



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

Recinto universitario Rubén Darío
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Departamento de Tecnología
Ingeniería Geológica

“EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUD EN EL CERRO LA GAVILANA,
CARRETERA NIC-01, KM 142, DEPARTAMENTO DE ESTELÍ”.

Monografía para optar al Título de Ingeniero Geólogo

Presentado por:

Br. Carlos Alexander Turcios Herrera.

Br. Nelson José Hernández Gómez.

Tutor:

MSc. Gema Velásquez.

Asesor:

MSc. Horacio Ulloa.

Asesora metodológica:

MSc. Karen Acevedo.

Managua, Diciembre del 2021.

Dedicatoria

A **Dios**, por haberme permitido llegar a este punto y acompañarme en cada momento de mi vida, por darme sabiduría, paciencia para ejecutar cada parte de este logro, sin el nada hubiese sido posible.

A mi madre **Eda Ivania Herrera Benavidez**, por ser la mujer que me dio a la vida y ha sido mi pilar en todo momento, velando por mi educación, cuidándome, sobre todo por el amor que me ha dado y el valor mostrado para salir adelante.

A mis tíos **María Antonia Herrera Benavidez** y **Manuel Traña** que siempre estuvieron apoyándome incondicionalmente en mi recorrido universitario, transmitiéndome sus consejos y gran confianza en mí, he podido llegar a ser lo que soy hoy en día.

A mis familiares, en especial a mis abuelos **Víctor Herrera** y **Teresa Benavidez**, cuales me criaron desde pequeño, me aconsejaron e inculcaron buenos valores, para ser una persona de bien.

A mis amistades, en especial a mis amigos y compañeros en la Carrera de Ingeniería Geológica, **Ariel Morales**, **Juan José Mercado Medrano** y **Franklin Palacios**, ya que siempre fueron grandes compañeros y me apoyaron en momentos importantes de mi carrera.

Carlos Turcios Herrera.

Dedicatoria

Dios, mi guía y mi luz, su fidelidad es infinita, Me demostró que por encima de él no hay nadie Llevándome de su mano, sin dejarme desfallecer para culminar con éxito una etapa más. A él Gracias, mil gracias.

A la mujer incansable, a mi abuela **Yelba Carrión**, mujer soñadora, mujer que hace posible lo imposible. Eres mi motivación, el mejor ejemplo de lucha, disciplina y entrega. Hoy soy el hombre que alguna vez soñaste formar.

A mis padres **Vrenda Gómez** y **Nelson Hernández**, por su apoyo constante y permanente, Siempre respaldando todos mis sueños. Gracias por ser modelo para mi vida. A mi familia gracias por estar ahí siempre.

A mi tío **Emerson Larios Carrión**, toda mi gratitud, eres el mejor ejemplo que enseña que en la vida todas las metas se pueden alcanzar con esfuerzo y trabajo. Tu apoyo, tu amistad incondicional Y tus buenos consejos me permitieron tomar sabias decisiones.

Msc. Manuel Traña, por todo su apoyo durante la carrera, por todos los momentos compartidos, por confiar en mí para sacar adelante este proyecto, por dejar de ser compañeros, para convertirse en amigo, gracias por ser el mejor equipo siempre.

A todos mis amigos: **Byron Carrión; Donald Delgadillo; Ariel morales; Juan Mercado; Franklin Palacio** y demás compañeros de carrera por compartir tantos momentos divertidos. Gracias porque cada uno a su manera, aportó algo para que este sueño fuera hoy más real que nunca.

Nelson Hernández Gómez.

Agradecimientos

Agradecemos principalmente a **Dios** por que nos ha dado en primer lugar la vida, la salud y sabiduría para culminar este trabajo.

A nuestros **Padres**, por el amor y apoyo que nos han brindado, a nuestras familias que con sus consejos hemos podido enfrentar los retos que se nos han presentado.

A nuestra Tutora, **Msc. Gema Velásquez** por su apoyo incondicional en todo tiempo. Por sus enseñanzas y sabios consejos.

A la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (**UNAN-Managua**) a la Facultad de Ciencias e Ingeniería, por permitirnos ser parte de su comunidad estudiantil.

Al Instituto de Geología y Geofísica (**IGG-CIGEO/UNAN-Managua**) por darnos la oportunidad de realizar los análisis de laboratorio y brindarnos los recursos, equipos y demás materiales que ayudaron a culminar el documento.

Al **Sr. Francisco Vázquez**, quien nos apoyó en la elaboración y corte de muestras, al **Ing. Omar López**, por su tiempo y disposición para enseñarnos los procesos y métodos a utilizar de nuestro trabajo de laboratorio.

Turcios, C. A. & Hernández, N. J.

Resumen

El presente estudio, tuvo como objetivo principal evaluar la estabilidad de talud en el cerro La Gavilana, carretera Nic-01, km 142, departamento de Estelí. Este tipo de estudio se basó en los métodos de equilibrio límite, calculando el FS, a través de los distintos tipos de levantamiento que se realizaron como: descripción Geológica, Geofísica, Topografía y Geotecnia.

La metodología que se llevó a cabo en esta investigación consistió tres etapas principales; 1) etapa de trabajo de gabinete, donde se logró recopilar la información más relevante de la zona de estudio, 2) etapa de campo; consistió en descripción geológica del área, toma de muestras de suelos y rocas, levantamiento topográfico y levantamiento geofísico, y la 3) etapa de procesamiento de datos y preparación del informe final.

Las condiciones geotécnicas se evaluaron mediante el análisis de los parámetros físico-mecánicos de las muestras recolectadas en campo, estos parámetros fueron obtenidos mediante los análisis realizados en el laboratorio de mecánica de suelos, una vez obtenidos estos datos se empleó el análisis de la inestabilidad de la ladera mediante el Software SLIDE 6.0 que permitió modelar la geometría de la ladera y tener simulaciones de las superficies de deslizamientos así como obtener el Factor Seguridad.

Se procedió a introducir los datos geofísicos y topográficos obtenidos en campo, estos fueron ingresados al programa RES2DINV, que nos permitió modelar el talud en 2D, generando datos y valores de las anomalías y distintas resistividades del subsuelo en el talud.

En conclusión, el área de estudio se encuentra en un margen activo a deslizamientos y derrumbes de rocas, todo esto debido a factores condicionantes como la topografía, meteorización, el fracturamiento de las rocas ligadas a una falla, determinada en la tomografía eléctrica y el factor desencadenante como la precipitación que es el principal factor que genera inestabilidad del talud en el sitio de estudio.

Palabras claves: Estabilidad de talud, Deslizamiento, Geología, Topografía, Geofísica, Geotecnia, Factor de seguridad.

Abstract

The main objective of this study was to evaluate the slope stability in the hill La Gavilana, Nic-01 road, km 142, department of Estelí. This type of study was based on the methods of limit equilibrium, calculating the FS, through the different types of survey that were carried out such as: Geological description, Geophysics, Topography and Geotechnics.

The methodology that was carried out in this research consisted of three main stages; 1) cabinet work stage, where it was possible to collect the most relevant information from the study area, 2) field stage; it consisted of geological description of the area, soil and rock sampling, topographic survey and geophysical survey, and the 3) stage of data processing and preparation of the final report.

The geotechnical conditions were evaluated through the analysis of the physical-mechanical parameters of the samples collected in the field, these parameters were obtained through the analyzes carried out in the soil mechanics laboratory, once these data were obtained, the analysis of the instability of the slope using the SLIDE 6.0 Software that allowed modeling the geometry of the slope and having simulations of the landslide surfaces as well as obtaining the Safety Factor.

We proceeded to introduce the geophysical and topographic data obtained in the field, these were entered into the RES2DINV program, which allowed us to model the slope in 2D, generating data and values of the anomalies and different resistivities of the subsoil on the slope.

In conclusion, the study area is in an active margin to landslides and rock collapses, all this due to conditioning factors such as topography, weathering, fracturing of rocks linked to local failure and the triggering factor such as precipitation that is the main factor that generates slope instability at the study site.

Keywords: Slope stability, Sliding, Geology, Topography, Geophysics, Geotechnics, Safety factor.

ÍNDICE.

CAPÍTULO I	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Localización del área de estudio	6
1.6. Características generales del área de estudio	7
1.6.1. Geología	7
1.6.2. Geomorfología	7
1.6.3. Relieve.....	8
1.6.4. Hidrología	8
1.6.5. Condiciones climáticas y temperaturas	9
CAPÍTULO II	12
2.1. Antecedentes	12
2.2. Marco Teórico.....	13
2.2.1. Marco Geotectónico Regional.....	13
2.2.2. Geología Estructural de Nicaragua	14
2.2.3. Geología Regional y Geomorfología de Nicaragua	17
2.2.4. Provincia geológica central	18
2.2.4.1. Grupo Matagalpa	18
2.2.4.2. Grupo Pre-Matagalpa.....	18
2.2.4.3. Grupo Coyol	19

2.3.	Aspectos generales de inestabilidad de taludes o laderas	19
2.3.1.	Definición de un talud o ladera	19
2.3.2.	Nomenclatura de los procesos de movimiento.....	21
2.3.3.	Etapas en el proceso de falla	24
2.3.4.	Clasificación de los movimientos en masa	24
2.3.5.	Factores que influyen en la inestabilidad de taludes	32
2.3.5.1.	Factores condicionantes	32
2.3.5.2.	Factores desencadenantes	32
2.3.6.	Evaluación de inestabilidad de talud o laderas	33
2.3.6.1.	Equilibrio limite	33
2.3.6.2.	Factor de Seguridad	33
2.3.7.	Sistema de clasificación de suelos.	39
2.3.7.1.	Sistema de clasificación (AASHTO).....	40
2.3.7.2.	Sistemas de clasificación (SUCS).....	40
2.3.8.	Programas informáticos para análisis de inestabilidad de talud.....	42
2.3.8.1.	Programa SLIDE 6.0	42
2.3.8.2.	Programa RES2DINV (Eléctricos y Electromagnéticos)	42
2.3.9.	Fundamentos de los métodos geofísicos a utilizar	43
2.3.9.1.	Prospección eléctrica	43
2.3.9.2.	La resistividad eléctrica	44
2.3.9.3.	Factores que afectan a la resistividad	45
2.3.9.4.	Tipos de dispositivos	46
2.3.9.5.	Tomografía eléctrica	49
2.3.9.6.	Geofísica eléctrica.....	50
2.3.9.7.	Elaboración de secciones geo eléctricas en inestabilidad de talud	51

2.4. Hipótesis	53
CAPÍTULO III.....	54
3.1. Diseño Metodológico.....	54
3.1.1. Enfoque de investigación	54
3.1.2. Tipo de estudio.....	54
3.1.3. Área de estudio.....	54
3.1.4. Universo y muestra	55
3.1.5. Variables y operacionalización de variables	55
3.1.6. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos e información.....	57
3.1.6.1. Trabajo de gabinete.....	57
3.1.6.2. Trabajo de campo.....	57
3.1.7. Procedimientos para la recolección de datos e información	58
3.1.8. Plan de análisis y procesamientos de datos.....	59
CAPITULO IV	61
4.1 Análisis discusión de resultados.	61
4.1.1 Análisis geológico.	61
4.1.1.1. Unidades litológicas del área de estudio.	61
4.1.1.2. Fracturas presentes en el talud.....	71
4.1.2. Factores condicionantes y desencadenantes que favorecen el deslizamiento.	75
4.1.3. Análisis topográfico.	76
4.1.2. Análisis Geotécnico.	80
4.1.2.1. Análisis granulométrico por tamizado.	80
4.1.2.2. Prueba de gravedad específica.....	92
4.1.2.3. Peso específico.....	94
4.1.2.4. Porcentaje de absorción	95

4.1.2.5. Análisis en el software Slide 6.0.....	96
4.1.3. Análisis Geofísico.	109
4.1.3.1. Metodología y trabajo de campo.	109
4.1.3.2. Instrumentación	110
4.1.3.3. Datos de campo y volumen de trabajo.....	111
4.1.3.4. Datos y Procesamiento.....	114
4.1. Discusión de resultados.	122
4.2. Conclusiones.....	125
4.3. Recomendaciones.	127
CAPÍTULO V.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación.....	11
Figura 2. Bosquejo de la configuración tectónica regional de Centroamérica.	16
Figura 3. Provincias geológicas de Nicaragua.	17
Figura 4. Nomenclatura de taludes y laderas, redibujado.	20
Figura 5. Nomenclatura en un deslizamiento, redibujado.....	
Figura 6. Dimensiones de un deslizamiento, redibujado.....	23
Figura 7. Algunos mecanismos de falla: caídas de rocas, redibujado.	
Figura 8. Volteo o inclinación en materiales residuales, tomado y redibujado del libro de deslizamientos.....	
Figura 9. Deslizamientos en suelos blandos, tomado y redibujado del libro de deslizamientos.....	
Figura 10. Deslizamiento rotacional típico, redibujado.....	28
Figura 11. Deslizamiento de translación, redibujado.	28
Figura 12. Flujos de diferentes velocidades, redibujado.....	
Figura 13. Avalancha en cauce de río por acumulación de materiales producto de una gran cantidad de deslizamientos ocurridos en el momento de un sismo, redibujado.....	
Figura 14. Ciclo Hidrológico.....	32
Figura 15. Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas.	
Figura 16. Dispositivos geoeléctricos: A) Wenner; B) Schlumberger; C) polo-polo; D) Dipolo-dipolo. Redibujado.	
Figura 17. Ejemplo de un Modelo de Resistividad Eléctrica en taludes.	52
Figura 18. Columna estratigráfica donde se presentan los diferentes estratos que comprende el talud.	70
Figura 19. Mapa geológico de Estelí.....	74
Figura 20. Diagrama de Roseta, presenta el máximo esfuerzo de todas las fracturas tomadas en el talud La Gavilana.	75
Figura 21. Ubicación de los perfiles geofísicos y topográficos en el talud La Gavilana.....	
Figura 22. Mapa topográfico del talud La Gavilana.....	
Figura 23. Curva granulométrica de la muestra de Código: TGV1_210921.....	86
Figura 24. Curva granulométrica de la muestra de Código: TGV2_210921.....	88

Figura 25. Curva granulométrica de la muestra de Código: TGV3_210921.....	90
Figura 26. Curva granulométrica de la muestra de Código: TGV4_210921.....	92
Figura 27. Mapa de ubicación de las secciones a analizar en el software slide 6.0.....	
Figura 28. Modelo del Cerro La Gavilana 2D, obtenido a partir del levantamiento topográfico en el perfil-1 de tomografía eléctrica.....	
Figura 29. Análisis del modelamiento, utilizando el método de Bishop simplificado.	100
Figura 30. Análisis del modelamiento, utilizando el método de Jambu Simplificado.	101
Figura 31. Análisis del modelamiento, utilizando el método de Spencer.	102
Figura 32. Análisis del modelamiento, utilizando el método de Fellenius.	103
Figura 33. Remodelado del talud cerro la Gavilana.	
Figura 34. Remodelado, calculando el FS por el método de Bishop simplificado.....	
Figura 35. Remodelamiento del talud la Gavilana, Análisis por el método de Jambú simplificado.....	
Figura 36. Remodelado del talud La Gavilana, Calculo del factor de seguridad por el método de Spencer.	
Figura 37. Remodelado del talud La Gavilana, Calculo del FS por el método de las dovelas de Fellenius.....	
Figura 38. Dispositivo Polo-Dipolo donde A y B son los electrodos de corriente, M y N los de potencial.....	109
Figura 39. Ingreso de las posiciones de electrodos de potenciales en la geometría del talud a estudiar.	
Figura 40. Esta figura muestra las medidas correspondientes entre los electrodos.	
Figura 41. Muestra el proceso para cargar los datos obtenidos en campo.	115
Figura 42. Inversiones de los datos del perfil 1.....	116
Figura 43. Sección Geoeléctrica del talud La Gavilana Perfil-1, con la topografía.	
Figura 44. Sección geoeléctrica del talud La Gavilana Perfil 2, con la topografía del terreno.	120

ÍNDICE DE FOTOS.

Foto 1. Litología del talud. Coordenadas UTM-WGS84: E572883-N1443302.-----	62
Foto 2. Deslizamiento superficial de detritos. Coordenadas-E572883-N1443302.-----	63
Foto 3. Deposito Coluvial (Qc), Coordenadas E572870-N1443210.-----	64
Foto 4. Vista general del escarpe principal y secundario del talud del área de estudio, Coordenadas E572810-N1443137.-----	65
Foto 5. Vista general de escarpes secundarios del talud principal, donde A: se presenta el cambio de la litología con sus clasificaciones correspondientes, B: Vista previa del aglomerado andesítico de color rojizo presenta oxidación moderada con alta grado de intemperismo, C: vista previa de los fragmentos angulosos de roca andesítica de textura porfírica y matriz meteorizada, Coordenadas (E572825-N1443138).-----	66
Foto 6. Vista general de zonas de debilidades, donde A: Se presenta un contacto subhorizontal de estrato de aglomerado andesítico Coordenadas E573292-N1442649. B y C: vista previa de fracturas en rocas andesíticas interperizadas, Coordenadas E573280-N1442702.-----	67
Foto 7. Bolones de roca andesítica, depositada en la parte inferior del talud principal, con coordenadas E572803-N1443270.-----	68
Foto 8. Vista previa de un tercer escarpe del talud principal, se observan bolones de rocas andesíticas con diámetro de 2 hasta 5 mts, estos han sido arrastrados mediante corrientillas de agua y acción de la gravedad, coordenadas E572803-N1443270.-----	69
Foto 9. Parte superior del talud principal, donde presenta A: Vista previa de zonas de fracturamientos, B: Vista previa de fracturas paralelas verticales, Coordenadas E572830-N144356.-----	71
Foto 10. Fracturamiento en afloramiento andesítico de la parte superior del talud, donde A: Vista general de la parte NE, B: Vista previa con datos de fracturas conjugadas, Coordenadas E572886-N144306.-----	72
Foto 11. A: Vista general de una grieta transversal que atraviesa el depósito de aglomerado andesítico (Tmca), B: vista previa de la contracuneta fracturada posiblemente generada por el empuje que está superando el límite de resistencia del material, C: coordenadas E572870-N1443210.-----	73

Foto 12. En el talud La Gavilana, la topografía se realizó por una estación de GPS de alta precisión. -----	77
Foto 13. A: Lavado de muestra en el tamiz No. 200, esta se lava para quitar todo el material arcilloso, B: Luego del lavado se obtiene las muestras húmedas y esta se vuelve a colocar al horno por 24 horas, tomando su peso húmedo respectivamente para cada muestra.-----	81
Foto 14. A: Muestras preparadas, obtenidas en el área de estudio. B: Se colocaron las cuatro muestras a secar en un horno a más de 110 ± 5 grados centígrados, estas muestras se secaron durante 24 horas. -----	81
Foto 15. A: Se coloca la serie de tamices en un equipo mecánico llamado Rota-Sift. B: Serie de tamices que se utilizó en el ensayo, desde la serie 3/4 in hasta 200 in.-----	82
Foto 16. A: Se pesa las muestras retenidas en cada tamiz, B; C; D; E: Cada muestra pesada se coloca de nuevo en la tara correspondiente, y se ve de esa forma, separado el suelo.--	83
Foto 17. Equipo de medición, A: Geps 2000, B: Electrodo de acero, C: Garruchas de 100 a 300 metros de cable. -----	111
Foto 18. A: Momento exacto de las mediciones eléctricas del talud, B: Muestra la operación de clavar electrodos de corriente a cierta distancia, C: esta foto muestra las medidas en metros entre electrodos de potenciales. -----	112
Foto 19. Vista general del muro de contención ubicado en el talud La Gavilana. -----	117
Foto 20. Vista previa del muro de contención ubicado en el talud La Gavilana. -----	117
Foto 21. Medidas con cinta del ancho del gavión o contracuneta del talud.-----	121
Foto 22. Vista previa de los gaviones o contracunetas del talud.-----	121

ÍNDICE DE TABLA.

Tabla 1. <i>Coordenadas UTM del área de estudio.</i>	6
Tabla 2. <i>Tabla climática del departamento de Estelí.</i>	9
Tabla 3. <i>Métodos de equilibrio límite más utilizados.</i>	35
Tabla 4. <i>Ejemplo de resistividades verdaderas en distintos materiales.</i>	44
Tabla 5. <i>Definición y operacionalización de variables.</i>	56
Tabla 6. <i>Análisis granulométrico de la muestra de Código: TGV1_210921.</i>	85
Tabla 7. <i>Análisis granulométrico de la muestra de Código: TGV2_210921.</i>	87
Tabla 8. <i>Análisis granulométrico de la muestra de Código: TGV3_210921.</i>	89
Tabla 9. <i>Análisis granulométrico de la muestra de Código: TGV4_210921.</i>	91
Tabla 10. <i>Resultados del cálculo de gravedad específica (ASTM D-854, AASHTO T-100, 2006).</i>	93
Tabla 11. <i>Resultados del cálculo del peso específico de cada una de las muestras recolectadas en el área de estudio.</i>	95
Tabla 12. <i>Resultados del cálculo de porcentaje de absorción.</i>	96
Tabla 13. <i>Resultados del cálculo de cada uno de los parámetros necesarios para el análisis de ladera en el software Slide 6.0.</i>	96
Tabla 14. <i>Litología de acuerdo a las secciones de tomografía eléctrica ERT.</i>	98

ÍNDICE DE ANEXO.

<i>Anexo 1. Valores de resistividad eléctrica de diferentes rocas y minerales, redibujado. .</i>	<i>134</i>
<i>Anexo 2. Se muestra lo siguiente: A) se observa las muestras de 30 gramos aproximadamente cortadas, B) Pesa, donde se está calculando el agua destilada con una muestra de suelo, C) Momento exacto donde se utiliza el equipo martillo de rebote para medir la resistencia de la roca.</i>	<i>134</i>
<i>Anexo 3. Esta tabla muestra las coordenadas de cada una de las muestras tomadas en el talud a estudiar.</i>	<i>135</i>
<i>Anexo 4. Datos de fracturamiento que se realizaron en el área de estudio.</i>	<i>135</i>
<i>Anexo 5. Análisis de una de las dovelas del método de Fellenius Perfil-1.....</i>	<i>136</i>
<i>Anexo 6. Análisis de una de las dovelas del método de Fellenius Perfil-1.....</i>	<i>136</i>
<i>Anexo 7. Se muestra una tabla de los datos obtenidos de la dovela del método de Fellenius.</i>	<i>137</i>
<i>Anexo 8. Modelamiento del perfil-2, calculando el factor de seguridad por el método Bishop simplificado.....</i>	<i>138</i>
<i>Anexo 9. Modelamiento del perfil-2, calculando el factor de seguridad por el método Janbu simplificado.....</i>	<i>138</i>
<i>Anexo 10. Modelamiento del perfil-2, calculando el factor de seguridad por el método de Spencer.....</i>	<i>139</i>
<i>Anexo 11. Modelamiento del perfil-2, calculando el factor de seguridad por el método de dovelas de Fellenius.....</i>	<i>139</i>
<i>Anexo 12. Modelamiento del perfil-3, calculando el factor de seguridad por el método Bishop simplificado.....</i>	<i>140</i>
<i>Anexo 13. Modelamiento del perfil-3, calculando el factor de seguridad por el método Jambu simplificado.....</i>	<i>140</i>
<i>Anexo 14. Modelamiento del perfil-3, calculando el factor de seguridad por el método Spencer.....</i>	<i>141</i>
<i>Anexo 15. Modelamiento del perfil-3, calculando el factor de seguridad por el método dovelas de Fellenius.....</i>	<i>141</i>

<i>Anexo 16. Modelamiento del perfil-4, calculando el factor de seguridad por el método de Bishop simplificado.....</i>	<i>142</i>
<i>Anexo 17. Modelamiento del perfil-4, calculando el factor de seguridad por el método de Janbu simplificado.....</i>	<i>142</i>
<i>Anexo 18. Modelamiento del perfil-4, calculando el factor de seguridad por el método de Spencer.....</i>	<i>143</i>
<i>Anexo 19. Modelamiento del perfil-4, calculando el factor de seguridad por el método dovelas de Fellenius.....</i>	<i>143</i>

CAPÍTULO I

1.1. Introducción

Los procesos de movimiento de masa están ligados al movimiento de materiales que definidos desde un punto de vista geomorfológico de acuerdo con (Alcántara, 2000). En la zona de estudio estos fenómenos involucran el movimiento de material formador de taludes por influencia de gravedad, sin la asistencia de algún agente de transporte fluido (conociéndose también como procesos gravitacionales). Además, Mediante diferentes mecanismos involucrados incluyen deslizamientos, expansiones laterales, vuelcos, flujos y movimientos complejos. Todos estos movimientos se dan comúnmente por agentes naturales (precipitaciones, sismos, topografía) y agentes antrópicos (cortes y excavaciones).

La importancia de estudios de procesos de taludes está determinada por el impacto que estos pueden generar en la población, ya que la inestabilidad de esta puede ser producida por la actividad humana (deforestación y explotación inadecuada de los suelos) siendo alterada y modificando el equilibrio que existente en el medio ambiente, sin embargo, un gran porcentaje de pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se implementan medidas de prevención o control (Suárez Díaz, 1998).

Por lo tanto, definimos que Nicaragua es un país de alta vulnerabilidad a desastres naturales tales como huracanes, inundaciones, y sismicidad. Así mismo el talud a estudiar puede generar pérdidas humanas y materiales. El proceso de inestabilidad del talud La Gavilana es originado por varias causas, lo cual son fuertes precipitaciones, alto grado de deforestación y frecuentes sismos, en las carreteras y lugares poblados del país, los deslizamientos y derrumbe de materiales son de gran incidencia y peligrosidad.

La elección del sitio es debido a la vulnerabilidad media y alta amenaza que presenta, éste se tomó a partir del estudio de sitios críticos y vulnerables en diferentes tramos principales del país de Nicaragua, elaborado por (JICA, 1998) y actualizado en el 2014 por el Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI), para generar información actualizada en el desarrollo de programas relacionados a la prevención y mitigación a sitios vulnerables.

El estudio se enfoca en evaluar la estabilidad de talud en un sector del cerro La Gavilana km 142, departamento de Estelí, esta área se localiza en la parte Sur del municipio de Estelí. El sitio fue considerado debido a posible fallamiento geológico, topografía irregular y fuertes precipitaciones que generan una elevada saturación de agua y material en la zona.

Los análisis se elaboraron mediante 3 variantes, lo cual parte de una caracterización geológica, métodos geotécnicos y geofísicos, se ejecutaron ensayos en laboratorio para determinar las propiedades y comportamiento mecánico del suelo, también se realizó perfiles geoelectrónicos aplicando el método de tomografía eléctrica (ERT), que permitió obtener la distribución de las resistividades eléctricas del subsuelo, morfología, espesores de capas y profundidad del talud.

Esta investigación se desarrolló de la siguiente manera:

Capítulo I y Capítulo II: Trabajo de gabinete, se inició con la recopilación de toda información posible que aportara al estudio; Capítulo III y Capítulo IV: etapa de (campo), en esta parte se realizó un reconocimiento y levantamiento geológico, Geofísico, Topografía y se realizó un muestreo de suelo y rocas, obteniendo parámetros físico-mecánicos de los suelos. procesamiento de datos haciendo uso de los softwares ya mencionados. Capítulo V, que es la parte final donde se muestra la bibliografía y cada uno de los anexos, recolectados en la etapa de resultados e interpretación de los datos obtenidos en la fase de campo.

1.2. Planteamiento del problema

Nicaragua es uno de los países con mayor vulnerabilidad a desastres naturales de América Latina y el Caribe, estos desastres son ocasionados por fenómenos meteorológicos y geológicos dando lugar a una elevada pérdida de vida humana y materiales provocando gran déficit en la economía del país. Ejemplo claro fue a raíz del año 1998 con el deslizamiento de tierra del Volcán Casita el cual generó gran pérdida de población y más aún el impacto social de la población nicaragüense, por lo que tanto el gobierno de Nicaragua como las organizaciones no gubernamentales continúan promoviendo los estudios de vulnerabilidad a deslizamiento u otros procesos de remoción en masa en el país (UNESCO-CEPRENAC, 2012).

El departamento de Estelí se caracteriza por un relieve muy variado debido a varios procesos morfoestructurales que se presentan en el territorio, en el cual se encuentra altiplanicie, valles rellenados, zonas accidentadas y escarpadas. Se encuentran sectores montañosos de alta pendiente que son susceptibles a grandes deslizamientos por condiciones climáticas topográficas y geológicas. El área de estudio se localiza en el cerro La Gavilana km 142, carretera Panamericana Norte, municipio de Estelí, el cual se observan puntos críticos y vulnerables a derrumbes y deslizamientos que podrían generar daños y bloqueos en la carretera, dejando incomunicada a la población y en el peor de los casos generando peligro para quien la transita. Este proceso de remoción en masa sumaría un bajo déficit en la economía de la zona, ya que esta carretera es la principal vía de acceso hacia Estelí y los diferentes municipios de la Región Norte del país.

Formulación del problema

La presente investigación, se refiere a estudiar y evaluar la estabilidad estructural del talud, para determinar el factor de seguridad adecuada para así proponer posibles medidas de prevención y control que tiene como finalidad sugerir una posible solución a la problemática de inestabilidad del Cerro La Gavilana.

La falta de protección de taludes incrementará el índice de accidentalidad y congestión vehicular en esta área de la carretera principal del país NIC-01. Por tanto, la

formulación del problema se plantea en la siguiente interrogante: ¿Cómo evaluar la estabilidad de talud en el cerro la Gavilana, km142, carretera Nic-01, en el departamento de Estelí?

1.3. Justificación

Analizar un talud natural no es sencillo debido a su estabilización y aunque existen métodos basados en la experiencia estos no son muy precisos o no se pueden aplicar como solución de estabilidad, porque al pasar del tiempo las condiciones del clima y de la intemperie pueden variar mucho y hacen que las condiciones iniciales del talud cambien y se altere el subsuelo, es por esto que siempre a la hora de evaluar un talud es mejor realizar un estudio detallado del suelo, caracterizando las propiedades físico-mecánicas, la geología del lugar de estudio y también es necesario hacer un estudio Geofísico para determinar el corte geoelectrico y su distribución de las resistividades de las rocas, características ambientales en ubicación del talud y su topografía para obtener mejores resultados.

En respuesta a la problemática planteada, es de gran importancia este tipo de investigación para dar a conocer el riesgo que puede generar un proceso de movimiento en masa. El cerro La Gavilana durante años ha sido implicado en frecuentes actividades de derrumbes y masas de suelos desplazadas, debido a esto es necesario ejecutar respectivos análisis de los sectores con mayor incidencia y peligro y así establecer una alternativa funcional en la estabilización de talud dentro del trazado de la carretera km 142.

Cabe destacar que el cerro La Gavilana abarca segmentos de la vía principal del país, es destacada por su importante influencia económica, donde se realiza: exportación de granos básicos, ganado, productos lácteos y turismo, de modo que es la única carretera principal hacia los pobladores de todo el país.

La elaboración de este estudio aportará un mejor tratamiento para así obtener medidas emergentes con el objetivo de garantizar una posible solución y minimizar el riesgo por inestabilidad en terrenos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- ❖ Evaluar la estabilidad de talud en el cerro La Gavilana, carretera Nic-01, km 142, departamento de Estelí.

1.4.2. Objetivos específicos

- ❖ Describir las condiciones geológicas presentes en el talud, para identificar las unidades lito-estratigráficas del área.
- ❖ Definir los factores desencadenantes y condicionantes presentes en el área de estudio, para conocer los factores que genera el movimiento del talud.
- ❖ Determinar la estabilidad del talud mediante análisis dinámico por elementos finitos y equilibrio límites aplicando ensayos de mecánica de suelos como, para conocer el factor de seguridad.
- ❖ Elaborar perfiles geofísicos en el talud, aplicando el método de tomografía eléctrica (ERT), para conocer el corte geoelectrico y la distribución lateral de las resistividades eléctricas del subsuelo.
- ❖ Proponer medidas u obras de adaptación y/o mitigaciones adicionales a las existentes, para implementar una posible solución al sitio de estudio.

1.5. Localización del área de estudio

El departamento de Estelí tiene una extensión territorial de 2229.7 Km² la cabecera departamental es el municipio de Estelí, este departamento está dividido por 6 municipios los cuales son: Condega, Estelí, La Trinidad, Pueblo Nuevo, San Juan de Limay, San Nicolás (INEC, 2005).

El área de estudio corresponde al tramo de carretera entre los municipios de La Trinidad y Estelí, al norte de Nicaragua (Figura 1), se encuentra a unos 5 km de la entrada del municipio de Estelí en el km 142, por lo tanto, comprende la hoja topográfica Estelí (2955-III), con las coordenadas UTM-WGS84: N569851-E1448919. Como se observa en la (Tabla 1). En el tramo de la carretera Panamericana que va desde San Benito hasta El Espino, en el km 142 se encuentra un cerro llamado La Gavilana donde se muestra meteorizado y con una pendiente moderada, haciéndola susceptible a moverse por lluvias o sismos importantes.

La principal vía de acceso al área de estudio, parte desde la capital de Nicaragua (Managua); es la carretera Panamericana Norte (NIC-01), que conduce hasta el Espino frontera con el país de Honduras.

Tabla 1.

Coordenadas UTM del área de estudio.

Sitio	Estación (Km)	x	y	Banda	NIC	Tramo
La Gavilana	142	572869	1443225	Derecha	NIC-01	San Benito-El Espino

Fuente: Elaboración Propia.

1.6. Características generales del área de estudio

1.6.1. Geología

Geológicamente el municipio se encuentra constituido por Rocas Volcánicas del Grupo Geológico Coyol e inclusiones de la Formación Matagalpa. El primero, correspondiente al período del Terciario del Mioceno Superior; y la segunda, al período Terciario del Mioceno Inferior. Los bloques montañosos, en sus bases o niveles inferiores están formados por Rocas Volcánicas Miocénicas del Grupo Coyol Inferior que a su vez está integrado por Andesitas e Ignimbritas Dacíticas. Los niveles medios están compuestos por Lavas, Tobas y Aglomerados Dacíticos, siempre del mismo Grupo, y los niveles superiores o superficiales consisten en Basaltos e Ignimbritas Dacíticas del Grupo Coyol Superior (Hodgson, 2006)

1.6.2. Geomorfología

El territorio del Municipio de Estelí, fisiográficamente pertenece a las tierras altas del interior donde sobresale el valle intramontano del mismo, se considera geomorfológicamente como una altiplanicie y a la vez es una especie de anfiteatro abierto en su parte norte estando flanqueada en sus partes este y oeste por mesetas de cumbres horizontales y pendientes muy inclinadas conocidas como Mesas de Moropotenté en el Oriente donde van en secuencia unas tras otras (Ocote Calzado, El Coralito, Moropotenté, Plan Helado, Las Cruces, El Bordo, La Laguna, La Guayaba, El Cebollal, El Caraco, La Pisota, etc.) y por occidente Las Mesas llamadas las Tablas que son las siguientes: Las Nubes, La Narizona, El Arrayán, Almaciguera, El Majagual etc, (ENACAL, 2021).

Es un territorio muy accidentado topográficamente caracterizado por un relieve juvenil que representa la primera etapa del proceso erosivo efectuado principalmente en las mesetas, lomas y cuevas de Estelí. A la falta de uniformidad del relieve corresponde una carencia climatológica que se caracteriza por una distribución irregular de las lluvias, vientos en diferentes direcciones, altas y bajas temperaturas, lo que da lugar a que se desarrollen zonas de microclimas en orden de importancia, Mirafior, Santa Cruz, Tomabú, la Montañita, entre otras, (ENACAL, 2021).

1.6.3. Relieve

El relieve es variado, el cual está condicionado a las particularidades morfoestructurales que presenta el territorio. La altura media municipal es de 1.150 msnm siendo el punto más elevado el Cerro la fila que alcanza 1603 msnm de acuerdo con la altitud se distinguen los niveles siguientes, (ENACAL, 2021):

- Altiplanicie que corresponde al denominado Valle de Estelí y las planicies del norte y sur.
- Montañas Altas del Este, ocupadas predominante por Mesetas comprendidas entre 1000 a 1436 msnm.
- Montañas Bajas del Este, ocupadas por Mesetas comprendidas entre 800 y 1000 msnm.
- Montañas Altas del Oeste, ocupadas por Cuestas y comprendidas entre 1000 y 1608 msnm encontrándose el punto más elevado del municipio que corresponde al Cerro la Fila.
- Montañas Bajas del Oeste, ocupadas por lomas y comprende entre 600 y 1000 msnm.

Además de ese tipo de área se distinguen los siguientes tipos de paisajes geomorfológicos:

- Valles rellanados en los sitios de El Regadío e Isiquí de suelos de reciente formación.
- Abanicos en los sitios de La Montañita, Santa Cruz, El Espinal y al noroeste y suroeste del casco urbano de Estelí de formaciones coluviales.
- Lomas (ondulado) en los sitios de Tomabú, La Labranza, El Cebollal y Cerro YelUCA de formaciones del terciario.
- Flujos del terciario en los alrededores de la Montañita.
- Talud en los lugares conocidos como La Tunoza, IsidriUo, de suelos coluviales.

1.6.4. Hidrología

La subcuenca del río Estelí tiene un área de drenaje de 1,326 km², drena a la cuenca del río Coco. El sistema hidrográfico está representado por el río Estelí, que recorre el municipio de sur a noreste, produciendo ramificaciones en forma de quebradas y riachuelos.

La mayoría de sus afluentes en época de sequía se cortan parcialmente en sus diferentes cursos, y otros se secan. El potencial estimado a nivel de fuente es de 0.60 MMC (MAGFOR-PROFOR, 2000).

El drenaje superficial natural del valle se efectúa a través de los numerosos afluentes que bajan y drenan desde los bloques montañosos que lo circundan. Los principales afluentes son: Las Pintadas que escurre y alimenta al río principal por el sector oeste del valle, y el río Paso León que fluye en el sector este del valle (MAGFOR-PROFOR, 2000).

1.6.5. Condiciones climáticas y temperaturas

Las características climáticas del municipio son variables, debido a la altitud, latitud, y orografía que condicionan las diversas zonas. En general el clima del municipio es templado seco por ser una zona sujeta a la sequía, (ENACAL, 2021).

En el Valle de Estelí la precipitación pluvial promedio anual es de 825 ml, casi similar a la de Condega que es de 800 ml a pesar de estar esta última a una altitud de 560 msnm, lo que muestra que este Municipio está influenciado al Norte por una zona más seca del país, (ENACAL, 2021).

Tabla 2.

Tabla climática del departamento de Estelí.

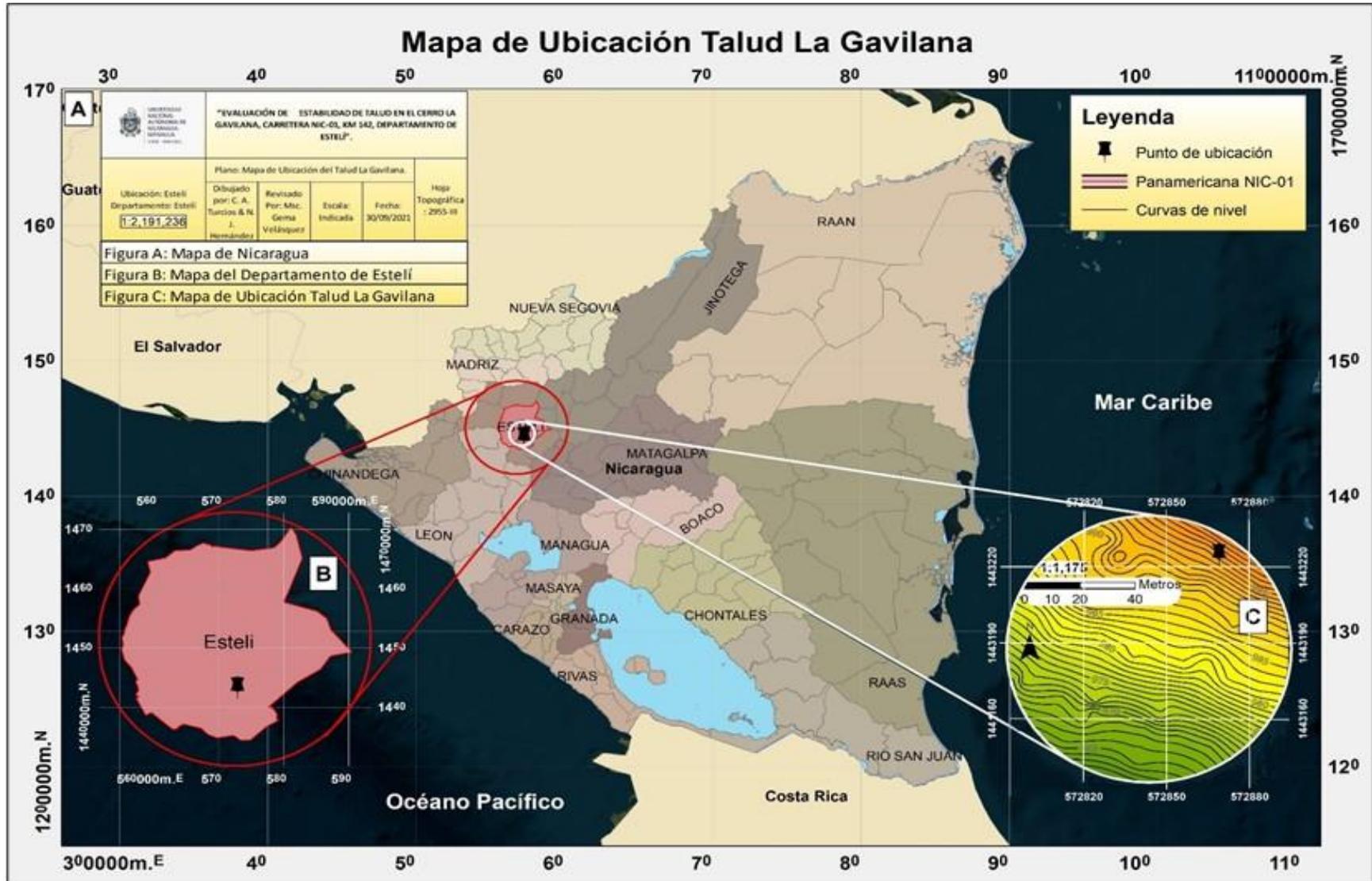
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	21	21.7	22.9	24.2	23.1	22.1	22.4	22.5	21.7	21.2	21.1	21.1
Temperatura mín. (°C)	17.1	17.2	17.8	19.2	19.7	19.4	19.3	19.2	18.9	18.5	17.8	17.5
Temperatura máx. (°C)	26.3	27.5	29.2	30.2	28	26.2	26.6	27	26.1	25.1	25.3	25.8
Precipitación (mm)	7	5	9	42	230	192	91	153	233	253	54	11
Humedad(%)	64%	60%	55%	54%	60%	70%	74%	75%	82%	83%	75%	60%
Días lluviosos (días)	1	1	1	5	13	16	12	15	13	17	7	2
Horas de sol (horas)	7.3	7.8	8.8	9.3	8.0	7.4	8.0	7.9	7.1	6.5	7.2	7.1

Fuente: (ENACAL, 2021).

