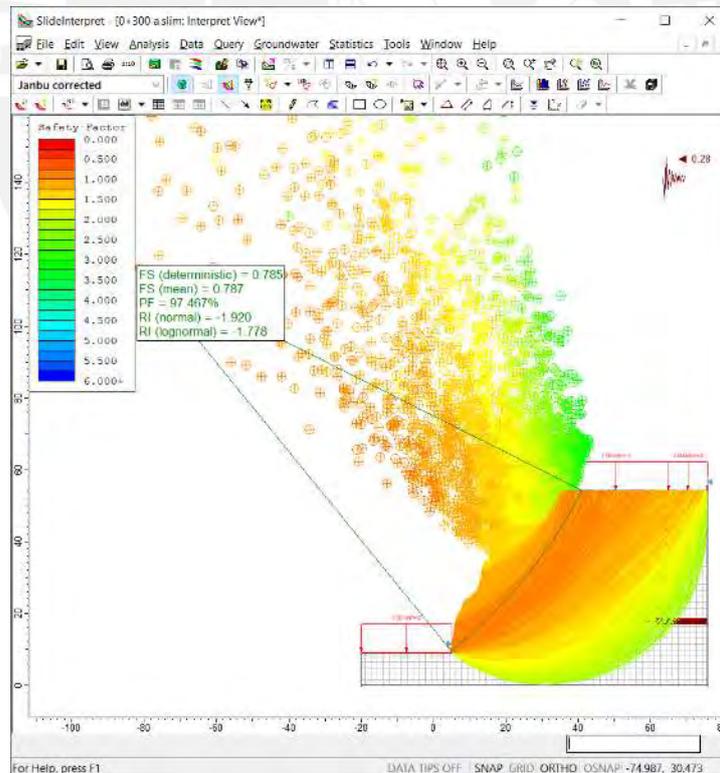


Imagen 56: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

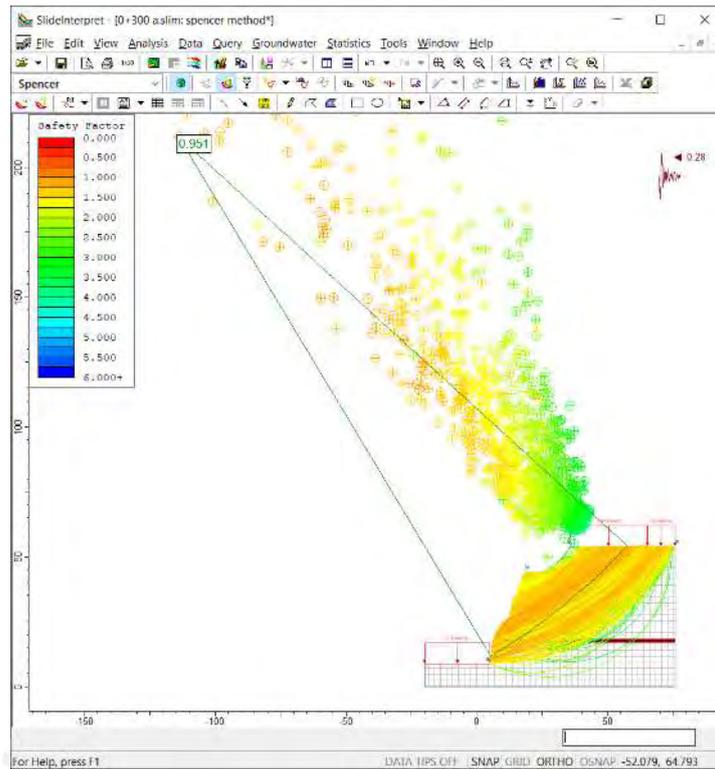


Imagen 57: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

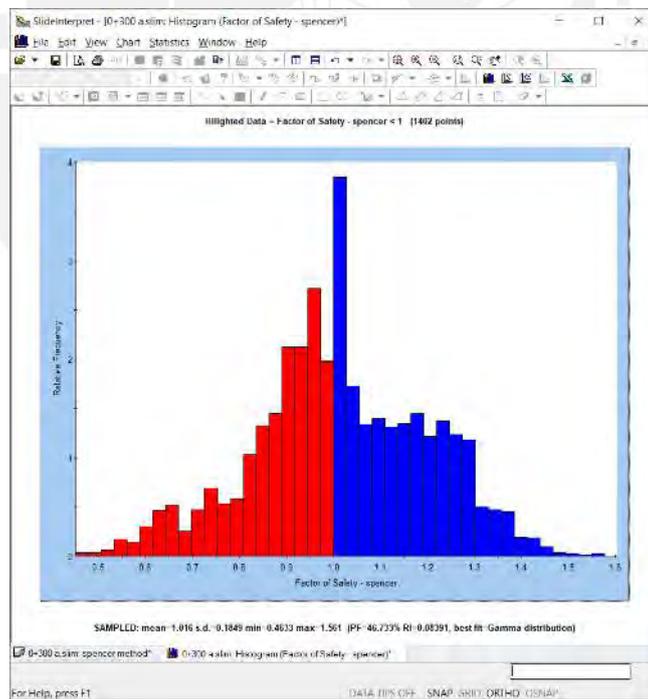


Imagen 58: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

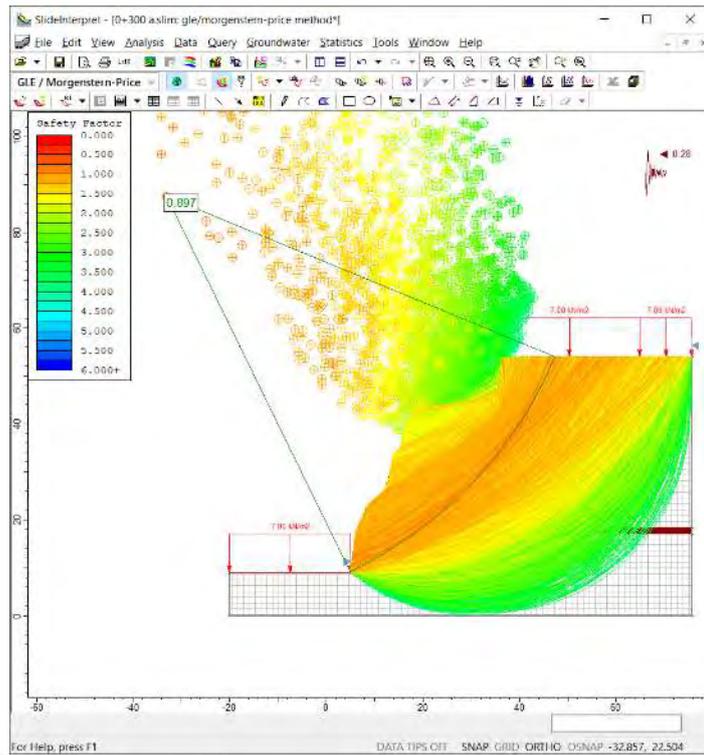


Imagen 59: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

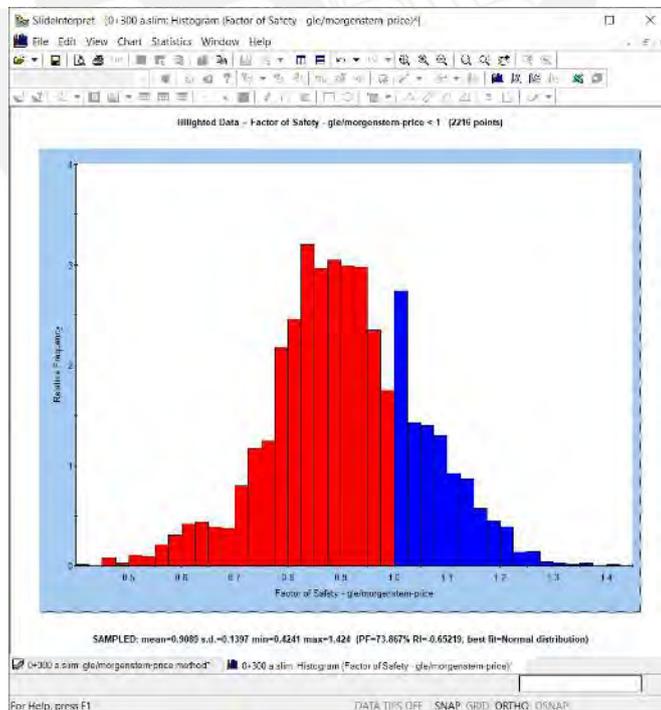


Imagen 60: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

- Perfil 8 (Progresiva 0+350)

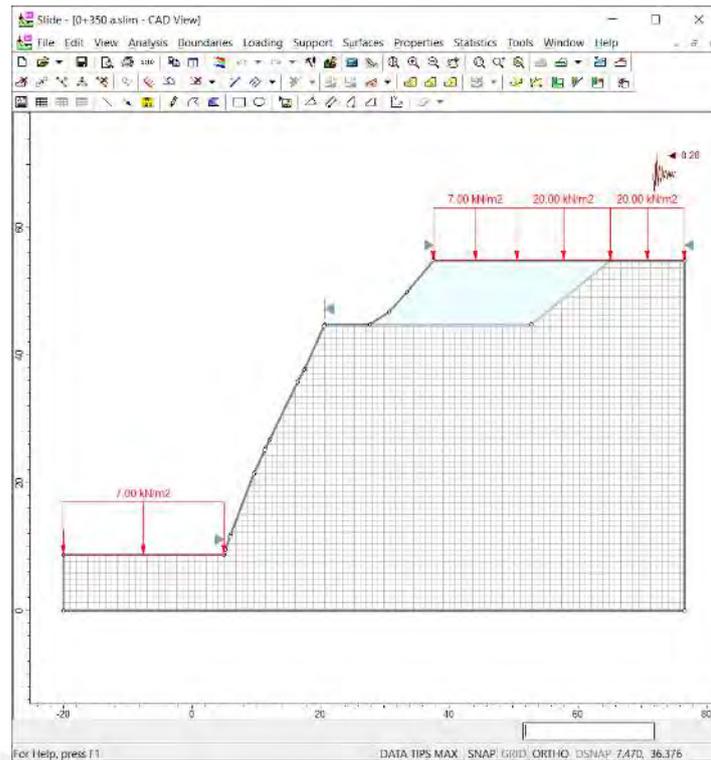


Imagen 61: Modelo de la progresiva 0+350 en Slide.