La temperatura media anual es de 21.5 °C para una elevación de 815 msnm los valores descienden en función de la altitud, con un gradiente vertical de 0.6 °C. por cada 100 metros de altitud; así en aquellas zonas de mayor altitud la medida anual es del orden de los 18.0 °C se registran temperaturas mínimas bajas, a consecuencia principalmente de la altitud. El comportamiento general de la distribución mensual se caracteriza por ser máximas durante el mes de marzo (35.8°c marzo de 1983) y mínimas en diciembre (5.5°c diciembre de 1975), (ENACAL, 2021).

Figura 1.

Mapa de ubicación.



Fuente: Elaboración propia. (INETER, 2020).

CAPÍTULO II

2.1. Antecedentes

Nicaragua es un país “multi-amenazas” que, por su alta vulnerabilidad, está propensa a desastres naturales todo el año. Entre algunas de sus principales amenazas se encuentran deslizamientos, huracanes, sismos, inundaciones, etc. estas que a su vez son capaces de terminar en catástrofes en cualquier momento (UNESCO-CEPRENAC, 2012).

Por su ubicación geográfica, Nicaragua está sujeta a diversos procesos naturales, que pueden ocasionar desastres especialmente por causas de inestabilidades del terreno debido a la presencia de relieves abruptos, fuertes precipitaciones y actividad sísmica. A partir de esto diferentes entidades gubernamentales como SINAPRED (Sistema Nacional de Prevención, Mitigación y Atención de Desastres Naturales), INETER (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales) tienen como objetivo realizar investigaciones, estudios para la gestión y prevención de desastres naturales.

La mayor parte de la red vial de Nicaragua fue construida entre los años 1940 y 1970. Para el diseño y la construcción se utilizan las normas norteamericanas (AASHTO, 1940). La elaboración de estas normas aporta al trabajo actual información útil de como clasificar muestras de suelos, mediante diversos análisis granulométricos.

En 2001, la Organización de Estados Americanos - Unidad de desarrollo sostenible y Medio Ambiente en conjunto con el MTI (Ministerio de Transporte e Infraestructuras), realizaron el ‘‘Estudio General sobre los Tramos Vulnerables a los Peligros Naturales de la Carretera Panamericana y sus Corredores Complementarios en Centroamérica en el cual indican que Centroamérica es una de las regiones más vulnerables a los peligros naturales, afectando aspectos de infraestructura económica de la región y por tanto del desarrollo sostenible. Esta investigación es de gran importancia para el presente trabajo, ya que establece una clasificación de donde se encuentran localizados los puntos críticos de inestabilidad de laderas en el país, lo que nos da referencia de poder determinar el talud a evaluar.

Según el estudio de INETER (2010) denominado, explicaciones de mapas de inestabilidad de terrenos y geología en tramo de carretera entre pobladores de La Trinidad-Estelí (Obando Rivera, 2010). En este estudio se describen la existencia del sector La Gavilana, que ha sido afectado por derrumbes de rocas y detritos. La relación de este estudio es que presenta pequeños aspectos descriptivos que se encuentran ligados al sitio de trabajo, y son de utilidad en la recolección de datos topográficos y geológicos.

(Merchán & Sánchez , 2013), elaboraron un estudio el cual tenía como objetivo analizar la inestabilidad de taludes en sectores de la zona cantera de materiales pétreos Las Victorias, ejecutando una metodología descriptiva de como determinar la geomecánica del macizo rocoso y así obtener el factor de seguridad del talud. Esta investigación aporta información necesaria para elaborar una clasificación mecánica de muestras de suelos y rocas, que nos permita obtener el factor de seguridad del sitio a estudiar.

(MTI & Dysconsa., 2020), Realizaron series de investigaciones que consistieron en generar datos geológicos-geotécnicos y geofísicos para 5 sitios de interés, esta permitió obtener información que faciliten diseños de obras civiles y determinar las propiedades de los suelos y zonas de debilidad que puedan afectar algunos puntos de interés del estudio.

La realización de este estudio con el trabajo actual es de gran importancia ya que provee información sobre metodologías que se deben aplicar en campo y así tener un mejor resultado en los datos a interpretar.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Marco Geotectónico Regional

América Central se sitúa en el margen occidental de la placa Caribe. (Dengo & Case, 1990), sus límites son: Al norte la Placa Norte Americana a través del sistema de fallas Motagua-Polochic - Jocatán y la Fosa Caimán; al Este por la falla de Puerto Rico y la zona de subducción de las Antillas Menores; al Sur por la Placa Suramericana y al Oeste por la fosa Mesoamericana. El desarrollo de la Placa Caribe se originó debido a la posición relativa de Norte y Sur América en el Triásico Jurásico Tardío. (Burlard, E et al., 1965). En la mayoría de las reconstrucciones del Pangea, Norte y Sur América se traslapaban en el área

que actualmente ocupa la placa del Caribe. (Burllard et al. 1965; Van der voo et al. 1976; Pindell, J. 1985), donde la placa del Caribe es tenida como alóctona de esas placas vecinas. Esto significa que Norte y Sur América no son márgenes de ruptura de la actual cuenca del Caribe. (Elming, S. et al, 1998).

(Dunca, R y Hargraves, R. 1984), presentaron un modelo de evolución del Caribe, debido a este el núcleo de la placa se formó de la emisión de lava de la placa Farallón al momento de desplazarse al este, por encima del punto caliente o hot spot de las Galápagos. Una vez que el espacio fue lo suficientemente grande, se dio el emplazamiento del Caribe. bosquejo de la configuración geológica regional de Nicaragua.

América Central se encuentra en un margen convergente continental, muy activo en donde la Placa de Cocos subduce a la Placa del Caribe y cuyos márgenes son complejos cinturones tectónicos activos, que han estado evolucionando a lo largo del Cenozoico (Dengo, D y Case, J. 1990). La dirección de subducción de estas dos placas es de N31°E, a una velocidad de 8 a 9 cm por año, con un ángulo aproximado de 80°, decreciendo hacia la parte sur de Nicaragua, hasta alcanzar los 60° en Costa Rica. (Frischbutter, A. 2001).

El hecho de que el ángulo de subducción de las dos placas decrezca hacia la parte sur de Nicaragua, hace que los principales rasgos geotectónicos presentes en el país sean: la Depresión Nicaragüense de rumbo NW-SE y la Cadena Volcánica de América Central con dirección NW-SE, formada por un alineamiento de estrato- conos y escudos volcánicos.

América Central ha sido dividida en tres grandes bloques tectónicos: Bloque Chortis, Bloque Chorotega y Bloque Maya, los cuales difieren completamente uno de otro con respecto a su geología, estructuras y rasgos morfotectónicos. (Dengo, G. 1969,1978).

2.2.2. Geología Estructural de Nicaragua

Existen en Nicaragua sistemas de fallas principales y secundarias, cubriendo principalmente las Provincias del Norte y la Central (Lilljequist & Hodgson, 1983). En Nicaragua los sistemas que constituyen los elementos estructurales más prominentes fueron agrupados en tres sistemas principales: NW-SE, NE-SW y NS. El territorio nicaragüense,

en su totalidad se encuentra altamente fallado, fracturado o plegado, a las cuales se los han asignado edades del Terciario – Cuaternario.

Estructuras de fallas con rumbos diferentes (NNW, SSE, ENE-WSW, y E-W) no son muy abundantes en Nicaragua, no obstante, las interpretaciones de las imágenes de radar señalan la presencia de estructuras lineales en el N del país y E del lago de Managua, con rumbos diferentes a los tres sistemas principales ya mencionados. Fallas NW-SE: se ha señalado que estas fallas coinciden con el rumbo de la cordillera Amerrisque. Las fallas son prominentemente normales o de gravedad. Estas fallas son consideradas de haberse formado como resultado de regímenes tensionales durante el Pleistoceno.

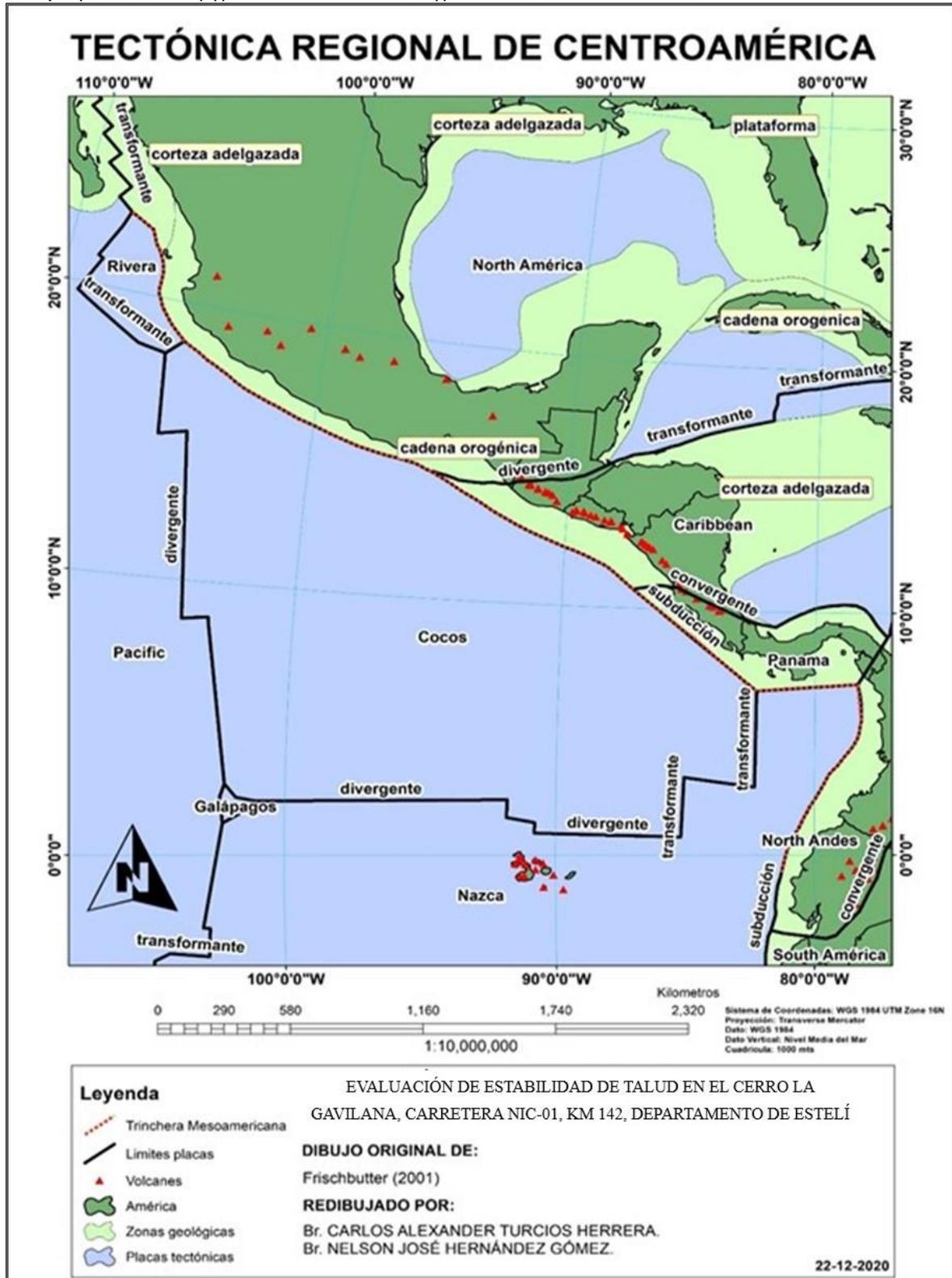
Las estructuras circulares (cráteres y calderas) están distribuidas en toda el área de Nicaragua con una tendencia de agruparse a lo largo de líneas arqueadas y convexas hacia el W (Lilljequist & Hodgson, 1983).

Cada grupo de depósito mineral puede ser relacionado en tiempo y espacio con un paleoarcó volcánico y magmático específico. Fallas activas durante ese tiempo específico determinan la dirección dominante del sistema de vetas. Cada veta ha sido formada directamente encima de la cámara magmática dentro de un sistema hidrotermal actuando verticalmente y circulando en fracturas. (Lilljequist & Hodgson, 1983).

Se muestra la cadena de volcanes activos (línea punteada), así como las velocidades promedio de deriva de las placas según su posición. Nicaragua está alineada a lo largo del borde W de la placa del Caribe y al borde E de la placa Coco (Figura 2).

Figura 2.

Bosquejo de la configuración tectónica regional de Centroamérica.



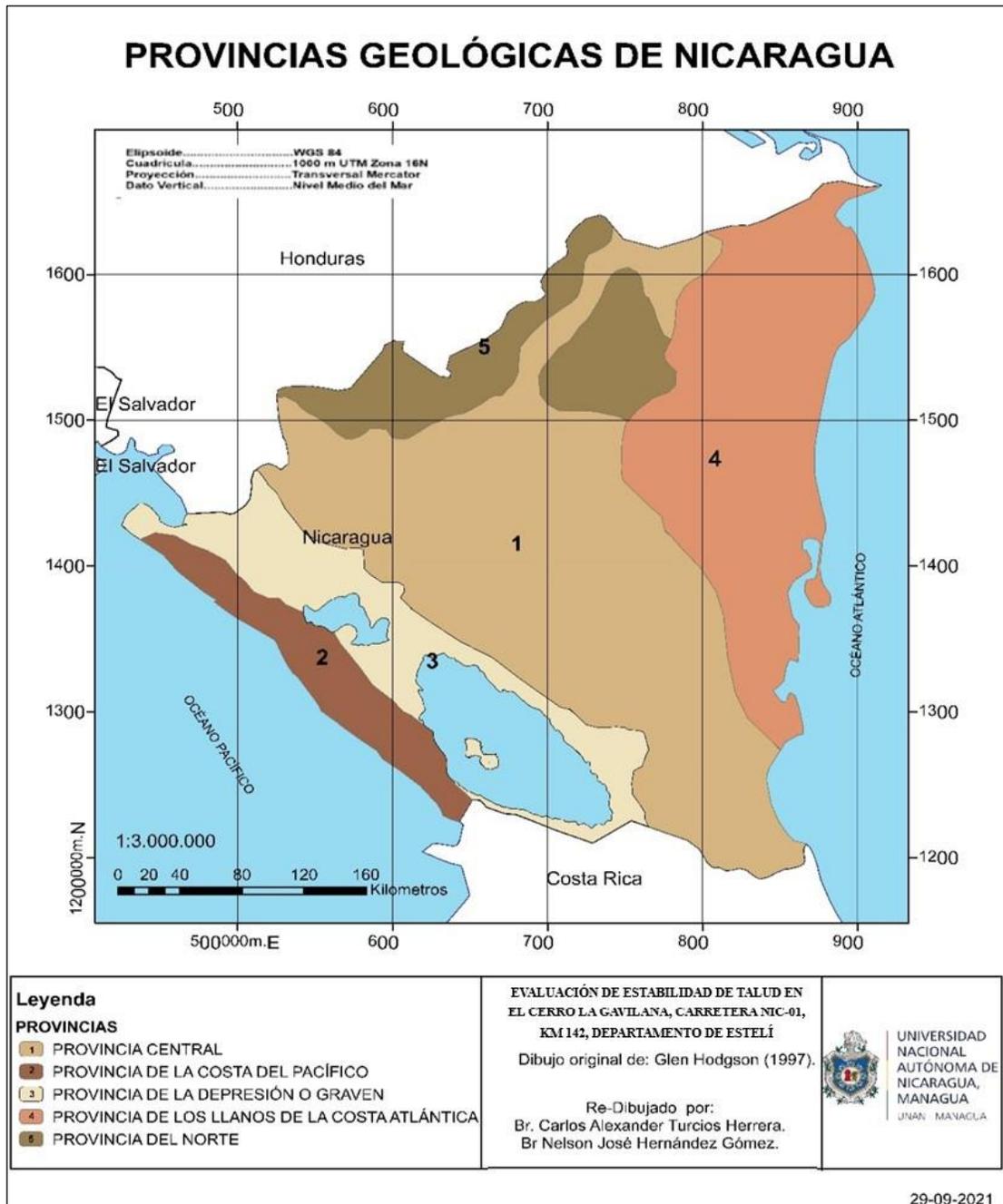
Fuente: Redibujado de Frischbutter, (2001).

2.2.3. Geología Regional y Geomorfología de Nicaragua

McBirney, A y Williams, H. (1965) dividen a Nicaragua en cuatro Provincias Geológicas; posteriormente Hodgson, G. (1976) agrega una provincia, quedando dividido el territorio nicaragüense oficialmente en cinco Provincias Geológicas (Figura 3):

Figura 3.

Provincias geológicas de Nicaragua.



Fuente: Redibujado de Hodgson, (1977).

- 1) Provincia Central.
- 2) Provincia de la Costa del Pacífico.
- 3) Provincia de la Depresión de Nicaragua o Graben de Nicaragua.
- 4) Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica.
- 5) Provincia del Norte.

2.2.4. Provincia geológica central

El área de estudio se encuentra en la provincia geológica central dentro de la provincia meridional de América Central, a su vez gran parte está dentro del bloque Chortis y una pequeña porción dentro del bloque Chorotega, geográficamente es conocida como en las tierras altas del interior (Howel, 1965).

La provincia central se divide en tres grandes grupos:

- Grupo Matagalpa.
- Grupo Pre-Matagalpa.
- Grupo Coyol.

2.2.4.1. Grupo Matagalpa

En este grupo se encuentran rocas volcánicas indiferenciadas y sedimentos subordinados, normalmente predominan rocas auto brechas andesíticas piroxeníticas, lavas y lahares en bloques. Debido a la porosidad de la roca y la abundancia de la lluvia, la meteorización es profunda. La alteración hidrotermal ha reducido las rocas a una arcilla amarillenta. Las dacitas y dacitas laminares son más abundantes y mejor conservadas.

La edad del grupo Matagalpa se extiende desde el Eoceno Superior hasta el Mioceno Medio y cuenta con un espesor aproximado entre 800 y 1400 metros (Garayar, 1971) y (Hodgson, 1971).

2.2.4.2. Grupo Pre-Matagalpa

En este grupo la morfología que presenta las unidades de rocas es diferente a las unidades del grupo Coyol y Matagalpa (Hodgson, 1984). Generalmente ofrece una morfología muy conspicua; reflejando arrugamientos, curvas arqueadas, flexuras con pequeños plegamientos etc. Las rocas volcánicas del área comprenden tobas de diferentes

fases eruptivas y composición, de bajo y alto grado de compactación, alternado con andesitas-basalto intercalado con delgados depósitos de toba y el espesor de este grupo no ha sido definido aún. En el área se encuentran abundantes anticlinales y sinclinales donde las unidades se repiten y sin tomar este fenómeno en cuenta, se estimó más de 7000 metros de espesor, en cambio más al sur donde las rocas están menos deformadas se ha estimado un espesor de 1700 metros.

2.2.4.3. Grupo Coyol

Este grupo comprende la zona de estudio y está definido por extensos depósitos horizontales de lavas e ignimbritas que forman altas mesetas y altiplanicie al Norte y Este del lago de Managua, bordeando parte de la depresión nicaragüense. Este grupo se distingue claramente por presentar un relieve muy característico de amplias mesetas, cordilleras y microcuencas de depositación, estas comprendidas por rocas ignimbritas, lavas y tobas intercaladas, fueron depositadas como capas horizontales ligeramente inclinadas, dando origen a mesetas y cuesta escalonada, con escarpe verticales constituyendo un rasgo geológico muy característicos. El espesor de este grupo es variable, en el área NE-central, se estimó un espesor aproximado de 1600 metros.

2.3. Aspectos generales de inestabilidad de taludes o laderas

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año; sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control. (Brabb, 1989).

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a que se generen problemas de deslizamientos de tierra debido a que generalmente, se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas (Brabb, 1989).

2.3.1. Definición de un talud o ladera

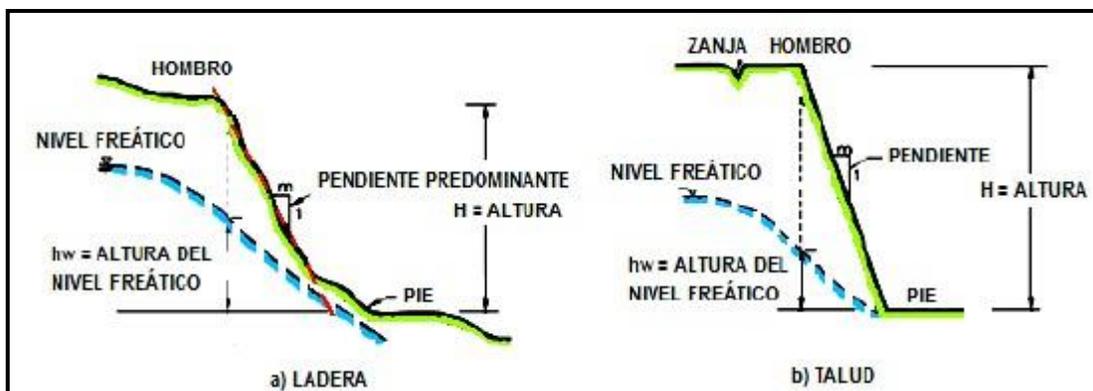
(Suárez Díaz, 1998) Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como

ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 4).

Las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen el estado original de estabilidad. Un talud estable puede convertirse en un “deslizamiento”. (Suárez Díaz, 1998).

Figura 4.

Nomenclatura de taludes y laderas, redibujado.



Fuente: (Suárez Díaz, 1998).

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos (Suárez Díaz, 1998):

1. **Altura:** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
2. **Pie:** Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe:** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático:** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.

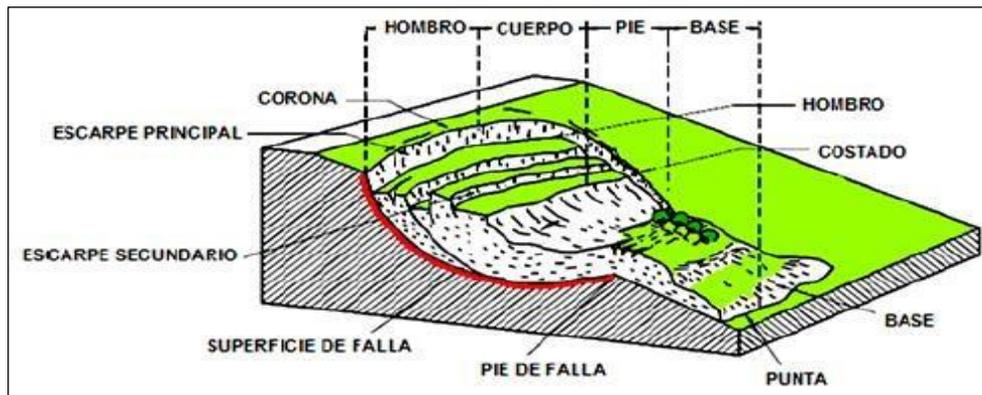
5. **Pendiente:** Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

2.3.2. Nomenclatura de los procesos de movimiento

Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos. Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos (Figura 5). Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras otros se mueven hacia abajo (IAEG, 1990).

Figura 5.

Nomenclatura en un deslizamiento, redibujado.



Fuente: (IAEG, 1990).

Las partes que integran un deslizamiento de acuerdo a la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG, 1990), son:

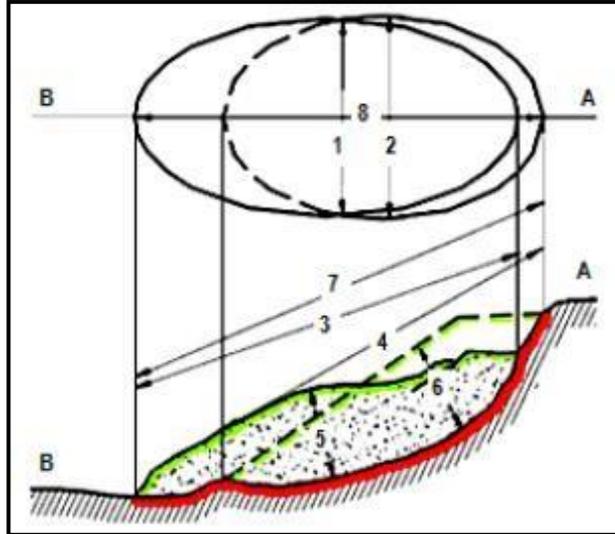
- ✓ **Escarpe principal.** Es la superficie que se encuentra muy inclinada a lo largo de la periferia del área del deslizamiento. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.
- ✓ **Escarpe secundario.** Es la superficie inclinada que es producida por los desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se movió.

- ✓ **Hombro.** Es la parte superior del material que se movió a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- ✓ **Corona o Cima.** Es el punto más alto del material en el sitio que prácticamente se encuentra inalterado.
- ✓ **Superficie de falla.** Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado.
- ✓ **Costado o flanco.** Es el lado del movimiento (visto de perfil lateral).
- ✓ **Base.** Es el área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- ✓ **Pie de la superficie de falla.** Es la línea de intercepción (generalmente tapada), entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- ✓ **Punta o uña.** Es el punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- ✓ **Superficie original del terreno.** Es la superficie que existía antes de presentarse el deslizamiento.
- ✓ **Derecha e izquierda.** Se refiere al lado del deslizamiento observado desde la corona, mirando hacia el pie. Generalmente se prefiere usar la orientación geográfica para la descripción del deslizamiento.

La extensión de un deslizamiento se mide por las dimensiones de la masa de suelo desplazada, estas son establecidas por la IAEG (Figura. 6), y son:

Figura 6.

Dimensiones de un deslizamiento, redibujado.



Fuente: (IAEG, 1990)

- 1. Ancho de la masa desplazada (W_d).** Es el ancho máximo de la masa desplazada perpendicular a la longitud de la masa deslizada.
- 2. Ancho de la superficie de falla (W_r).** Es el ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicular a la longitud de la superficie de falla.
- 3. Longitud de la masa deslizada (L_d).** Es la distancia mínima entre la punta y el hombro.
- 4. Longitud de la superficie de falla (L_r).** Es la distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y el hombro.
- 5. Profundidad de la superficie de falla (D_r).** Es la máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por el ancho de la superficie de falla y la longitud de la superficie de falla.
- 6. Profundidad de la masa deslizada (D_d).** Es la máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por el ancho de la masa deslizada y la longitud de la masa deslizada.
- 7. Profundidad de la superficie de falla (D_r).** Es la máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por el ancho de la superficie de falla y la longitud de la superficie de falla.
- 8. Longitud total (L).** Es la distancia máxima desde la punta al hombro del deslizamiento.

9. Longitud de la línea central (Lc). Es la distancia de la punta al hombro del deslizamiento, a lo largo de puntos equidistantes sobre la superficie original de los bordes laterales o flancos.

2.3.3. Etapas en el proceso de falla

La clasificación de deslizamientos pretende describir e identificar los cuerpos que están en movimiento relativo. Las clasificaciones existentes son esencialmente geomorfológicas y solamente algunas de ellas introducen consideraciones mecánicas o propiamente geológicas.

Las caracterizaciones geotécnicas son necesarias y por esta razón, las clasificaciones eminentemente topográficas y morfológicas, como las propuestas por (Varnes, 1978), deben adaptarse a las condiciones verdaderas de los movimientos.

En este orden de ideas se deben considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- a. Etapa de deterioro o antes de la falla** donde el suelo es esencialmente intacto.
- b. Etapa de falla** caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- c. La etapa post-falla** que incluye los movimientos de la masa involucrada en un deslizamiento desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.
- d. La etapa de posible reactivación** en la cual pueden ocurrir movimientos que deben considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.

2.3.4. Clasificación de los movimientos en masa

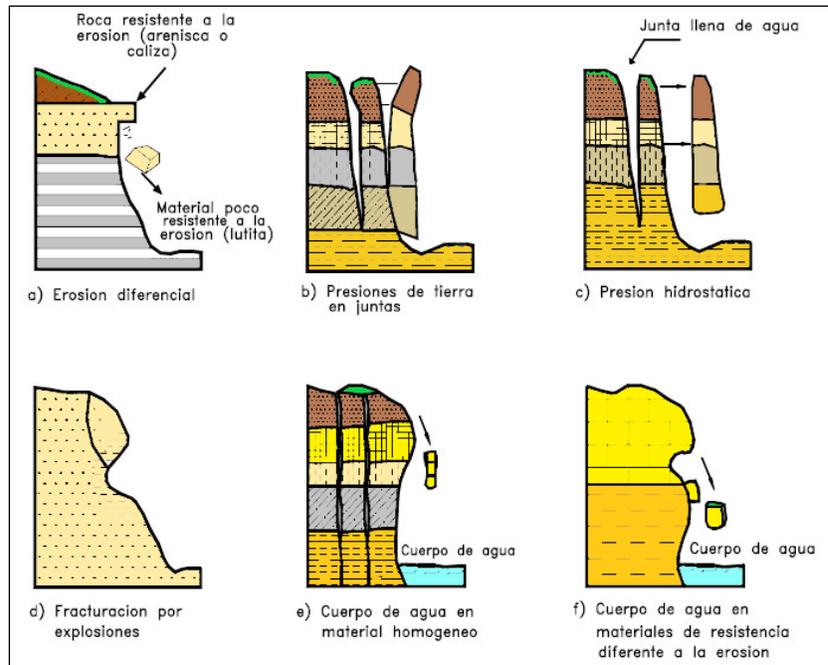
Para la clasificación de los movimientos en masa se presenta el sistema propuesto originalmente por (Varnes, 1978), el cual tipifica los principales tipos de movimiento. Para el propósito del tema, se presentan algunas observaciones a los procesos de movimiento identificados por Varnes. Algunos de estos movimientos están incluidos en la clasificación de los procesos de deterioro previos a un deslizamiento y es difícil identificar cuando son procesos de deterioro y cuando son componentes principales del movimiento del talud.

1. Caído

Las caídas son descenso más o menos libre y extremadamente rápido de masas de suelo o roca de cualquier tamaño, desde taludes escarpados o riscos. El proceso es generalmente progresivo y, con frecuencia, prolongado (Figura 7). Se puede iniciar con grietas de tensión en la parte superior y falla por cortante en la base, un poco antes del desprendimiento de la masa de roca o suelo (Hutchinson, 1988).

Figura 7.

Algunos mecanismos de falla: caídas de rocas, redibujado.



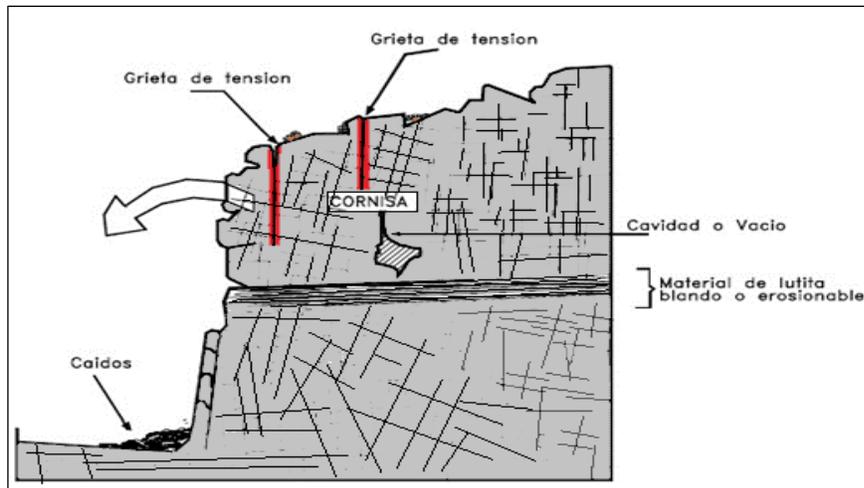
Fuente: (Suárez Díaz, 1998).

2. Inclinación o volteo

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurren en las formaciones rocosas (Figura 8).

Figura 8.

Volteo o inclinación en materiales residuales, tomado y redibujado del libro de deslizamientos.



Fuente: (Suárez Díaz, 1998).

3. Reptación

La reptación consiste en movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo subsuperficial sin una superficie de falla definida. Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno. Se les atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos, usualmente, muy blandos o alterados. La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos (Suárez Díaz, 1998).

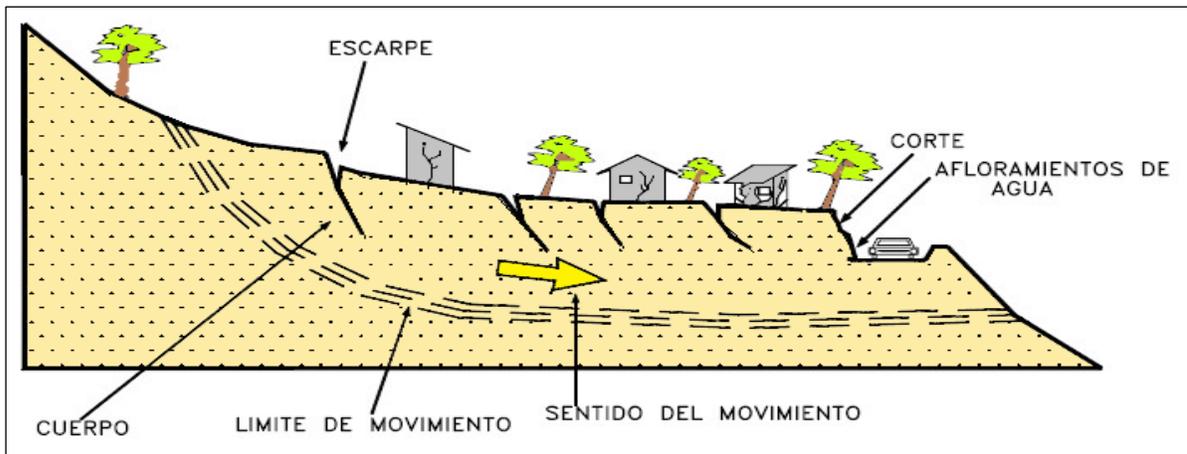
4. Deslizamiento

(Hutchinson, 1988), define los deslizamientos como movimientos relativamente rápidos pendiente abajo de suelo o roca a lo largo de una o más superficies discretas que delimitan la masa movilizada en el proceso. Aquí, Hutchinson incluye aquellos movimientos en los cuales la geometría de la superficie de falla es identificable y el recorrido moderado. (Figura 9).

Resulta muy interesante su planteamiento, que concuerda muy bien con la realidad: “Tanto los suelos como las rocas son predominantemente friccionantes y su resistencia por lo tanto tiende a incrementarse con la profundidad proporcionalmente a la presión efectiva de la sobrecarga. En consecuencia, el desarrollo de deslizamientos con superficies de falla profundas es poco frecuente, salvo el caso de algunos deslizamientos rotacionales y compuestos que se menciona más adelante, y la mayoría de los deslizamientos son relativamente superficiales y traslacionales por naturaleza”.

Figura 9.

Deslizamientos en suelos blandos, tomado y redibujado del libro de deslizamientos.



Fuente: (Suárez Díaz, 1998).

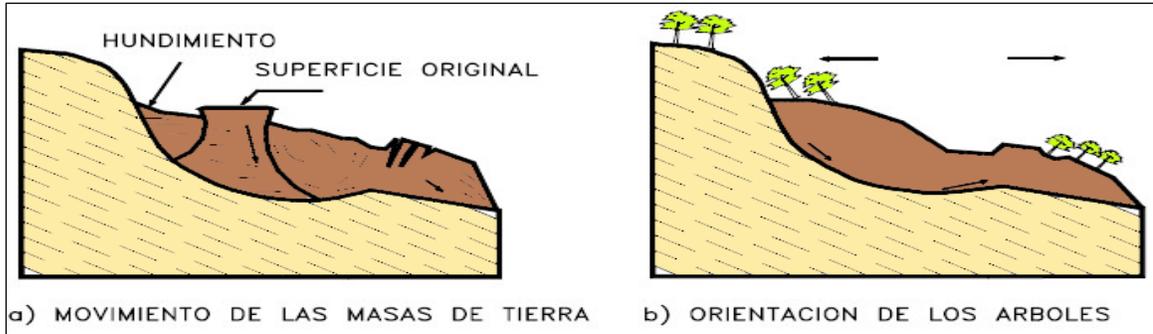
Los deslizamientos se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados deslizamientos rotacionales y traslacionales o planares. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y estabilización a emplearse.

a. Deslizamiento Rotacional

Un deslizamiento rotacional es aquel en que la superficie de rotura es cóncava hacia arriba, por lo que el movimiento resultante se desarrolla en función de un eje de giro paralelo al plano de falla y transversal a la dirección de avance del suelo (Figura 10). Durante su desarrollo es posible observar una serie de grietas concéntricas y cóncavas, ubicadas en la dirección del movimiento (Skempton & Hutchinson, 1969).

Figura 10.

Deslizamiento rotacional típico, redibujado.



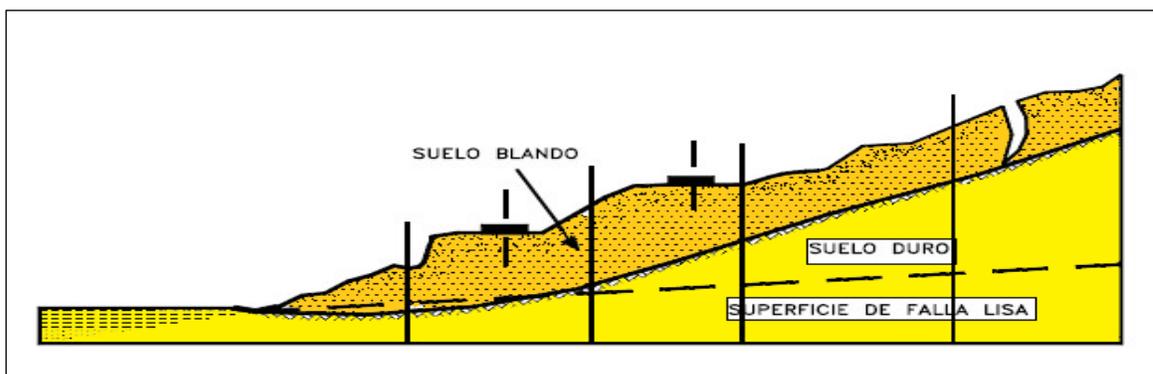
Fuente: (Skempton & Hutchinson, 1969).

b. Deslizamiento de traslación

Según (Hutchinson, 1988), este tipo de deslizamiento involucra falla por cortante a lo largo de una superficie casi planar en el sentido de la ladera, a veces canalizada en sección transversal. El material se desplaza en forma casi paralela a la pendiente del terreno y la relación D/L es de 0,1 o menos (Figura 11). La diferencia importante entre los movimientos de rotación y traslación está principalmente, en la aplicabilidad o no de los diversos sistemas de estabilización.

Figura 11.

Deslizamiento de traslación, redibujado.



Fuente: (Skempton & Hutchinson, 1969).

5. Esparcimiento lateral

En los esparcimientos laterales el modo de movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y translación sino también de flujo (Suárez Díaz, 1998).

6. Flujo

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos (Figura 12), así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos o de suelo o tierra (Suárez Díaz, 1998).

a. Flujo en roca

El término flujo se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de corte efímeras y estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada se asemeja a la de un líquido viscoso. Su límite inferior puede ser una superficie a lo largo de la cual se ha presentado un movimiento diferencial apreciable o una zona espesa de cizallamiento distribuido. (Cruden & Varnes, 1996).