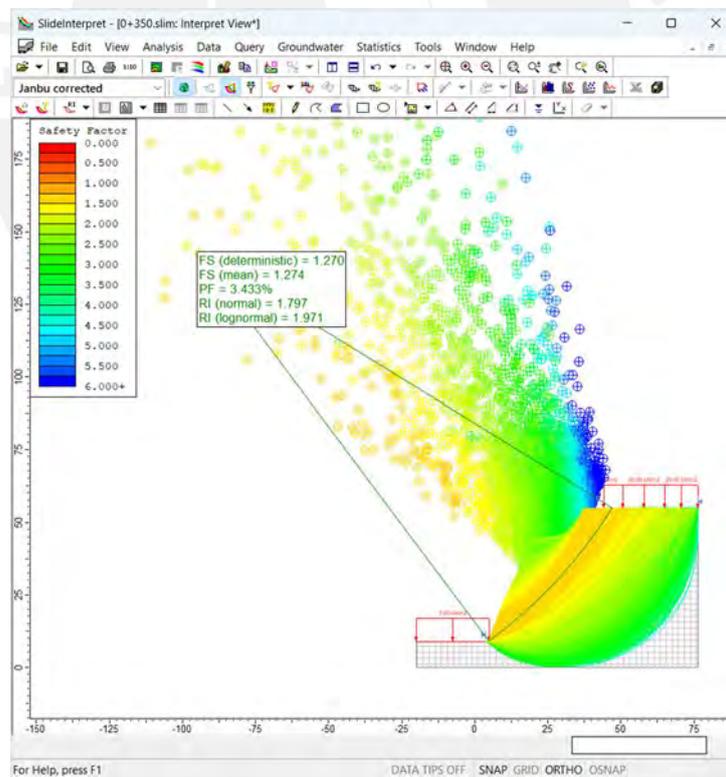


Imagen 62: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

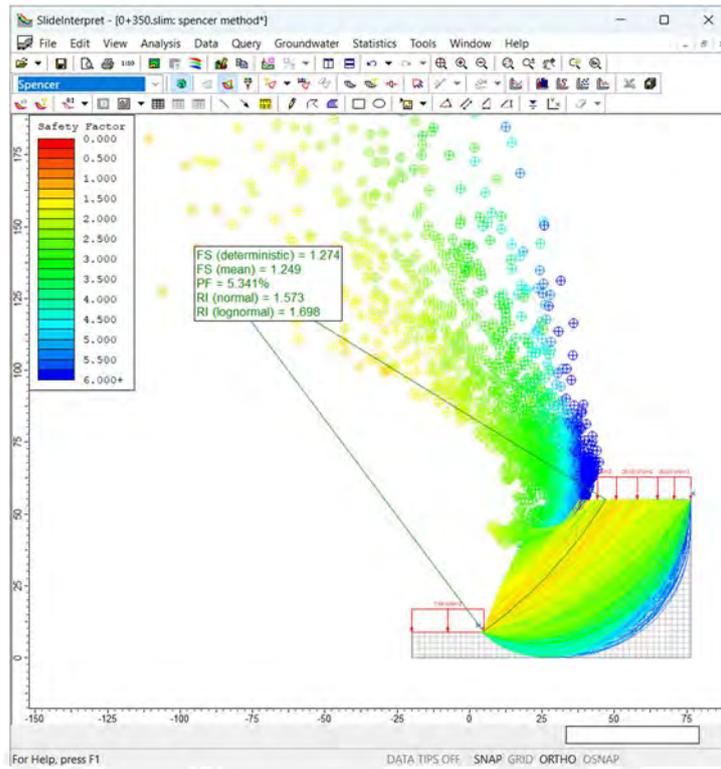


Imagen 63: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

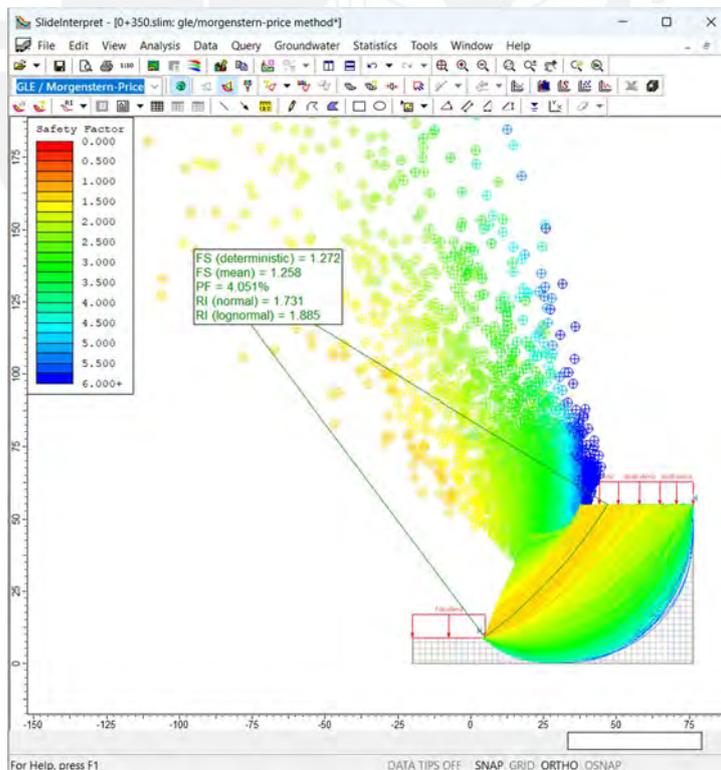


Imagen 64: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

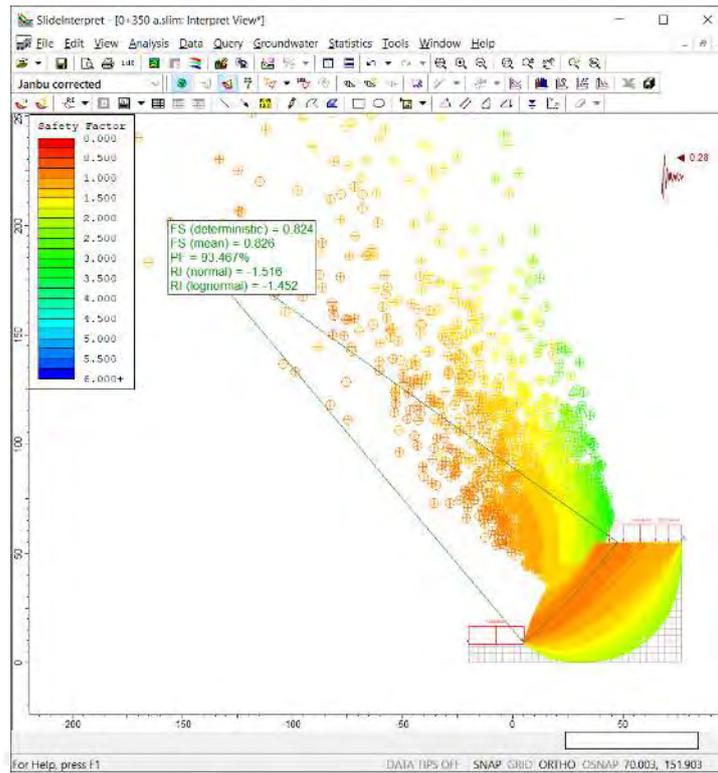


Imagen 65: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