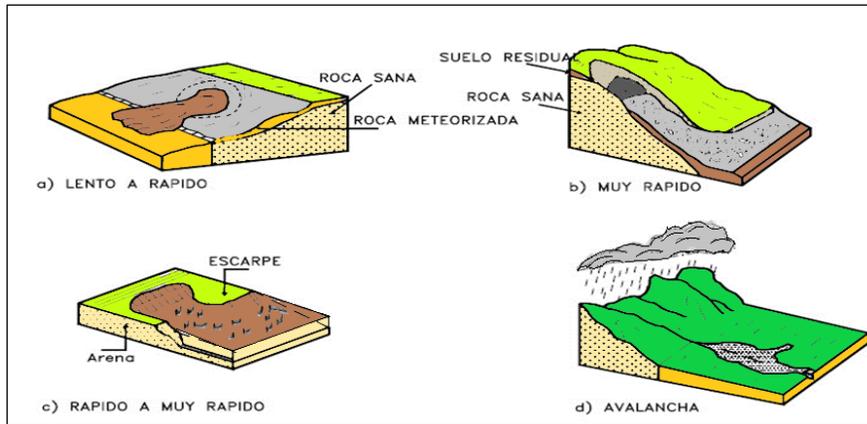
b. Flujo de residuos (Detritos)

En opinión de (Cruden & Varnes, 1996), los flujos más rápidos corresponden a los flujos canalizados de detritos, en los cuales el material pierde bastante cohesión, admite bastante agua o encuentra laderas más pendientes. Se pasa en forma gradual de flujos de detritos a avalanchas de detritos que son movimientos extremadamente rápidos.

Los flujos de detritos son a menudo de alta densidad, con más del 80 % de sólidos en peso, que exceden la densidad del concreto húmedo.

Figura 12.

Flujos de diferentes velocidades, redibujado.



Fuente: (Suárez Díaz, 1998).

c. Flujo de suelo

Los flujos de suelo también pueden ser secos y más lentos de acuerdo a la humedad y pendiente de la zona de ocurrencia. En zonas de alta montaña y desérticas ocurren flujos muy secos, por lo general pequeños, pero de velocidades altas (Suárez Díaz, 1998).

d. Flujos de lodo

Dentro de los flujos de tierra están los “flujos de lodo”, en los cuales los materiales de suelo son muy finos y las humedades muy altas y ya se puede hablar de viscosidad propiamente dicha, llegándose al punto de suelos suspendidos en agua. Los flujos de lodo poseen fuerzas destructoras grandes que dependen de su caudal y velocidad (Suárez Díaz, 1998).

7. Avalanchas

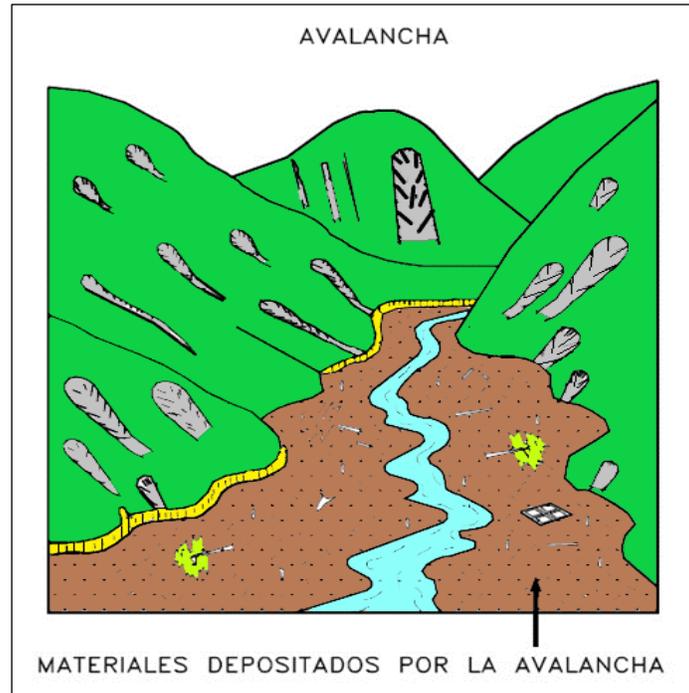
En las avalanchas la falla progresiva es muy rápida y el flujo desciende formando una especie de “ríos de roca y suelo” (Figura 13). Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación (Suárez Díaz, 1998).

8. Movimientos complejos

Con mucha frecuencia los movimientos de un talud incluyen una combinación de dos o más de los principales tipos de desplazamiento descritos anteriormente, este tipo de movimientos se les denomina como “Complejo”. Adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración; es así como una inclinación puede terminar en caído o un deslizamiento en flujo (Suárez Díaz, 1998).

Figura 13.

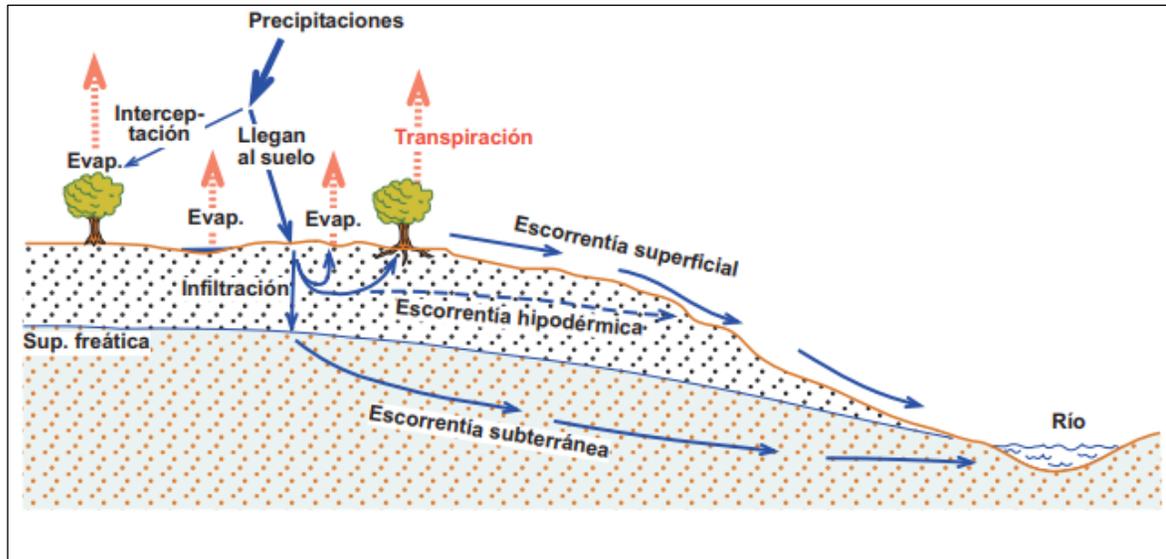
Avalancha en cauce de río por acumulación de materiales producto de una gran cantidad de deslizamientos ocurridos en el momento de un sismo, redibujado.



Fuente: (Suárez Díaz, 1998).

Figura 14.

Ciclo Hidrológico.



Fuente: (Sanchez San Román).

2.3.5. Factores que influyen en la inestabilidad de taludes

Esta clasificación se identifica dos tipos de factores:

2.3.5.1. Factores condicionantes

Los factores condicionantes o pasivos son aquellos que se relacionan con los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos, además se considera que son intrínsecos a los materiales naturales, estos factores son:

- ✓ Estratigrafía y litología.
- ✓ Estructura geológica y discontinuidades.
- ✓ Condiciones y comportamiento hidrogeológicos de los materiales (Figura 14).
- ✓ Propiedades físicas, resistentes y deformacionales.
- ✓ Tensiones naturales y estado tenso-deformacional.

2.3.5.2. Factores desencadenantes

Los factores desencadenantes o activos provocan la rotura cuando se cumple una serie de condiciones. Se consideran que son factores externos que actúan sobre los suelos o

macizos rocosos, cambiando las características, propiedades y condiciones de equilibrio del talud, estos factores son:

- ✓ Sobrecargas estáticas.
- ✓ Cargas dinámicas.
- ✓ Cambios en las condiciones hidrogeológicas (Figura 14).
- ✓ Factores climáticos.
- ✓ Variación en la geometría.
- ✓ Reducción de parámetros resistentes.

2.3.6. Evaluación de inestabilidad de talud o laderas

La evaluación de inestabilidad de taludes o laderas parte de la identificación de factores o causas del deslizamiento. Los métodos a utilizar para un análisis de diseño de taludes en suelo o roca se presentan como:

2.3.6.1. Equilibrio límite

Los problemas de estabilidad de taludes son estáticamente indeterminados, y para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partida diferentes según los métodos. Con dichas condiciones, se establecen las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistentes. Los análisis proporcionan el valor del FS del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan. (Suárez Díaz, 1998).

2.3.6.2. Factor de Seguridad

El concepto de Factor de Seguridad nace de la necesidad tanto de proveer seguridad a las obras y elementos diseñados y construidos, como de optimizar los mismos (González G., 1974, 1992, 1999, 2006). La expresión del factor de seguridad viene dada por:

Ecuación
$$F.S: \frac{\int \tau_R.Ds}{\int \tau.Ds} \quad (1)$$

Donde

τ_R : es la resistencia a la corte máxima que se puede movilizar a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento,

τ : es la resistencia a la corte movilizada a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento,

D_s : es el diferencial de longitud a lo largo de la superficie de deslizamiento.

Definir el factor de seguridad con respecto a la resistencia al corte es lógico porque la resistencia al corte es la que realmente condiciona el resultado y a su vez tiene el mayor grado de incertidumbre. Como ejemplo de orden de magnitud, los valores del factor de seguridad para el cálculo de taludes son de $FS = 1.3$, para el caso de taludes temporales, i de $FS = 1.5$ para el caso de taludes definitivos.

Para la aplicación del método del equilibrio límite son requeridas las siguientes fases de cálculo (Alonso, 1989):

- ✓ Determinar un mecanismo de rotura cinemáticamente admisible. Generalmente se consideran para la superficie de deslizamiento, formas geométricas sencillas, como pueden ser rectas, circunferencias o espirales logarítmicas.
- ✓ A partir de la condición de equilibrio, se establecen relaciones entre las fuerzas presentes en el problema. Diferenciando entre las fuerzas que inducen al desequilibrio (peso, cargas externas), y las fuerzas internas resistentes. Las ecuaciones necesarias que se deben cumplir en el problema son:
 - ✓ Equilibrio de fuerzas, tanto verticales como horizontales.
 - ✓ Equilibrio de momentos, respecto a un punto arbitrario.
 - ✓ Se analiza la estabilidad del conjunto a partir del concepto de factor de seguridad.
 - ✓ Mediante cálculos repetitivos se halla el menor valor del factor de seguridad, que va asociado a la superficie de deslizamiento más desfavorable.

Los métodos de equilibrio límite más utilizados en la práctica y sus características, se resumen en la (Tabla 2) (Ducan & Wright, 1980); (Abramson, Thomas, Sunil, & Glenn, 2002).

Tabla 3.

Métodos de equilibrio límite más utilizados.

Método	Características
Ábacos de estabilidad (Jambu, 1968); (Ducan, 1996).	-Bastante exacto para muchos propósitos -Permite hacer análisis rápidos.
Método ordinario de las dovelas (Fellenius, 1955).	-Solo es válido para roturas circulares. -Satisface el equilibrio de momentos. -No satisface el equilibrio de fuerzas.
Método de Bishop modificado (Bishop, 1955).	-Solo es válido para roturas circulares. -Satisface el equilibrio de momentos. -Satisface el equilibrio de fuerzas verticales. -No satisface el equilibrio de fuerzas horizontales.
Métodos de equilibrio de fuerzas (Lowe & Karafiath, 1960).	-Es válido para cualquier curva de rotura. -Satisface el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales. -No satisface el equilibrio de momentos.
Procedimiento generalizado de Jambu (Jambu, 1968).	-Es válido para cualquier curva rotura. -Satisface todas las condiciones de equilibrio. -Permite variar la posición de las fuerzas laterales entre dovelas.
Método de Morgenstern y Price (Morgenstern & Price, 1965).	-Es válido para cualquier curva de rotura. -Satisface todas las condiciones de equilibrio. -Permite variar la orientación de las fuerzas laterales entre dovelas.
Método de Spencer (Spencer, 1967).	-Es válido para cualquier curva de rotura. -Satisface todas las condiciones de equilibrio. -Considera las fuerzas laterales entre dovelas paralelas.
Método de Sarma (Sarma, 1973).	-Satisface todas las condiciones de equilibrio. -Permite calcular la magnitud del coeficiente sísmico. -Horizontal que mantiene la masa que tiende a moverse en un estado de equilibrio límite. -Desarrolla una relación entre coeficiente sísmico y el F_s . -Utiliza una función de distribución de fuerzas entre dovelas (similar a Morgenstern y Price, 1965).

Fuente: (Ducan & Wright, 1980); (Abramson, et al., 2002).

A continuación, se explica con detalle las hipótesis y características de los métodos a utilizar en la evaluación de la ladera del área de estudio.

a. Método ordinario de Fellenius

Conocido también como método sueco, método de las dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de fallas circulares, divide el área de fallas en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el factor de seguridad (Fellenius, 1955).

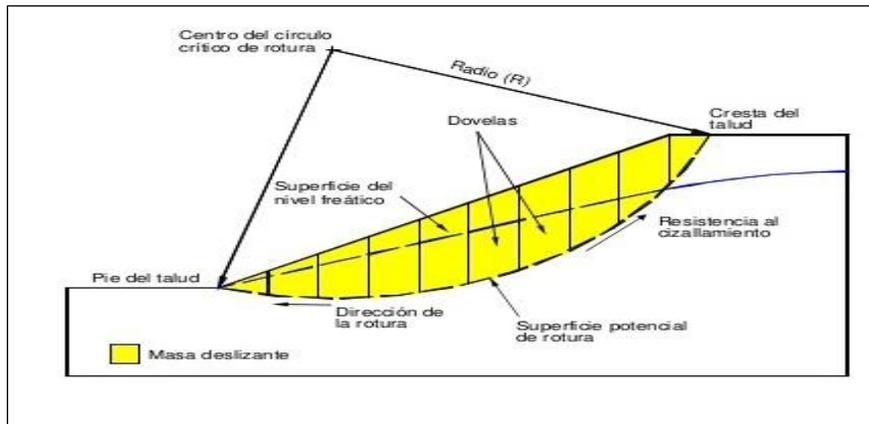
Las fuerzas que actúan sobre una dovela son (Figura 15):

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

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

Figura 15.

Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas.



Fuente: (Fellenius, 1955).

Ecuación
$$F.S = \frac{\sum [C' b \sec \alpha + (W \cos \alpha - u \cdot b \sec \alpha) \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha} \quad (2)$$

Donde:

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

w: Peso total de caída de tajada.

u: Presión de poros

b: Ancho de la tajada

ϕ : Parámetros de resistencia del suelo.

b. Método de Morgenstern-Price

El método de análisis desarrollado por (Morgenstern & Price, 1965). Puede ser aplicado tanto a superficies de rotura circulares como no circulares. Es un método parecido al método de Spencer, pero en el caso de Morgenstern-Price permite la especificación de las fuerzas entre rebanadas.

Sin embargo, esta suposición de funciones diferentes tiene muy poco efecto sobre el cálculo de factor de seguridad cuando se satisface el equilibrio estático y hay muy poca diferencia entre los resultados del método de Spencer y el de Morgenstern y Price. El método de Morgenstern y Price, al igual que el de Spencer es un método muy preciso prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo.

c. Método de Bishop

(Bishop, 1955), presenta un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo a la expresión:

$$\text{Ecuación} \quad F.S. = \sum \frac{[C'b + (W - Ub) \tan \phi' / ma]}{\sum W \text{sen} \alpha} \quad (3)$$

$$\text{Ecuación} \quad ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F.S.} \right) \quad (4)$$

Donde:

b : ancho de la dovela

W : peso de cada dovela.

$C' \phi$: parámetros de resistencia del suelo

U : presión de poros en la base de cada dovela: $\gamma_w \times h_w$.

α : Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

Como se puede observar en la ecuación, el término factor de seguridad FS se encuentra tanto en la izquierda como en la derecha de la ecuación; se requiere un proceso de interacción para calcular el factor de seguridad.

El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario.

Aunque existen métodos de mayor precisión que el método de Bishop, las diferencias de los factores de seguridad calculados no son grandes. La principal restricción del método de Bishop simplificado, es que solamente considera las superficies circulares. (Suárez Díaz, 1998).

d. Método de Janbú

El método simplificado de Janbú se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante. Janbú considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección F_0 . El factor F_0 depende de la curvatura de la superficie de falla. Estos factores de corrección son solamente aproximados y se basan en análisis de 30 a 40 casos.

En algunos casos, la suposición de F_0 puede ser una fuente de inexactitud en el cálculo del factor de seguridad. Sin embargo, para algunos taludes la consideración de este factor de curvatura representa el mejoramiento del análisis.

El método de Janbú solamente satisface el equilibrio de esfuerzos y no satisface el equilibrio de momentos. De acuerdo con Janbú (ecuación modificada):

$$\text{Ecuación} \quad F.S. = \frac{F_0 \left\{ [C'b + (W - Ub) \tan \phi] \frac{1}{\cos \alpha ma} \right\}}{\sum W \tan \alpha} \quad (5)$$

$$\text{Ecuación} \quad ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F.S.} \right) \quad (6)$$

Donde:

F_0 = depende de la curvatura de la superficie de falla

b : ancho de la dovela

W : peso de cada dovela.

$C' \phi$: parámetros de resistencia del suelo

U : presión de poros en la base de cada dovela: $\gamma_w \times h_w$.

α : Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

e. Método de Spencer

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

La inclinación específica de estas fuerzas entre partículas, es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Spencer inicialmente propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender fácilmente a superficies no circulares. Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad F y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas Θ .

una vez se obtienen los valores de F y θ se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y sencillo para el cálculo del factor de seguridad. (Suárez Díaz, 1998).

2.3.7. Sistema de clasificación de suelos.

Los sistemas de clasificación del suelo (SUCS, 2007), se dividen en grupos y subgrupos con base en propiedades ingenieriles comunes tales como la distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico.

Los dos sistemas principales que se utilizan en la actualidad son el sistema AASHTO y el sistema unificado de clasificación de Suelos SUCS.

2.3.7.1. Sistema de clasificación (AASHTO).

El sistema del departamento de Caminos de U.S.A., introducido en 1929 (AASHTO). Adoptado por la Association of State Highway and Transportation Officials entre otras. Es de uso especial para la construcción de vías, en especial para manejo de subrasantes y terraplenes.

En esta clasificación los suelos se clasifican en siete grupos (A-1, A-2, A-3... A-7), según su granulometría y plasticidad. Más concretamente, en función del porcentaje que pasa por los tamices n 40.

Estos siete grupos se corresponden a dos grandes categorías de suelos, suelo granulares (con no más del 35% que pasa por el tamiz n 200).

Criterios de clasificación

- ✓ Los ensayos necesarios se reducen a análisis granulométricos (tamices n 10,40 y 200 ASTM).
- ✓ Determinación de los límites de Atterberg.
- ✓ Determinación del Índice de Plasticidad.
- ✓ Cálculo de índice de grupo (IG).

2.3.7.2. Sistemas de clasificación (SUCS).

El sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS, 2007), es un sistema de clasificación de suelos usados en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo.

Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras. Cada letra es descrita debajo con la excepción de PT. Para clasificar el suelo hay que realizar previamente una granulometría del suelo mediante tamizado u otros. También se le denomina clasificación modificada de Casagrande.

Originalmente propuesto por Casagrande de 1942 para la construcción de aeropuertos. El sistema fue revisado en 1952 y adoptado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos. Es ampliamente utilizado en trabajos de geotecnia (ASTM).

Criterios de clasificación

- ✓ Porcentaje que pasa a través del tamiz n 200 (esta es la fracción final).
- ✓ Porcentaje de fracción gruesa para el tamiz n 4.
- ✓ Coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura (para suelos con 12% que pasan a través del tamiz n 200).
- ✓ Límite líquido o índice de plasticidad de la porción de suelos que pasa a través del tamiz n 40 (para suelos con 5 & ó más que pasan a través del tamiz 200).

Categorías de clasificación

- a) Suelos de grano grueso:
 - Gravas y arenas naturales con menos del 50% que pasa tamiz n 200.
 - Prefijos G o S (G: grava o S: arenas).
- b) Suelos de grano fino
 - Aquellos con más del 50% que pasa tamiz n 200.
 - Prefijo M para limos inorgánicos
 - Prefijo C para arcillas inorgánicas
 - Prefijo O para limos y arcillas orgánicos
 - Símbolo Pt para turba, estiércol y suelos altamente orgánico.

Categorías de clasificación sufijos

- c) Depende Cu y Cc:
 - W: Bien graduado
 - P: Mal graduado
- d) Depende de Ll
 - L: baja plasticidad
 - H: Alta plasticidad

2.3.8. Programas informáticos para análisis de inestabilidad de talud

En la actualidad se encuentra un gran número de programas y aplicaciones las cuales son de gran eficiencia para elaborar, analizar e interpretar la estabilidad de un talud permitiendo hacer uso de simulaciones de cargas externas y presencia de sustancias acuosas, lo cual es difícilmente determinar con sistemas manuales, para lograr un mejor proceso del trabajo fue de mayor seguridad el uso y manejo de softwares tales como:

2.3.8.1. Programa SLIDE 6.0

SLIDE es un software de análisis de Estabilidad de Taludes en 2D que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad. Incluye análisis de agua subterránea por elementos finitos en estado estacionario, e integra capacidades de análisis de sensibilidad, probabilísticos y análisis retrospectivos.

Este programa también permite modelar modelos geotécnicos, será utilizado con el fin de modelar el talud, con el cual se obtiene el factor de seguridad.

2.3.8.2. Programa RES2DINV (Eléctricos y Electromagnéticos)

El programa RES2DINV a 32 o 64 bits usa el método de inversión Gauss-Newton para producir un modelo en 2 dimensiones del subsuelo a partir de los datos de resistividad aparente. Es completamente automático y el usuario ni siquiera debe suministrar un modelo de inicio.

El programa escoge automáticamente los parámetros óptimos para un conjunto de datos determinado. De todas maneras, los parámetros que afectan al proceso de inversión pueden ser modificados por el usuario. El filtro de suavizado se puede ajustar para enfatizar las variaciones de resistividad en las direcciones vertical u horizontal. Se proporciona dos variaciones diferentes del método smoothness constrained least-squares. Uno optimizado para áreas donde la resistividad de la subsuperficie varia de una manera suave y otro optimizado para áreas con límites claros. También en el programa está disponible una opción de inversión de datos robusta para reducir el efecto de puntos de datos ruidosos. Se puede incluir también la información de resistividad de pozo y otras fuentes para restringir el proceso de inversión.

2.3.9. Fundamentos de los métodos geofísicos a utilizar

2.3.9.1. Prospección eléctrica

La exploración del subsuelo a partir de las mediciones de resistividad eléctrica (Métodos Geo-eléctricos), constituye una técnica bien conocida durante los últimos 50 años. Se trata de una metodología habitualmente empleada en ingeniería geológica, minera, geotecnia, obras públicas, arqueología, y medioambiente.

A grandes rasgos, los métodos geoelectricos consisten en introducir corriente en el terreno y medir voltaje producido en ciertos puntos determinados de la superficie. A partir del valor de la corriente inducida y del voltaje medido, se puede obtener la resistividad del material o zonas del subsuelo. Cada tipo de material o estructura presenta un rango de resistividad característico, cuyo valor sirve de base para la interpretación de resultados.

El método geoelectrico fue propuesto por primera vez por el ingeniero francés schlumberger, en el año 1912. En esencia, consiste en hacer pasar por el subsuelo una corriente eléctrica y determinar el potencial que produce entre 2 puntos de la superficie del terreno.

El objetivo de este método se basa en obtener secciones 1-D, 2-D, 3-D de resistividades reales del subsuelo, modelo a partir del cual podremos determinar la presencia de filtración de agua en profundidad, estabilidad del suelo, anomalías mineralizadas, la localización de estas áreas en donde tengamos una anomalía característica del valor de la resistividad del terreno. Para ello será preciso el empleo de un programa de inversión, con cual transformar las resistividades aparentes obtenidas de la campaña de campo, a valores de resistividad real del terreno.

Los métodos eléctricos y electromagnéticos se basan en la testificación del terreno aprovechando sus propiedades eléctricas o electromagnéticas (Tabla 3). Existen infinidad de configuraciones de campo a la hora de proponer métodos eléctricos. La diferencia entre las distintas configuraciones reside en el tipo de trasmisor y receptor de corriente utilizados en el campo, y en cómo se sitúen en el campo estos transmisores o receptores.

Los métodos eléctricos tienen la ventaja de ser muchos más sencillos en el procesado y la interpretación, pero su mayor desventaja es que cualquier material aislante o muy conductivo puede apantallar los materiales que lo rodean (Anexo 1). Mientras que los métodos electromagnéticos tienen la ventaja de poder recoger medidas, aunque en la zona existan materiales muy resistivos e incluso muy conductivos, dependiendo del espesor de las capas.

Tabla 4.

Ejemplo de resistividades verdaderas en distintos materiales.

Resistividad verdadera de rocas, suelos y minerales (Loke , 2004).			
Material	Resistividad verdadera	Material	Resistividad verdadera
Granito	$6.10^3 - 10^6 \Omega.m$	Arcilla	1 – 100 $\Omega.m$
Esquisto	$30 - 10^4 \Omega.m$	Marga	4 – 90 $\Omega.m$
Mármol	$100 - 4.10^8 \Omega.m$	Depósitos aluviales	10 – 900 $\Omega.m$
Cuarcita	$100 - 3.10^8 \Omega.m$	Agua dulce	10 – 100 $\Omega.m$
Pizarra	$800 - 5.10^7 \Omega.m$	Agua marina	0.3 $\Omega.m$
Caliza	$70 - 7.10^3 \Omega.m$	Esquistos grafitico	$10^{-4} - 7.10^{-3} \Omega.m$
Arenisca	$10 - 6.10^3 \Omega.m$	Carbón antracitico	10-3 – $2.10^5 \Omega.m$

Fuente: (Loke , 2004).

2.3.9.2. La resistividad eléctrica

(Loke , 2004), Cuando introducimos corriente eléctrica en el terreno, ésta se puede propagar de tres maneras a través del subsuelo: conducción dieléctrica (asociada a materiales muy poco conductivos o aislantes), conducción electrónica (asociada a materiales con electrones libres, i.e. los metales) y conducción electrolítica (asociada al movimiento de los iones presentes en el fluido intersticial del terreno). La conducción electrolítica es el modo

de propagación más importante, y en el que se basa los métodos de resistividad. El método de resistividades es, sin duda, en todas sus modalidades el más importante de todos los métodos eléctricos. El 70% de los estudios de geofísica realizados para estudios hidrogeológicos utilizaron los métodos eléctricos. Este método permite suministrar una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo y se puede determinar aproximadamente la distribución vertical de su resistividad. El método de resistividades permite no sólo el estudio de formaciones sus horizontales, sino también la determinación de formaciones subverticales (fallas, filones, zonas de contacto, etc.).

2.3.9.3. Factores que afectan a la resistividad

La resistividad eléctrica es un parámetro que varía en función de las características del terreno. Algunos de los factores que lo influyen son:

- ✓ El grado de saturación del terreno.
- ✓ La temperatura.
- ✓ Porosidad y la forma de los poros.
- ✓ La salinidad del fluido.
- ✓ El tipo de roca.
- ✓ Los procesos geológicos que afectan a los materiales.
- ✓ La presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico.

Es precisamente esta estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, lo que permite el utilizar estos métodos de resistividad en la búsqueda de focos de filtración de agua en el subsuelo. En este sentido, incrementos del contenido en agua del terreno provocarán disminuciones de la resistividad.

En lo que concierne a los otros factores, destacar que la salinidad del fluido, la porosidad del terreno, y la temperatura (si bien éste es un factor poco importante), presentan un comportamiento análogo al del grado de humedad. Un caso curioso es el de la sal, ya que ésta se comporta como un excelente aislante en estado seco, mientras que en disolución confiere al terreno una alta conductividad.

2.3.9.4. Tipos de dispositivos

La geo eléctrica es uno de los métodos geofísicos de prospección con mayor difusión y aplicación en las ciencias de la tierra (Figura 16). Consiste en la inyección de corriente eléctrica (I) al subsuelo y a partir del potencial (ΔV) generado en el mismo se determina la resistencia (R) del suelo. Este valor de resistencia es transformado a un valor de resistividad aparente (ρ_a), a partir de una constante geométrica (K) cuya expresión se da en la (Ecuación 7).

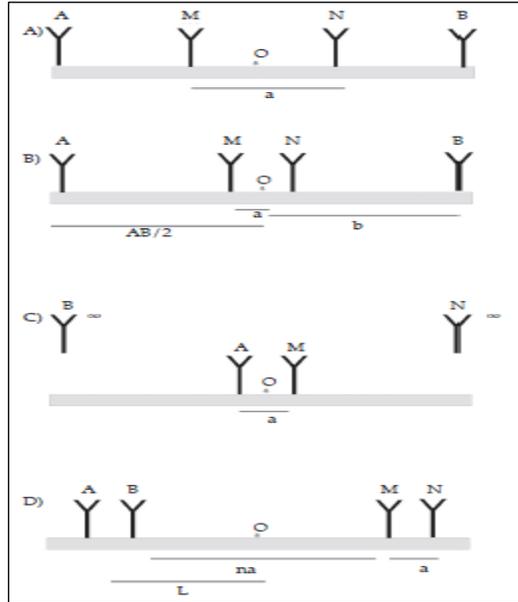
Ecuación
$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (7)$$

El valor final de K para cada medición dependerá del dispositivo empleado y de la separación de los electrodos, tanto de inyección de corriente (A, B) como de medición del potencial (M, N).

Los diferentes tipos de dispositivos empleados en el método geoelectrico se diferencian entre sí por la distancia relativa entre electrodos, y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial. En la figura se muestran los dispositivos empleados con mayor frecuencia: Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo.

Figura 16.

Dispositivos geoeléctricos: A) Wenner; B) Schlumberger; C) polo-polo; D) Dipolo-dipolo. Redibujado.



Fuente: (Loke , 2004).

2.3.9.4.1. El dispositivo Wenner:

Wenner, establece este método de medición de la resistividad de la resistividad del suelo considerando un sistema de cuatro electrodos alineados y simétricos con el punto de medición (Ecuación 7). El coeficiente geométrico se simplifica tal como lo expresa la (Ecuación 8).

Ecuación
$$K = 2\pi\alpha \tag{8}$$

Donde:

α : es la distancia entre los diferentes electrodos, así $AM=MN=NB=\alpha$

una vez efectuada la medición de la resistividad, es necesario desplazar los cuatro electrodos a una nueva separación (equidistante para todos) con el fin de poder realizar la siguiente medición.

2.3.9.4.2. El dispositivo Schlumberger:

Schlumberger, pretendía que la distancia $2a$ que separa los electrodos M y N tienda a cero con el fin de medir el campo eléctrico. En este dispositivo, la relación AB/MN se debe mantener lo más grande posible, en la práctica se tiene que $4 \leq AB/MN \leq 20$, y se cambia la línea MN cuando la medida de la diferencia de potencial es muy pequeña.

El coeficiente geométrico, en este caso se simplifica en la (Ecuación 9).

$$\text{Ecuación} \quad K = 2\pi(a^2 - b^2)/2b \quad (9)$$

2.3.9.4.3. Dispositivo dipolo- dipolo:

Los dispositivos dipolares constituyen una familia caracterizada porque en ellos, los electrodos de corriente (A, B) están lo suficientemente próximo entre sí respecto a la distancia a que se miden sus efectos para que puedan considerarse como un dipolo. Existen dos dipolos, el AB de emisión y el MN de recepción, cuya posición mutua puede ser en principio cualquiera. No obstante, existen ciertas configuraciones que son las más empleadas en la práctica; como el dispositivo polar en el cual los cuatro electrodos son alineados y el dispositivo ecuatorial cuando los dos dipolos son paralelos.

Para el dispositivo dipolo-dipolo el coeficiente geométrico está representado por la (Ecuación 10).

$$\text{Ecuación} \quad K = 2\pi(n - 1) n(n + 1)a \quad (10)$$

Este dispositivo es usado por su gran profundidad de investigación y porque la extensión de cable extendido sobre el terreno es relativamente reducida. Sin embargo, presenta dos inconvenientes que hay que tomar en cuenta:

Requieren de una fuente de corriente muy potente y la mayoría de los resultados son influenciados por las variaciones laterales de facies.

2.3.9.4.4. El dispositivo polo-polo:

En este caso un electrodo de emisión de corriente y otro electrodo de potencial son ubicados lejos tanto entre ellos como de los otros dos electrodos.

En la práctica de campo, estos dos electrodos deben estar al infinito, considerándose al menos 10 veces la distancia α existente entre los otros dos electrodos de medición; por ello, el único termino que interviene en el coeficiente geométrico es $1/AM$ y el coeficiente geométrico se simplifica en la (Ecuación 11).

$$\text{Ecuación} \qquad K = 2\pi\alpha \qquad (11)$$

2.3.9.5. Tomografía eléctrica

La Tomografía Eléctrica es un método de resistividad multielectrónico basado en la modelización 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos o diferencias finitos). Cabe destacar que actualmente se está avanzando en la modelización 3D.

La técnica de la tomografía eléctrica emplea los valores de resistividad aparente medidos con los dispositivos geoelectricos sobre la superficie del terreno, para generar imágenes del subsuelo donde se representan los valores de la resistividad verdadera de las diferentes zonas del subsuelo. La relación entre la resistividad aparente y la resistividad verdadera es una relación compleja. Para determinar la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de la resistividad aparente, se aplica la técnica de la “inversión” (Loke , 2004).

La aparición de la Tomografía eléctrica ha supuesto un salto cualitativo espectacular con respecto a los métodos de resistividad convencionales.

Este avance se debe fundamentalmente a dos razones:

- ✓ En primer lugar, porque estos métodos convencionales solo utilizan 4 electrodos, siendo necesario para cada medida variar manualmente sus posiciones en el terreno

(proceso relativamente lento y pesado). En cambio, el método de Tomografía eléctrica es una técnica multielectrónico, en el que todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado.

Esto nos permitirá poder realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en un breve espacio de tiempo, obteniendo por tanto modelos 2D de gran resolución.

- ✓ En segundo lugar, porque el empleo de técnicas numéricas nos permitirá poder procesar eficazmente todo este gran volumen de información.

Con tomografía eléctrica se entiende la visualización de alguna propiedad eléctrica del subsuelo (resistividad), mediante secciones continuas, generalmente verticales, pero ya se trabaja en tres dimensiones. Esta metodología es intensiva y de alto detalle o resolución y permite no solamente la prospección de los acuíferos, sino que mediante su observación en el tiempo (4D), se puede ver la dinámica hídrica. Se está usando, por ejemplo, en controles de contaminantes.

Existen también configuraciones de campo en malla, a distintas profundidades cuando se dispone de galerías o medidas en sondeos (digraffas). Con todo esto se puede conseguir información de secciones y plantas a distinta profundidad.

2.3.9.6. Geofísica eléctrica

El objetivo de la geofísica eléctrica es encontrar un modelo de distribución de resistividades verdaderas en el subsuelo, que genere una respuesta similar a los valores de resistividad aparente medidos. Las relaciones matemáticas entre los valores de resistividad aparente medidos y la resistividad verdadera del subsuelo se obtienen a partir de métodos de elementos o diferencias finitos.

El procedimiento de generación de una tomografía eléctrica, parte de los datos de resistividad aparente medidos, representados en forma de pseudo perfil. A continuación, se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo, y resolviendo lo que se define como cálculo del problema directo, se llega al modelo de resistividades aparentes

que se derivaría del mismo. Estas resistividades aparentes se comparan con las realmente medidas, y se calcula el error cometido. A través de este error se modifica el modelo hipotético real de resistividades verdaderas, y se repite el proceso anterior. De este modo, tras una serie de iteraciones, se consigue un modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que da explicación a las resistividades aparentes medidas.

Para ello será preciso el empleo de un programa, con el que se transforma las resistividades aparentes obtenidas de la campaña de campo, a valores de resistividad real.

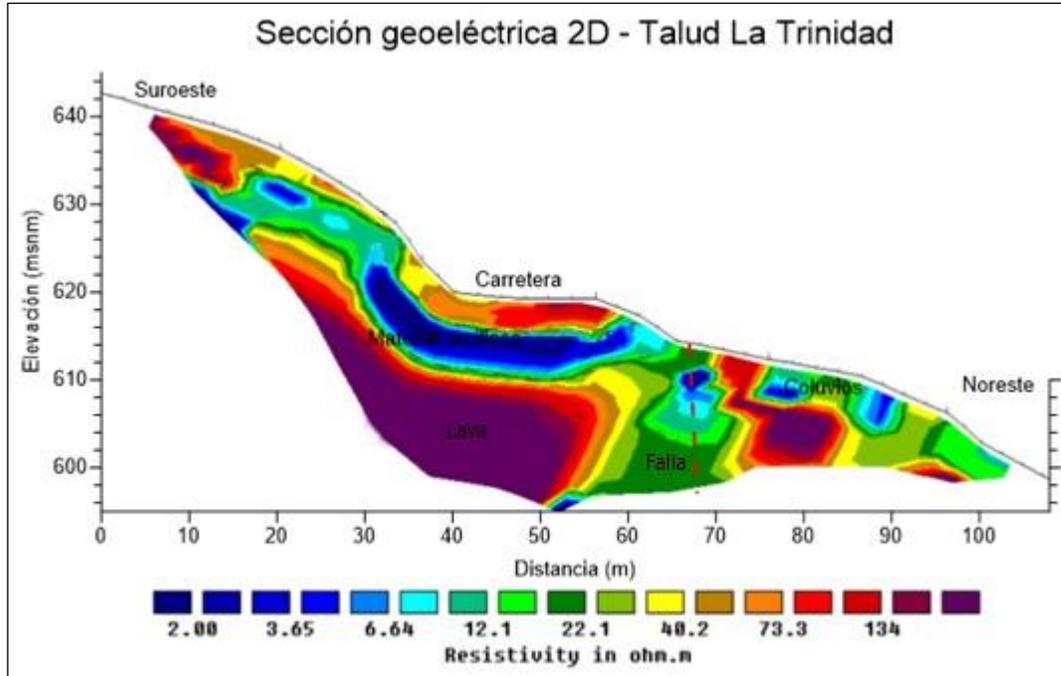
2.3.9.7. Elaboración de secciones geo eléctricas en inestabilidad de talud

Este método de prospección eléctrica se basó en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de perfiles longitudinales, con una separación determinada, todos estos electrodos se conectan simultáneamente al equipo de medida y, mediante un programa secuencial específico para cada trabajo, el aparato ordena cuales deben ser los conjuntos de cuatro electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición.

Como resultado se obtiene una sección geo eléctrica muy expresiva ya que muestra los valores de resistividad de manera continua mediante colores y refleja los cambios de este parámetro con cambios de color más bruscos o graduales cuanto más neta o más transicional, respectivamente, sea la discontinuidad que manifiestan, lo cual permite una observación bastante clara de los diferentes aspectos del subsuelo: litología, fracturas, etc. (Figura 17).

Figura 17.

Ejemplo de un Modelo de Resistividad Eléctrica en taludes.



Fuente: Elaboración propia.

En el plano horizontal la sección geofísica presenta una zona de discontinuidad, una de mayor extensión, al este. Después de la discontinuidad de la parte este, todo el corte se observa muy quebrado o discontinuo. En el plano horizontal, de acuerdo con la morfología regional, la estructura detectada tiene una orientación Noroeste-Sureste.

2.4. Hipótesis

Mediante una eficiente evaluación de estabilidad de talud en el área de estudio, se podrá prever el comportamiento del talud y calcular el factor de seguridad, con ayuda de los resultados empleados en cada uno de los objetivos ya planteados, esto con fines de garantizar la seguridad y determinar si la ladera es estable o inestable en sus condiciones actuales.

CAPÍTULO III

3.1. Diseño Metodológico

3.1.1. Enfoque de investigación

El enfoque de esta investigación es de tipo mixta, debido a que consiste en la integración de dos métodos; cuantitativo y cualitativo.

Cualitativo, porque se hizo una descripción geológica de campo donde obtuvo información litológica y estructural del talud, se determinó el tipo movimiento que este presenta, posteriormente se realizó una descripción geotécnica en laboratorios de las muestras recolectadas en campo

Cuantitativo, ya que a partir del levantamiento del talud se obtuvieron valores numéricos de las dimensiones, lo cual se determinó mediante métodos geotécnicos y geofísicos que conllevó a realizar un modelamiento 2D, a través de softwares: SLIDE y RES2DINV, el cual nos permitió obtener: morfología, espesores de las capas, resistividades del subsuelo y a su vez el factor de seguridad del talud.

3.1.2. Tipo de estudio

El tipo de estudio se efectuó en un marco descriptivo.

Descriptivo porque implica la caracterización de los suelos y rocas, identificando texturas, composición y clasificación, tipo de movimiento que se encuentra sometido el talud, análisis de descripción geotécnica y geofísicas que determinarán el factor de seguridad de este.

3.1.3. Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el cerro La Gavilana, km 142, carretera NIC-01, departamento de Estelí.

3.1.4. Universo y muestra

- **Universo**
- El talud crítico a deslizamientos localizados en el cerro la Gavilana, km 142, departamento de Estelí.
- **Muestra**
- Los diferentes tipos de suelos y rocas que conforman el talud, en el tramo del cerro la Gavilana.

3.1.5. Variables y operacionalización de variables

3.1.5.1. Variable independiente

Estabilidad del talud.

3.1.5.2. Variable dependiente

Factor de seguridad.

Tabla 5.

Definición y operacionalización de variables.

Objetivos específicos.	Variable conceptual.	Subvariables o Dimensiones.	Variable operativa o indicador	Técnicas de recolección de datos e información
Describir las condiciones geológicas presentes en el talud, para identificar las unidades lito estratigráficas del área.	-Geología estructural. -Topografía. -Litología.	-Fallas y fracturas -Técnicas Geoestadísticas. -Tipos de rocas y suelos.	-Tipo de material que hay en cada estrato. -Mediciones de fracturas. -Altura, longitud y pendiente en metros.	Técnicas de observación, registro y recolección de datos geológicos en campo.
Definir los factores desencadenantes y condicionantes presentes en el área de estudio, para conocer los factores que genera el movimiento del talud.	-Geología -Geomorfología. -Actividad humana.	-Tipo de suelo. -pendientes, altura. -Deforestación, devastación de taludes.	-Lluvia -Tipo de roca o mineral. -Vegetación.	-Revisión Bibliográfica.
Determinar la estabilidad del talud mediante análisis dinámico por elementos finitos y equilibrio límite, aplicando ensayos de mecánica de suelos, para conocer el factor de seguridad.	-Propiedades físico-mecánicas del suelo. -Propiedades físico-mecánicas de las rocas.	-Granulometría. -Esfuerzo de compresión o extensivos. -Peso unitario. -Gravedad específica.	-Clasificación de suelos. -Resistencia del material.	Evaluación en campo por medio de muestreo de suelo y análisis en laboratorio, aplicación de software.
Elaborar perfiles geofísicos en el talud, aplicando el método de tomografía eléctrica (ERT), para conocer el corte geoelectrico y la distribución lateral de las resistividades eléctricas del subsuelo.	-Propiedades físicas de los materiales del subsuelo -Prospección geofísica.	-Estructura del terreno o subsuelo -Resistividad eléctrica de las rocas. -Anomalías	-Fallas o fracturas -Comportamiento eléctrico de las rocas.	Ensayos de tomografía eléctrica (ERT) en los puntos críticos del área y aplicación del software RES2DINV.
Proponer medidas u obras de adaptación y/o mitigaciones adicionales a las existentes, para implementar una posible solución en el sitio de estudio.	-Medidas de mitigación para la estabilidad de laderas.	-Factor de seguridad.	-Encontrar un factor de seguridad estables.	Modelos ejecutados a través del software SLIDE 6.0.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.6. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos e información

3.1.6.1. Trabajo de gabinete

Es la etapa clave en el desarrollo de esta investigación, para realizar la misma, se revisaron múltiples bibliografías referente al tema de estudio, donde se realizó búsqueda en el centro de información del MTI (Ministerio de Transporte e Infraestructuras), por lo cual se obtuvo acceso a revistas, trabajos, informes y proyectos. Utilizando el estudio de “Revisión y actualización, del estudio de reducción de vulnerabilidad en las carreteras principales de la República de Nicaragua, preparado por el (JICA, 1998)” y sus subproductos del proyecto mismo, actualizado en el 2014.

También se recopiló información de internet relacionada con este tema contribuyendo significativamente al enriquecimiento de información. En esta etapa se adquirió toda la información necesaria para esta investigación como son las características generales de la zona de estudio: geología y topografía.

3.1.6.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo se ejecutó con el objetivo de delimitar el área de estudio. La zona de estudio corresponde a la hoja topográfica Estelí (2955-III), por lo cual abarca el cerro La Gavilana, donde se describieron los procesos de removimiento de masas existentes con mayor amenaza en la zona, teniendo en cuenta la ubicación geográfica del punto. Por lo tanto, se hizo un reconocimiento geológico permitiendo obtener información de litología y parámetros estructurales (fracturas, fallas, rumbo y buzamiento), a partir del uso de herramientas como: brújula y libreta de campo. Una vez identificado el sitio crítico de inestabilidad se procedió a cuantificar el área de cada uno, mediante la toma de amplitud y longitud medidos con cinta métrica.

Mediante observaciones se analizó y se mencionó los factores detonantes (pendiente, precipitación y acción antrópica). Se extrajeron muestras de rocas en forma manual en cada talud, embolsándola y georreferenciándola con peso estimado de 2 a 3 kg, lo cual se llevaron a laboratorio para aplicar ensayos de clasificación granulométrica por método SUCS y AASHTO.

También se trazaron perfiles geofísicos por el método de tomografía eléctrica en el sitio.

3.1.7. Procedimientos para la recolección de datos e información

En esta sección se hizo una descripción de los procedimientos y herramientas usados para el procesamiento y análisis de datos disponibles. Para determinar los parámetros del suelo, necesarios para el cálculo de factor de seguridad.

En esta fase se elaboró un mapa base de ubicación, que facilitó la localización del punto de inestabilidad en el área de estudio. Partiendo de este mapa, se visitó el sitio, para realizar una caracterización geológica que abarco la litología y parámetros estructurales (fracturas, fallas, rumbo y buzamiento), luego se procedió a ejecutar dos perfiles geofísicos de tomografía eléctrica ERT, uno en paralelo a la carretera y el otro en dirección al deslizamiento, realizado esto, en la parte de geotecnia, se recolecto muestras de rocas y de suelo, de aproximadamente 2 a 8 k en puntos de muestreos del talud a estudiar, y por último se levantaron datos de altimetría y planimetría para obtener la geometría del talud, para su debido análisis en gabinete.

La recolección de los datos geotécnicos en campo se realizó mediante muestreo de suelo por lo tanto las herramientas utilizadas son:

- ✓ Mazo de 5 libras.
- ✓ Bolsas plásticas de muestreo.
- ✓ Etiquetas.
- ✓ Marcadores.
- ✓ Cinta métrica.
- ✓ Balanzas.

En la recolección de datos de tomografía eléctrica (ERT), los instrumentos utilizados fueron:

- ✓ Electrodo: no son más que unas barras metálicas cuyo número variará en función del problema.
- ✓ Cable: es de gran longitud, con conexiones cada cierto intervalo a fin de poder conectar los electrodos.
- ✓ Conectores: son unos pequeños cables de cobre con pinzas en los extremos. Son los que se encargan de conectar los electrodos al cable.
- ✓ Ordenador portátil: en él tenemos el software que nos permite por un lado determinar las variables de trabajo: tipo de dispositivo electrónico, número de electrodos, espaciado entre ellos, número de medidas a realizar, etc., y por otro lado procesar y visualizar los resultados obtenidos.
- ✓ Unidad central (GEPS 2000): es el cerebro de todo el dispositivo. Se encarga de ejecutar de forma automática toda la secuencia de medidas predeterminada, verificar el buen estado de las conexiones, así como almacenar digitalmente todos los resultados de campo.
- ✓ Una planta de combustible: es la fuente de alimentación de todo el sistema del equipo.
- ✓ GPS: instrumento de precisión, por lo tanto, se ocupó para realizar los puntos de coordenadas.
- ✓ Mazo: Instrumento manual.

En la (Foto 14), se muestran en detalle los elementos que conforman el dispositivo de medida. Corresponden al material utilizado en el estudio del talud La Gavilana, en donde el resistivímetro utilizado es el GEPS modelo 2000 dicho equipo corresponde a la empresa (ACEGSA-GEOINGENIERIA), presenta un sistema de registro de resistividad automático.

3.1.8. Plan de análisis y procesamientos de datos

Una vez terminada la etapa de campo, se analizó y se procesó los datos obtenidos que permitió realizar una columna lito-estratigráfica en el programa STRATER 5, logrando clasificar los diferentes tipos de unidades de rocas encontradas.

Con los datos que se midieron las estructuras de fracturamiento, se desarrolló unas rosetas de fracturas para definir la dirección de esfuerzo máximo que se encuentra afectando en el sitio de estudio, ejecutándose mediante los programas ROZETA 2.0 y STERONET 10.0.

En los ensayos de clasificación granulométrica por método SUSC se desarrollaron en el laboratorio “Geotécnico del IGG-CIGEO/ UNAN-MANAGUA”. (Instituto de Geología y Geofísica), con el fin de tener parámetros necesarios para realizar el cálculo de inestabilidad de talud logrando determinar el factor de seguridad.

Por último, dado por terminada las mediciones de tomografía eléctrica se analizó e interpretaron los datos obtenidos, logrando apreciar las distintas resistividades del subsuelo, espesor y geometría del cuerpo desplazado en el talud.

Todas estas mediciones y datos agrupados fueron procesados y modelados con la ayuda de programas como: STRATER, este programa nos permitió elaborar una columna litológica del área de estudio. Utilizando software para determinar y analizar la inestabilidad de suelo y rocas, dándonos un modelamiento de equilibrio límite del talud “SLIDE 6.0.” Para realizar una modelación bidimensional del talud y conocer las propiedades resistivas y espesores de los materiales en el subsuelo “RES2DINV y SURFER”.

CAPITULO IV

4.1 Análisis discusión de resultados.

El trabajo investigativo consistió en la fase: Geológico, geotécnico, geofísico y topográfico, donde se aplicaron diferentes metodologías presentes en este capítulo, se realizó la interpretación de los resultados obtenidos en campo a partir los análisis en gabinete a la información del levantamiento aplicando los métodos ya mencionados en los objetivos, por lo tanto, se definieron los programas generales que se utilizaron para obtener los resultados del talud La Gavilana.

4.1.1 Análisis geológico.

Las rocas del área de estudio pertenecen al Grupo Coyol y se distinguen por presentar un relieve abrupto, escarpado y característico de mesetas escalonadas que fue originado por depósitos de lavas andesíticas e ignimbritas con alto grado de fracturamiento.

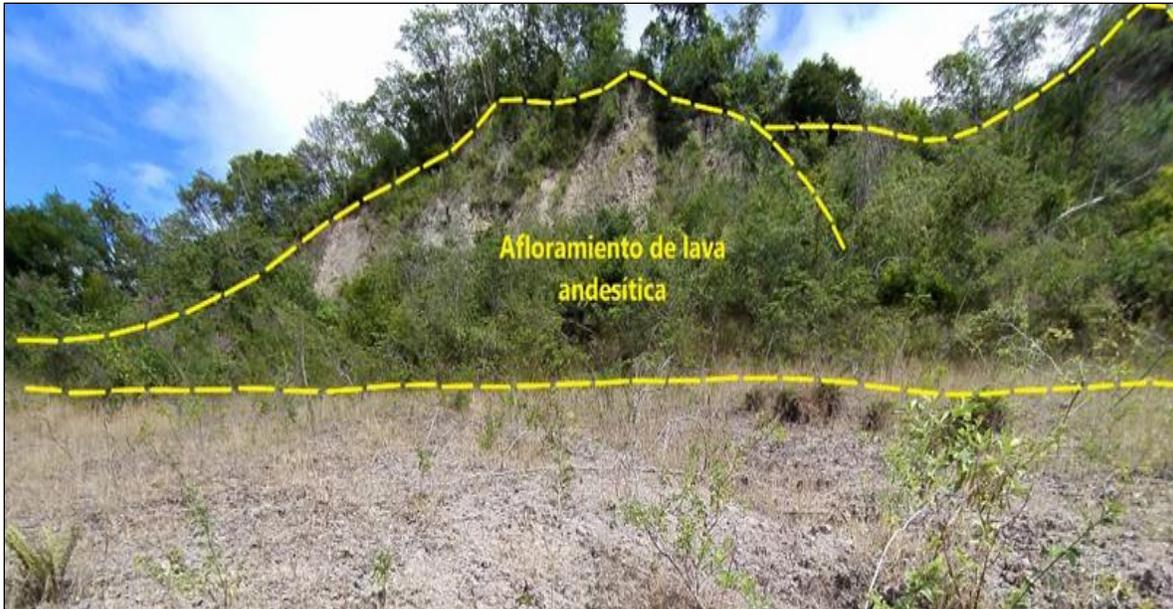
El talud tiene una longitud de 220 metros y una altura de 78 metros, está conformado por 5 estratos de origen volcánico-sedimentario, (Figura 18).

4.1.1.1. Unidades litológicas del área de estudio.

Las rocas que afloran en el área pertenecen al grupo Coyol Inferior dentro de la Formación Andesítica Ignimbrita o aglomerado (Tmca). La roca andesita identificada en la ladera es de tonalidad gris claro a oscuro, está compuesta por minerales de plagioclasa, anfíboles y biotita en traza, esta se encuentra sobre yaciendo sobre delgadas capas de coluviales (Qc) y aglomerados deleznable. Cabe mencionar en la parte superior del afloramiento encontramos un horizonte de suelo de color marrón con textura limo-arcilloso con abundante materia orgánica de espesor de 0.5 metros (Foto1).

Foto 1.

Litología del talud. Coordenadas UTM-WGS84: E572883-N1443302.



Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior del talud se encontró un derrumbe producido por correntías de aguas (Foto 2), se encuentra comprendido por rocas andesíticas de matriz intemperizada, este afloramiento cuenta con un espesor de 15 m. Luego se procedió a la recolección de muestras para su debido análisis en laboratorio.

Foto 2.

Deslizamiento superficial de detritos. Coordenadas-E572883-N1443302.



Fuente: Elaboración propia.

En esta unidad litológica, se especificó como un tipo de depósito coluvial (Qc), con fragmentos de rocas desordenados (Foto 3), presentando clastos con tamaños de 5 a 10 cm de texturas subangulosas, el afloramiento tiene un espesor de 4 metros proveniente de la roca donde se han depositado pendiente abajo formados por acción de la gravedad, erosión de la roca madre, y la acción del agua.

Foto 3.

Deposito Coluvial (Qc), Coordenadas E572870-N1443210.



Fuente: Elaboración Propia

El desplazamiento vertical es importante en relación con la horizontal del terreno, por lo cual los tipos de movimientos que se pueden producir son: Deslizamientos, derrumbes, en la siguiente (Foto 4) se puede observar el escarpe superior comprendido por rocas andesíticas y el escarpe inferior comprendido por depósitos coluviales.

Foto 4.

Vista general del escarpe principal y secundario del talud del área de estudio, Coordenadas E572810-N1443137.

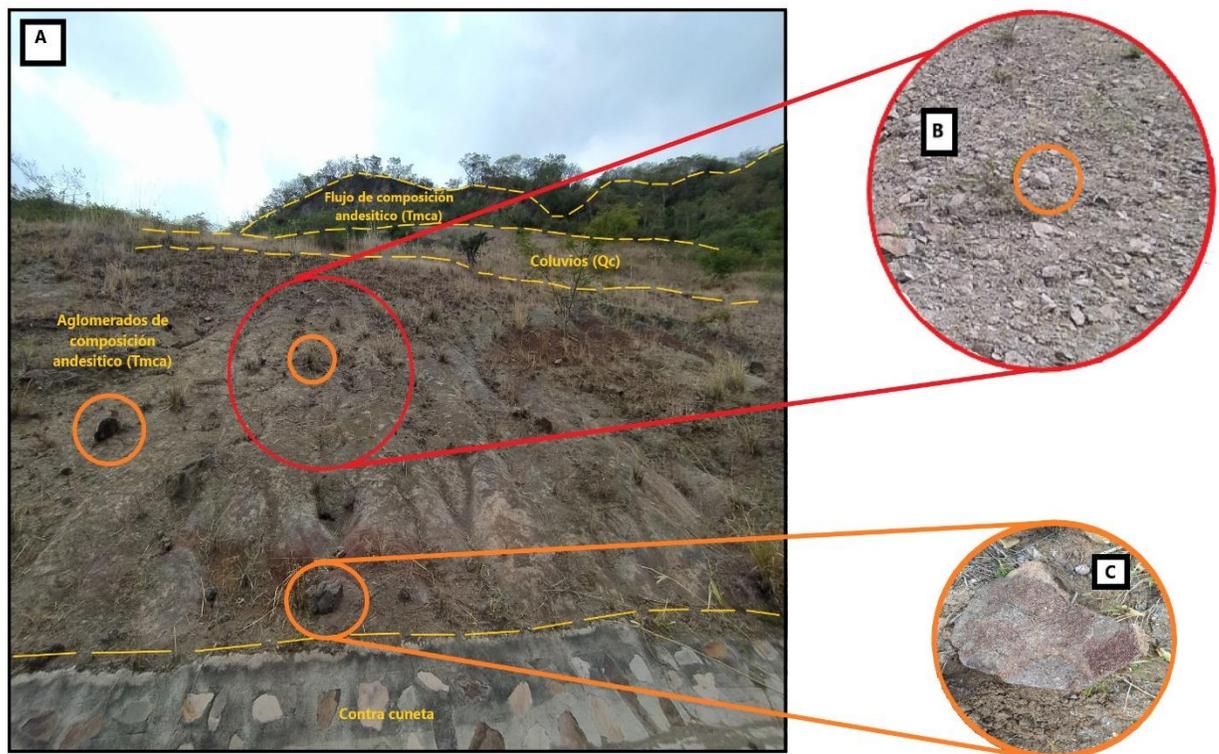


Fuente: Elaboración Propia.

El siguiente punto del talud principal se caracterizó el tipo de material que aflora sobreyaciendo los aglomerados andesíticos, (Foto 5), con un espesor de 6 mtrs, los cuales tienen una deposición irregulares con las andesitas, en el afloramiento se observaron fragmentos de rocas angulosas a redondeados de composición andesítica de diversas formas y tamaños, por tanto es asociado a flujos de lava, los cuales también presentan fracturas con buzamiento con dirección al corte de la carretera principal, formando zonas de debilidades en donde circulan o drenan aguas que se infiltran durante la época lluviosa (Foto 6).

Foto 5.

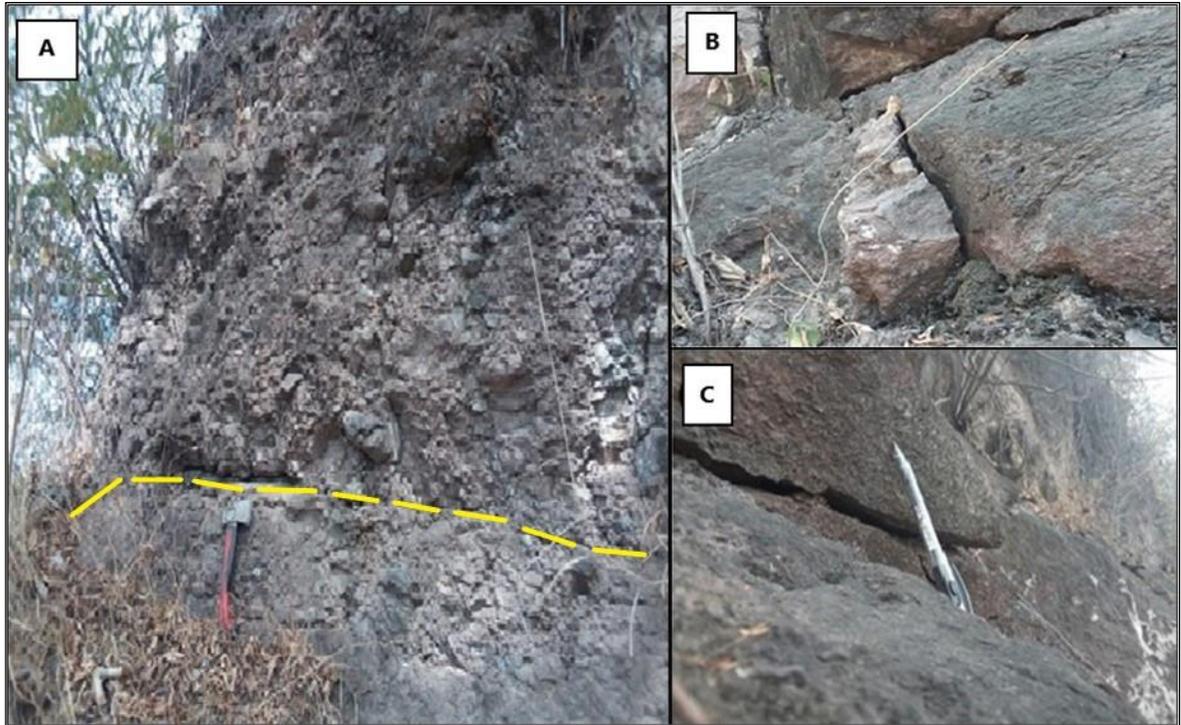
Vista general de escarpes secundarios del talud principal, donde A: se presenta el cambio de la litología con sus clasificaciones correspondientes, B: Vista previa del aglomerado andesítico de color rojizo presenta oxidación moderada con alta grado de intemperismo, C: vista previa de los fragmentos angulosos de roca andesítica de textura porfírica y matriz meteorizada, Coordenadas (E572825-N1443138).



Fuente: Elaboración propia.

Foto 6.

Vista general de zonas de debilidades, donde A: Se presenta un contacto subhorizontal de estrato de aglomerado andesítico Coordenadas E573292-N1442649. B y C: vista previa de fracturas en rocas andesíticas interperizadas, Coordenadas E573280-N1442702.



Fuente: Elaboración Propia.

Esta parte del talud se encuentra cubierto por un enmallado y escalonado espesor de 40 metros, esta formación presenta un amplio fracturamiento y con indicios de deslizarse por el debilitamiento de esta estructura, en esta área se tomó muestras de rocas con peso aproximado de 2 a 5kg, para su debido análisis de laboratorio (Foto 6).

Foto 7.

Bolones de roca andesítica, depositada en la parte inferior del talud principal, con coordenadas E572803-N1443270.



Fuente: Elaboración propia.

En la dirección NW de la parte inferior del talud, se encontró bolones de rocas andesíticas, con un diámetro de 7 a 11 mts, proveniente de la parte superior, provocando derrumbes de rocas masivas (Foto 7), en dirección a la carretera principal, en esta parte se determinó un tercer escarpe (Foto 8).

Foto 8.

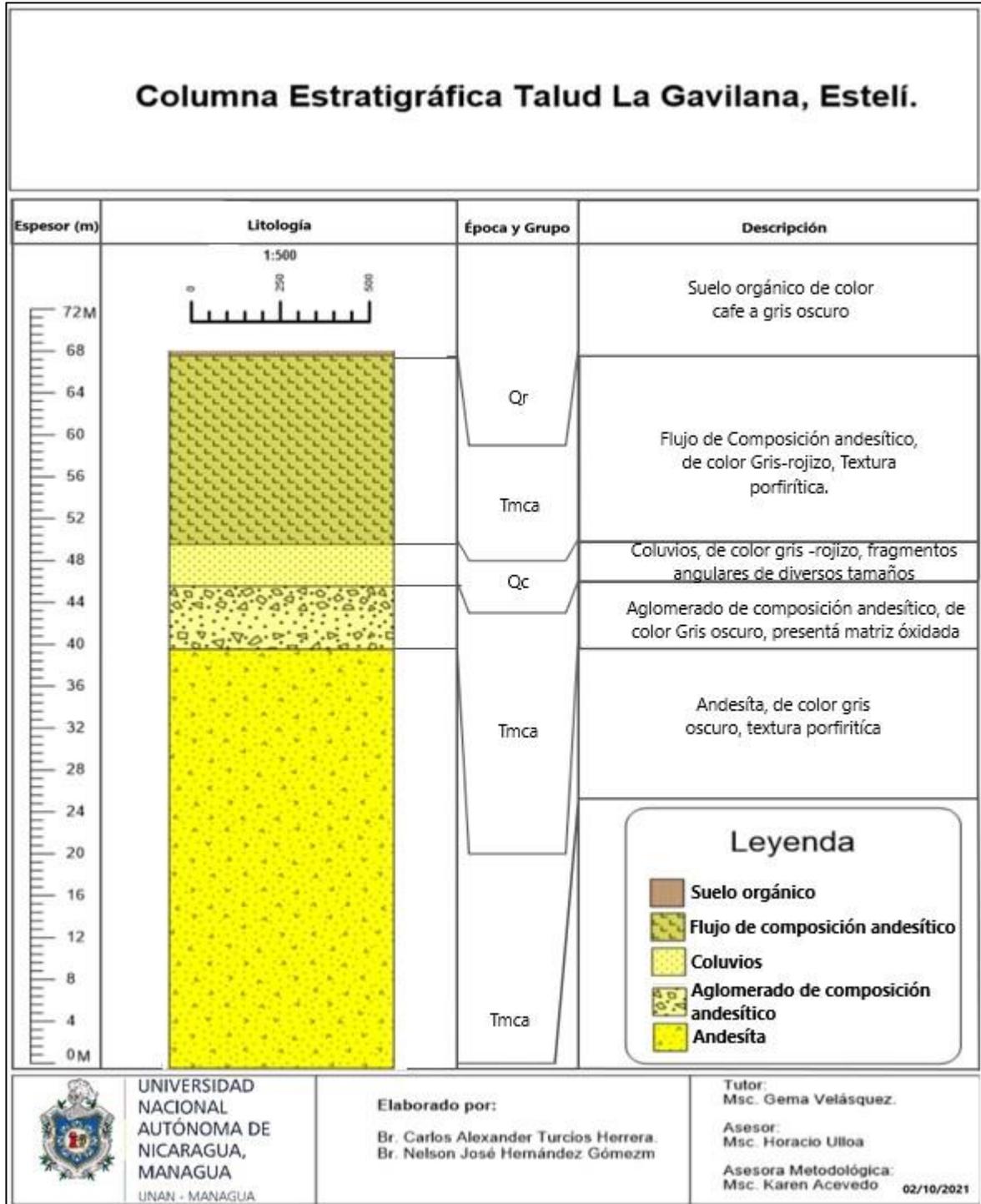
Vista previa de un tercer escarpe del talud principal, se observan bolones de rocas andesíticas con diámetro de 2 hasta 5 mts, estos han sido arrastrados mediante corrientillas de agua y acción de la gravedad, coordenadas E572803-N1443270.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 18.

Columna estratigráfica donde se presentan los diferentes estratos que comprende el talud.



4.1.1.2. Fracturas presentes en el talud

El área de estudio es afectada por una intensa actividad tectónica, ya que una de las principales características presentes en el talud es su alto grado de fracturamiento, esto tiende a ser un factor muy importante respecto a la estabilidad del mismo, en la parte superior del talud consta con un sistema de fracturas complejas y presenta zonas de esfuerzos compresivos y extensivos con sistema de fracturas paralelas verticales con una dirección preferencial NW (Foto 9), y fracturas conjugadas (Foto 10).

Foto 9.

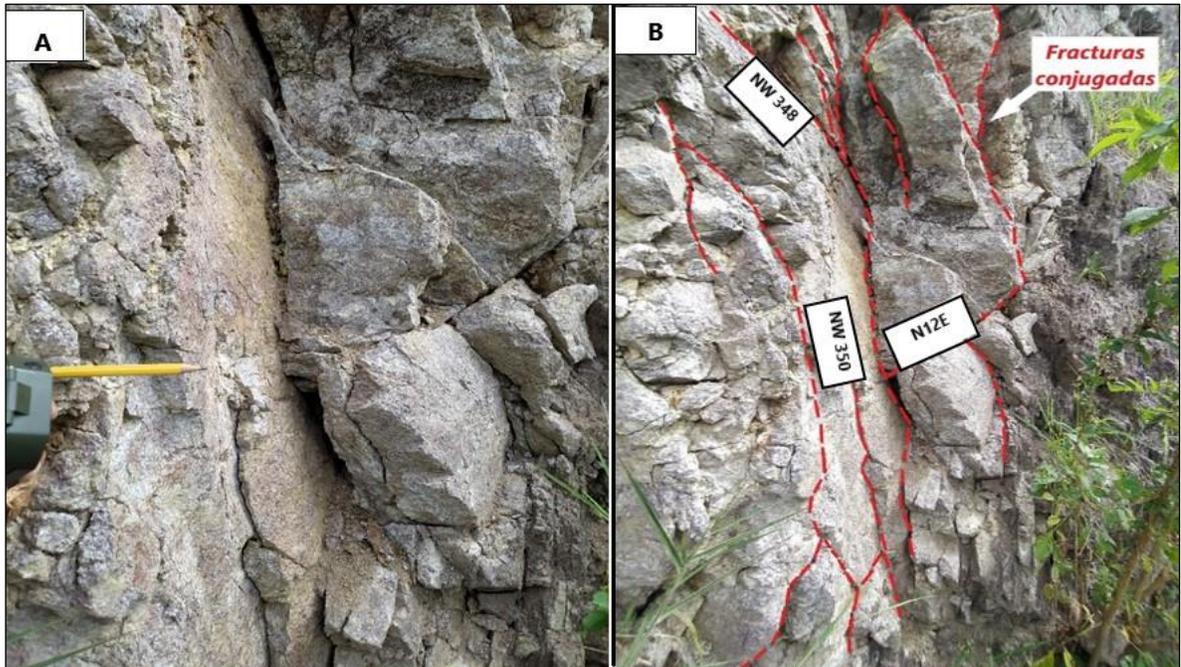
Parte superior del talud principal, donde presenta A: Vista previa de zonas de fracturamientos, B: Vista previa de fracturas paralelas verticales, Coordenadas E572830-N144356.



Fuente: Elaboración propia.

Foto 10.

Fracturamiento en afloramiento andesítico de la parte superior del talud, donde A: Vista general de la parte NE, B: Vista previa con datos de fracturas conjugadas, Coordenadas E572886-N144306.



Fuente: Elaboración propia.

En la parte inferior del talud, se determinó indicio de una posible grieta transversal, en los depósitos de aglomerados andesíticos con dirección NE-SW, la cual esta grieta atraviesa una contra cuneta de 5 mtrs de longitud, y se observa un tipo de movimiento de colapso de la parte NW del estrato (Foto 11).

En el talud principal y el secundario se logró tomar 33 datos de fracturas (Anexo 4), midiendo el rumbo y ángulo de buzamiento de cada fractura, estos datos se procesaron con la ayuda del software STERONET para generar un diagrama de rosetas. En la (Figura 20) se comprende el mayor esfuerzo posible en la zona de estudio, donde su dirección preferencial es NW-SE.

Foto 11.

A: Vista general de una grieta transversal que atraviesa el depósito de aglomerado andesítico (Tmca), B: vista previa de la contracuneta fracturada posiblemente generada por el empuje que está superando el límite de resistencia del material, C: coordenadas E572870-N1443210.



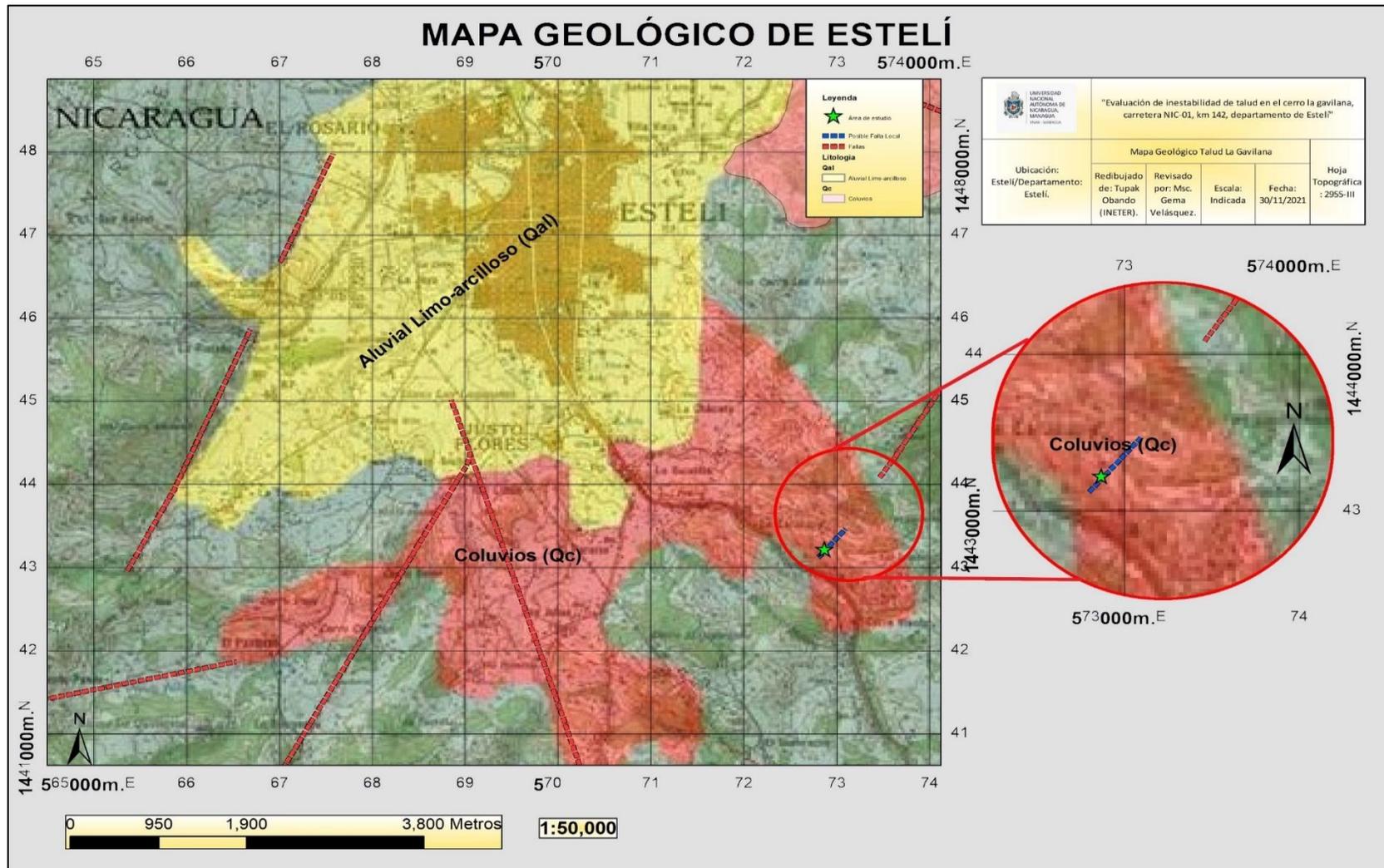
Fuente: Elaboración Propia.

En mapa topográfico Estelí (Código índice: 2955-III) a escala 1:50,000 datum WGS 84 del año 1988 editado por Ineter (Figura 19), Seguidamente, se indican fallas geológicas foto-interpretadas vistas en fotos aéreas del área a escala 1:50,000, siendo superpuesta al mapa en uso. Las fallas geológicas se representan por líneas discontinuas color rojo con longitudes de trazos variables, las cuales se ubican al Sur de la cabecera municipal de Estelí, en segmento de tramo de carretera entre los poblados de La Trinidad y Estelí.

El diagrama de rosetas de fracturas (Figura 20), nos demuestra que el mayor esfuerzo compresional se encuentra en dirección hacia el NW a SE y el esfuerzo extensional dirigido hacia el NE-SW. Estos esfuerzos de deformación dan origen a diversas y diferentes tipos de fracturas en la zona de estudio, estas pueden estar ligados a la actividad tectónica y volcánica del Terciario.

Figura 19.

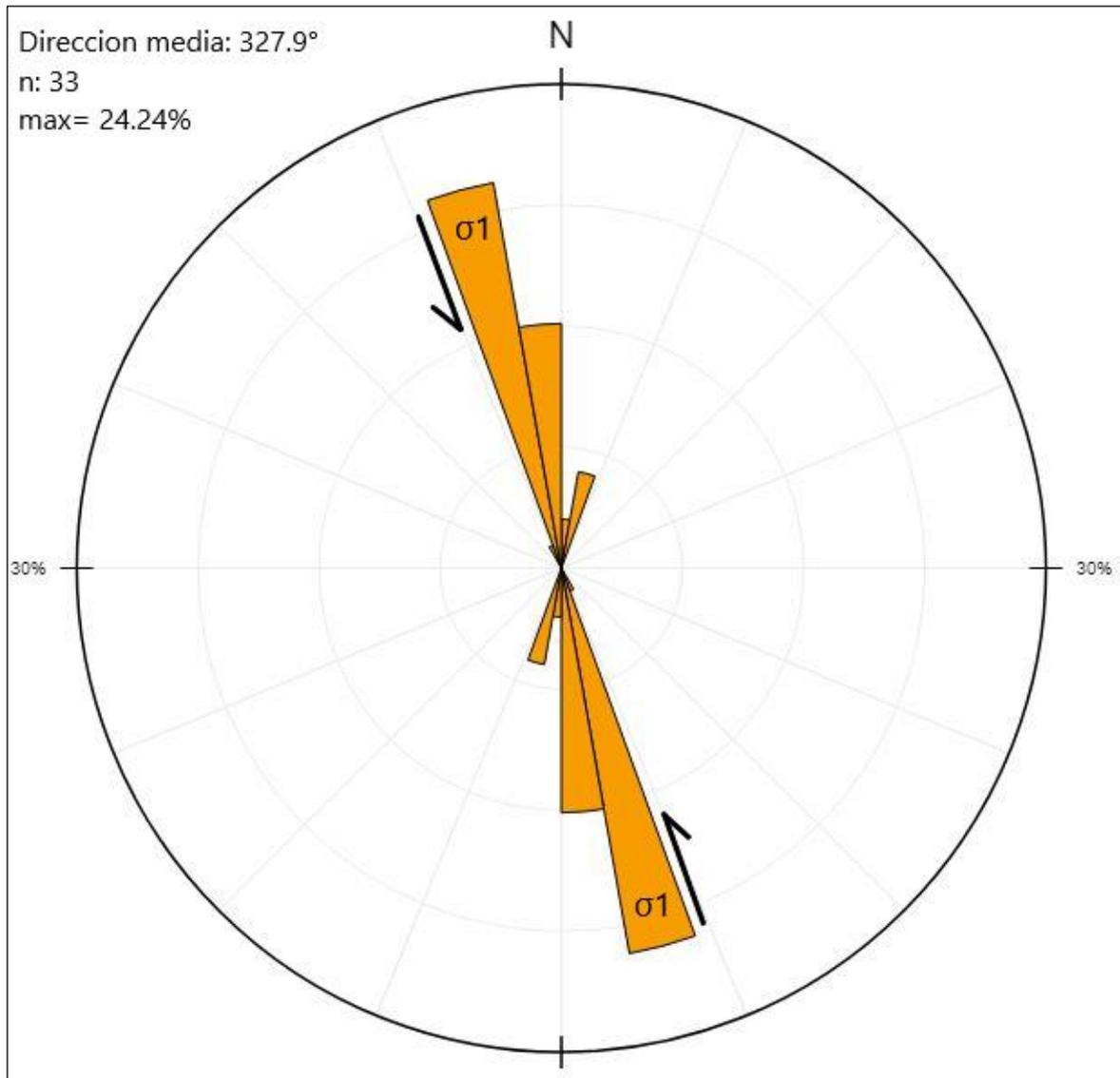
Mapa geológico de Estelí.



Fuente: (Obando Rivera, 2010).

Figura 20.

Diagrama de Roseta, presenta el máximo esfuerzo de todas las fracturas tomadas en el talud La Gavilana.



Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2. Factores condicionantes y desencadenantes que favorecen el deslizamiento.

Factor condicionante:

La desfavorable disposición de los estratos, grado de intemperismo y propiedades físicas y resistentes de cada tipo de material.

En gran parte del talud apreciamos que las rocas se encuentran totalmente fracturadas y fácilmente están sujetas a caerse, el alto grado de fracturamiento es debido a un posible fallamiento local en la zona, (Obando Rivera, 2010), señala las pocas fallas geológicas que se muestran en los terrenos montañosos de Estelí, tienen una dirección preferencial Noreste-Suroeste.

La caracterización morfológica y geométrica del talud, ya que este presenta alto grado de pendiente, dando indicios a movimientos gravitacionales.

Factores desencadenantes:

El factor principal al momento de desencadenar un movimiento de remoción en masa es la fuerte precipitación durante el periodo de lluvia (Tabla 2), ya que el agua se infiltra dentro de las fracturas del suelo provocando un cambio en el peso original del material, mediante acción de la gravedad se generan desprendimientos de materiales a favor de la pendiente.

Debido al fracturamiento que hace más susceptible a la roca, las vibraciones de los vehículos livianos y transportes pesados causa desprendimientos leves hasta causar una zona inestable provocando deslizamientos o desprendimiento de material, o por sismos cercanos al sitio.

4.1.3. Análisis topográfico.

La siguiente (Figura 21), representa la ubicación de 2 perfiles de tomografía eléctrica, estos con disposición paralela y transversal al talud presentando rumbos NE-SW Y E-W. Se elaboraron perfiles topográficos verticales y horizontales el cual se realizó por una estación geodésica y GPS remoto de alta precisión (Foto 12), obteniendo así los datos longitudinales, verticales y profundidad (X, Y, Z), por lo tanto, el levantamiento topográfico sirvió de base para los siguientes análisis de los distintos métodos que se propusieron en los objetivos ya mencionados, en esta (Figura 22), se observa también las curvas de nivel y perfil topográfico del talud procesado.

Los resultados obtenidos en el levantamiento topográfico y procesamiento de los datos fueron fundamentales para el desarrollo y análisis de los demás métodos aplicados en la investigación como lo es la geofísica y geotecnia realizado en el área de estudio. Por medio de estos resultados se logró realizar modelamientos más precisos del talud.