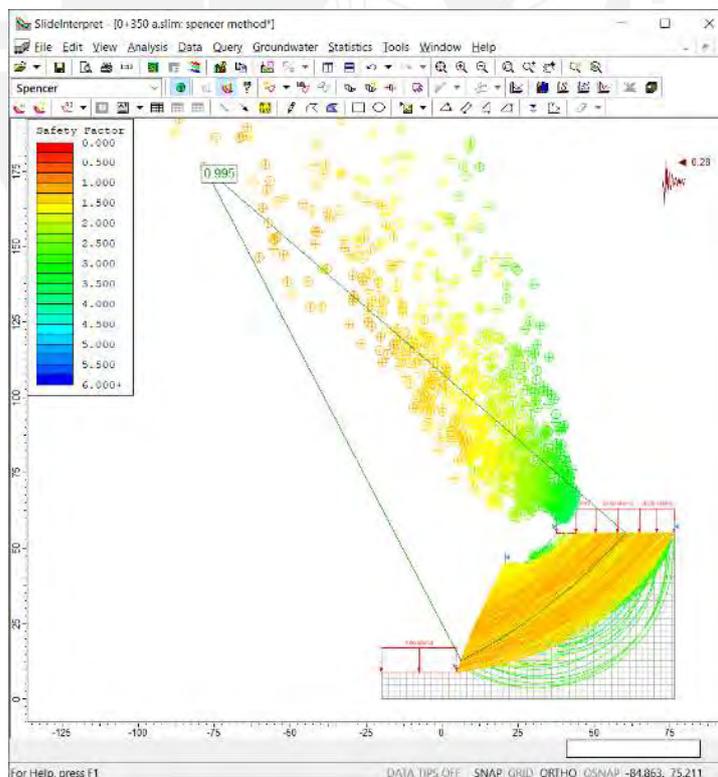


Imagen 66: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

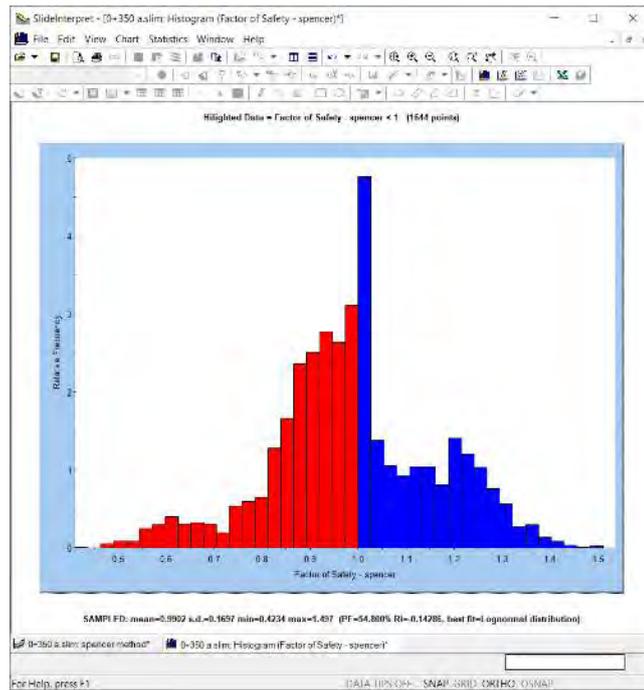


Imagen 67: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

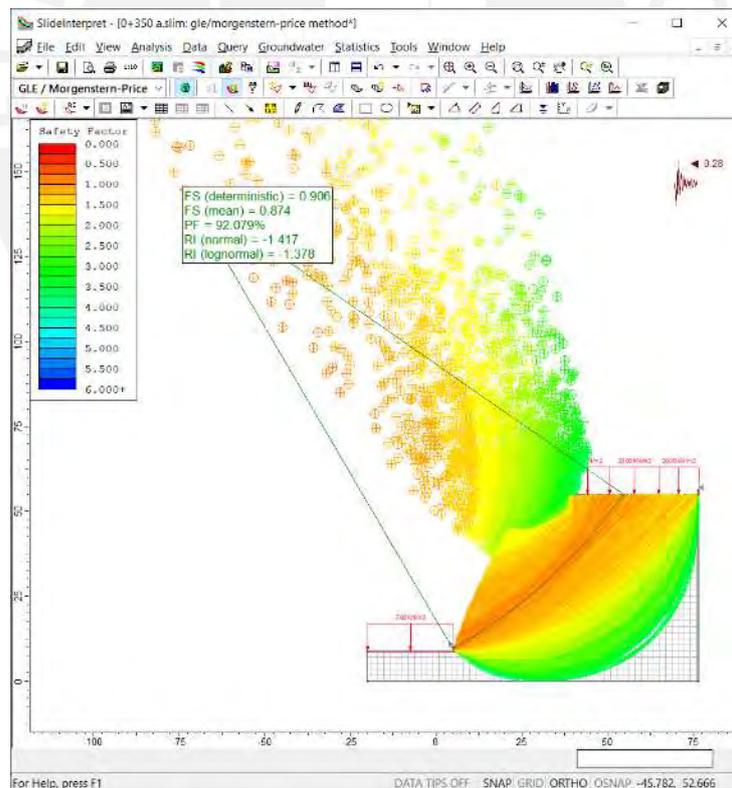


Imagen 68: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

- Perfil 9 (Progresiva 0+400)

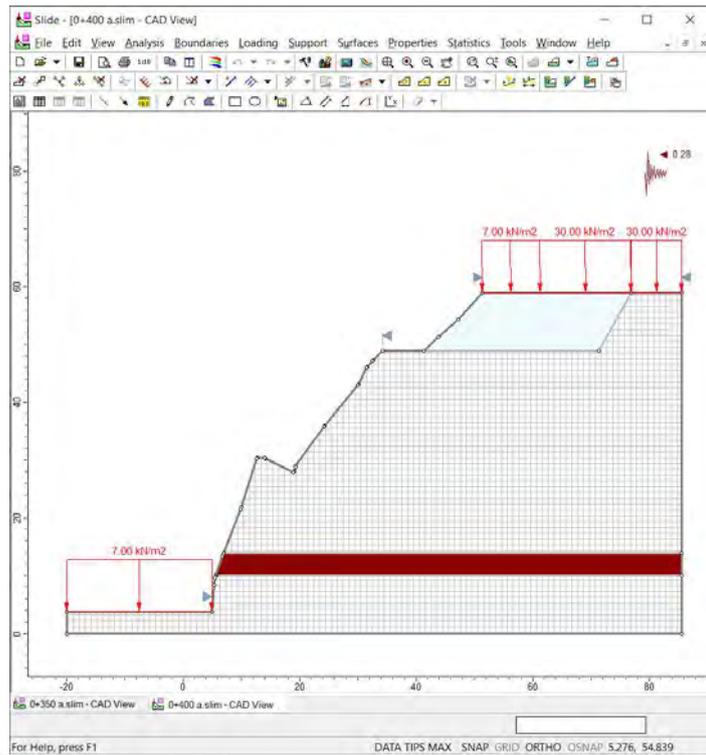


Imagen 69: Modelo de la progresiva 0+400 en Slide.