Foto 12.

En el talud La Gavilana, la topografía se realizó por una estación de GPS de alta precisión.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 21.

Ubicación de los perfiles geofísicos y topográficos en el talud La Gavilana.

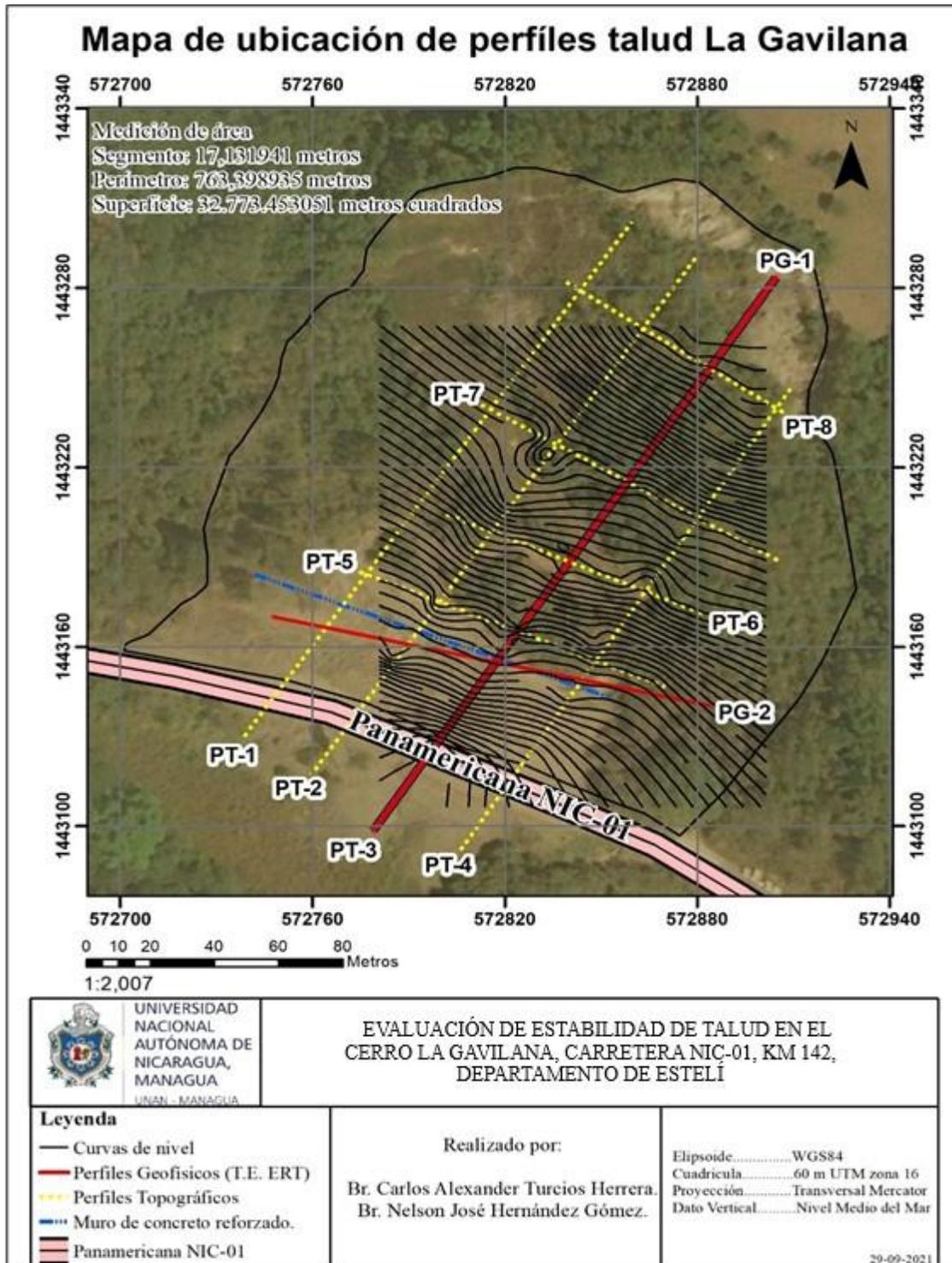
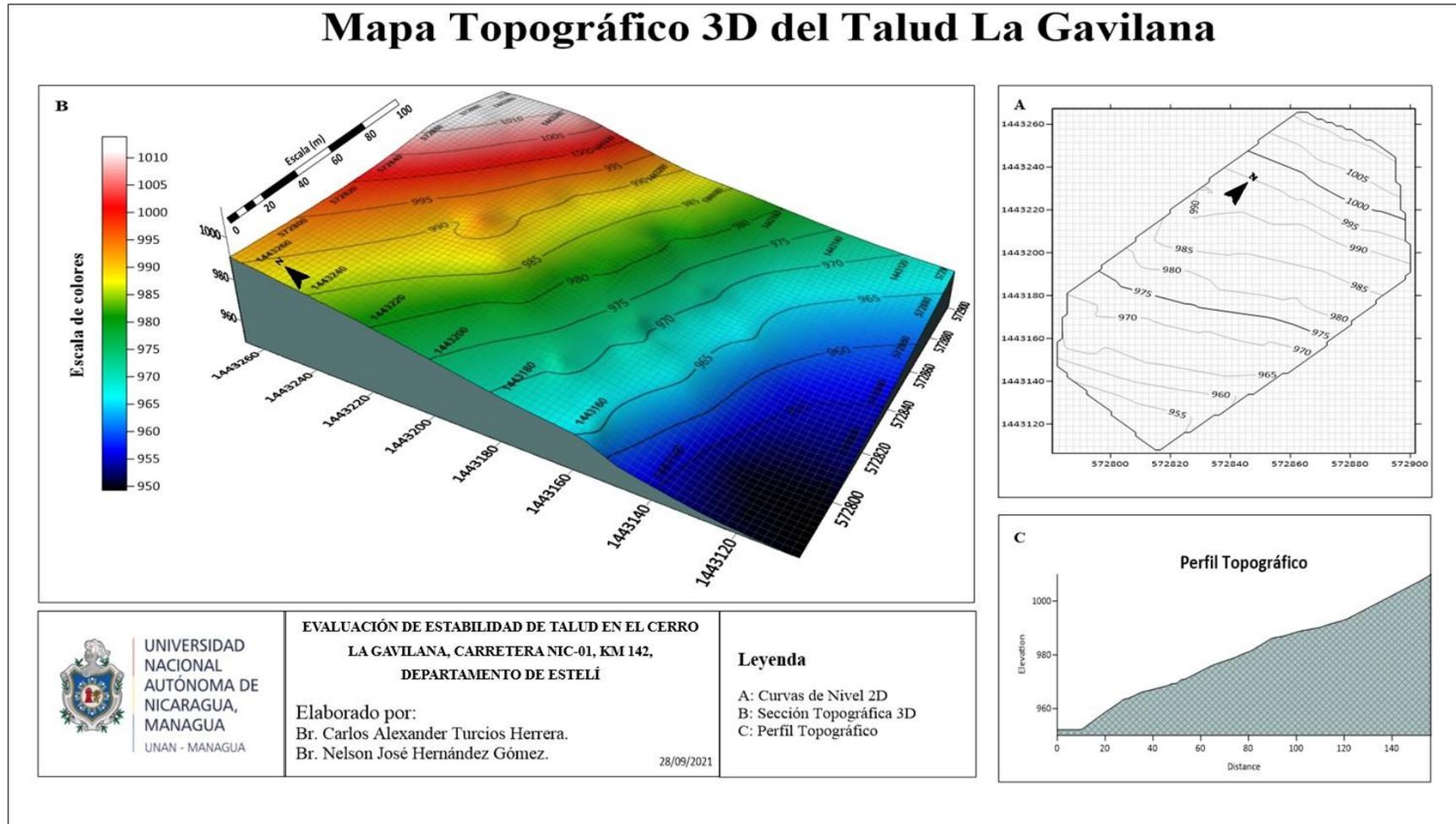


Figura 22.

Mapa topográfico del talud La Gavilana.



4.1.2. Análisis Geotécnico.

Las investigaciones geotécnicas consistieron en la realización de trabajos de campo, ensayos de laboratorio y evaluación de inestabilidad del talud con métodos computacionales. Entre los análisis geotécnicos realizados están el de granulometría, porcentaje de humedad, gravedad específica, densidad de la roca, porcentaje de adsorción.

4.1.2.1. Análisis granulométrico por tamizado.

La granulometría nos permite conocer la medida de los granos de los sedimentos que se han recolectado en el área de estudio, mediante análisis granulométrico logramos obtener información importante como: su origen, propiedades mecánicas y el cálculo de la abundancia de cada uno de los granos según su tamaño dentro de la escala granulométrica.

Este procedimiento se realizó mediante la normativa (UNE-EN, 2017), el ensayo se determinó mediante cuatro muestras secas, obtenidas en campo, cada una de estas muestras son lavadas en el tamiz 0.075 mm (Foto 13) y secada en un horno a 110 ± 5 grados centígrado (Foto 14).

Foto 13.

A: Lavado de muestra en el tamiz No. 200, esta se lava para quitar todo el material arcilloso, B: Luego del lavado se obtiene las muestras húmedas y esta se vuelve a colocar al horno por 24 horas, tomando su peso húmedo respectivamente para cada muestra.



Fuente: Elaboración propia.

Foto 14.

A: Muestras preparadas, obtenidas en el área de estudio. B: Se colocaron las cuatro muestras a secar en un horno a más de 110 ± 5 grados centígrados, estas muestras se secaron durante 24 horas.



Fuente: Elaboración propia.

Esta muestra pasa por una serie de tamices que van desde el de 3 pulgadas hasta tamices más finos de 0.075 mm de la serie ASTM. Para hacer un tamizado de la muestra se deben seguir los siguientes procedimientos:

Usar tamices que son ensamblados en una columna de un orden descendente (Foto 15-B), en el tamiz de malla gruesa se hecha la primera muestra, la columna de tamices se somete a movimientos vibratorios y de rotación, con ayuda de una maquina especial (Foto 15-A). Luego de esto se procedió a retirar los tamices y se toma por separado el peso del material que se ha retenido en cada uno, al tener en cuenta el peso total y los retenidos, se elaboró la curva granulométrica para cada una de las muestras a analizar.

Foto 15.

A: Se coloca la serie de tamices en un equipo mecánico llamado Rota-Sift. B: Serie de tamices que se utilizó en el ensayo, desde la serie 3/4 in hasta 200 in.



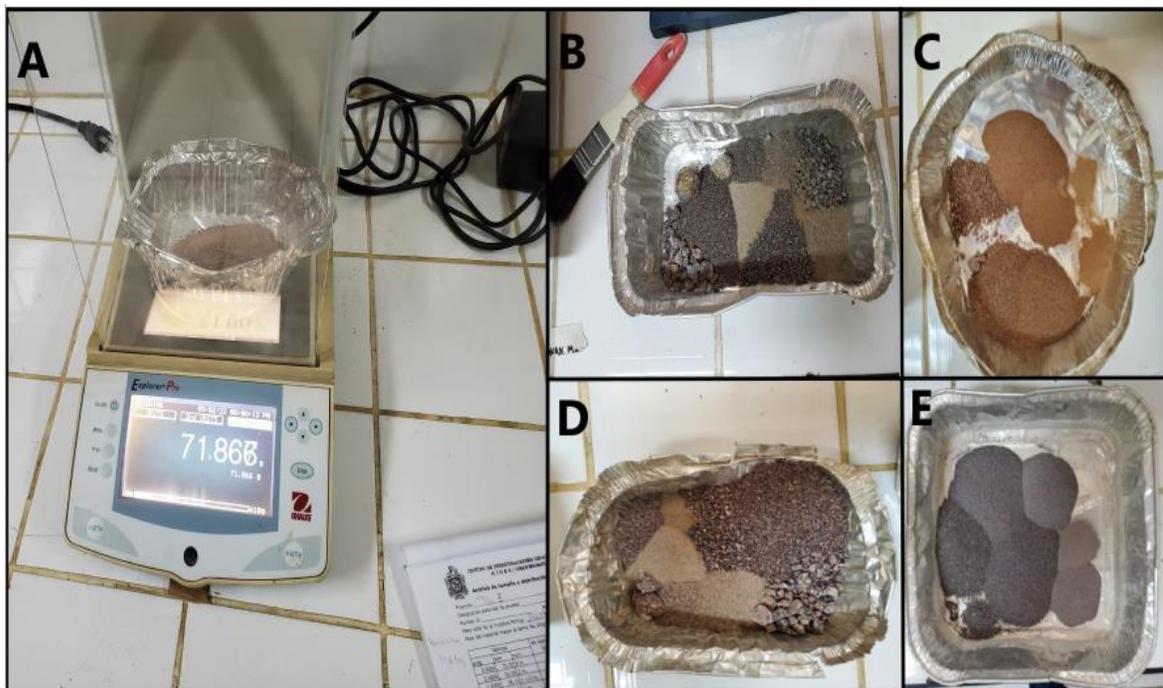
Fuente: Elaboración propia.

Una de las razones principales que se hace este tipo de estudio es que nos permite verificar si el suelo es bien o mal gradado, estimar la impermeabilidad del suelo, mostrar la distribución de los granos en la curva granulométrica, determinar los coeficientes de curvatura y pendiente, determinar el diámetro efectivo del suelo.

Se pesan las porciones retenidas en cada tamiz (Foto 16), expresando los resultados en tanto por ciento.

Foto 16.

A: Se pesa las muestras retenidas en cada tamiz, B; C; D; E: Cada muestra pesada se coloca de nuevo en la tara correspondiente, y se ve de esa forma, separado el suelo.



Fuente: Elaboración Propia.

Una vez realizado el ensayo se realiza la curva granulométrica, calculada por una serie de ecuaciones para poder obtener los diferentes tipos de porcentaje necesario para interpretar los resultados:

Ecuación
$$\% \textit{Retenido} = \left(\frac{A}{W} * 100 \right) \quad (12)$$

Ecuación
$$\% \textit{Pasa} = \left(\frac{W - (A + B)}{W} * (100) \right) \quad (13)$$

Donde:

A: Peso retenido en el tamiz indicado.

B: Peso retenido en los tamices superiores del indicado.

W: Peso de la muestra.

De igual forma se determinó el porcentaje de la fracción gruesa (Gravas) mediante el tamiz No 10 ASTM, el porcentaje de arenas es calculado por lo comprendido en los dos tamices para suelo anteriores y de forma análoga se determinó el porcentaje de cada tamaño de partícula. Seguidamente se analiza en conjunto la proporción de cada uno de los tamaños de las partículas, curvas muy verticales indican reducida variabilidad en los tamaños mientras que curvas inclinadas muestran una gradación importante del tamaño de las partículas.

En el presente ensayo se logró una mayor definición de la granulometría, utilizando el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura, por lo tanto, se utilizaron las diferentes ecuaciones:

Ecuación
$$Cu = \frac{D60}{D10} \quad (14)$$

Ecuación
$$Cc = \left(\frac{(D30)^2}{(D10 * D60)} \right) \quad (15)$$

Donde:

D10: tamaño donde pasa el 10% del material.

D30: tamaño donde pasa el 30% del material.

D60: tamaño donde pasa el 60% del material.

Con todo este proceso se obtuvieron las siguientes tablas con su análisis granulométrico, por lo tanto, cada tabla (Tabla 5), (Tabla 6), (Tabla 7), (Tabla 8). Se obtuvieron los resultados de dicho ensayo.

Tabla 6.

Análisis granulométrico de la muestra de Código: TGV1_210921.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOCIENCIALES
(CIGEO/UNAN-MANAGUA)**

Análisis de tamaño y distribución de partículas

Proyecto: EVALUACIÓN DE INESTABILIDAD DE TALUD EN EL CERRO LA GAVILANA, CARRETERA NIC- 01, KM 142, DEPARTAMENTO DE ESTELÍ.

Designación estándar de prueba: _____ Fecha: 03/09/2021

Sondeo ID: _____ Muestra No: TGV1_210921.

Peso total de la muestra Wm (g): 386,538 Peso del material mayor al tamiz No.10 (g): _____

Tamices			Wt retenido (g)	ret. Retenido (g)	ret. Total (%)	mas fino (%)
Pulg	mm	núm..				
3	75	3-in				
2	50	2-in				
1.5	38.1	1-1/2-in				
1	25	1-in				
0.75	19	3/4-in	12.66	5.3642	5.3642	94.6358
0.5	12.5	1/2-in	4.6	1.9491	7.3133	92.6868
0.375	9.5	3/8-in	8.66	3.6693	10.9826	89.0174
0.25	6.3	No.3				
0.187	4.75	No.4	23.3	9.8725	20.8551	79.1450
0.132	3.35	No.6				
0.0937	2.36	No.8				
0.0787	2	No.10	46.17	19.5627	40.4178	59.5822
		Plato				
		Suma				
0.0469	1.18	No. 16				
0.0331	0.85	No. 20	68.68	29.1005	69.5183	30.4818
0.0234	0.6	No. 30				
0.0165	0.425	No.40	37.85	16.0375	85.5557	14.4443
0.0117	0.3	No. 50				
0.0098	0.25	No. 60	16.66	7.0590	92.6147	7.3853
0.0083	0.212	No. 70				
0.0059	0.15	No. 100	8.11	3.4363	96.0510	3.9490
0.0041	0.106	No. 140	3.69	1.5635	97.6145	2.3855
0.0029	0.075	No. 200	5.26	2.2287	99.8432	0.1568
		Plato	0.37	0.1568	100.0000	0.0000
		Suma	236.01	100		
		Peso total (g):	255.8			

% Grava 20.86

% Arenas 78.99

% Limo 0.1568

Clasificación de suelos	
X	Y
4.75	0
4.75	100
0.075	0
0.075	100

	x	x
D10	0.33	0.01
y	10	10

	x	x
D30	0.85	0.01
y	30	30

	x	x
D60	2.1	0.01
y	60	60

Cu	6.3636
Cc	1.0426
SW	Arena bien graduada.

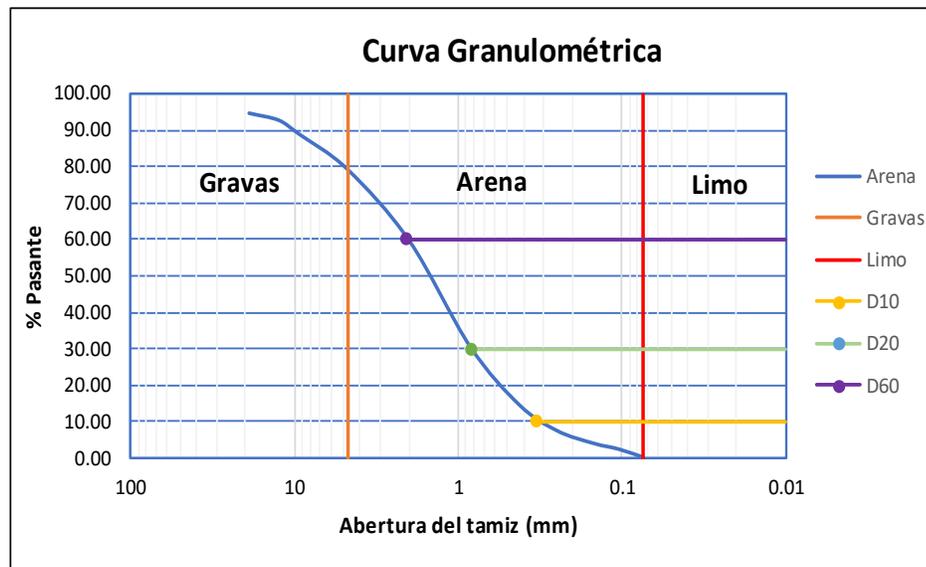
Peso antes del lavado: 383.69

Peso después de lavado: 255,8

Fuente: Elaboración propia.

Figura 23.

Curva granulométrica de la muestra de Código: TGV1_210921.



Fuente: Elaboración propia.

En la (Figura 23), se analizó y determinó la curva granulométrica, en esta muestra se observa una Arena bien graduada (SW), obteniendo la curva se calculó los coeficientes de curvatura y uniformidad.

Tabla 7.

Análisis granulométrico de la muestra de Código: TGV2_210921.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOCIENCIENTIFICAS
(CIGEO/UNAN-MANAGUA)**

Análisis de tamaño y distribución de partículas

Proyecto: EVALUACIÓN DE INESTABILIDAD DE TALUD EN EL CERRO LA GAVILANA, CARRETERA NIC- 01, KM 142, DEPARTAMENTO DE ESTELÍ.

Designación estándar de prueba: _____ Fecha: 03/09/2021

Sondeo ID: _____ Muestra No: TGV2_210921

Peso total de la muestra Wm (g): 386,538 Peso del material mayor al tamiz No.10 (g): _____

Tamices			Wt retenido (g)	ret. Retenido (g)	ret. Total (%)	mas fino (%)
Pulg	mm	núm..				
3	75.00	3-in				
2	50.00	2-in				
1.5	38.10	1-1/2-in				
1	25.00	1-in				
0.75	19.00	3/4-in	0	0.0000	0	100.000
0.5	12.50	1/2-in	7.079	2.4208	2.4208	97.579
0.375	9.50	3/8-in	8.804	3.0107	5.4315	94.568
0.25	6.30	No.3				
0.187	4.75	No.4	36.65	12.5332	17.9647	82.035
0.132	3.35	No.6				
0.0937	2.36	No.8				
0.0787	2.00	No.10	61.943	21.1827	39.1474	60.853
		Plato				
		Suma				
0.0469	1.18	No. 16				
0.0331	0.85	No. 20	73.457	25.1201	64.2675	35.732
0.0234	0.60	No. 30				
0.0165	0.43	No.40	44.302	15.1500	79.4175	20.583
0.0117	0.30	No. 50				
0.0098	0.25	No. 60	21.615	7.3917	86.8092	13.191
0.0083	0.21	No. 70				
0.0059	0.15	No. 100	16.552	5.6603	92.4695	7.531
0.0041	0.11	No. 140	14.176	4.8478	97.3172	2.683
0.0029	0.08	No. 200	7.072	2.4184	99.7357	0.264
		Plato	0.773	0.2643	100.0000	0.000
		Suma	292.423	100		
		Peso total (g):	298.455			

% Grava	17.96
----------------	-------

% Arenas	81.77
-----------------	-------

% Limo	0.2643
---------------	--------

Clasificación de suelos	
X	Y
4.75	0
4.75	100
0.075	0
0.075	100

	x	x
D10	0.19	0.01
y	10	10

	x	x
D30	0.68	0.01
y	30	30

	x	x
D60	1.95	0.01
y	60	60

Cu	10.2632
Cc	1.2480
SW	Arena bien graduada.

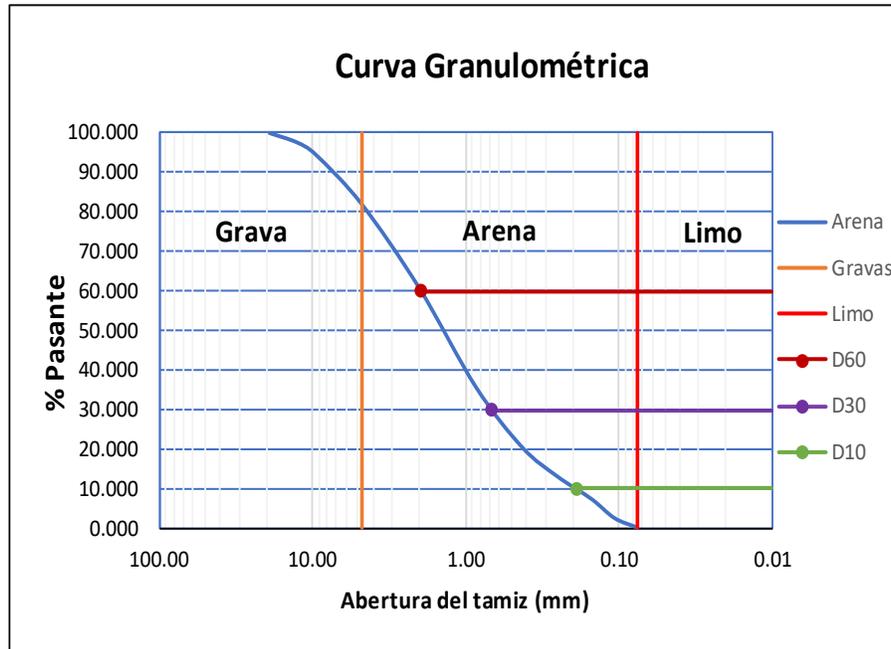
Peso antes del lavado: 386,538

Peso después de lavado: 298,455

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24.

Curva granulométrica de la muestra de Código: TGV2_210921.



Fuente: Elaboración propia.

En la (Figura 24), se observa una arena bien graduada (S_w), donde se determinó el coeficiente de C_u y C_c .

Tabla 8.

Análisis granulométrico de la muestra de Código: TGV3_210921.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOCIENCIENTIFICAS
(CIGEO/UNAN-MANAGUA)**

Análisis de tamaño y distribución de partículas

Proyecto: EVALUACIÓN DE INESTABILIDAD DE TALUD EN EL CERRO LA GAVILANA, CARRETERA NIC- 01, KM 142, DEPARTAMENTO DE ESTELÍ.

Designación estándar de prueba: _____ Fecha: 03/09/2021

Sondeo ID: _____ Muestra No: TGV3_210921

Peso total de la muestra Wm (g): 373,54 Peso del material mayor al tamiz No.10 (g): _____

Tamices			Wt retenido (g)	ret. Retenido (g)	ret. Total (%)	mas fino (%)
Pulg	mm	núm..				
3	75.00	3-in				
2	50.00	2-in				
1.5	38.10	1-1/2-in				
1	25.00	1-in				
0.75	19.00	3/4-in	0.000	0.0000	0	0.000
0.5	12.50	1/2-in	0.000	0.0000	0.0000	0.000
0.375	9.50	3/8-in	0.000	0.0000	0.0000	100.000
0.25	6.30	No.3				
0.187	4.75	No.4	1.116	1.5096	1.5096	98.490
0.132	3.35	No.6				
0.0937	2.36	No.8				
0.0787	2.00	No.10	1.325	1.7924	3.3020	96.698
		Plato				
		Suma				
0.0469	1.18	No. 16				
0.0331	0.85	No. 20	6.115	8.2719	11.5739	88.426
0.0234	0.60	No. 30				
0.0165	0.43	No.40	18.697	25.2918	36.8657	63.134
0.0117	0.30	No. 50				
0.0098	0.25	No. 60	19.582	26.4890	63.3548	36.645
0.0083	0.21	No. 70				
0.0059	0.15	No. 100	14.546	19.6767	83.0315	16.969
0.0041	0.11	No. 140	8.742	11.8255	94.8569	5.143
0.0029	0.08	No. 200	3.305	4.4707	99.3277	0.672
		Plato	0.497	0.6723	100.0000	0.000
		Suma	73.925	100		
		Peso total (g):	86.176			

% Grava	1.51
----------------	------

% Arenas	97.82
-----------------	-------

% Limo	0.6723
---------------	--------

Clasificación de suelos	
X	Y
4.75	0
4.75	100
0.075	0
0.075	100

	x	x
D10	0.126	10
y	10	10

	x	x
D30	0.218	10
y	30	30

	x	x
D60	0.4	10
y	60	60

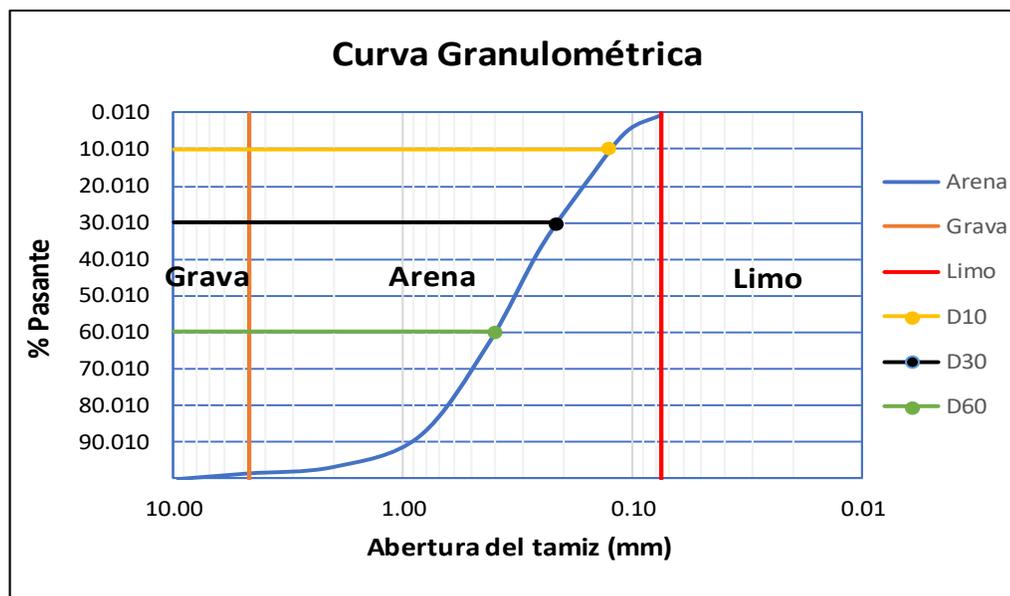
Cu	3.1746
Cc	0.9429
SP	Arena pobremente graduada.

Peso antes del lavado: 373,54
Peso después de lavado: 86,176

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 25.

Curva granulométrica de la muestra de Código: TGV3_210921.



Fuente: Elaboración propia.

En esta (Figura 25), se llegó a la conclusión de una arena pobremente graduada (SP).

Tabla 9.

Análisis granulométrico de la muestra de Código: TGV4_210921.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOCIENCIENTIFICAS
(CIGEO/UNAN-MANAGUA)**

Análisis de tamaño y distribución de partículas

Proyecto: EVALUACIÓN DE INESTABILIDAD DE TALUD EN EL CERRO LA GAVILANA, CARRETERA NIC- 01, KM 142, DEPARTAMENTO DE ESTELÍ.

Designación estándar de prueba: _____ Fecha: 03/09/2021

Sondeo ID: _____ Muestra No: TGV4_210921

Peso total de la muestra Wm (g): 390,2 Peso del material mayor al tamiz No.10 (g): _____

Tamices			Wt retenido (g)	ret. Retenido (g)	ret. Total (%)	mas fino (%)
Pulg	mm	núm..				
3	75.00	3-in				
2	50.00	2-in				
1.5	38.10	1-1/2-in				
1	25.00	1-in				
0.75	19.00	3/4-in	0.000	0.0000	0.0000	0.000
0.5	12.50	1/2-in	0.000	0.0000	0.0000	0.000
0.375	9.50	3/8-in	0.000	0.0000	0.0000	100.000
0.25	6.30	No.3				
0.187	4.75	No.4	1.079	0.5226	0.5226	99.477
0.132	3.35	No.6				
0.0937	2.36	No.8				
0.0787	2.00	No.10	0.080	0.0387	0.5614	99.439
		Plato				
		Suma				
0.0469	1.18	No. 16				
0.0331	0.85	No. 20	2.561	1.2404	1.8018	98.198
0.0234	0.60	No. 30				
0.0165	0.43	No.40	46.163	22.3588	24.1605	75.839
0.0117	0.30	No. 50				
0.0098	0.25	No. 60	64.98	31.4726	55.6332	44.367
0.0083	0.21	No. 70				
0.0059	0.15	No. 100	49.711	24.0772	79.7104	20.290
0.0041	0.11	No. 140	24.042	11.6446	91.3550	8.645
0.0029	0.08	No. 200	13.96	6.7614	98.1164	1.884
		Plato	3.889	1.8836	100.0000	0.000
		Suma	206.465	100		
		Peso total (g):	224.17			

% Grava 0.52

% Arenas 97.59

% Limo 1.8836

Clasificación de suelos	
X	Y
4.75	0
4.75	100
0.075	0
0.075	100

	x	x
D10	0.11	10
y	10	10

	x	x
D30	0.19	10
y	30	30

	x	x
D60	0.32	10
y	60	60

Cu	2.9091
Cc	1.0256
SP	Arena pobremente graduada.

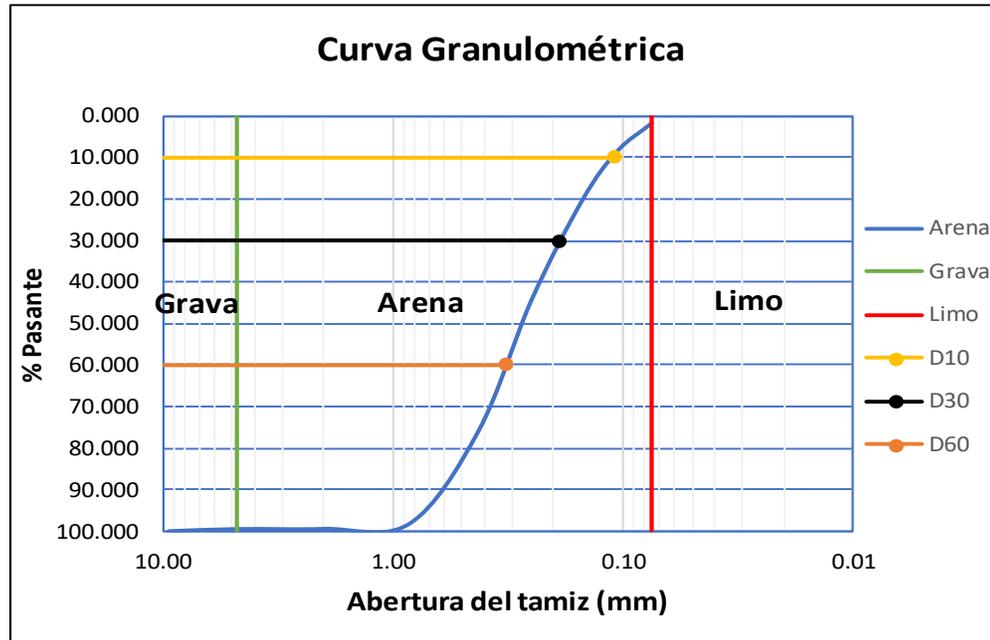
Peso antes del lavado: 390,2

Peso después de lavado: 224,17

Fuente: Elaboración propia.

Figura 26.

Curva granulométrica de la muestra de Código: TGV4_210921.



Fuente: Elaboración propia.

En esta (Figura 26), se analizó los resultados y se llegó a la conclusión en que esta muestra es una arena pobremente graduada, en este análisis estas clasificaciones se realizaron por el método (SUCS, 2007), ya que no se determinó el índice de plasticidad por el método (Atterberg).

4.1.2.2. Prueba de gravedad específica

Este dato se obtuvo a partir del valor promedio del grano del suelo de la muestra (Tabla 9), Este valor es necesario para calcular la relación de vacíos del suelo, se utilizó también en el análisis de hidrómetra calculando el peso unitario de la muestra y por lo tanto el parámetro es obtenido por medio de (Ecuación 16), propuesto por la norma (ASTM D-854, AASHTO T-100).

Ecuación
$$G.S = \frac{yx}{yw} \quad (16)$$

Donde:

Gs: Gravedad específica.

Yx: Peso unitario de los sólidos del suelo (grs/cm³).

Yw: Peso unitario del agua a 4° C (grs/cm³).

Tabla 10.

Resultados del cálculo de gravedad específica (ASTM D-854, AASHTO T-100, 2006).

Gravedad específica (ASTM D-854, AASHTO T-100)				
Proyecto: Talud La Gavilana, Estelí.			Fecha: 21/09/2021	
Muestras:	TGV1_210921	TGV2_210921	TGV3_210921	TGV4_210921
Alto (m)	0.062	0.075	0.059	0.07
Ancho (m)	0.06	0.05	0.06	0.058
Largo (m)	0.07	0.057	0.062	0.055
Wt (kg)	0.5835	0.5216	0.5249	0.5878
Volumen (m ³)	0.0002604	0.00021375	0.00021948	0.0002233
Peso específico total (Kg/m ³)	2240.78	2440.23	2391.56	2632.33
Gravedad específica	2.24	2.44	2.39	2.63

Fuente: Elaboración Propia.

Para este cálculo se utilizó los equipos (Anexo 2):

- Frasco volumétrico (picnómetro), de 100 a 500 cm³ de capacidad.
- Bomba de vacío, con tuberías y uniones, o en su defecto un mechero o un dispositivo para hervir el contenido del picnómetro.
- Homo o Estufa, capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta 110 ± 5°C (230 ± 9 °F). • Balanzas, una con capacidad de 1200 g y sensibilidad de 0.01 g, otra con capacidad de 200 g y sensibilidad de 0.001 g.
- Pipeta.
- Termómetro graduado, con una escala de 0 a 50 °C (32 a 122 °F) y con precisión de 0.1 °C (0.18 °F).

- Cápsula de evaporación.
- Agua destilada.
- Guantes de asbesto.
- Tamices de 2.36 mm (N° 8) y 4.75 mm (N° 4).

4.1.2.3. Peso específico

El peso específico de un agregado o muestra es la relación de su peso respecto a su volumen, estas muestras se obtienen los datos como: ancho, largo, alto, peso de cada una de las muestras de aproximadamente de 20 a 30 gramos (Anexo 2-A), es el cociente de dividir el peso de las partículas de un agregado entre el volumen de estas sin considerar el vacío entre ellas (Ecuación 17), este ensayo se realizó con las condiciones de las normas (ASTM C 127., 2003).

Ecuación
$$\gamma_t = \frac{W_t}{V} \quad (17)$$

Donde:

γ_t : Peso específico total

W_t : Peso total

V_t : Volumen total

Este cálculo es una característica importante, ya que este parámetro ayuda a identificar el tipo de roca y su estructura geológica (Tabla 10).

Tabla 11.

Resultados del cálculo del peso específico de cada una de las muestras recolectadas en el área de estudio.

Peso Específico (Kg/m3)				
Proyecto: Talud La Gavilana, Estelí.			Fecha: 21/09/2021	
Muestras:	TGV1_210921	TGV2_210921	TGV3_210921	TGV4_210921
Alto (m)	0.062	0.075	0.059	0.07
Ancho (m)	0.06	0.05	0.06	0.058
Largo (m)	0.07	0.057	0.062	0.055
Wt (kg)	0.5835	0.5216	0.5249	0.5878
Volumen (m3)	0.0002604	0.00021375	0.00021948	0.0002233
Peso específico total (Kg/m3)	2240.78	2440.23	2391.56	2632.33

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2.4. Porcentaje de absorción

El agua dentro de una masa de suelo es parte fundamental de su comportamiento, puede estar presente en tres fases y generar propiedades determinantes, pero la absorción en términos coloquiales es la capacidad que tiene un material de retener agua, definiendo así que la absorción es el aumento en peso de los agregados debido al agua en los poros del material pero, sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, la absorción interactúa a nivel interno de partículas y se expresa como un porcentaje del peso seco.

Este dato se obtuvo generalmente después de haber sometido al material a una saturación durante 24 horas, cuando esta termina se procede a secar superficialmente el material (Tabla 11), y por diferencia de masa se logra calcular el porcentaje de absorción con relación a la masa seca del material, la fórmula para este cálculo es la siguiente (Ecuación 18):

$$\text{Ecuación} \quad \%A = \left(\frac{(Wh - Wt)}{Wt} * 100 \right) \quad (18)$$

Donde:

Wh: Peso de la muestra saturada.

Wt: Peso de la muestra Seca.

Tabla 12.

Resultados del cálculo de porcentaje de absorción.

Porcentaje de Absorción				
Proyecto: Talud La Gavilana, Estelí.			Fecha: 21/09/2021	
Muestras:	TGV1_210921	TGV2_210921	TGV3_210921	TGV4_210921
Wt(Kg)	0.5835	0.5216	0.5249	0.5878
Wh(kg)	0.6079	0.5389	0.5517	0.5965
% de absorción	4.18	3.31	5.1	1.48

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2.5. Análisis en el software Slide 6.0.

Obteniendo los datos recolectados en campo y analizado las muestras en laboratorio, se interpretaron lo siguiente (Tabla 12):

Tabla 13.

Resultados del cálculo de cada uno de los parámetros necesarios para el análisis de ladera en el software Slide 6.0.

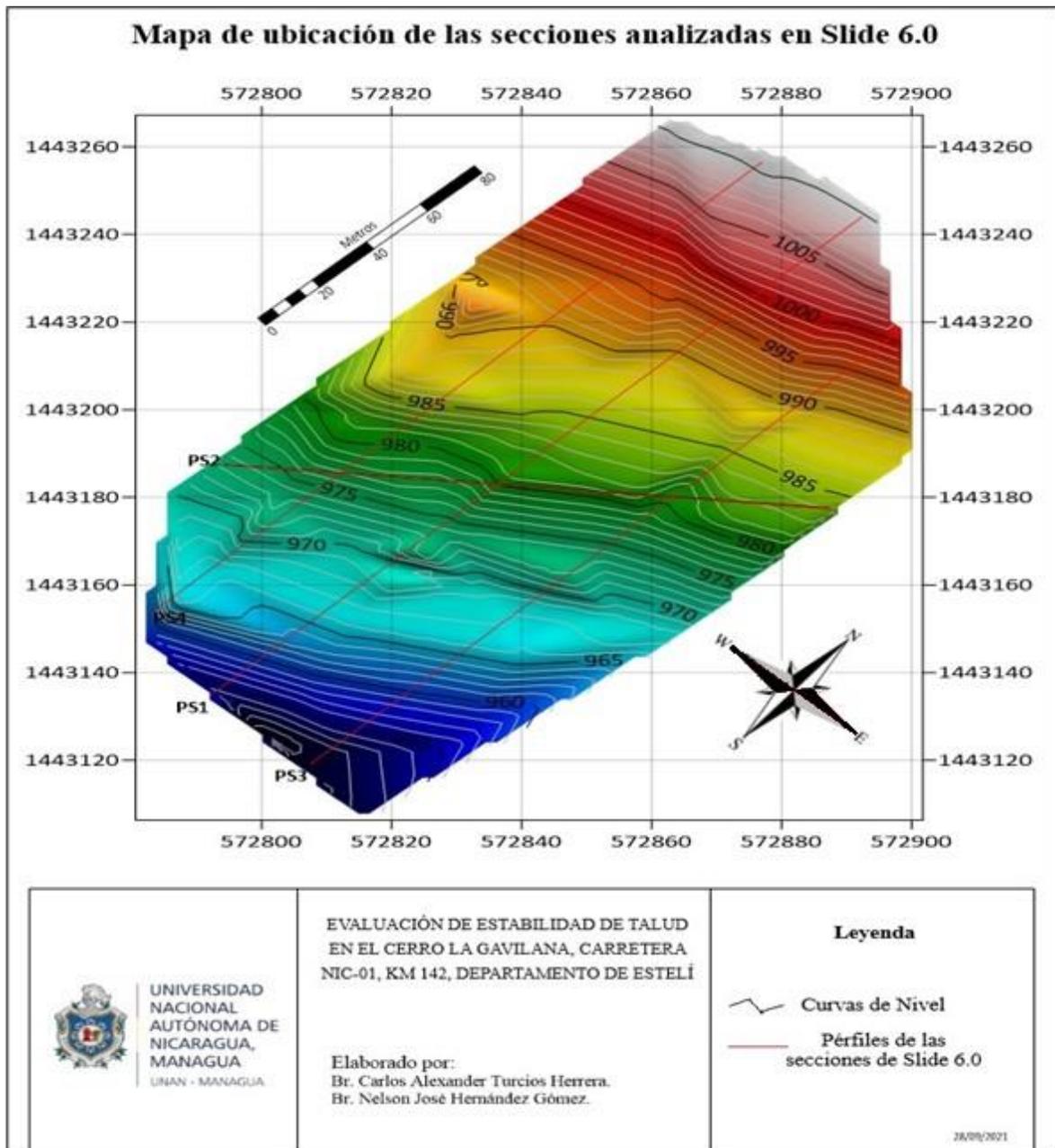
SLIDE 6.0			
Proyecto: Talud La Gavilana, Estelí.			21/09/2021
Muestras de campo	Peso Unitario (Kn/m3)	Cohesión (Kn/m2)	Angulo de fricción
TGV1_210921	22	55	40
TGV2_210921	24	55	40
TGV3_210921	23	50	40
TGV4_210921	26	55	40

Fuente: Elaboración Propia.

Para este análisis se necesitaron de 4 datos, los cuales son: Cohesión, peso unitario, Angulo de fricción y la distribución de la litología del área de estudio, todo esto se realizó en el programa Slide 6.0, también se realizó el modelado a partir de la base de datos de la topografía (Figura 27) y de los análisis geofísicos.

Figura 27.

Mapa de ubicación de las secciones a analizar en el software slide 6.0.



A continuación, se muestran los análisis y superficies de falla obtenidos por los métodos de Bishop simplificado, Janbú simplificado, Spencer y Fellenius, de manera que se pueda ilustrar la forma en que el software presenta los resultados de Factor de Seguridad (FS) (Tabla 13).

Tabla 14.

Litología de acuerdo a las secciones de tomografía eléctrica ERT.

Material	Color
Flujo andesítico	
Coluvios	
Arcilla1	
Arcilla2	

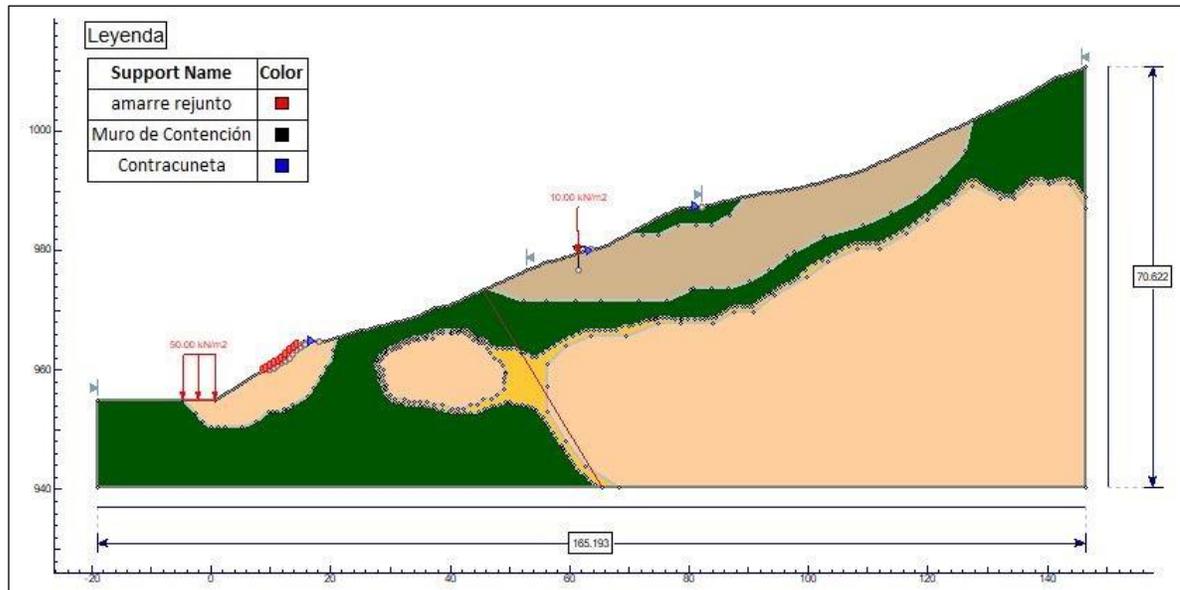
Fuente: Elaboración propia.

El siguiente perfil se basó en los resultados obtenidos en los levantamientos, Geológicos Geofísico y topográfico, definiendo así el siguiente modelo interpretado (Figura 28), este modelo representado en el PS1 (Figura 27), se tomó en cuenta como el análisis principal ya que en este perfil se realizaron las secciones geoelectrica para obtener los parámetros de resistividades eléctricas del subsuelo e interpretar las anomalías o estructuras que puedan causar un deslizamiento en el área de estudio, este perfil se encuentra en dirección hacia la carretera (Figura 21).

En los siguientes (Anexo 8-19), se encuentra los demas secciones interpretadas en el software Slide 6.0, obteniendo cada uno de ellos el Factor de seguridad correspondiente al area de estudio con sus condiciones actuales, tomando en cuenta cada una de las estructuras construidas.

Figura 28.

Modelo del Cerro La Gavilana 2D, obtenido a partir del levantamiento topográfico en el perfil-1 de tomografía eléctrica.

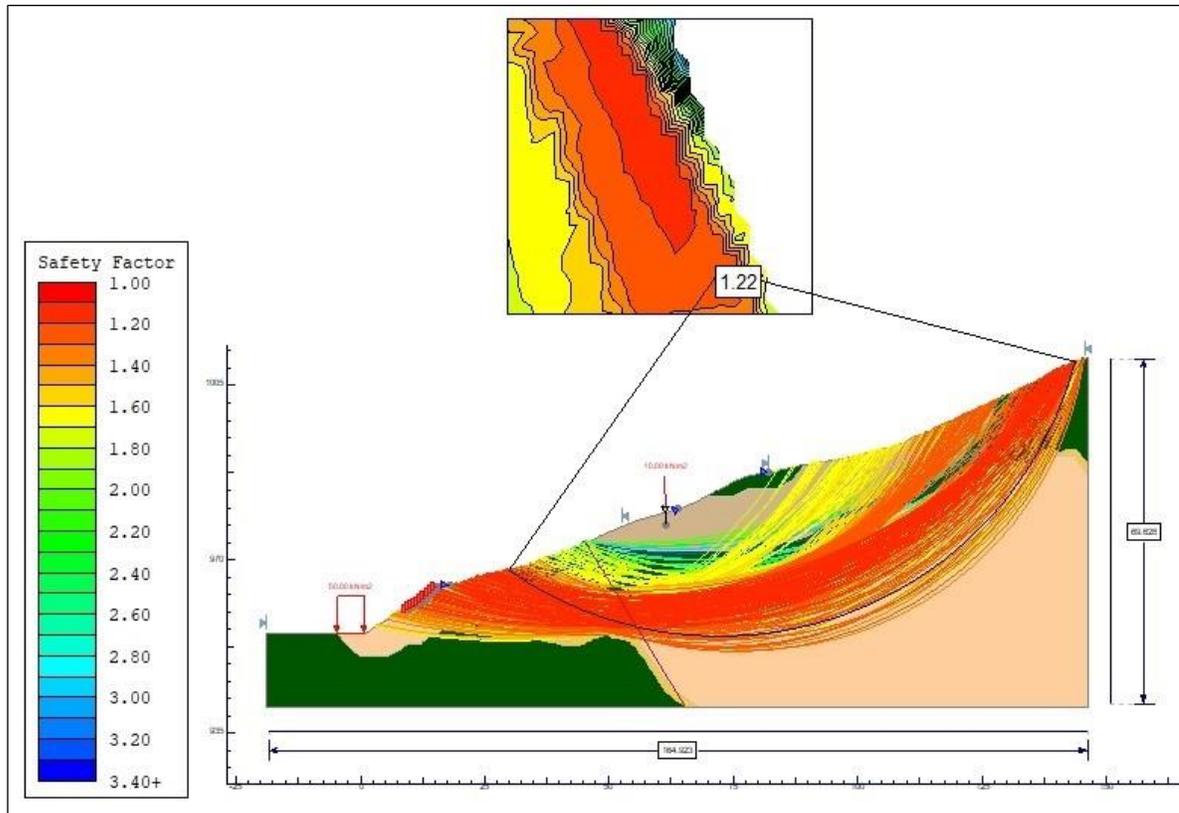


Fuente: Elaboración propia.

Este modelo en 2D se realizó en el programa Slide 6.0, tomando en cuenta la geología realizada en el área de estudio y los análisis de resistividades del subsuelo de la tomografía eléctrica empleada, para la geometría del talud se tomó en consideración la topografía y cada una de las estructuras construidas en el cerro levantada en el perfil-1 (Figura 27)

Figura 29.

Análisis del modelamiento, utilizando el método de Bishop simplificado.

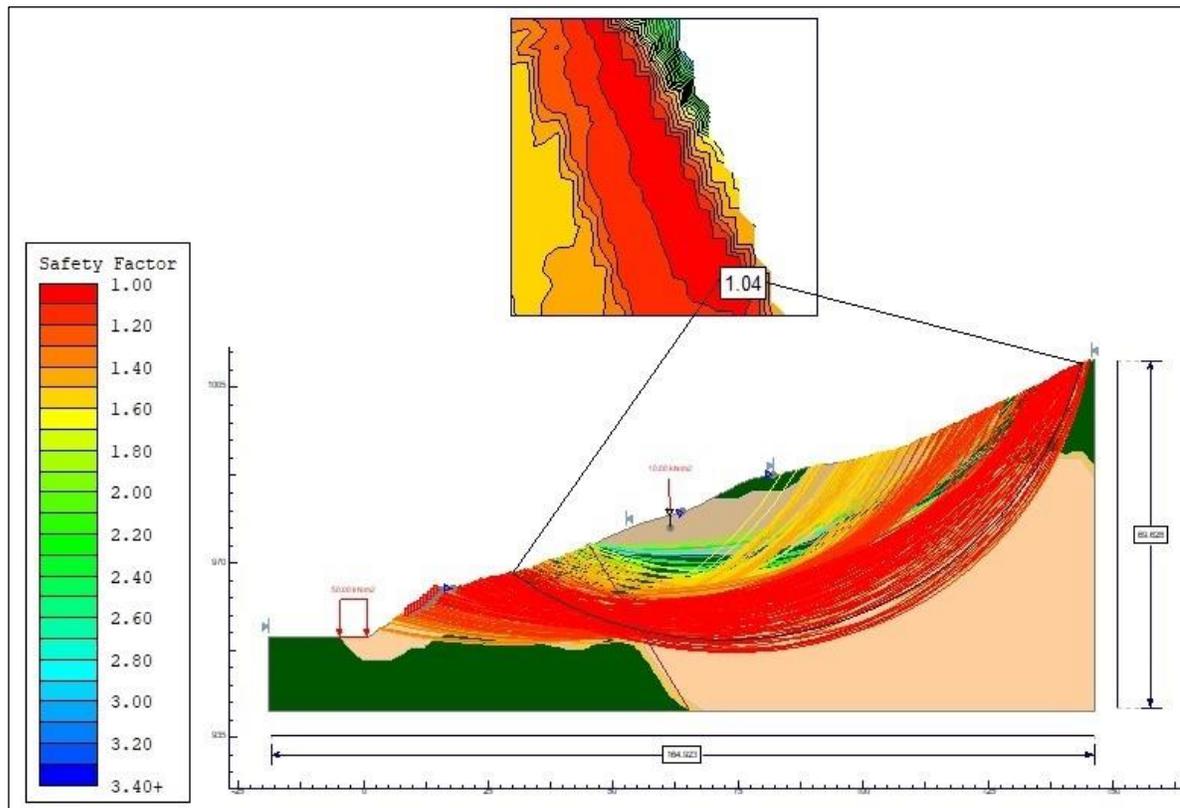


Fuente: Elaboración Propia.

En esta (Figura 29), se puede observar que el análisis determinado por el método de Bishop simplificado, en las condiciones actuales del talud, se calculó un factor de seguridad de 1.22, con forme a este resultado el valor obtenido está por debajo de 1.5 para ser un talud en condición de seguridad.

Figura 30.

Análisis del modelamiento, utilizando el método de Jambu Simplificado.

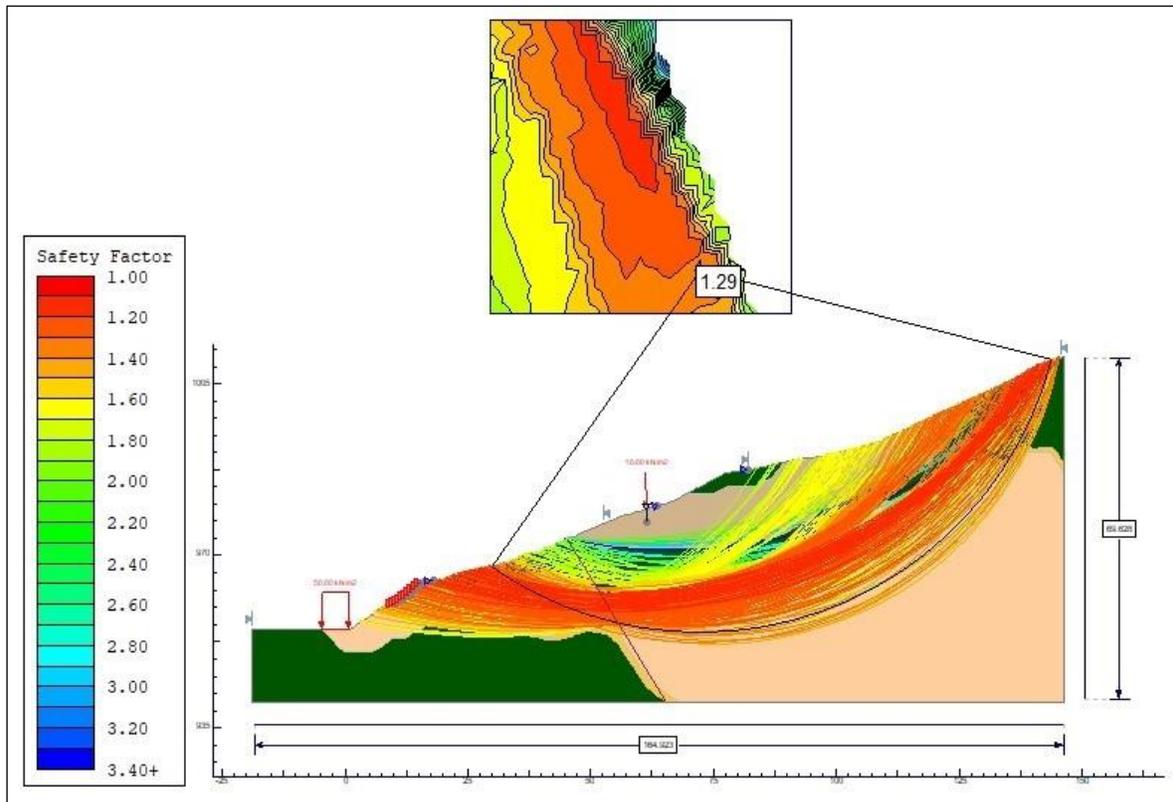


Fuente: Elaboración Propia.

La (Figura 30), se calculó el factor de seguridad, dando por resultado de FS 1.04, pero a diferencia de Bishop, este método busca el equilibrio de fuerzas y no de momentos, considerando esto se resalta que, en el análisis posterior a este, el valor calculado por el método de Jambú simplificado es menor al FS obtenido en el método de Bishop simplificado, por lo tanto el talud en sus condiciones actuales no representa un incremento del factor de seguridad por este método, quedando mucho más por debajo de 1.5.

Figura 31.

Análisis del modelamiento, utilizando el método de Spencer.

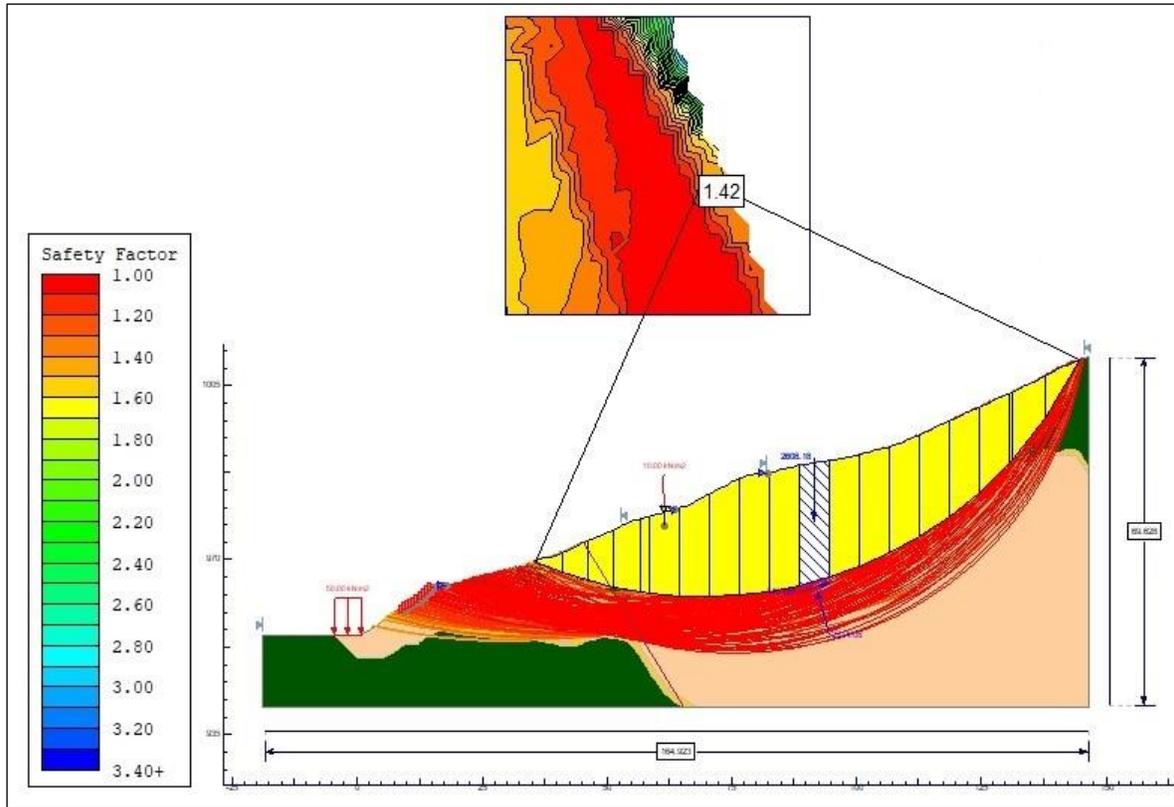


Fuente: Elaboración Propia.

El método de Spencer se considera un método muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud, este método es más sencillo y más completo para el cálculo de FS (Figura 31), obteniendo como resultado un factor de seguridad de 1.29, por lo tanto, se determinó un FS relativa ya que se encuentra en el rango de 1.25-1.50.

Figura 32.

Análisis del modelamiento, utilizando el método de Fellenius.



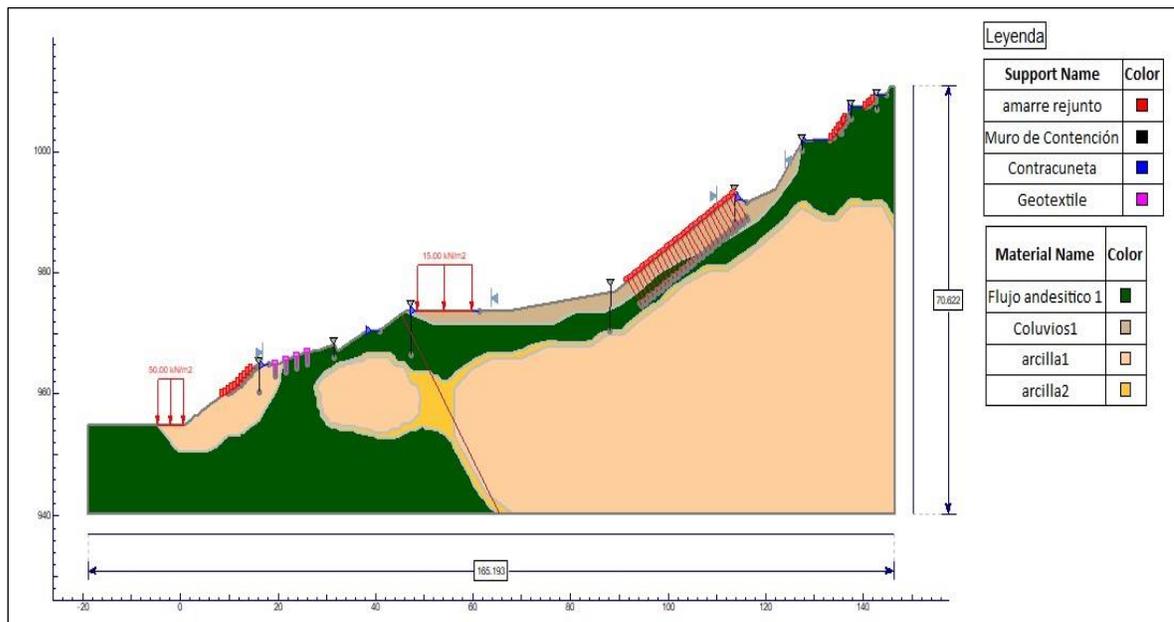
Fuente: Elaboración propia.

En este análisis de método de dovelas de Fellenius (Figura 32), se determinó que el peso de la dovela, se puede descomponer en sus componentes normal y tangencial (Anexo 5 y 6), que en el caso de este análisis se consideran igual a sus reacciones sobre la superficie hipotética de falla, obteniendo así el factor de seguridad de 1.42 siendo este método relativamente estable que los anteriores propuestos en el área de estudio.

Obtenidos estos resultados interpretando cada uno de los modelos empleados, en las condiciones actuales del talud, aun así, se reevaluó los análisis con un remodelado del talud (Figura 33), tomando en cuenta reducción de pendientes, descapote de la parte superior, con nuevas estructuras que pueden mejorar la estabilidad del talud.

Figura 33.

Remodelado del talud cerro la Gavilana.

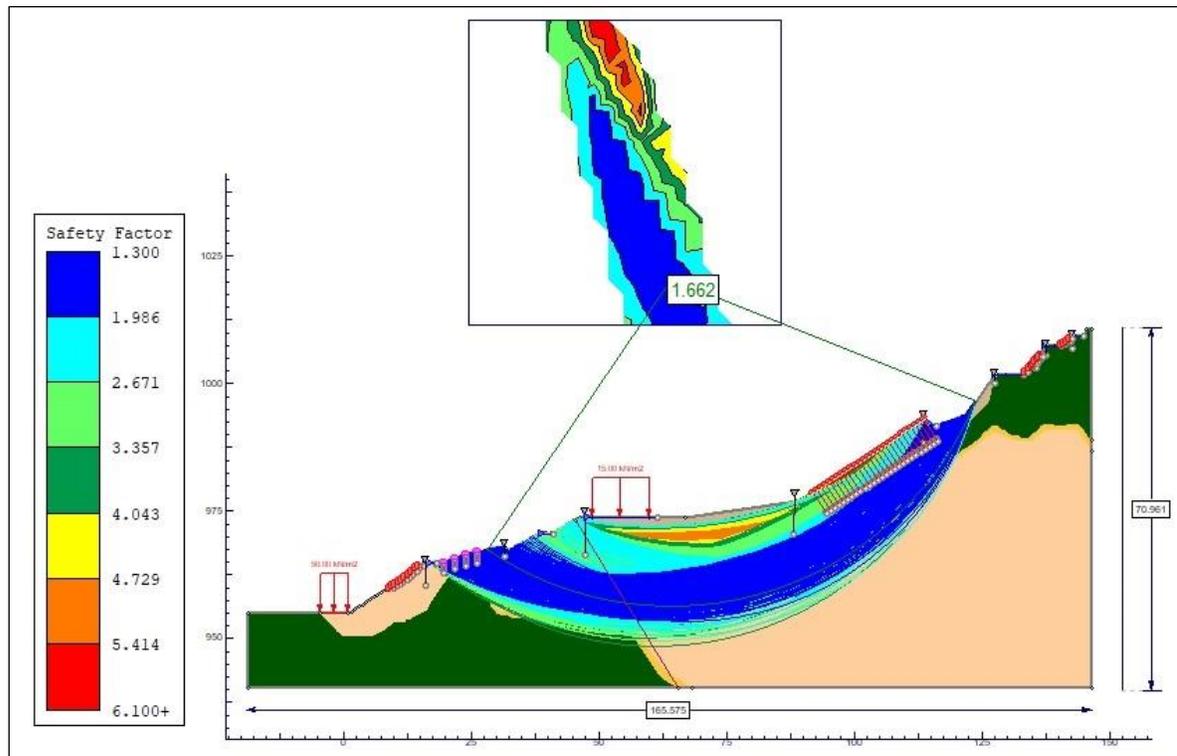


Fuente: Elaboración propia.

Este modelo se obtuvo a partir de los datos obtenidos de topografía del perfil-1 (Figura 27), Este se remodeló tomando en cuenta las estructuras actuales de estabilización construida en el área de estudio, por lo tanto, se propuso en este análisis reducir la pendiente a unos 147° y construir nuevas estructuras que puedan estabilizar el talud ya sea muros de contención, enrejado, descapote de la parte superior de la ladera de unos 12 metros y contracunetas, obteniendo así los siguientes resultados de los análisis:

Figura 34.

Remodelado, calculando el FS por el método de Bishop simplificado.

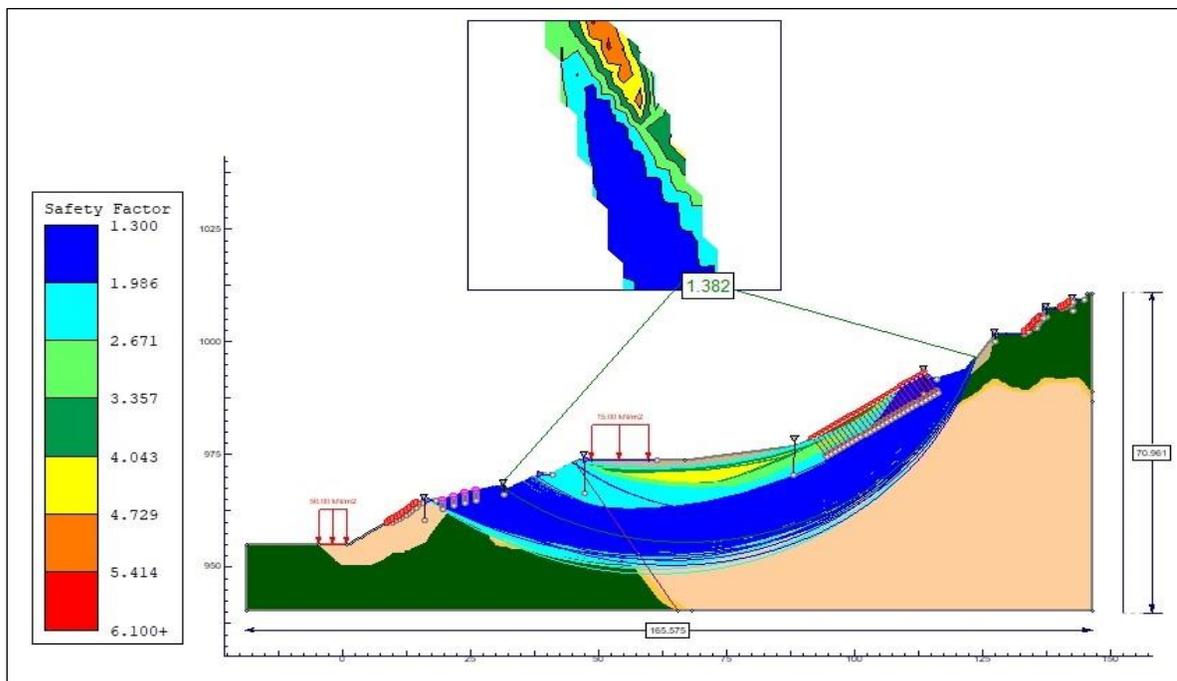


Fuente: Elaboracion propia.

En la (Figura 34), se puede observar que, con este remodelamiento del talud, teniendo en cuenta nuevas estructuras de estabilización, por el método de Bishop Simplificado bajo estas condiciones puede estar en un factor de seguridad estable por encima de 1.5.

Figura 35.

Remodelamiento del talud la Gavilana, Análisis por el método de Jambú simplificado.

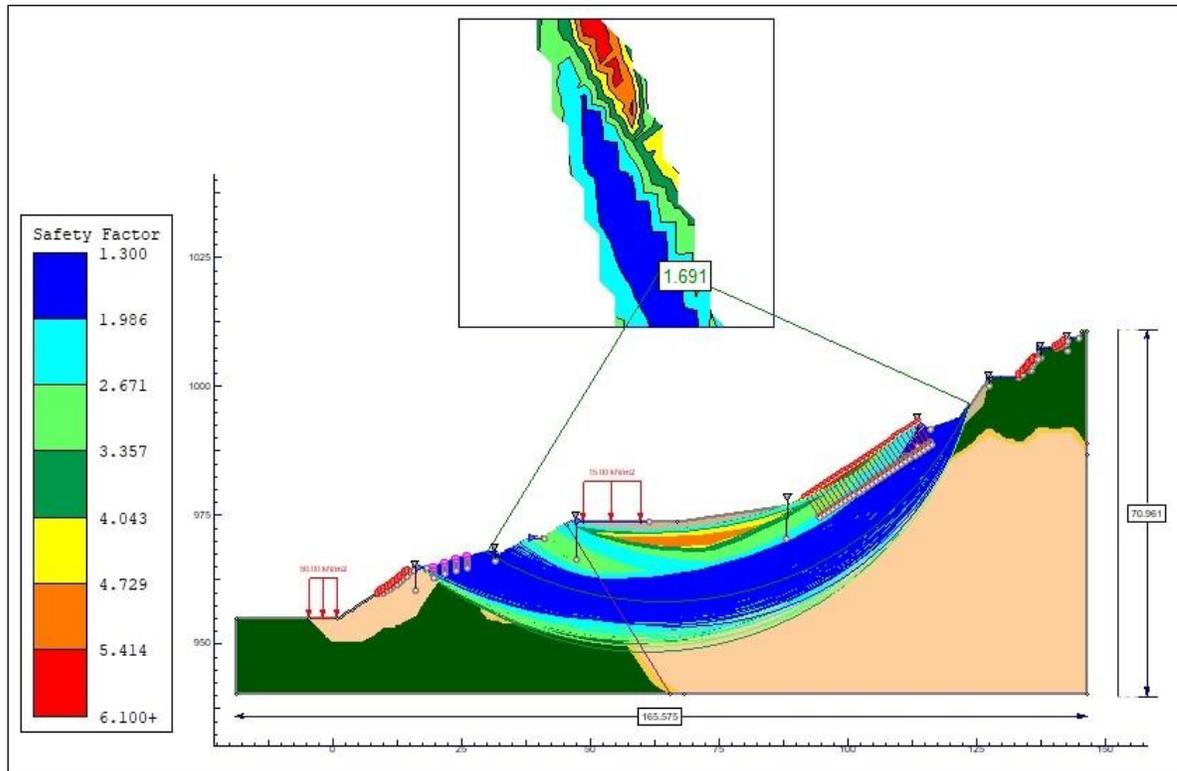


Fuente: Elaboración propia.

(Figura 35), este resultado se aprecia que el cálculo del FS 1.38, definiéndose así un Factor de seguridad relativamente seguro, en estas condiciones tomando en cuenta las estructuras actuales y las nuevas propuestas.

Figura 36.

Remodelado del talud La Gavilana, Calculo del factor de seguridad por el método de Spencer.



Fuente: Elaboración propia.

El método de Spencer (Figura 36), es el más exacto y con mayor estabilidad ya que con este comportamiento del remodelamiento del talud, se comprende en un factor de seguridad prácticamente estable mayor a lo establecido 1.5.

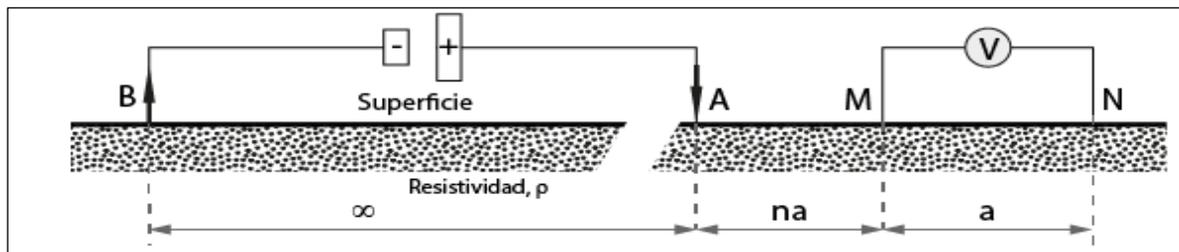
4.1.3. Análisis Geofísico.

4.1.3.1. Metodología y trabajo de campo.

Para cumplir con el objetivo de este estudio se emplearon dos perfiles con el método geofísico de Tomografía eléctrica ERT con el arreglo Dipolo-Polo (Figura 38).

Figura 38.

Dispositivo Polo-Dipolo donde A y B son los electrodos de corriente, M y N los de potencial.



Fuente: (Pellicer, 2015).

La constante a es una distancia en metros (en general no mayor de 10 m, salvo para dispositivos determinados, donde se buscan profundidades de investigación grandes). La variación del parámetro “N” nos va definiendo los diferentes niveles que estamos midiendo, ya que de su valor depende el tamaño del dispositivo y por tanto la profundidad a la que llegamos. En el dispositivo polo-dipolo, el electrodo de corriente designado como “ ∞ ” significa que el electrodo “B” se sitúa muy alejado del dipolo “MN” (al menos a una distancia equivalente a 3 veces el tamaño mayor del dispositivo y en sentido perpendicular al mismo).

La profundidad de investigación depende del tipo de dispositivo, del tamaño de este y de los materiales a estudiar (tamaño, disposición, contraste de resistividad, etc.).

El factor geométrico del dispositivo en este caso es:

$$\text{Ecuación} \quad g = 2\pi \frac{b(b+a)}{a} \quad (19)$$

Cuando $a \ll b$ este dispositivo es equivalente al semi-Schlumberger. Una variación del dispositivo polo-dipolo se obtiene moviendo uno de los electrodos de potencial, por ejemplo, N, a un punto distante (teóricamente al infinito). En este caso el factor geométrico es:

$$\text{Ecuación} \qquad K = 2\pi b \qquad (20)$$

Para realizar el método, en la superficie del suelo se inyecta una corriente directa a través de electrodos y se registra la respuesta de este, midiendo la diferencia de potencial en otros electrodos. La tomografía eléctrica se utiliza con dispositivos multielectrodos los que permiten mediante mediciones con distintas geometrías obtener secciones geoeléctricas o cortes de resistividades 2D, los que posteriormente se interpretan en el contexto geológico y estructural del área de estudio.

4.1.3.2. Instrumentación

La inyección de corriente, las mediciones de estas y las diferencias de potenciales se efectuaron con ayuda de un terrámetro de fabricación checa Marca Geps2000, controlado por una computadora, Electrodos de acero y garruchas de 50 a 300 metros de distancia, con una caja de multielectrodos de 16 canales (Foto 18), con las siguientes características:

Foto 17.

Equipo de medición, A: Geps 2000, B: Electrodo de acero, C: Garruchas de 100 a 300 metros de cable.



Fuente: Elaboración propia.

GEPS2000

- Transmitter:
- Output power of GEPS2000 Transmitter 2000 W
- Current up to 10 A (24 bits conversion)
- Voltage up to 2500 V
- Precisión 0.1%

4.1.3.3. Datos de campo y volumen de trabajo

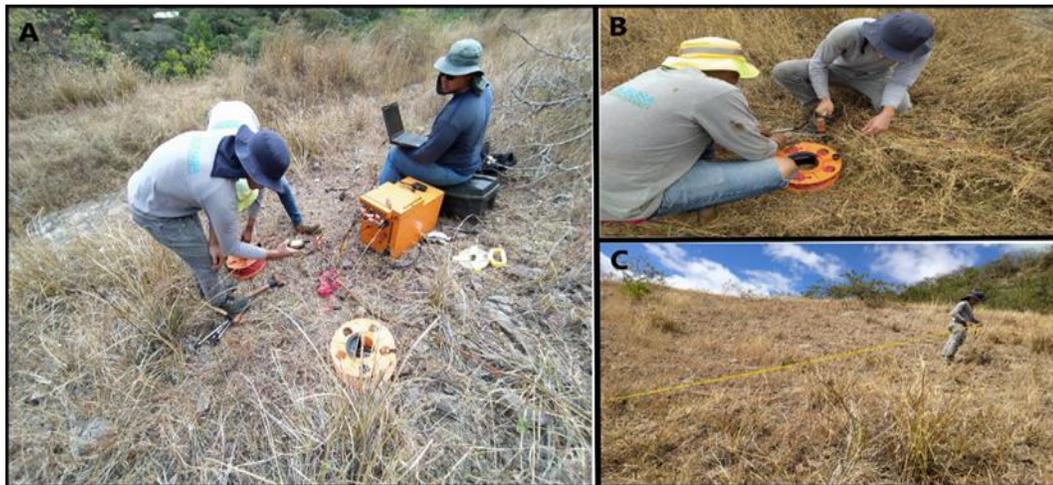
En totalidad en el talud La Gavilana se realizaron 2 perfiles geoelectricos, por lo tanto, ambos perfiles tienen de longitud 170 metros, lo cual el P1 se trazó Norte-Sur y el P2 con una orientación Oeste-Este, ver (Figura 21).

Se utilizaron 17 electrodos de potencial espaciados cada 10 m y se inyectó corriente cada 5 m y en cada potencial. Se utilizó un voltaje de 450 v con corrientes que fluctuaron

entre 240 mA y 1100 mA. Para la georreferenciación de los puntos se utilizó un GPS Garmin con una precisión en la horizontal de 2 m. En las (Foto 19) siguientes se muestra el momento en que se llevaron a cabo las mediciones de campo, en los dos perfiles geofísicos se utilizaron los mismos componentes.

Foto 18.

A: Momento exacto de las mediciones eléctricas del talud, B: Muestra la operación de clavar electrodos de corriente a cierta distancia, C: esta foto muestra las medidas en metros entre electrodos de potenciales.