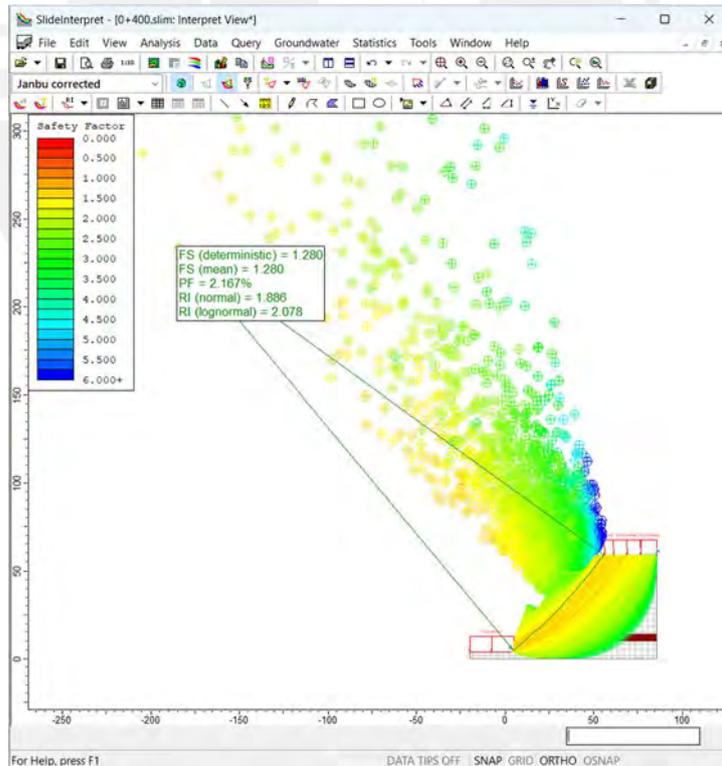


Imagen 70: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

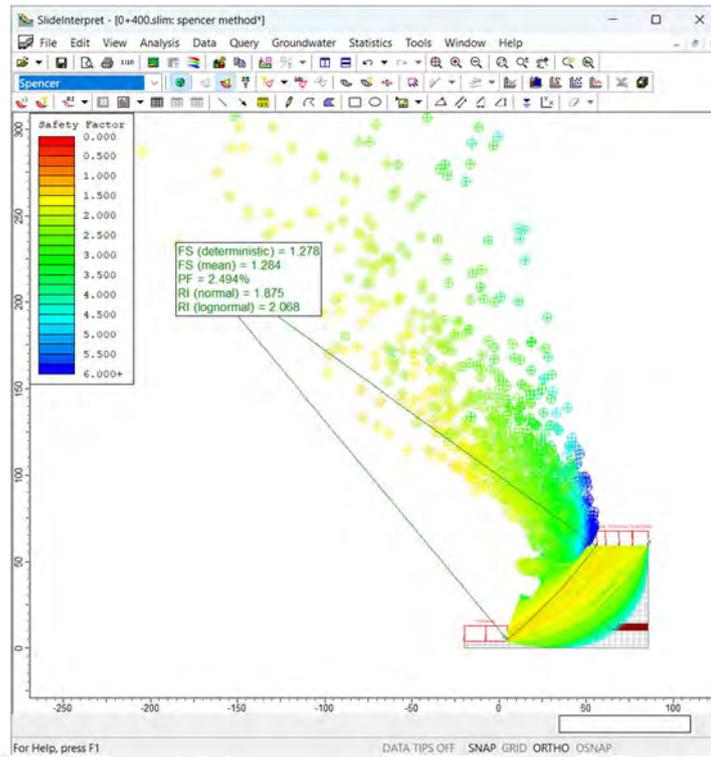


Imagen 71: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

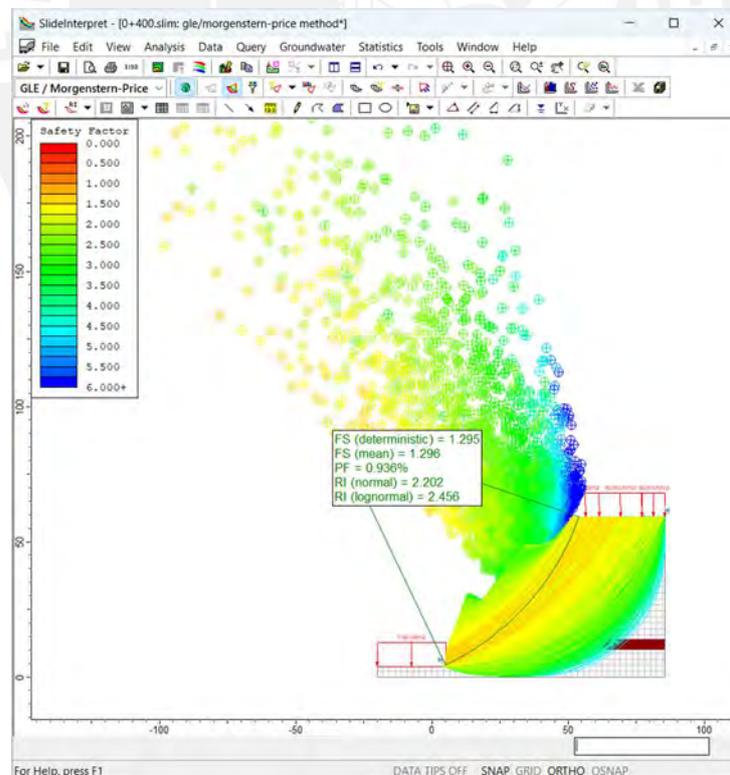


Imagen 72: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

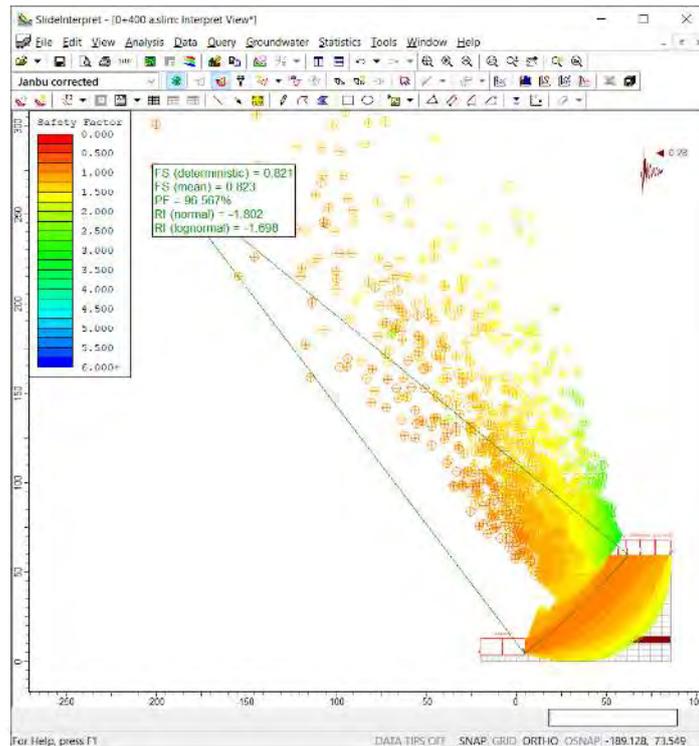


Imagen 73: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

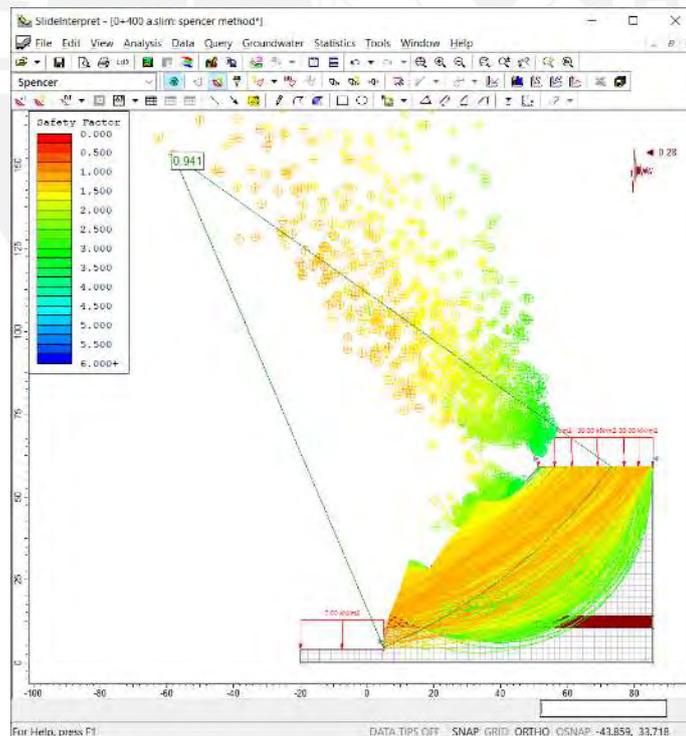


Imagen 74: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

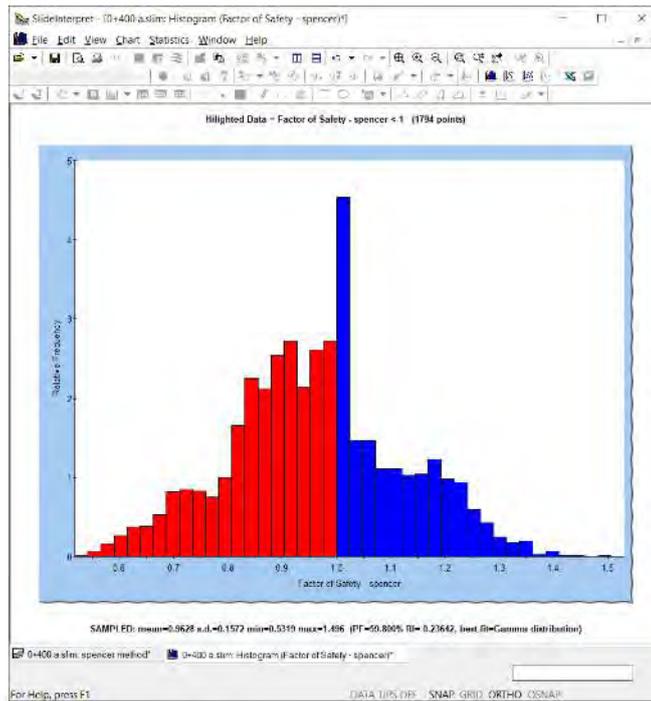


Imagen 75: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

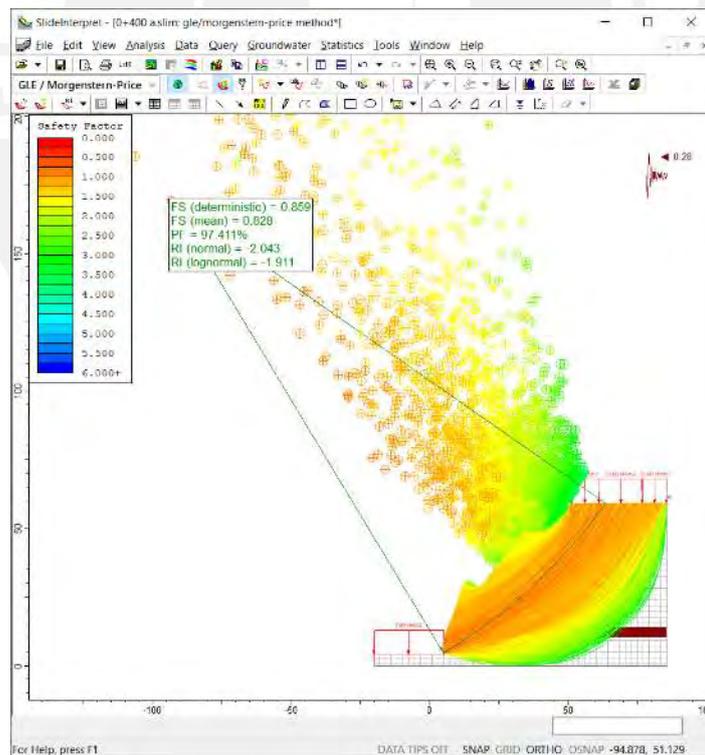


Imagen 76: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

➤ Perfil 10 (Progresiva 0+450)

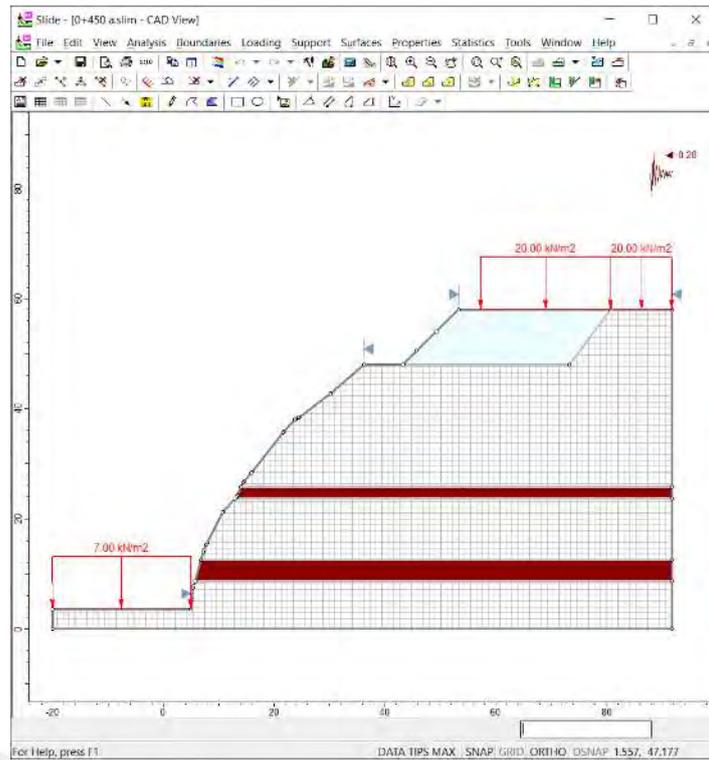


Imagen 77: Modelo de la progresiva 0+450 en Slide.