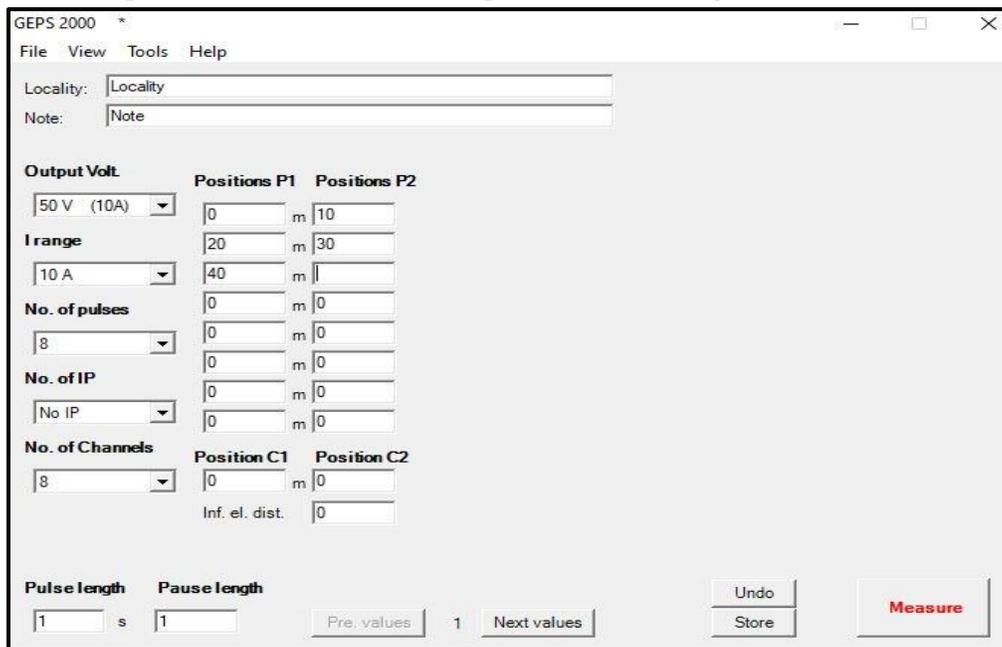
Fuente: Elaboración propia.

Una vez en el programa Geps-2000, se realizaron los siguientes pasos:

- Primero se abre el programa y se crea la geometría del talud de cómo va cada distancia entre los electrodos de potenciales y se guardan los datos en el directorio (Figura 39).
- Segundo se realizan las mediciones solo cambiando las posiciones de los electrodos de corriente y cambiando la geometría nuevamente (Figura 40).

Figura 39.

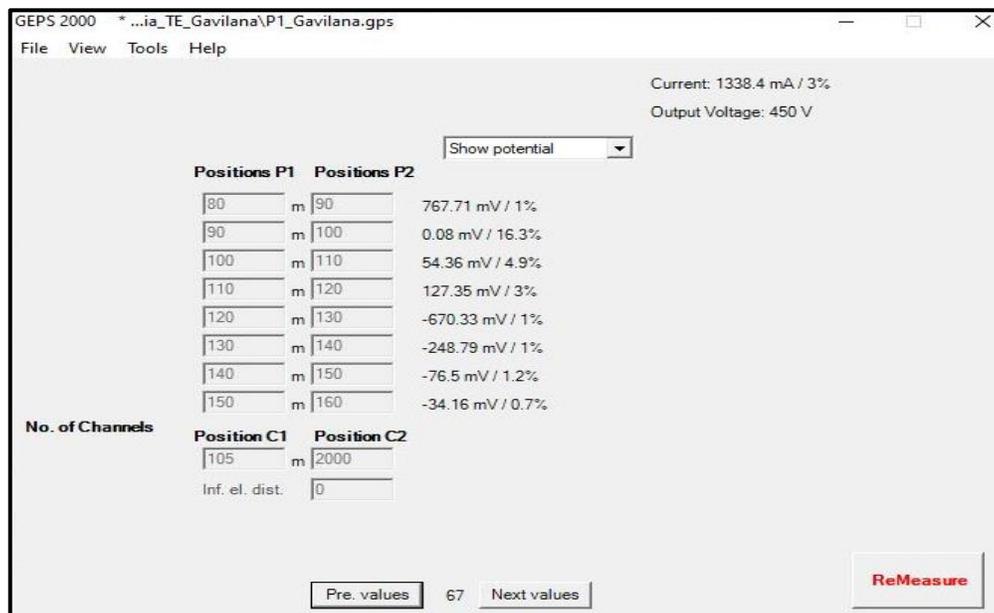
Ingreso de las posiciones de electrodos de potenciales en la geometría del talud a estudiar.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 40.

Esta figura muestra las medidas correspondientes entre los electrodos.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.4. Datos y Procesamiento.

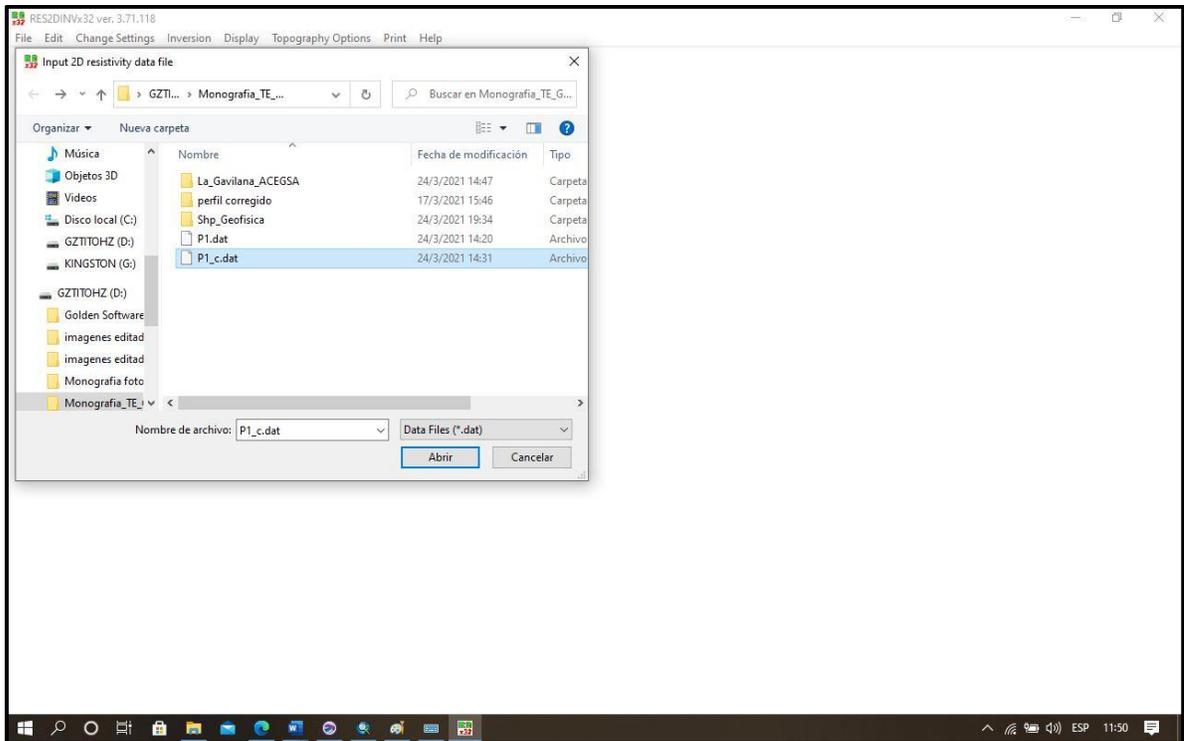
Las estructuras reales resistivas fueron interpretadas a partir de inversión en dos dimensiones de los datos. Las secciones de resistividad aparente se interpretaron mediante un proceso de inversión numérica obteniendo así, el modelo geoelectrico (Figura 43) y (Figura 44). El software utilizado para la inversión de los datos ha sido el RES2DINV el cual está diseñado para interpolar e interpretar datos de campo de prospección geofísica eléctrica en sondeos 2D de resistividades eléctrica y polarización inducida. La inversión de la resistividad se realiza mediante el método de mínimos cuadrados que involucra métodos de elementos finitos y estos valores son procesados. Finalmente, los datos e interpretan en el contexto geológico local, los resultados del procesamiento se muestran en las figuras.

Al finalizar las mediciones del talud, estos datos se procesan y se hacen correcciones, utilizando programas como Excel, WordPad, y por último estos datos se ingresan en el programa RES2DINVx32 realizando los siguientes pasos:

- Primero se abre el programa RES2DINVx32, y se escoge el archivo en formato DAT (Figura 41).
- Segundo se realiza la inversión de los datos obtenidos, presentando así una imagen con las secciones geoelectrico del talud.
- Por último, estos resultados se analizan e interpretan (Figura 42)

Figura 41.

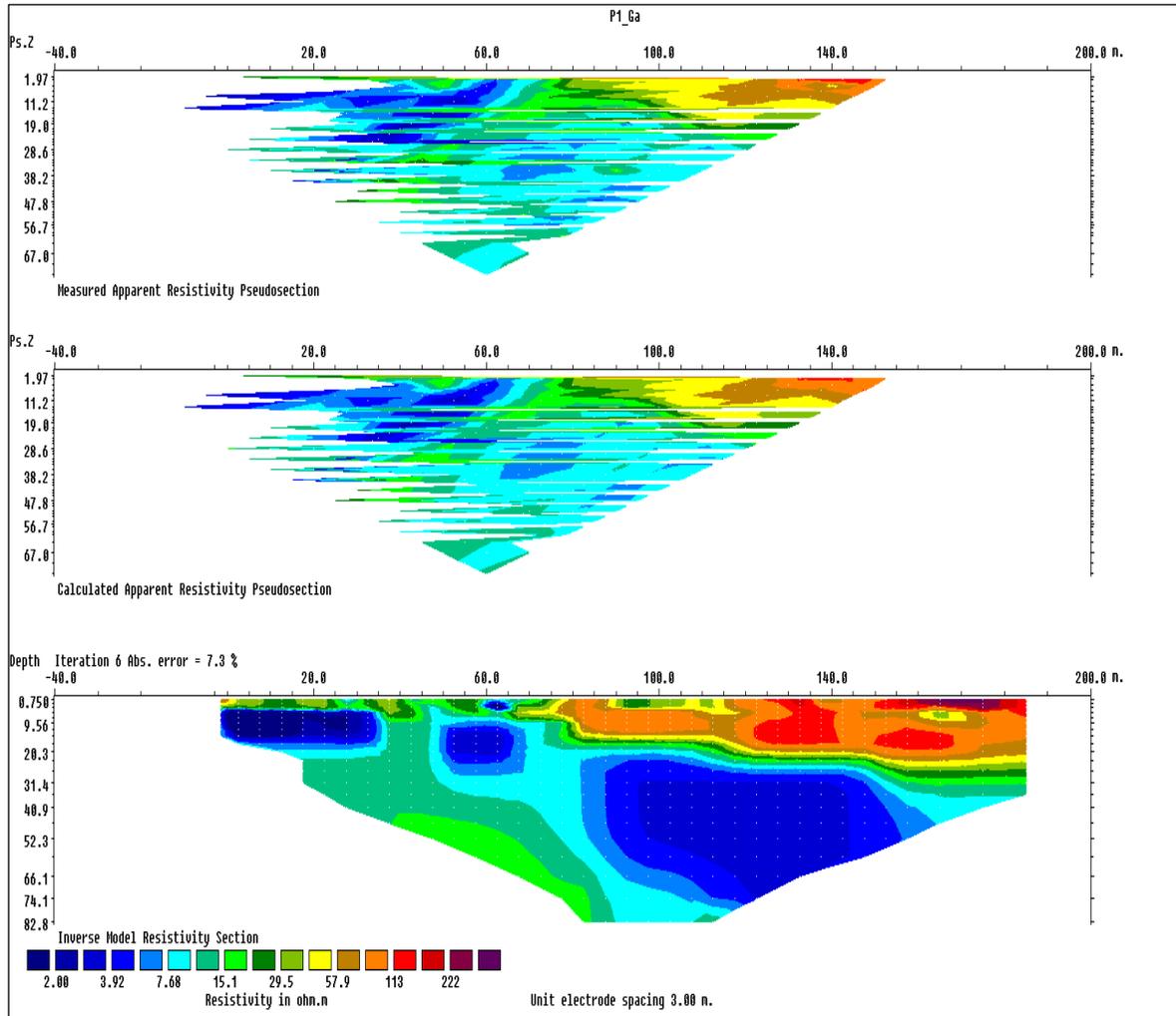
Muestra el proceso para cargar los datos obtenidos en campo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42.

Inversiones de los datos del perfil 1.



Fuente: Elaboración propia.

Es necesario destacar que sobre el talud hay obras de estabilización ya construidas (Foto 20 y 19), lo cual limita grandemente la ubicación ideal de los perfiles. Es por esta razón que la única manera de hacer el perfil geoelectrico, fue de forma transversal a la carretera. Aun así, los resultados del perfil (más abajo explicados) demuestran que el sitio es inestable en las condiciones actuales estudiadas.

Foto 20.

Vista previa del muro de contención ubicado en el talud La Gavilana.



Fuente: Elaboración propia.

Foto 19.

Vista general del muro de contención ubicado en el talud La Gavilana.



Fuente: Elaboración Propia.

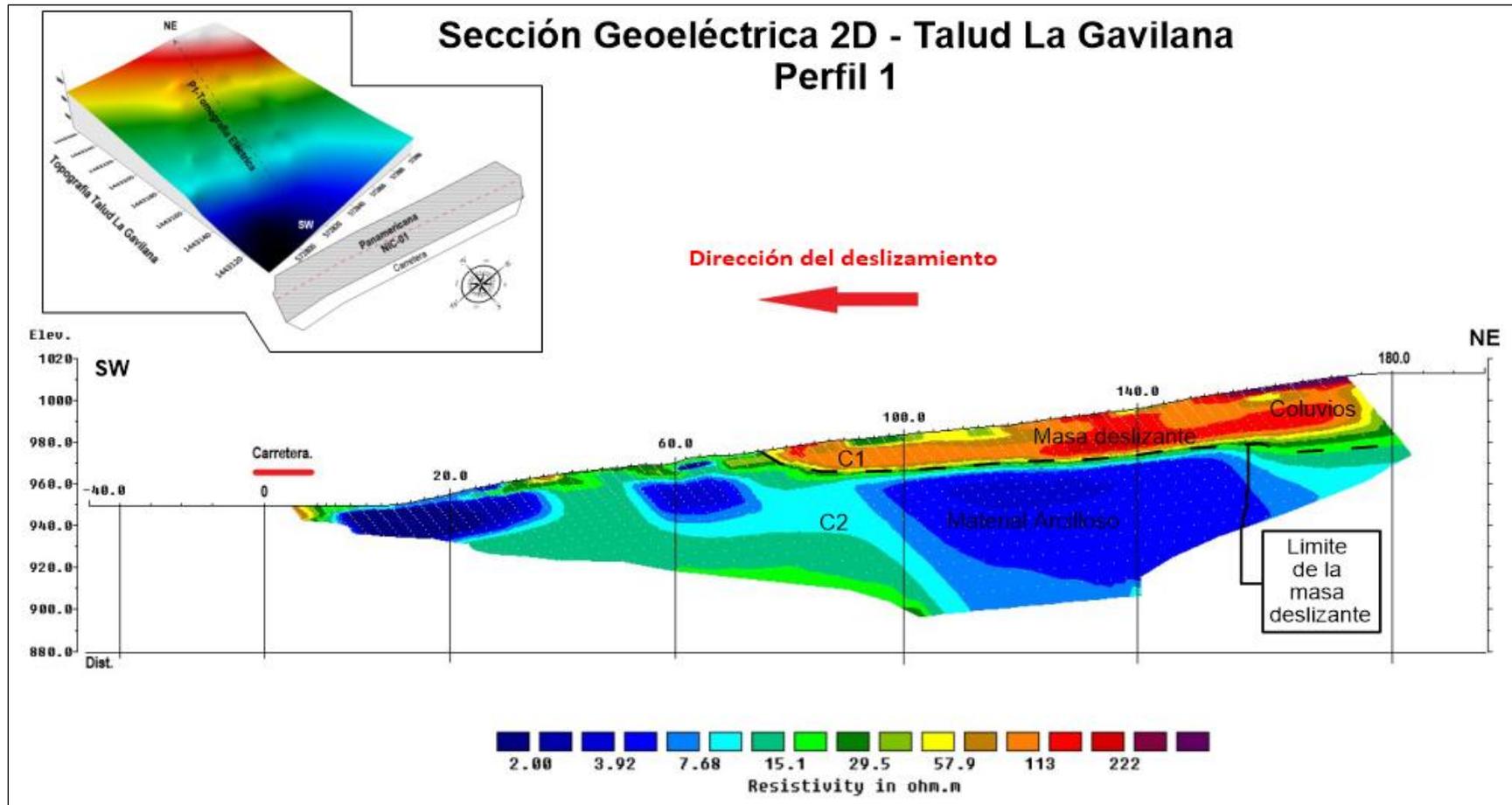
Perfil 1 (P1)

El corte geoelectrico encontrado presenta 2 capas resistivas (Figura 43):

1. CAPA 1 – Este es el estrato superficial, conformado por materiales de alta resistividad, 222 Ohm.m. El espesor de esta capa es variable, pero en promedio alcanza los 30 m. Este material se corresponde a materiales coluviales y lava (Aglomerados).
2. Capa 2. Este es un estrato de bajas resistividades (2-10 ohm.m) muy arcilloso, el que subyace a los materiales coluviales, con un espesor de 15 m.

Figura 43.

Sección Geoeléctrica del talud La Gavilana Perfil-1, con la topografía.



Fuente: Elaboración propia.

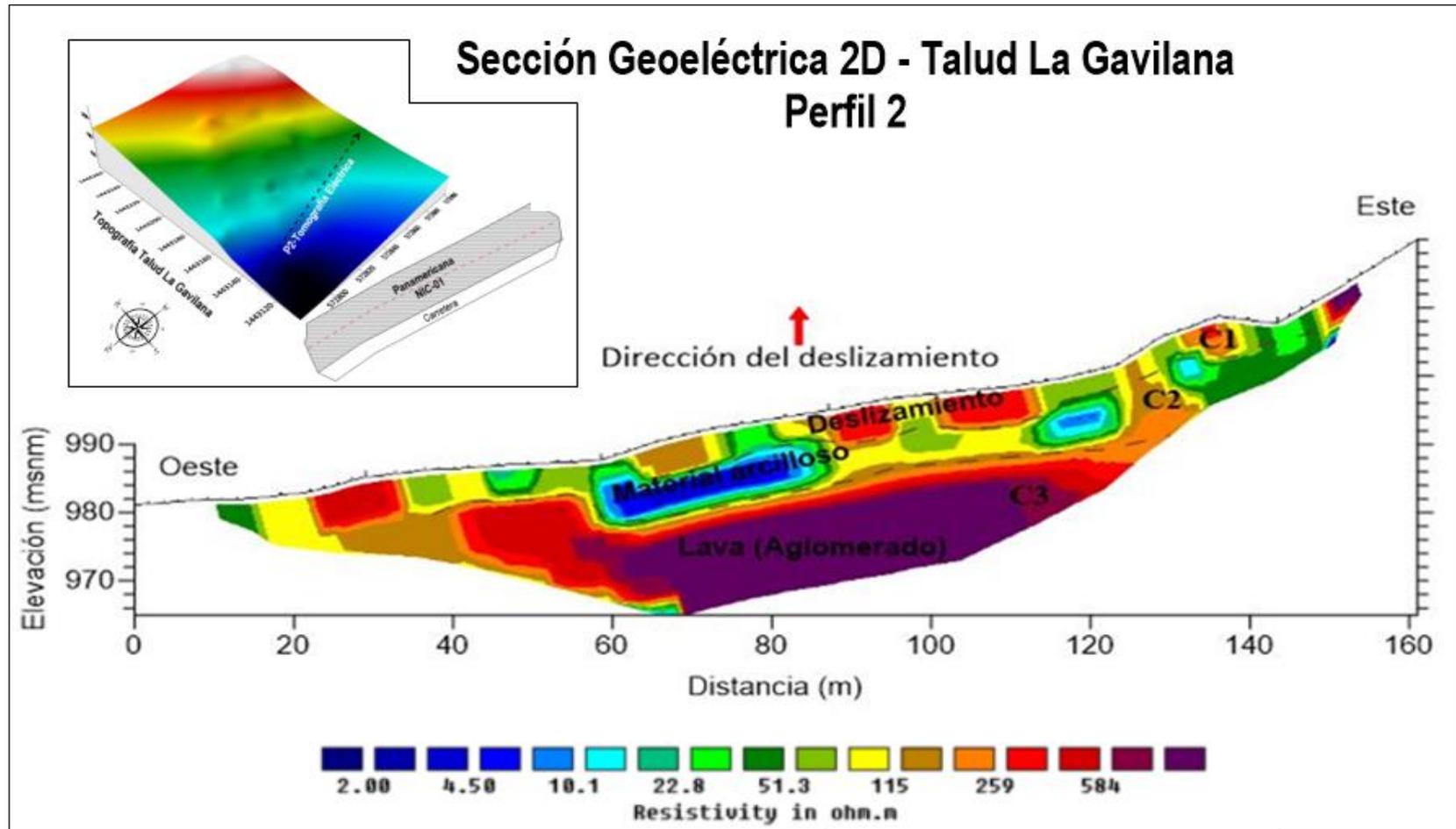
Perfil 2 (P2)

El corte geoelectrico encontrado presenta 3 capas resistivas (Figura 44):

- CAPA 1 – Este es el estrato superficial, conformado por materiales de alta resistividad, 100 Ohm.m. El espesor de esta capa es variable, pero en promedio alcanza los 5 m. Este material se corresponde materiales coluviales.
- Capa 2. Este es un estrato de bajas resistividades (2-10 ohm.m) muy arcilloso, el que subyace a los materiales coluviales, con un espesor de 5m.
- Capa 3 – Este es un estrato de altas resistividades, mayores que 584 Ohm.m aproximadamente, el cual se interpreta como lavas.

Figura 44.

Sección geoeléctrica del talud La Gavilana Perfil 2, con la topografía del terreno.



Fuente: Elaboración propia.

En el plano horizontal y vertical se detectan dos anomalías resistivas, las que representan posibles zonas de desgarre de los materiales superficiales. Esas parecen no profundizarse. De acuerdo con la morfología la anomalía se orienta en la dirección Suroeste-Noreste

Es preciso señalar que, aun por las limitaciones de ubicación del perfil sobre el talud y considerando la ubicación espacial del tendido, se observa que existe una masa de materiales muy heterogéneas que conforman el cuerpo o masa del deslizamiento. Se aprecia que existe un material arcilloso que es producto de la alteración e interperismo de la roca y que conforma el límite del deslizamiento (materiales con bajos valores de resistividad). En la masa deslizante o cuerpo del deslizamiento se observan algunas estructuras u obras de estabilización (gaviones) que se han construido sobre el talud y las cuales presentan valores altos de resistividad (Fotos 21 y 22).

Foto 22.

Vista previa de los gaviones o contracunetas del talud.



Fuente: Elaboración propia.

Foto 21.

Medidas con cinta del ancho del gavión o contracuneta del talud.



Fuente: Elaboración propia.

4.1. Discusión de resultados.

La toma de muestras y ensayos de laboratorio para determinar las propiedades del suelo permitieron que se pudiera realizar su clasificación de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS, 2007), que para el caso en estudio se obtuvo que el material corresponde a una arena pobremente graduada (SP) a arena bien graduada (SW). En base a dicha información y mediante la aplicación de ensayos adicionales se obtuvieron propiedades importantes para el estudio como lo fue el peso específico del suelo y el ángulo de fricción interna, datos relevantes para el cálculo determinadas en el procedimiento de cálculo del Factor de Seguridad.

La utilización del software Slide 6.0 especializado en el análisis de estabilidad de taludes permitió observar de forma más clara la interacción entre el factor de seguridad calculado por cada uno de los métodos (Fellenius, Bishop Simplificado, Janbú Simplificado, Janbú Corregido) y las superficies de falla distribuidas en toda la masa de suelo. Esto generó que se pudiera visualizar de forma más sencilla las zonas más inestables del talud y las que por sus propiedades y geometría poseían un mayor grado de inestabilidad.

Dado que los cuatro modelos considerados han entregados distintos valores del FS menores a 1.5 para la condición estática, se ha realizado una comparación entre ellos, por lo tanto, se observa que el talud estudiado bajo las condiciones actuales es inestable de acuerdo a sus propiedades físico-mecánicas (Figura 28), (Figura 29), (Figura 30), (Figura 31) y (Anexo 8-19).

Ante los resultados anteriores del remodelamiento del talud se plantea la posibilidad de estabilizar la ladera mediante los múltiples métodos que existen, tomando en cuenta las condiciones geológicas, geotécnicas, topográficas y geofísicas del área. se seleccionó el método más apto para llevar a cabo la modificación siendo el método de abatimiento de pendiente, debido a que se logra hacer una redistribución de las fuerzas debido al peso de los materiales, obteniéndose una configuración más estable.

El abatimiento o disminución de la pendiente es uno de los métodos más empleados para mejorar la inestabilidad, el cual consiste en la disminución de la pendiente reduce las fuerzas actuantes y adicionalmente el círculo de falla tiende a alargarse e incrementar su profundidad aumentando de esta manera el factor de seguridad.

Los resultados del análisis indican que los valores de factor de seguridad del talud varían entre los rangos de 1 y 1.4, los cuales están por debajo de valor estipulado por las normas de estabilidad, mismas que tienen como referencia un factor de seguridad de 1.5. La tomografía eléctrica refleja una zona anómala posiblemente esta sea una falla, presenta topografía irregular con un alto grado de fracturamiento, todo esto nos indica que el talud estudiado es inestable e inseguro.

Además del método que se emplea en este estudio como alternativa para mejorar la ladera, es necesario destacar, sobre el talud hay obras de estabilización ya construidas, estas se encuentran en un lapso de deterioro debido a agentes externos (corrientes de aguas), y falta de mantenimiento por las autoridades municipales.

Se recomiendan otras técnicas de modificación de la geometría como: Tender el talud para disminuir la pendiente, darle forma a la superficie de este construyendo bermas o gradas para generar varios niveles, remover material de la parte alta del talud para reducir la altura de este. También pueden ser aplicables otros métodos de estabilización como utilizar trincheras, barreras y mallas ya que estos controlan el movimiento de caída de rocas.

A partir de los resultados obtenidos, concluimos que estos guardan relación y planteamiento del (MTI & Dysconsa., 2020), el cual confirma la inestabilidad del talud y el riesgo que representa para en municipio de Estelí, municipios cercanos y todas aquellas personas que transitan por la carretera NIC.01, ya sea para fines comerciales o para otras actividades

Cabe destacar que el estudio realizado por el (MTI & Dysconsa., 2020), contribuyó a identificar el punto crítico o talud ubicado en el km 142 de la carretera Nic.01, Departamento de Estelí. Nuestra investigación complementa dicho estudio, análisis geológicos, parámetros físico-mecánicos de las rocas-suelos, levantamiento topográfico y métodos geofísicos, posteriormente ejecutados en los softwares Slide y Resdin2d, encontrando la solución más adecuada a la zona, tomando en cuenta el ámbito del costo económico de las medidas propuestas.

4.2. Conclusiones

Las características geológicas del talud corresponden desde la parte superior hasta la parte inferior en andesitas de grano fino a medio, estas se encuentran intercaladas con aglomerados de alto grado de interperismo y en parte deleznable dando lugar a un suelo arenoso, todo esto producto de un flujo volcánico de erupciones previas en el área.

Mediante el levantamiento de campo se identificó la tipología de movimiento en el área de estudio, esto corresponde a pequeños deslizamientos y desprendimientos o caída de bloques con fragmentos de 8 a 10 mts de diámetro.

Los factores condicionantes identificados en el talud fueron la geomorfología, litología, alto grado de fracturamiento en las rocas y su pendiente inclinada. Agregando también que el clima y la actividad antrópica juega un rol muy importante, el clima con una precipitación media anual de 850 mm y el alto índice de transporte vehicular que circula en la zona.

Los resultados de los parámetros físico-mecánicos obtenidos en laboratorio, dedujeron que las muestras se encuentran dentro de dos rangos de clasificación: graduadas y pobremente graduadas, dado esto las muestras TGV1_210921 y TGV2_210921 son bien graduadas, muestra TGV3_210921 y TGV4_210921 son pobremente graduadas, correspondiendo a material compuesto por gravas y arenas con pobre contenido de limo.

El análisis se basó en el empleo del software SLIDE 6.0 considerando las deficientes condiciones del sitio modelando el talud con diferentes geometrías, para operar el programa se identificaron las características estándares del material a partir de la clasificación granulométrica realizada en laboratorio y documentos recopilados respecto a la clasificación de rocas y sus propiedades geomecánicas. Los resultados considerando la geometría y la geología obtenida y las obras estructurales de construcción, dieron el factor seguridad más crítico (≤ 1.04), factor seguridad más inestable (≤ 1.29) y el factor seguridad más inestable (≤ 1.22), factor de seguridad más inseguro (≤ 1.42). Todos los modelos coincidieron en un resultado para factor seguridad menor a 1.5.

Mediante las secciones geoelectricas definimos que el talud la Gavilana presenta cortes muy similares conformados hasta los 30 m de profundidad, estos definidos por 3 estratos: Uno somero de alta resistividad conformado por materiales coluviales y aluvi6n residuales de 4-5 m de espesor; un delgado estrato de baja resistividad, arcilloso, de 5 m de espesor; y un estrato base conformado por lavas y/o aglomerados. El talud muestra zonas de falla en direcci6n NW-SW, esto aunado a la presencia de una capa arcillosa, indican que son muy propensas a la ocurrencia de deslizamientos.

Adem6s del m6todo planteado para estabilizar el talud de este estudio se pueden aplicar otros m6todos de estabilizaci6n como utilizar m6s sistemas de control en el pie del talud como trincheras, barreras y mallas ya que los que se encuentran est6n deteriorados y colapsados, estos procedimientos controlan el movimiento de ca6da de rocas, tambi6n pueden emplear barreras de protecci6n como muros de concreto, pilotes, gaviones y construir cubiertas de protecci6n.

No se realiz6 el muestreo de rocas en toda la longitud del talud por condiciones inestables que este presenta. Se limitaron algunas mediciones estructurales a causa de la abundante vegetaci6n que existe en la pared del talud y careciendo de una completa visibilidad.

Bajo estas condiciones se concluy6 que el talud Cerro La Gavilana es inestable bajo las condiciones actuales que esta presenta.

4.3. Recomendaciones.

Utilización de estaciones totales en los estudios similares para efectuar modelamientos y análisis tridimensionales de la inestabilidad del talud a fin de obtener datos con mayor precisión.

Realizar estudios SPT en diversos puntos del talud, para actualizar información más precisa del comportamiento actual del mismo y así realizar un análisis más a detalle de los parámetros físico-mecánicos del suelo y subsuelo en el talud.

Llevar a cabo estudios de amenazas sísmicas mediante la realización de pruebas como refracción o vibración ambiental que permiten determinar valores de velocidades de ondas primarias o de compresión y velocidades de ondas secundarias o de corte.

Ejecutar perforaciones horizontales paralelas al escarpe del talud, utilizando métodos ingenieriles de drenaje, esto con el fin de evacuar el agua saturada en el subsuelo ocasionada por las fuertes precipitaciones en el lugar de estudio.

Acudir a las autoridades municipales de la zona para ejecutar proyectos que incluyan métodos ingenieriles como: métodos de control en el pie del talud como trincheras, gaviones, mallas, entre otros. Todo esto con el fin de reducir riesgos ante desastres.

Programación de brigadas por parte de la alcaldía y MTI, que realicen limpieza de bloques desprendidos del talud antes del comienzo de época de invierno.

Elaborar campañas de señalización a lo largo de cuesta la Gavilana, que ayude a prevenir a la población que transita sobre el tramo de carretera km 142.

CAPÍTULO V

5.1. Bibliografía

- AASHTO, A. A. (1940). *Estandard Specifications For Highway Bridges*. Washington, D.C., Estados Unidos.: (F. J. Sierra, Trad.).
- Abramson, L. W., Thomas, S. L., Sunil, S., & Glenn, M. B. (2002). *Slope stability and stabilization methods*. John Wiley and Sons, Inc.
- Alcántara, I. (2000). *Mitigación del Riesgo por Inestabilidad*. ADN.
- Alonso, E. (1989). Análisis de la estabilidad de taludes. En *Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales* (págs. 97–118). Catalunya: Sociedad Española de Geomorfología.
- ASTM. (1586). *Geotechnical investigation and testing – Field testing*. (U.-E. ISO, Ed.)
- ASTM C 127. (2003). *American Society for Testing and Materials* (Vol. Volumen 04.02).
- ASTM D-854, AASHTO T-100. (2006). *GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS (PICNÓMETRO)*. Obtenido de <http://www.lms.uni.edu.pe/labsuelos/MODOS%20OPERATIVOS/Determinacion%20de%20la%20gravedad%20especifica.pdf>
- Atterberg, A. M. (s.f.). *STM D4318-05 Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of soils*.
- Bishop, A. W. (1955). *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes* (Vol. V). M.A., PhD., A.M.I.C.E.
- Brabb. (1989). *Landslides: extent and economic significance*. Washington DC.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide Types and Processes*. Washington: TRBNRC, National Academy.
- Dengo, G., & Case, J. (1990). The Caribbean Region. The Geology Of North America. *Geol. Soc. Am.*, 528.
- Ducan, J. M. (1996). *Soil slope stability analysis*. Transportation research Board. National research council.
- Ducan, J. M., & Wright, S. G. (1980). *The accuary of equilibrium methods of slope stability analysis*. California, Berkeley, Calif. (U.S.A.): Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam -- Printed in The Netherlands.

- ENACAL. (2021). *Ficha Municipal*. Obtenido de Caracterización Municipal de Esteli:
<http://biblioteca.enacal.com.ni/bibliotec/Libros/enacal/Caracterizaciones/Esteli/Esteli.html>
- Fellenius. (1955). *The early history of circular sliding surfaces*. Geotechnique .
- Garayar, J. (1971). *Geología y depositos minerales de una parte de las mesas de esteli, cordillera norte y montañas de Dipilto*. Managua.
- González G., A. J. (1974, 1992, 1999, 2006). *Safety Factors: A Conceptual Review*. Bogotá, Colombia: Análisis Geotécnicos Colombianos AGC Ltda.
- GSHAP. (1999). *Global Seismic Hazard Assesment Programm*. Obtenido de <http://gmo.gfz-potsdam.de/>
- Herraiz , M. (1997). *Conceptos básicos de sismología para ingenieros*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería - CISMID.
- Hodgson , G. (1971). *Geología y anotaciones mineralogicas de la planicie SE del Lago de Nicaragua*. Managua.
- Hodgson, G. (1984). *Geotransversal costa a costa. Proyecto SAREC*. Managua.
- Howel, W. (1965). *volcanic history of nicaragua* . california : Ann Arbor (Mich.) : UMI.
- Hutchinson, J. N. (1988). *Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrogeology. Proccedings, Fifth International Symposium on Landslides*. Balkema: Rotterdam.: (C. Bonnard, ed.).
- I. C. (1990). *international association for engineering geology and the environment*. Recuperado el 06 de 08 de 2020, de <https://www.iaeg.info/>
- INEC. (2005). *INEC*. Obtenido de www.inec.gob.ni
- INETER. (2020). *Dirección General de Geodesia y Cartografía*. Obtenido de <https://www.ineter.gob.ni/geodesiaycartografia.html>
- INETER, & CONSUDE. (2003-2005). *Proyecto MET-ALARN, Recomendaciones técnicas para la elaboración de mapas de amenaza y susceptibilidad a inestabilidad de laderas*. Ineter-Consude, Nicaragua.
- Instituto Geotécnico Noruego. (2008). *Guía para la implementación y sostenibilidad de sistemas de alerta tempranante deslizamientos (SATD) en America Central*. UNESCO.
- Jambu, N. (1968). *Slope stability computations. Soil mechanics and foundation engineering report*. Trondheim.: Technical University of Norway.

- JICA, A. D. (1998). *Estudio de redcción de vulnerabilidad en las carreteras principales de la Republica de Nicaragua*. Nicaragua: Oriental Consultanst Company Limited.
- Lilljequist, R., & Hodgson, G. (1983). *Structures and rock formations related to precious metal vein deposits in nicaragua*. INMINE-SAREC-SGAB.
- Loke , M. H. (2004). *Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys*.
- Lowe, J., & Karafiath, L. (1960). Effect of anisotropic consolidation on the undrained shear strength of compacted clays. *ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, (págs. 837-858).
- Merchán, J., & Sánchez , D. (2013). *Evaluación de la estabilidad de los taludes en un sector de la canntera de materiales pétreos “Las Victorias”*. Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). *The Analysis of the stability of general slip surfaces*. London: The Institution of Civil Engineers.
- MTI & Dysconsa. (2020). *Proyecto: “Estudio de Factibilidad y Diseño para la Ampliación de Carretera Empalme San Benito – Empalme Sébaco - Estelí”*. Managua.
- Obando Rivera, T. E. (2010). *Documentos explicativos de mapa de inestabilidad de terreno y geología del tramo de carretera desde la trinidad (estelí) hasta el espino, al norte de nicaragua*. Managua: INETER. doi:file:///C:/Users/50577/Desktop/mapa-inestabilidad-terrenos-geologia-carretera.pdf
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). *Multichannel analysis of surface waves (MASW)*. USA: Kansas Geological Survey, Lawrence.
- Pellicer, E. (2015). *Caracterización mediante tomografía eléctrica del deslizamiento de toleo (oviedo)*. Universidad de Oviedo. doi:file:///C:/Users/50577/Downloads/TFM_Esperanza%20Pellicer%20Jimenez%20(1)%20(1).pdf
- Rogers, J. D. (2006). *Exploración de subsuperficies utilizando la prueba de penetración estándar y prueba de penetrómetro cono*. Departamento de Ciencias Geológicas e Ingeniería , 125 McNutt Hall, University of Missouri.
- Sanchez San Román, J. (s.f.). *Ciclo Hidrológico*. España. Obtenido de <http://hidrología.usal.es>
- Sarma , K. (1973). *Stability Analysis of Embankments and Slopes* (Vol. 23). Geotechnique.

- Skempton, A. W., & Hutchinson, J. N. (1969). Stability of Natural Slopes and Embankment foundations. *Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (págs. 291-340). Mexico: State of the art.
- Spencer , E. (1967). *A Method of Analysis of the Stability of Embankments* (Vol. 17). Geotechnique.
- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad De Taludes En Zonas Tropicales*. (I. d. Ltda., Ed.) Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda. Obtenido de <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
- SUCS. (2007). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>
- Tupak, O. (s.f.). *Monografias*. Recuperado el 15 de agosto de 2020
- UNE-EN, 9.-1. (05 de 09 de 2017). *UNE-Normalización Española*. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049638>
- UNESCO-CEPRENAC. (2012). *Proyecto fortacelimiento de capacidades en los sistemas de alerta temprana, SAT, en america central, desde una perspectiva de multiamenaza*. doi:<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/San-Jose/pdf/Informe%20Final%20Nicaragua.pdf>
- Varnes, D. J. (1978). *Landslide types and processes*. Washington, DC United States: Transportation Research Board.

5.2. Anexos

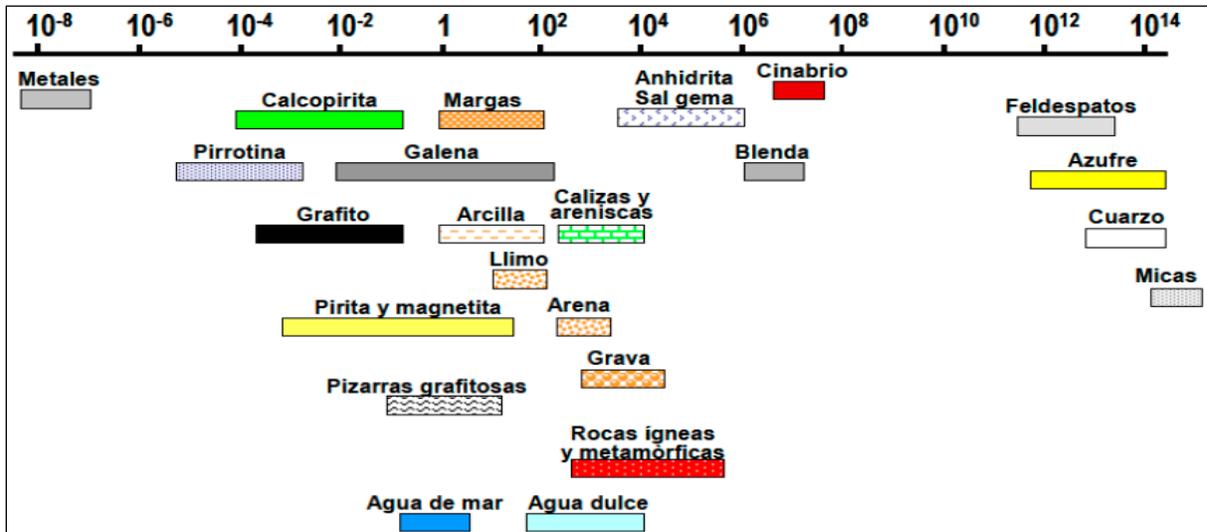
5.3. Glosario.

- ✓ **Avalancha:** Desprendimiento súbito y progresivo de una mezcla de roca, tierra y agua o nieve que cae ladera abajo.
- ✓ **Caídos de terreno:** Fragmentos de tierra o roca que se desprenden y se depositan en la parte baja de una ladera.
- ✓ **Depósito de suelo:** Región donde se depositan materiales que cuentan con coherencia natural, derivada del tipo y tamaño microscópico de las partículas individuales que los forman.
- ✓ **Deslizamiento:** Aplicado a suelos y a material superficial, se refiere a movimiento plástico lento hacia abajo. Aplicado a sólidos elásticos, alude a deformación permanente a causa de algún esfuerzo.
- ✓ **Discontinuidad:** Falta de continuidad en una formación geológica que originalmente se manifestaba en la naturaleza en forma continua en el tiempo y en el espacio.
- ✓ **Inestabilidad de taludes:** Involucra a los problemas principales que se plantean en los taludes de tierra y/o roca, inclusive el control de deslizamientos y caídos a los lados de los cortes, a los costados de los depósitos de materiales de relleno y en las faldas de las colinas naturales. Los estudios geotécnicos y geofísicos representan una herramienta poderosa para definir la solución de los problemas de inestabilidad de taludes.
- ✓ **Estrato:** Capa de suelo o de roca que se localiza en una región, originalmente en posición horizontal; en ocasiones su espesor puede ser muy variable.
- ✓ **Falla:** Superficie de ruptura de una roca a lo largo de la cual ha habido movimiento diferencial.
- ✓ **Fallas de ladera:** Son mecanismos desequilibrados que pueden derivar en desprendimiento de suelo y roca por acción de las fuerzas originadas por la atracción de las fuerzas de la gravedad de la tierra.
- ✓ **Fallas de pendiente:** Movimiento hacia abajo y hacia fuera de la roca o del material sin consolidar, como una unidad o como una serie de unidades.
- ✓ **Formaciones:** Rasgos geológicos característicos de una región de la tierra, determinados por los materiales existentes y los procesos físicos que les dieron origen en el devenir histórico de la tierra.

- ✓ **Fracturamiento:** Los patrones de ruptura determinan generalmente la consistencia de las masas rocosas. Los patrones de estratificación y fracturamiento o ruptura, así como los lentes de roca muy intemperizada son los factores que controlan la consistencia de la roca.
- ✓ **Geotecnia:** Es la aplicación de las ciencias de la tierra a la solución de los problemas de ingeniería civil.
- ✓ **Irregularidades topográficas:** Cambios importantes en altura o forma de los rasgos naturales existentes, como la presencia de un valle redondo de cadenas montañosas.
- ✓ **Ladera:** Costado de un terraplén o de una montaña.
- ✓ **Litológicas (características litológicas):** Representa las características estratigráficas de una formación geológica o de una zona de terreno, es decir, los tipos de roca, como se presentan, tamaño de grano, color y constituyentes minerales.
- ✓ **Resistencia:** Fuerza necesaria para que ocurra la ruptura o para que comience la deformación plástica.
- ✓ **Roca:** Agregado de minerales de diferentes especies en proporciones variables.
- ✓ **Suelo:** Material que se forma en la superficie de la tierra como resultado de procesos orgánicos. El suelo varía según el clima, la vida animal y vegetal, el tiempo, la pendiente del terreno y el material (rocoso) del que se deriva.

Anexo 1.

Valores de resistividad eléctrica de diferentes rocas y minerales, redibujado.



Fuente: (Loke , 2004).

Anexo 2.

Se muestra lo siguiente: A) se observa las muestras de 30 gramos aproximadamente cortadas, B) Pesa, donde se está calculando el agua destilada con una muestra de suelo, C) Momento exacto donde se utiliza el equipo martillo de rebote para medir la resistencia de la roca.



Fuente: Elaboración Propia

Anexo 3.

Esta tabla muestra las coordenadas de cada una de las muestras tomadas en el talud a estudiar.

Muestras	Coordenadas		
	Puntos	N	E
1	1443286	572908	38
2	1443204	572867	42
3	1443174	572859	36
4	1443154	572842	30

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4.

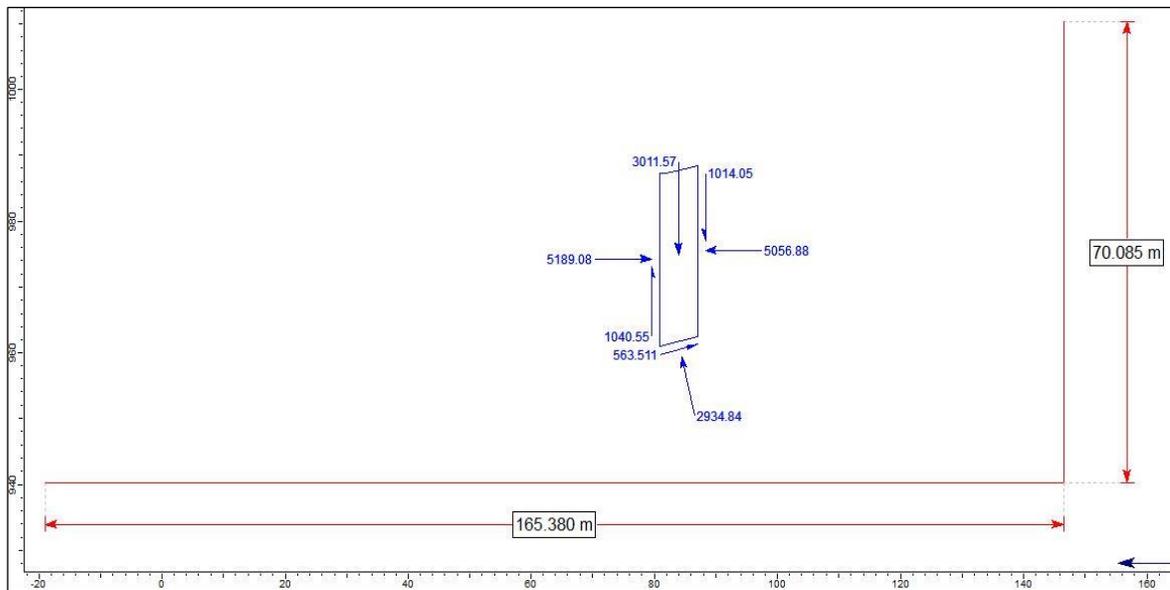
Datos de fracturamiento que se realizaron en el área de estudio.

N°	RUMBO		Dip	Ancho (cm)	Largo (m)
	NE	NW			
1		354°	85	1,3	1,6
2		350°	80	1,5	1,2
3		347°	86	0,8	1,35
4		356°	90	0,5	1,84
5		355°	90	1,7	1,3
6		350°	82	1	2,1
7		348°	88	2,5	1,8
8		358°	88	1,8	2,5
9	5°		84	1,4	2,1
10	12°		76	1,1	1,45
11	8°		70	0,8	2,35
12		348°	80	0,6	1,15
13		352°	75	0,8	2,5
14		350°	70	2,6	1,3
15	20°		85	3,4	1,55
16	16°		80	3	2,3
17		346°	74	1,6	1,4
18		355°	88	1,9	1,65
19		350°	84	0,7	1,2
20		348°	80	1,2	1,8
21		356°	87	1,8	2,1
22		350°	78	0,5	2,4
23		345°	75	2,4	1,95
24		350°	78	1,6	1,6
25		340°	73	1	1,7
26		342°	68	0,9	2,5
27		358°	86	1,8	2,15
28		353°	84	2,5	1,85
29		358°	88	2,2	1,35
30	15°		76	1,5	1,6
31		350°	80	1,4	2,15
32		346°	72	0,8	1,75
33		348°	70	2,4	1,9

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 5.

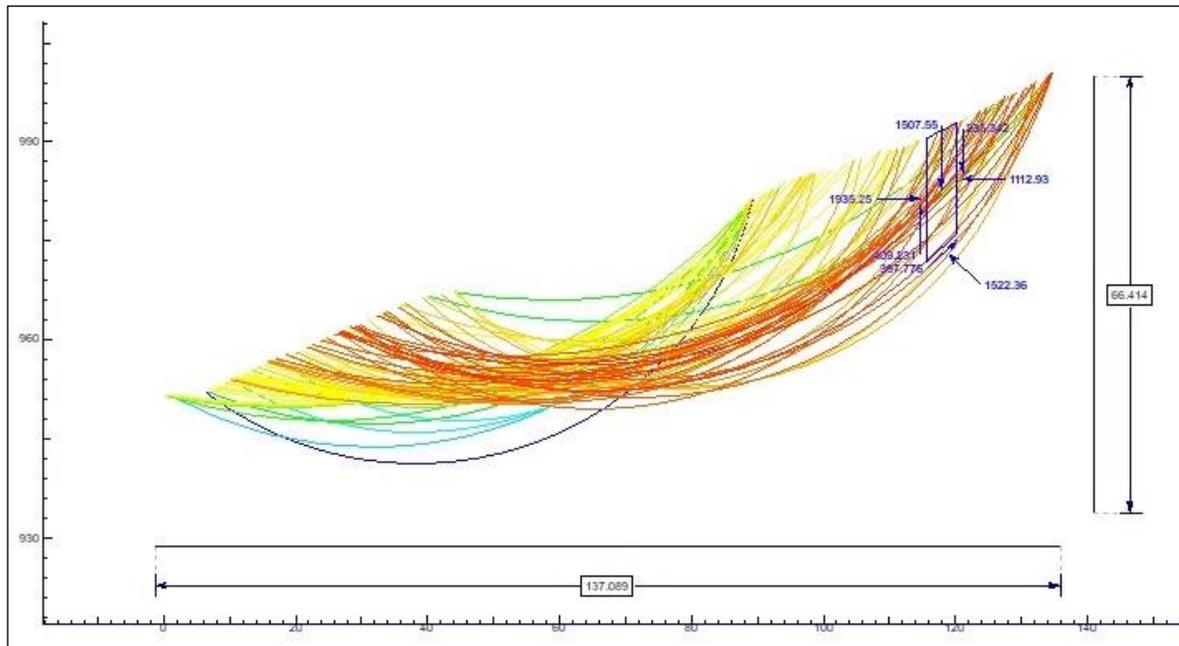
Análisis de una de las dovelas del método de Fellenius Perfil-1.



Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 6.

Análisis de una de las dovelas del método de Fellenius Perfil-1.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7.

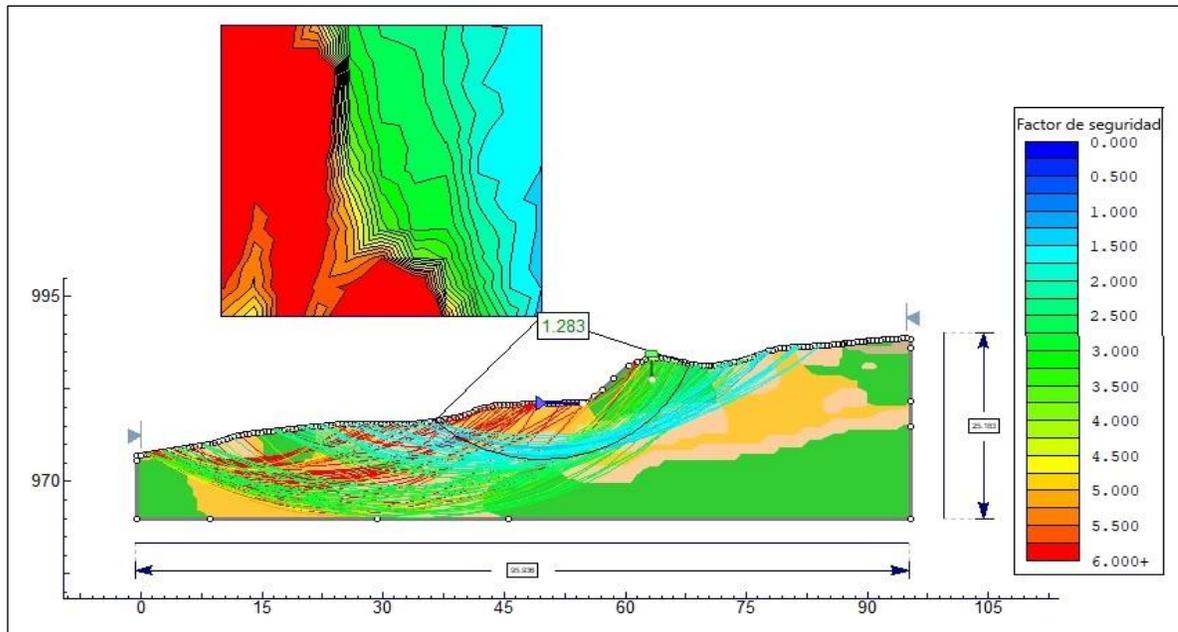
Se muestra una tabla de los datos obtenidos de la dovela del método de Fellenius.

Número de rebanada:	1	(Fellenius)
Factor de seguridad:	104,461	
Ángulo de fricción de la base:	45	Grados
Cohesión de base:	28	kPa
Ancho de la rebanada:	512,458	m
Longitud de la base:	553,039	m
Ángulo de la base de la rebanada:	-220,857	Grados
Peso de la rebanada:	204,918	kN
Fuerza de fricción:	161,297	kPa
Fuerza cohesiva:	28	kPa
Resistencia al cizallado:	189,297	kPa
Estrés por cizalla:	181,213	kPa
Fuerza de cizalla de base:	1002.18	kN
Fuerza normal de base:	892,038	kN
Estrés normal de base:	161,297	kPa
Estrés normal efectivo:	161,297	kPa
Presión de poros:	0	kPa
Presión positiva de los poros:	0	kPa
Succión matricial:	0	kPa
Exceso de presión de poros:	0	kPa
Presión inicial de los poros:	0	kPa
Fuerza normal del lado izquierdo:	0	kN
Fuerza de cizalla del lado izquierdo:	0	kN
Fuerza resultante del lado izquierdo:	0	kN
Ángulo de fuerza del lado izquierdo:	0	Grados
Fuerza normal del lado derecho:	1262.78	kN
Fuerza de cizalla del lado derecho:	253,222	kN
Fuerza resultante del lado derecho:	1287.92	kN
Ángulo de fuerza del lado derecho:	11,339	Grados
Fuerza sísmica horizontal:	0	kN
Fuerza sísmica vertical:	0	kN
Fuerza sísmica resultante:	0	kN
M-Alfa:	0.567176	
Elevación de la línea de empuje:	966,976	m
Coordenada Y - Abajo:	966,976	m
Coordenada Y - Arriba:	966,976	m
Phi _b :	0	Grados
Material base:	1	

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 8.

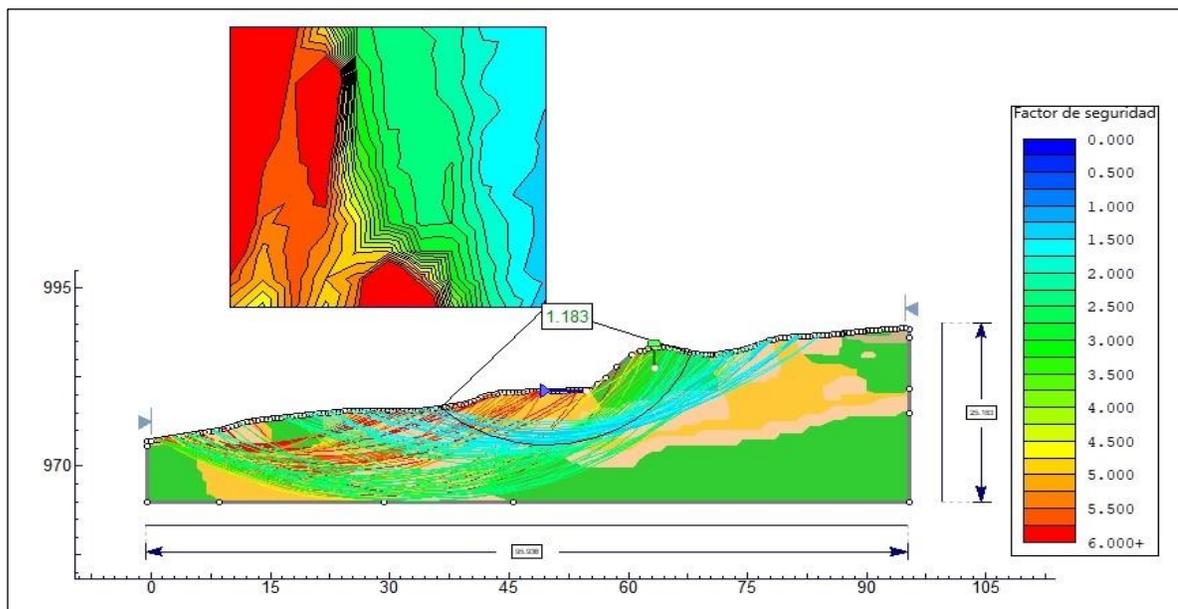
Modelamiento del perfil-2, calculando el factor de seguridad por el método Bishop simplificado.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9.

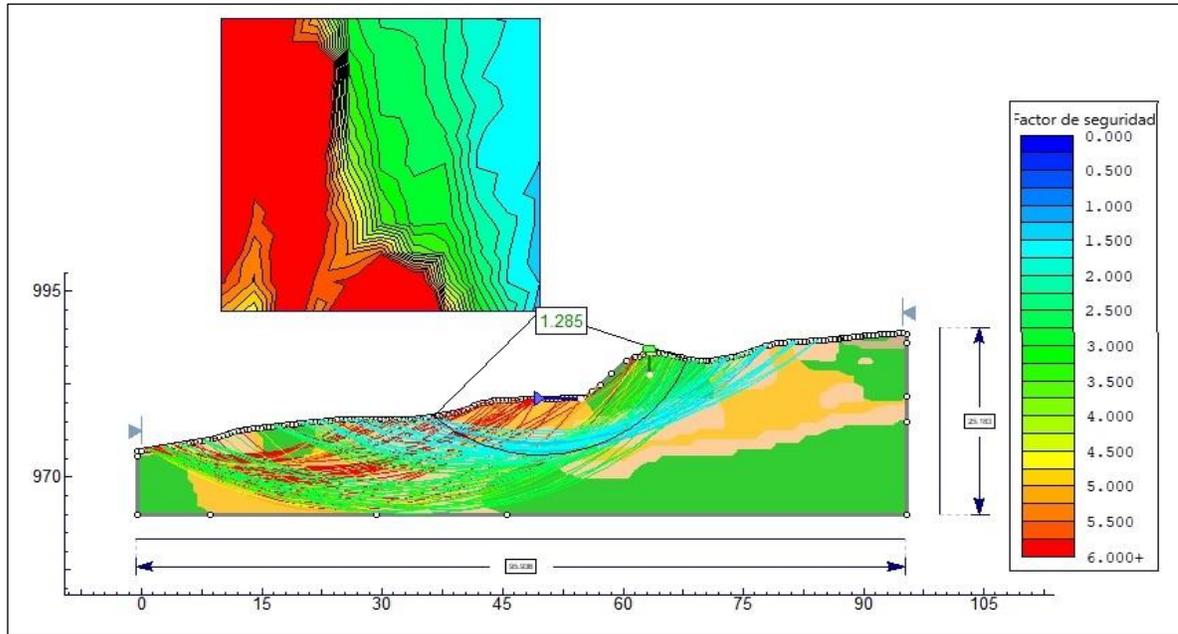
Modelamiento del perfil-2, calculando el factor de seguridad por el método Janbu simplificado.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10.

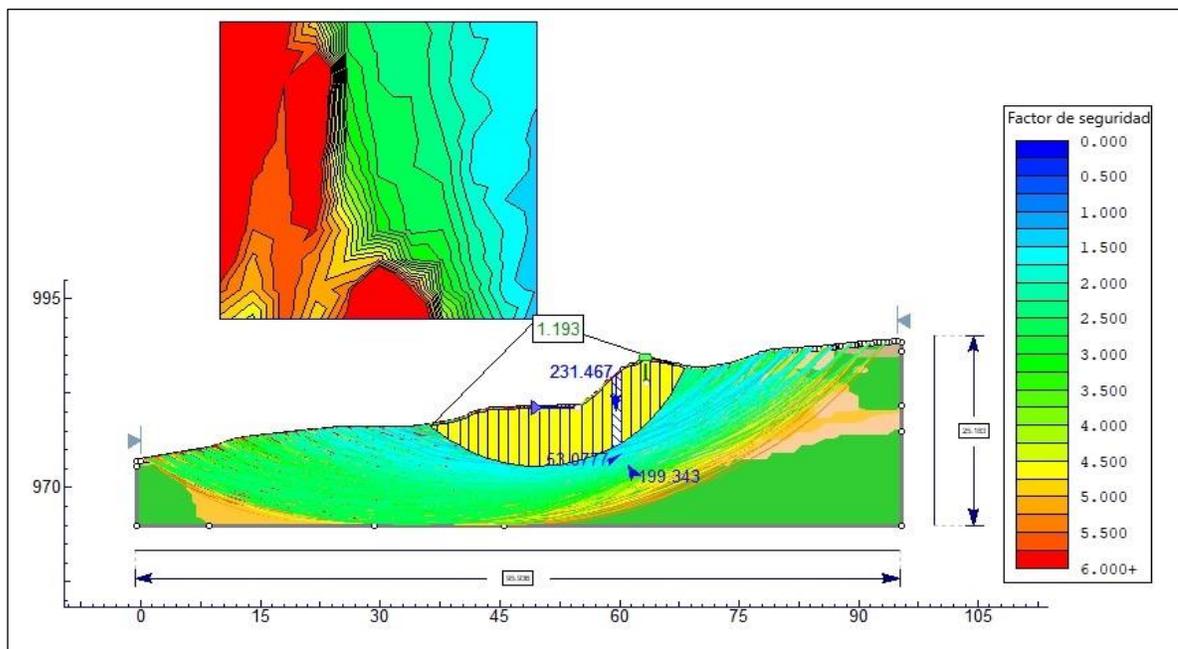
Modelamiento del perfil-2, calculando el factor de seguridad por el método de Spencer.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11.

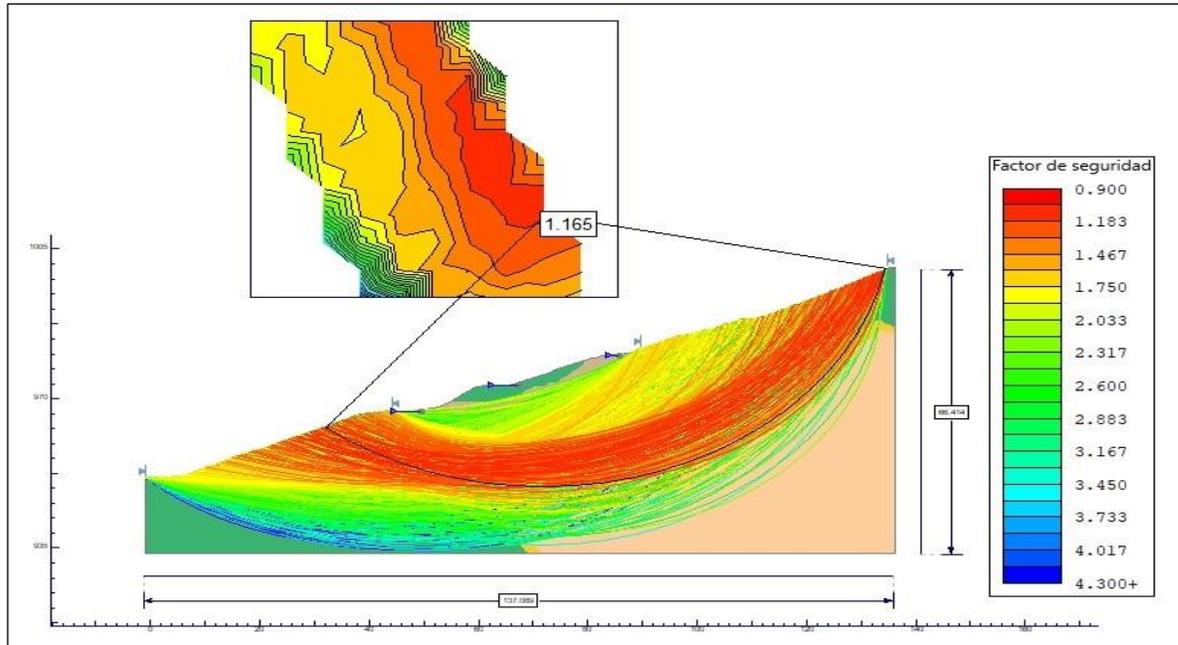
Modelamiento del perfil-2, calculando el factor de seguridad por el método de dovelas de Fellenius.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12.

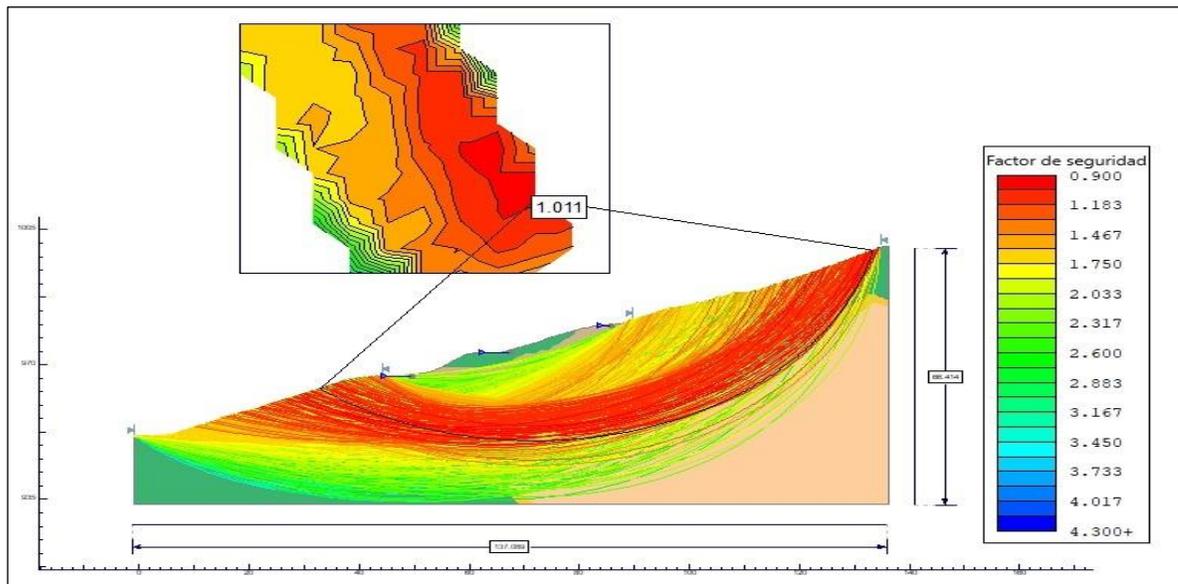
Modelamiento del perfil-3, calculando el factor de seguridad por el método Bishop simplificado.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13.

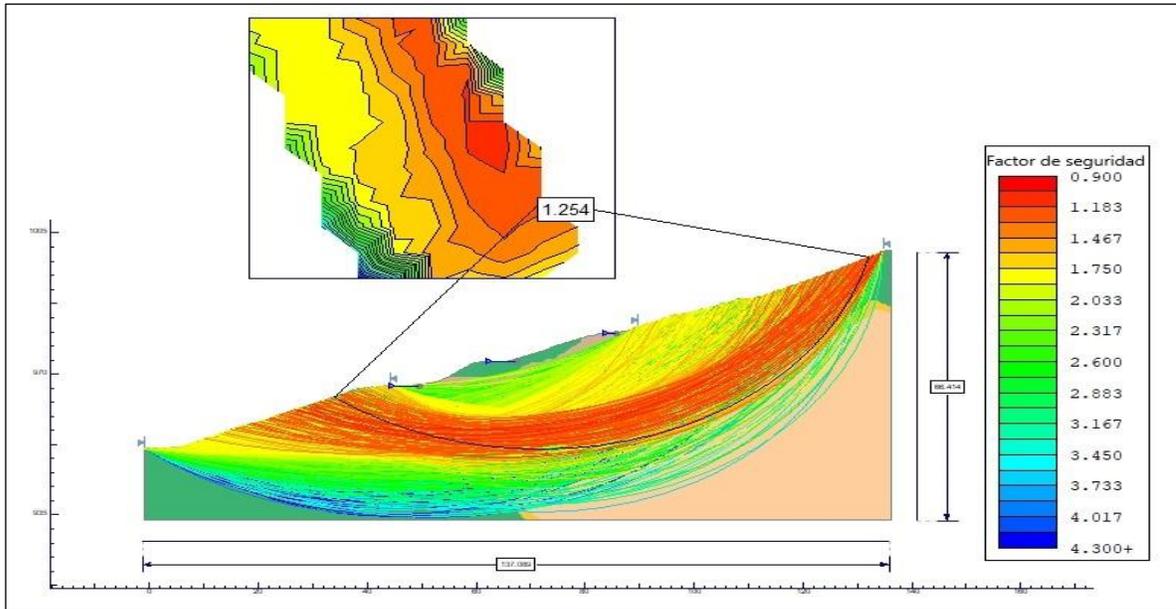
Modelamiento del perfil-3, calculando el factor de seguridad por el método Jambu simplificado.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 14.

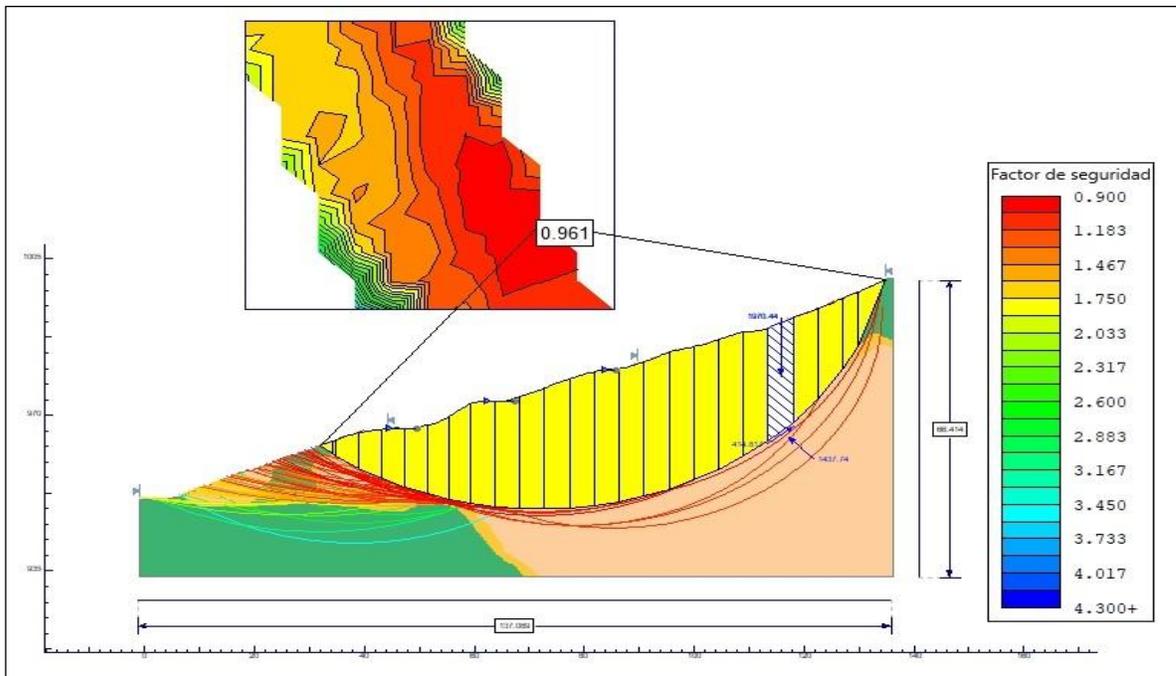
Modelamiento del perfil-3, calculando el factor de seguridad por el método Spencer.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 15.

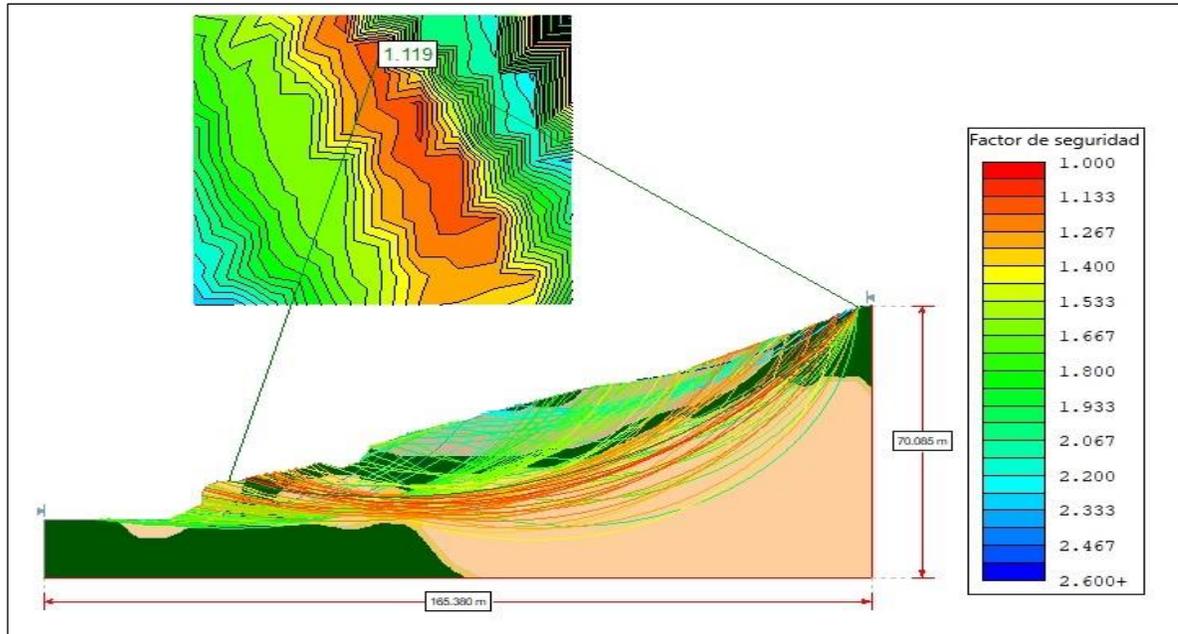
Modelamiento del perfil-3, calculando el factor de seguridad por el método dovelas de Fellenius.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 16.

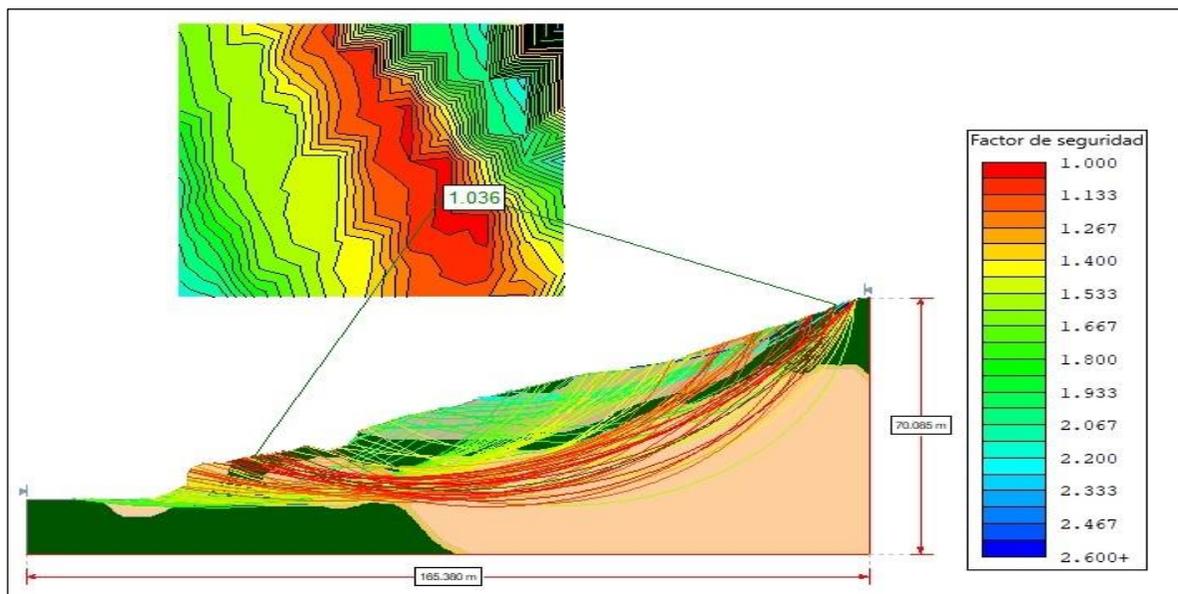
Modelamiento del perfil-4, calculando el factor de seguridad por el método de Bishop simplificado.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 17.

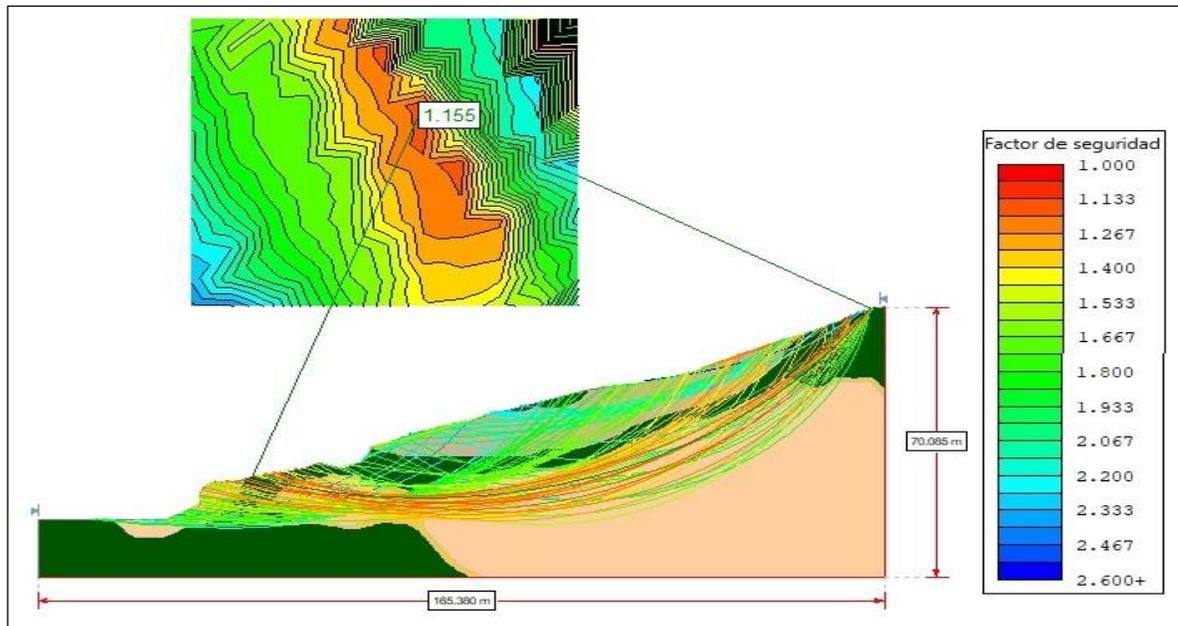
Modelamiento del perfil-4, calculando el factor de seguridad por el método de Janbu simplificado.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 18.

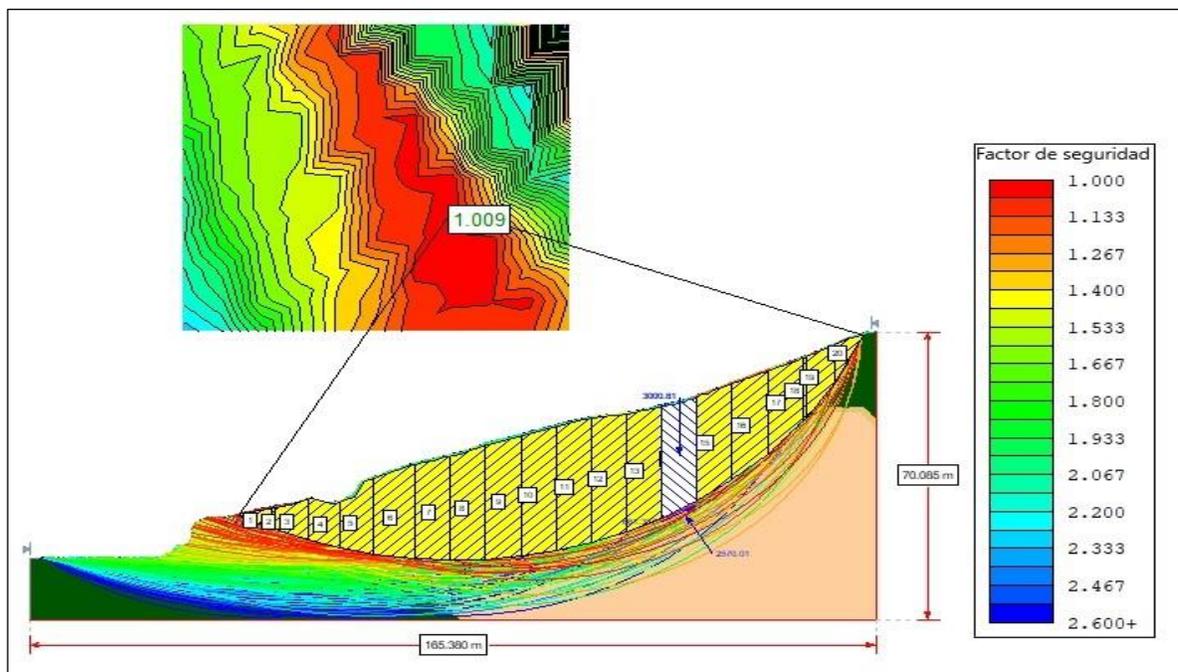
Modelamiento del perfil-4, calculando el factor de seguridad por el método de Spencer.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 19.

Modelamiento del perfil-4, calculando el factor de seguridad por el método dovelas de Fellenius.



Fuente: Elaboración Propia.