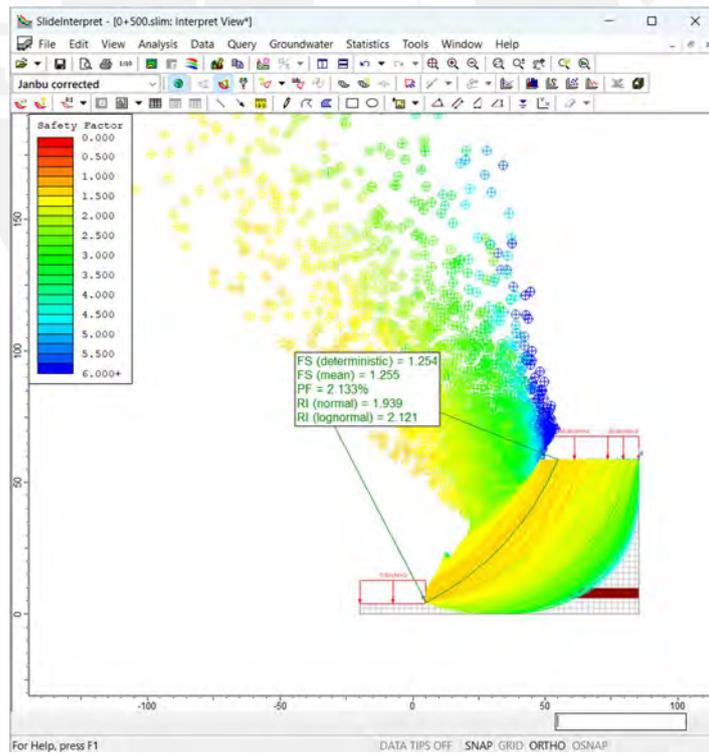


Imagen 78: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

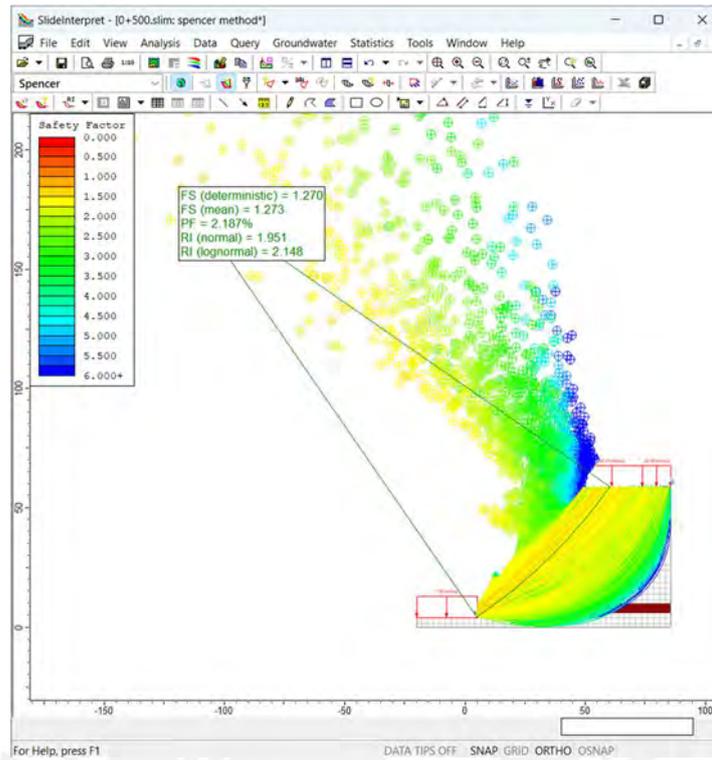


Imagen 79: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

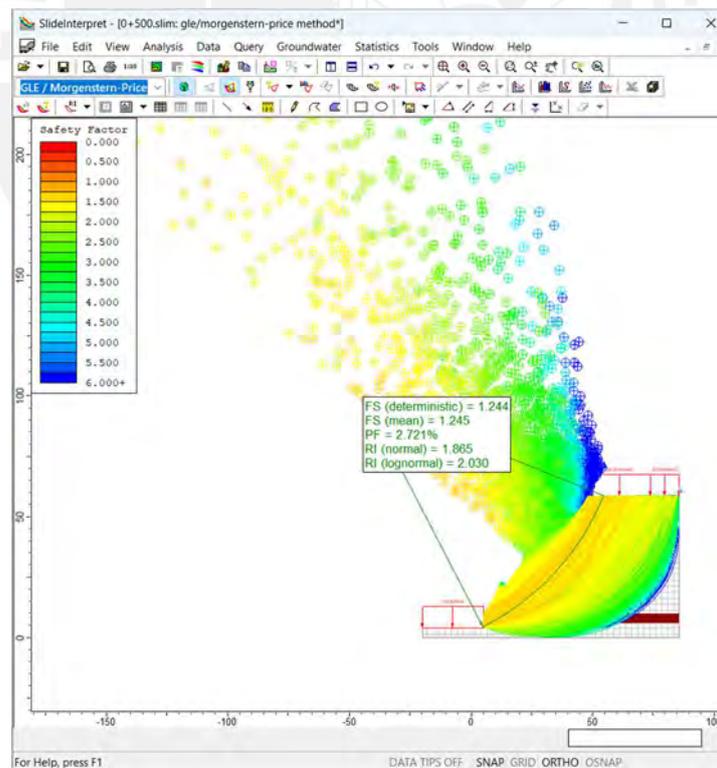


Imagen 80: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

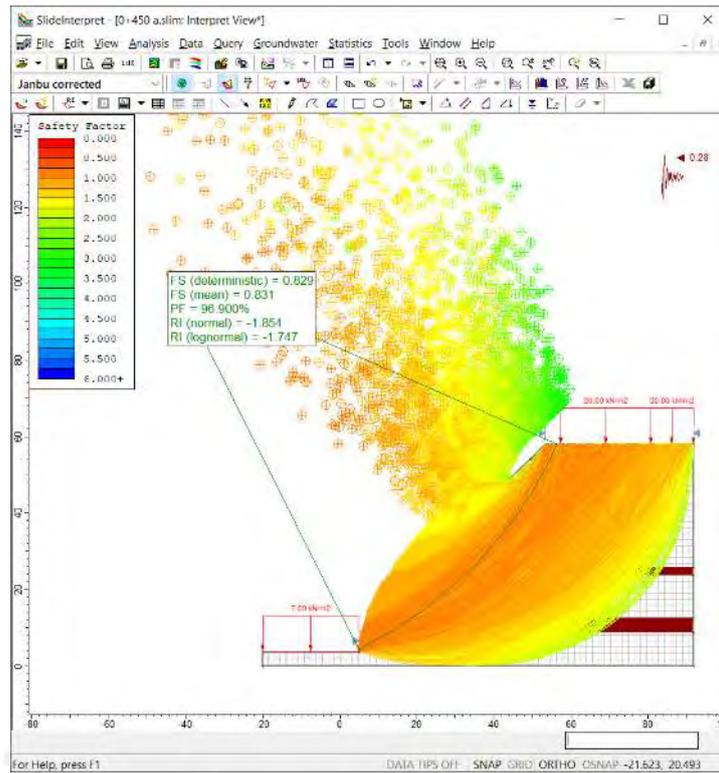


Imagen 81: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

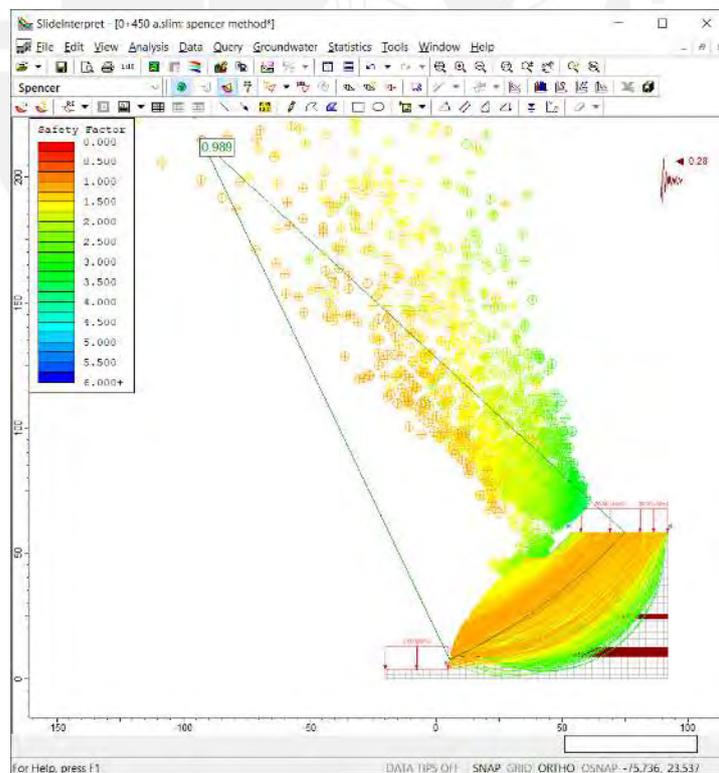


Imagen 82: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

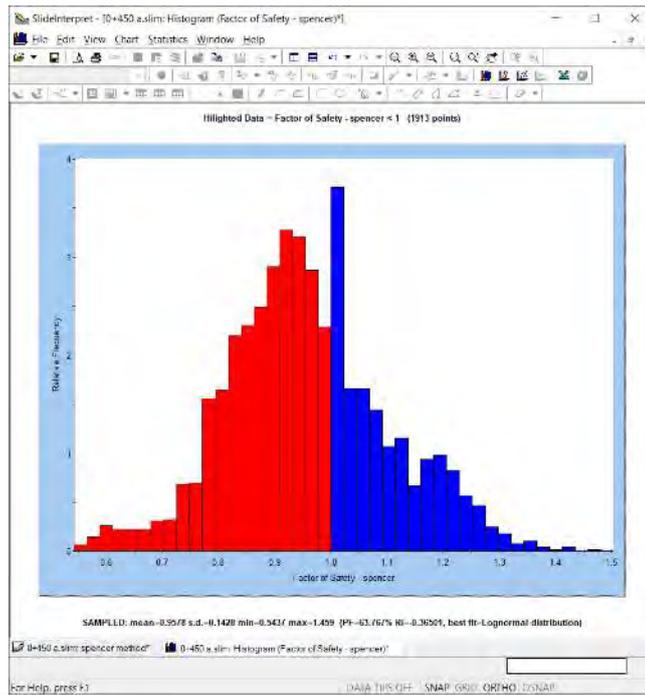


Imagen 83: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

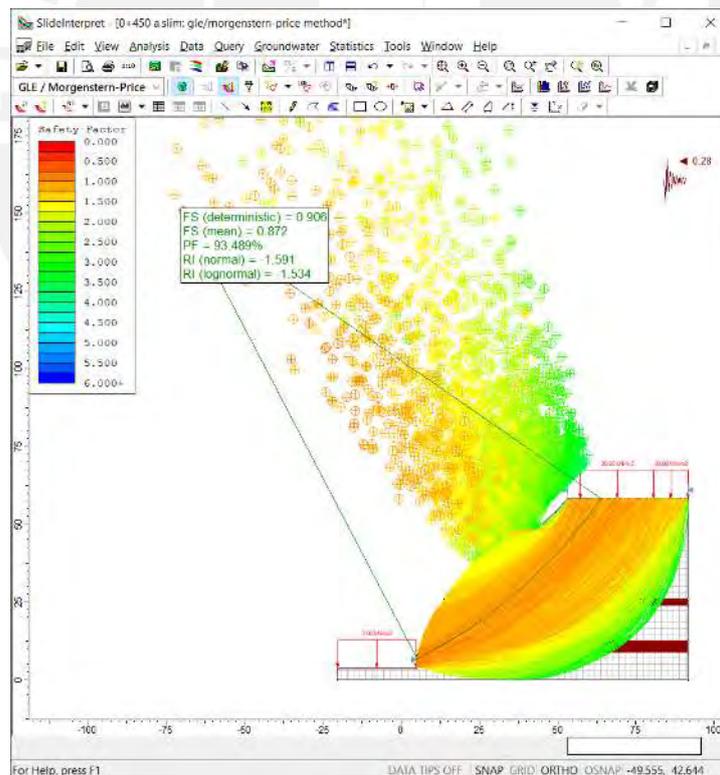


Imagen 84: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

➤ Perfil 11 (Progresiva 0+500)

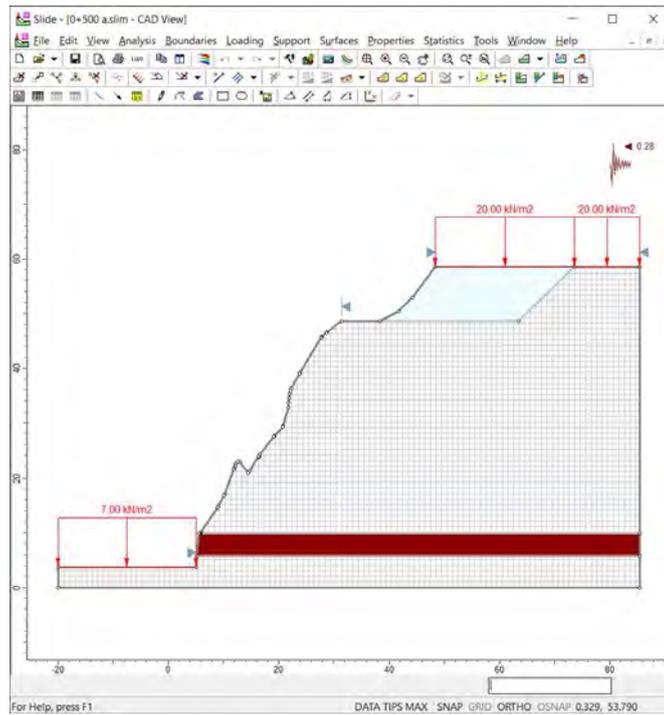


Imagen 85: Modelo de la progresiva 0+500 en Slide.

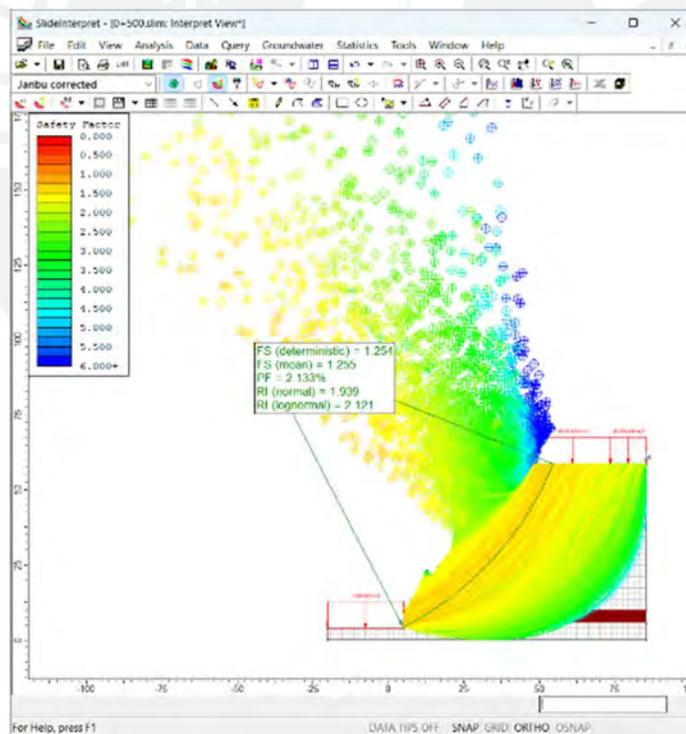


Imagen 86: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones estáticas.

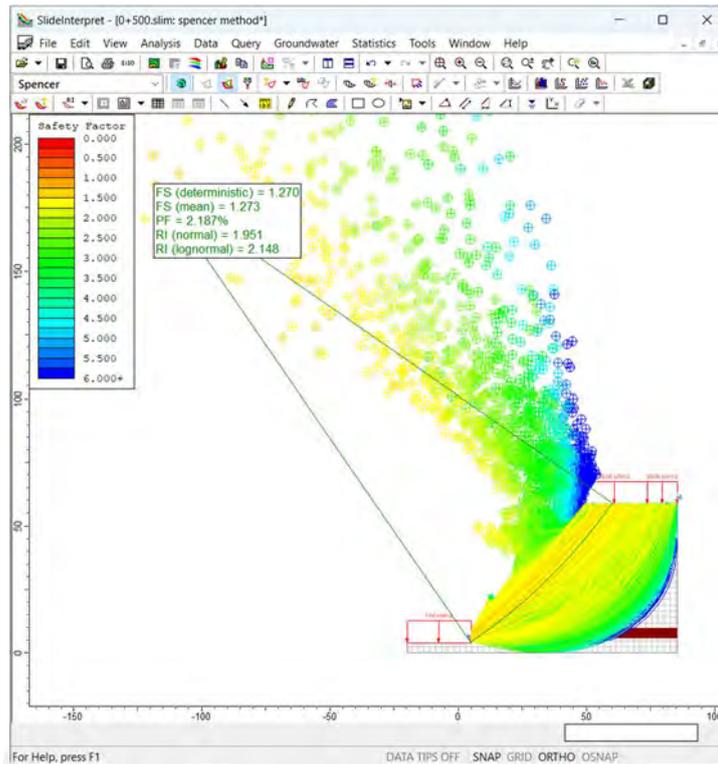


Imagen 87: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones estáticas.

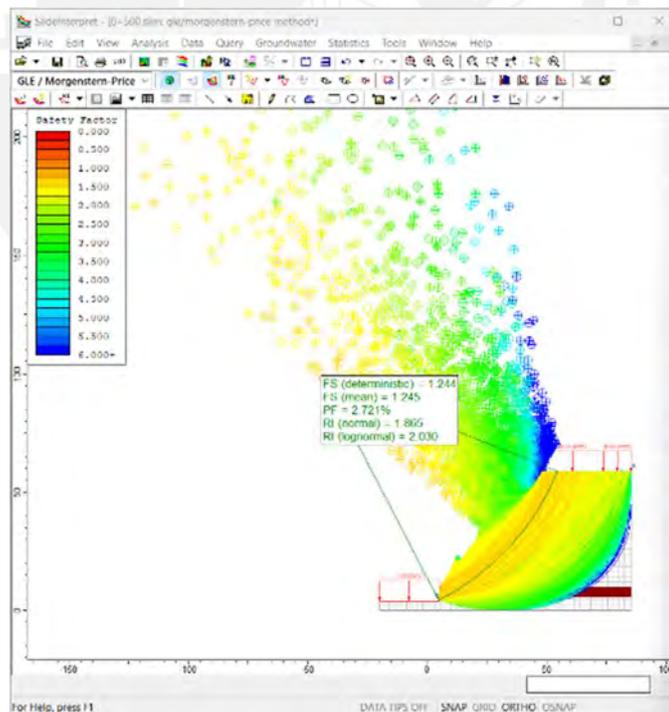


Imagen 88: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones estáticas.

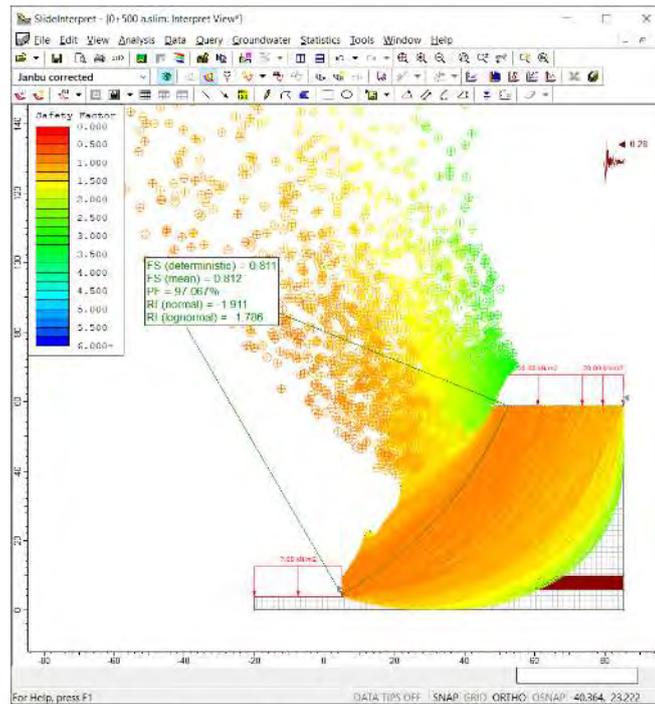


Imagen 89: Análisis determinístico y probabilístico con método de Janbu en condiciones pseudoestáticas.

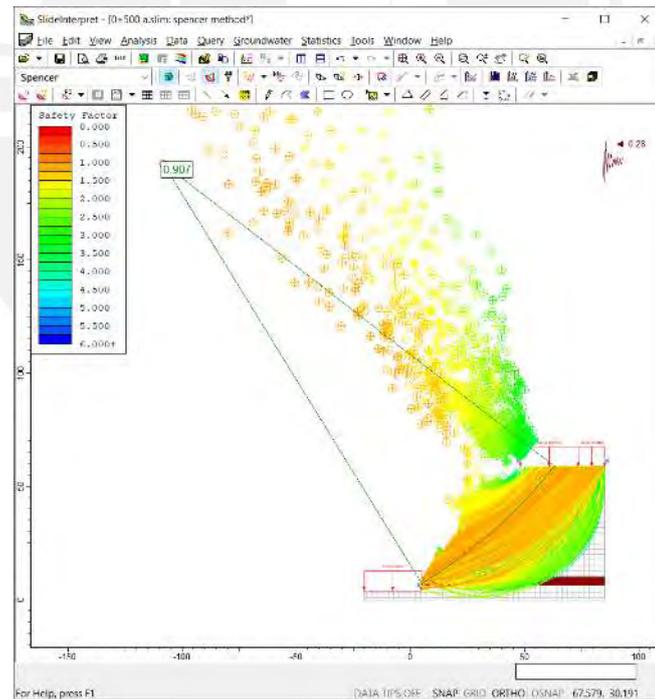


Imagen 90: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

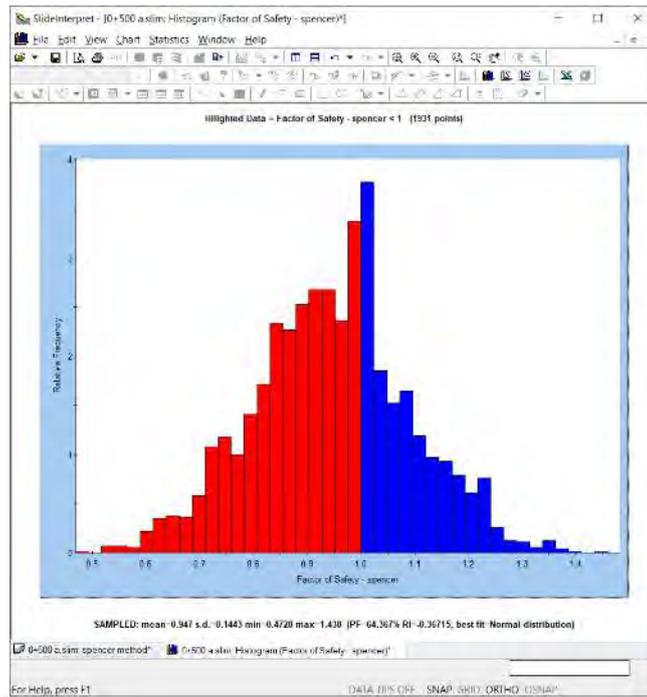


Imagen 91: Análisis determinístico y probabilístico con método de Spencer en condiciones pseudoestáticas.

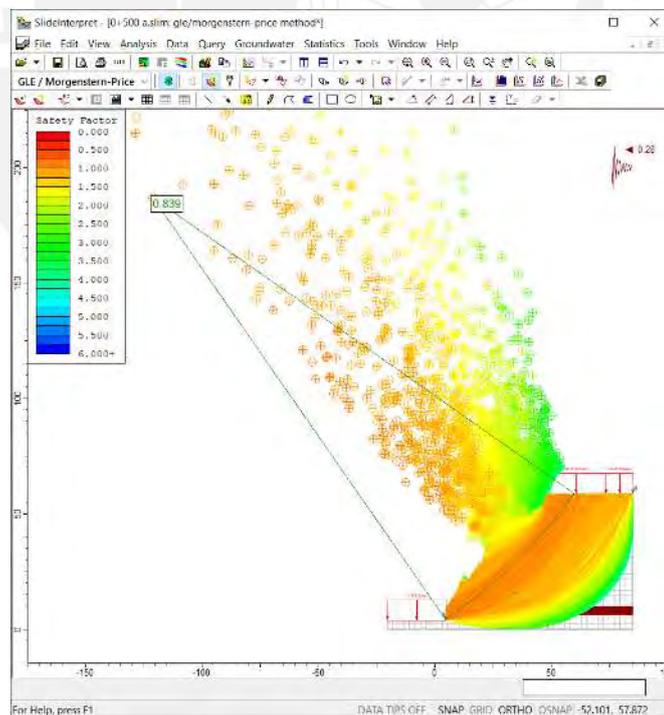


Imagen 92: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

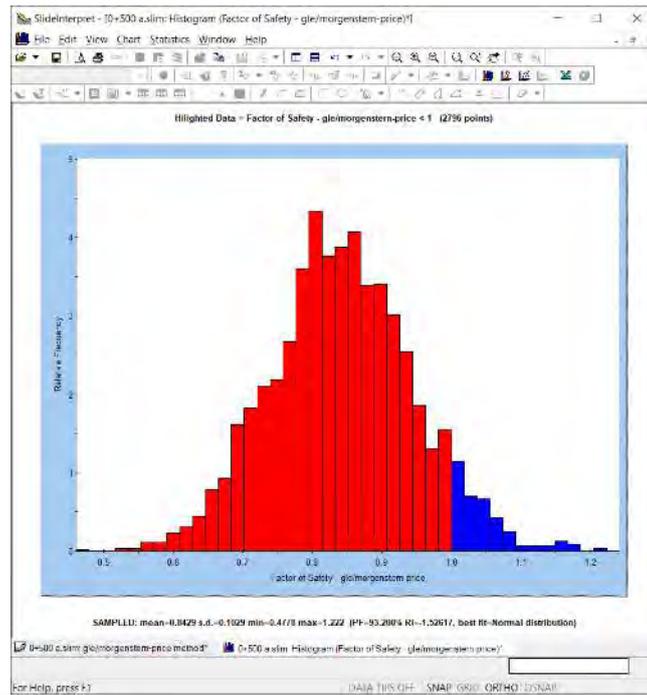
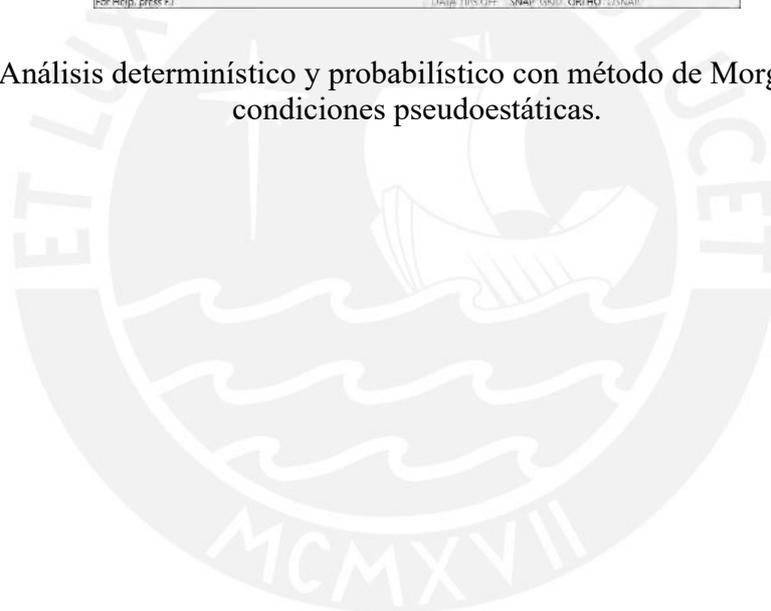
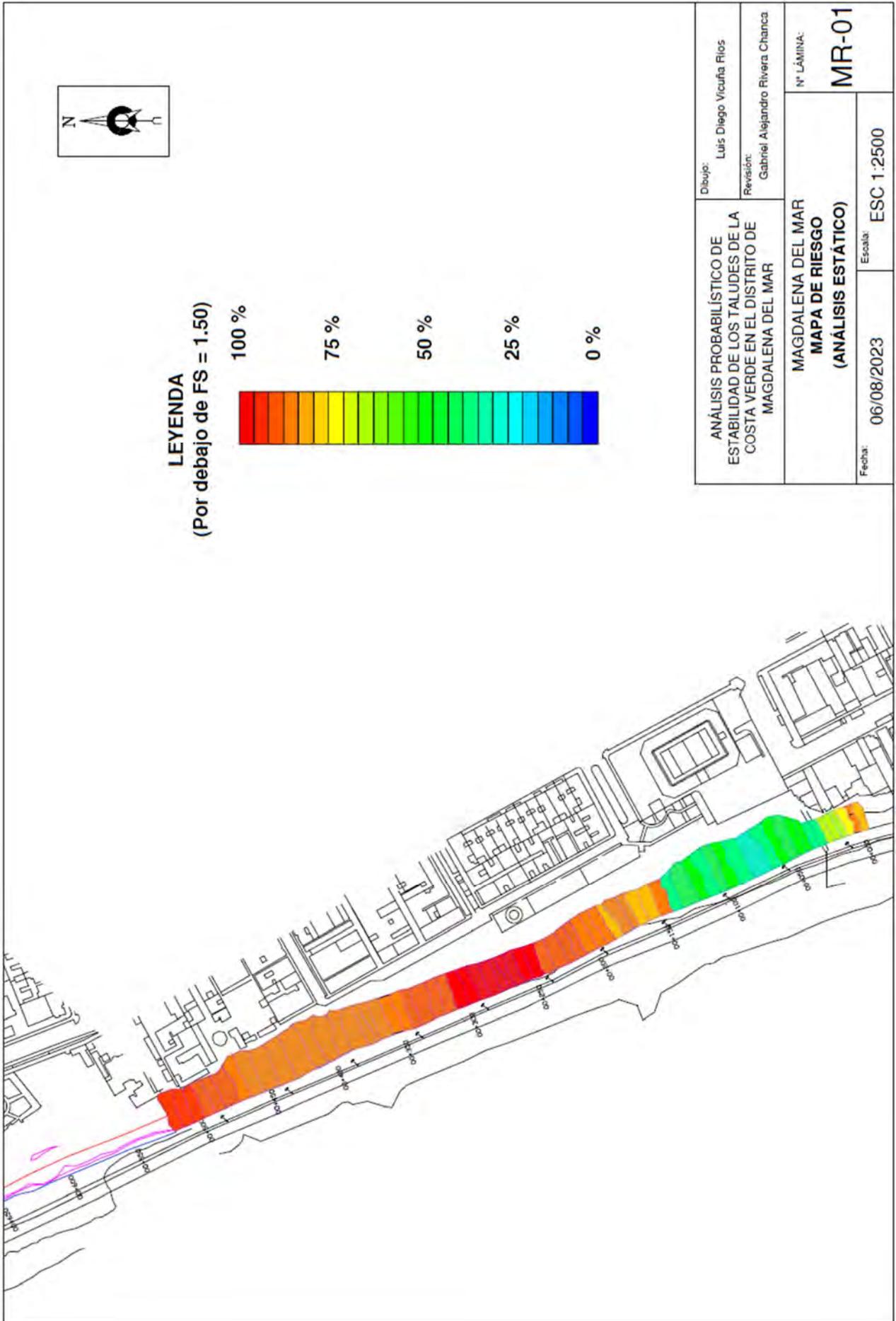


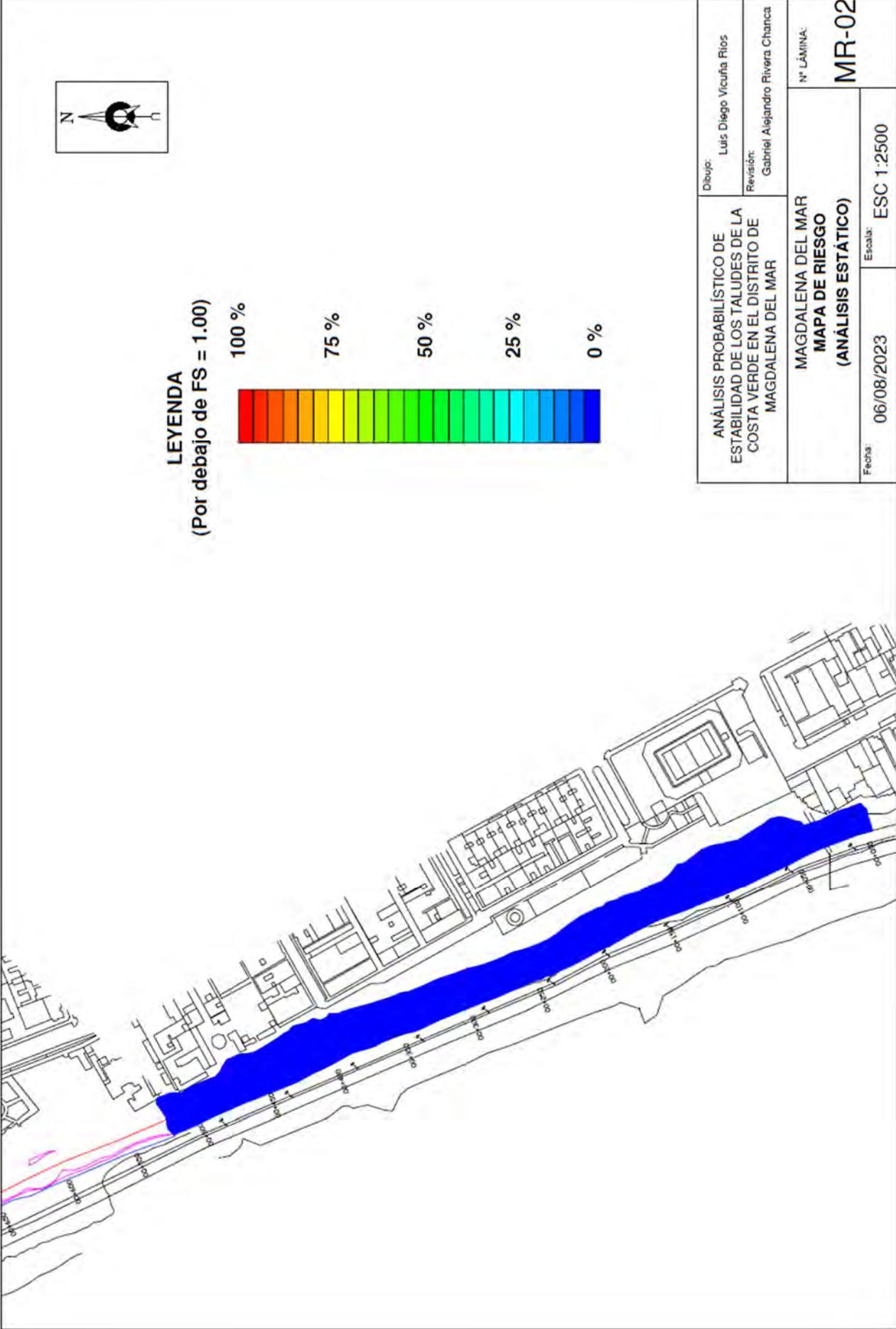
Imagen 93: Análisis determinístico y probabilístico con método de Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

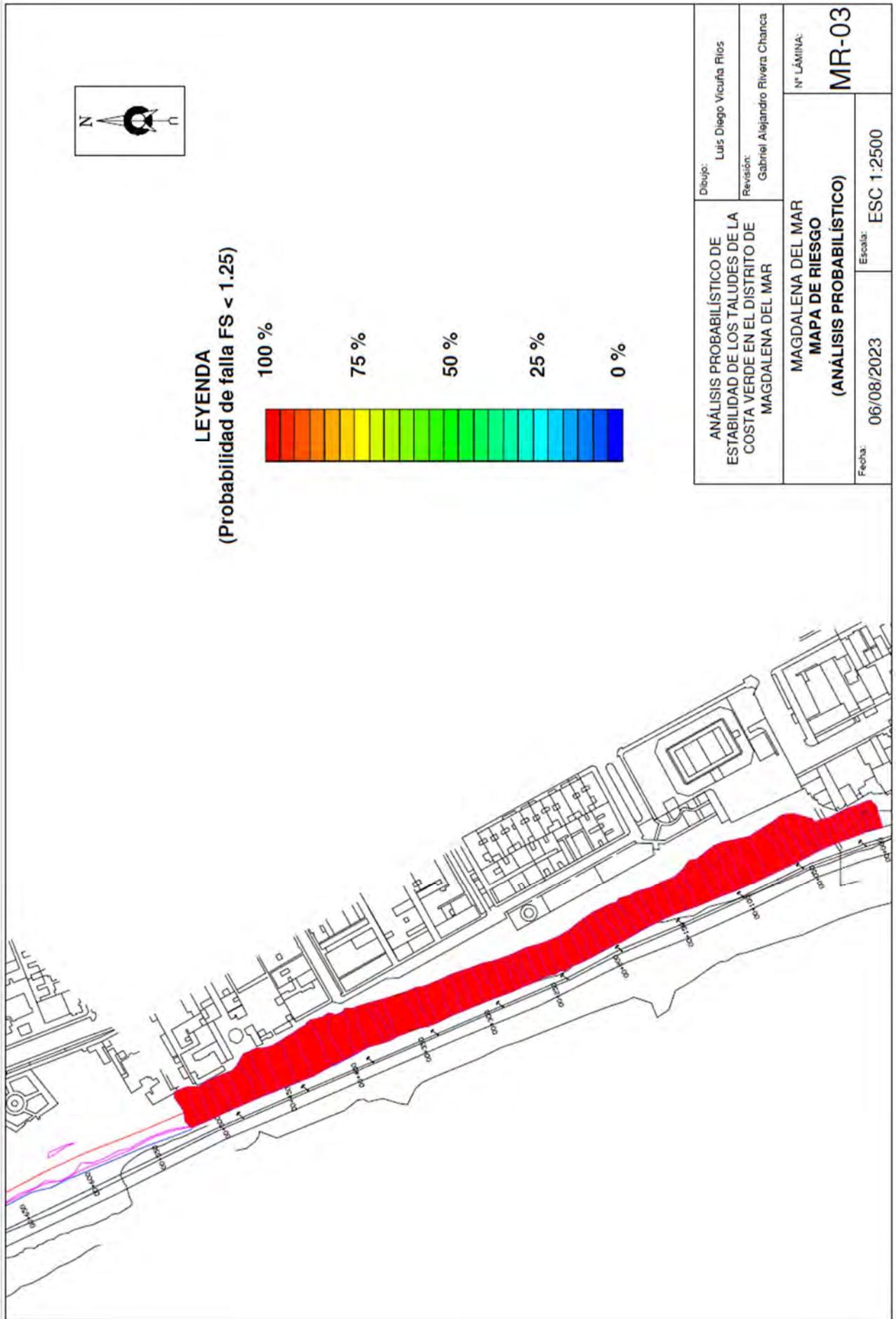


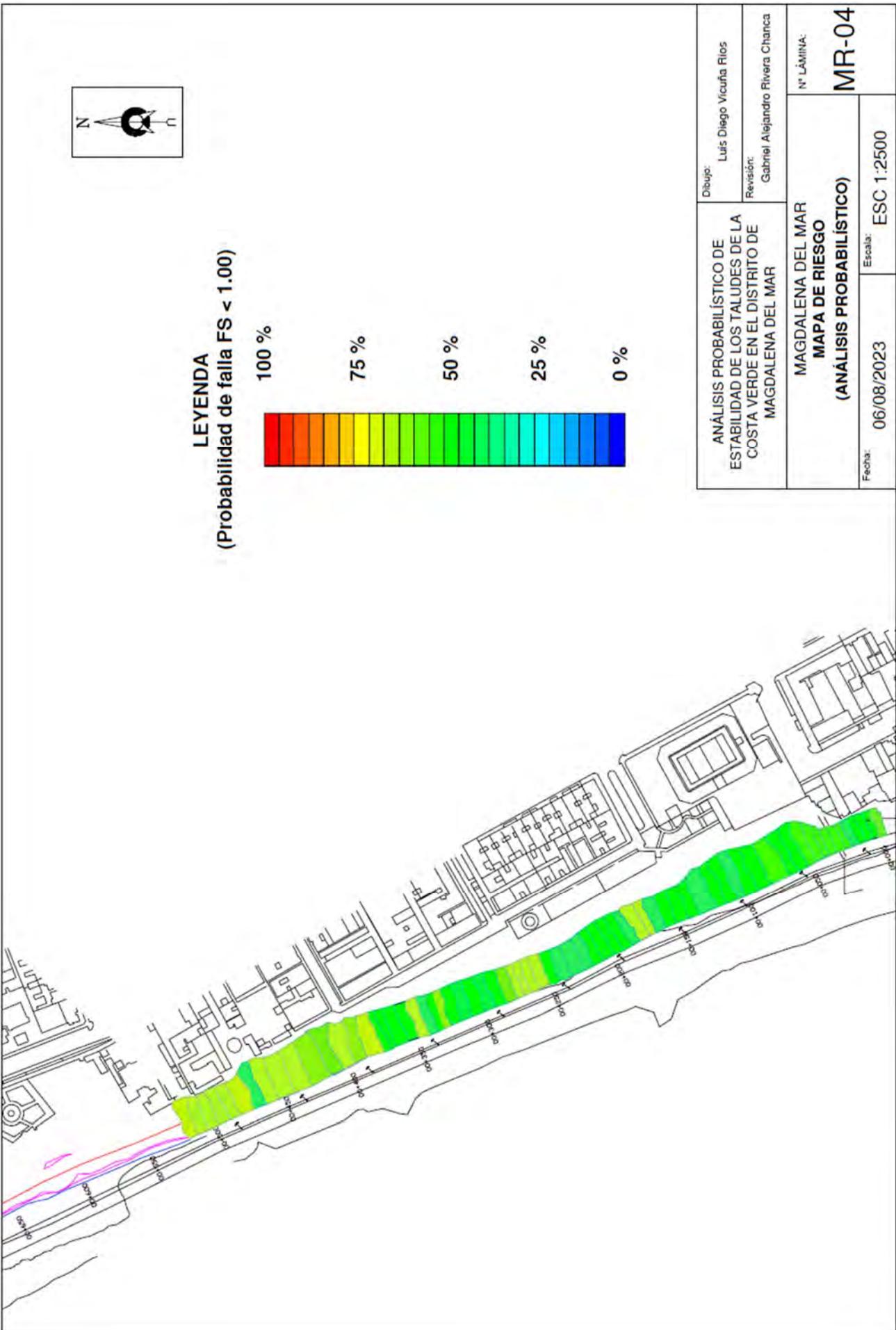
ANEXO B: MAPAS DE RIESGO











Dibujo: Luis Diego Vicuña Ríos Revisión: Gabriel Alejandro Rivera Chanca	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE ESTABILIDAD DE LOS TALUDES DE LA COSTA VERDE EN EL DISTRITO DE MAGDALENA DEL MAR	Nº LÁMINA: MR-04
	MAGDALENA DEL MAR MAPA DE RIESGO (ANÁLISIS PROBABILÍSTICO)	Fecha: 06/08/2023 Escala: ESC 1:2500