

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Caracterización geológica y geotécnica de un movimiento en masa en el sector Nueva Prosperina, Guayaquil - Ecuador.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Geología

Presentado por:

José Agustín García Romero

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mis padres, hermana, abuelos y pareja, por su amor y sacrificio durante todos estos años, el cual ha permitido que llegue hasta aquí y me convierta en lo que soy. Es un orgullo y privilegio formar parte de sus vidas.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a los profesores de Geología, en especial a mis tutores MSc. Ángel Valdiviezo, MSc. David Altamirano y MSc. Peter Olaya, quienes estuvieron dispuestos a ayudarme en todo momento con sus conocimientos y visitas a campo. Gracias a cada uno por su dedicación y apoyo incondicional.

De igual manera a los técnicos de la Dirección de Gestión de Riesgos y Cooperación de la Alcaldía de Guayaquil y el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencia, en especial a Jhoyzett Mendoza y Darwin Yáñez, quienes colaboraron en trabajos de campo imperantes para el proyecto.

Finalmente, a mis compañeros y amigos; Jabid Martínez, Adrián Calle, Jean Cedeño, Arián Briones y Andrés García quienes aportaron de alguna u otra forma para el desarrollo del proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*José Agustín García Romero*) y doy mi consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in black ink, enclosed in a hand-drawn oval. The signature reads "Jose AGarcia".

José Agustín García Romero

EVALUADORES

Keila Mishelle Muthre Freire

PROFESORA DE LA MATERIA

David Ricardo Altamirano Morán

PROFESOR TUTOR

Ángel Alberto Valdiviezo Ajila

PROFESOR TUTOR

Peter Stalin Olaya Carbo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Durante medio siglo los movimientos en masa se han consolidado como uno de los procesos geológicos más destructivos, generando miles de pérdidas humanas y materiales. Ocurren con frecuencia en regiones de “bajos recursos”, donde las malas prácticas asociadas a expansión urbana desmedida y deforestación de laderas incrementan su peligrosidad. Este contexto ocurre en Nueva Prosperina – Guayaquil, situación que motiva la caracterización geológica – geotécnica de las laderas mediante metodologías eficientes en sectores con alto índice de inseguridad, con la finalidad de mejorar el conocimiento del peligro geológico. Las fases metodológicas consistieron en; **i)** análisis de información mediante Snowball Sampling, **ii)** visita de reconocimiento y toma de muestras, **iii)** topografía con VANT, **iv)** ensayos de laboratorio y sísmica de refracción para caracterización geológica – geotécnica y, **v)** integración de resultados para análisis de estabilidad. El análisis geológico – geomorfológico determinó que el flanco suroeste del cerro presenta mayor susceptibilidad a movimientos en masa, identificándose 7 con componentes de flujo de tierra y reptación, 3 en estado activo. Los factores de seguridad mínimos entre 0.39 y 0.26 para condiciones pseudoestáticas y dinámicas, respectivamente, sobre la base de modelos geológicos – geotécnicos para la evaluación del análisis de estabilidad, revelan que el peor escenario recae en situaciones de escorrentía haciendo de este su principal factor detonante. Este factor está condicionado por la acumulación de desechos y rellenos en drenajes naturales, aumentando la inestabilidad de las laderas del cerro Nueva Prosperina. Se recomienda evaluar el potencial para implementar soluciones basadas en la naturaleza que contribuyan en la estabilización del cerro.

Palabras Clave: Geología, Geotecnia, Movimientos en masa, Estabilidad de Laderas, Riesgo de Desastres.

ABSTRACT

During the last 50 years, landslides have become one of the most destructive geological processes, generating thousands of human and material losses. Their occurrence is frequent in regions of "low resources", where bad management associated with uncontrolled urban expansion and slope deforestation increase their hazard. This is the context in Nueva Prosperina - Guayaquil, a situation that leads to geological-geotechnical characterization of slopes through efficient methodologies in sectors with high insecurity rates, to improve the knowledge of the geological hazard. The methodology stages consisted in i) information analysis by Snowball Sampling, ii) inspection visit and sampling, iii) topography with UAV, iv) lab tests and seismic refraction for geological-geotechnical characterization, and v) results integration for stability analysis. The geological-geomorphological analyze determined that the southwest flank of the hill has a greater susceptibility to landslides, identifying 7 with components of earth flow and creep, 3 in active state. The lowest safety factors between 0.39 and 0.26 for pseudo-static and dynamic conditions, respectively, based on geological-geotechnical models for the evaluation of the stability analysis, reveal that the worst scenario involves runoff events, making this the main trigger factor. This is conditioned by waste accumulation and natural drainage fillings, increasing the instability of the slopes of Nueva Prosperina hill. An assessment of the possibility for the implementation of nature-based solutions that contribute to the stabilization of the hill is recommended.

Keywords: Landslides, Geology, Geotechnics, Slope Stability, Disaster Risk.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	3
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO 2	6
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Riesgo de Desastres	6
2.2 Movimientos en Masa	6
2.3 Reconocimiento de movimientos en masa	11
2.4 Estados de Actividad un movimientos en masa	11
2.5 Factores condicionantes y desencadenantes	11
2.5.1 Factores Condicionantes	12
2.5.2 Factores Desencadenantes	12
2.6 Indicadores Morfométricos involucrados en el análisis de laderas	13

2.6.1	Pendiente.....	13
2.6.2	Aspecto u Orientación.....	14
2.6.3	Curvatura.....	14
2.7	Métodos y estudios asociados al análisis de la estabilidad de laderas	15
2.7.1	Clasificaciones Geomecánicas de los Suelos	15
2.7.2	Clasificaciones Geomecánicas de las Rocas	17
2.7.3	Tipos de Rotura en Suelos.....	18
2.7.4	Análisis de Estabilidad de Laderas: Modelos Matemáticos	19
2.7.5	Prospecciones Geofísicas.....	21
CAPÍTULO 3		23
3.	DATOS Y MÉTODOS.....	23
3.1	Área de Estudio.....	23
3.1.1	Ubicación Geográfica y Acceso.....	23
3.1.2	Población y Vivienda.....	24
3.1.3	Relieve.....	24
3.1.4	Clima y Precipitación.....	25
3.1.5	Geología Regional	26
3.2	Metodología.....	29
3.2.1	Análisis de Información Existente.....	30
3.2.2	Visita de Reconocimiento.....	30
3.2.3	Levantamiento Topográfico.....	31
3.2.4	Levantamiento Geológico.....	34
3.2.5	Levantamiento Geotécnico.....	37
3.2.6	Análisis de Estabilidad de las Laderas	47
CAPÍTULO 4		49

4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	49
4.1	Identificación de Zonas Inestables.....	49
4.1.1	Indicadores Morfométricos	49
4.1.2	Inventario de Movimientos en Masa	53
4.1.3	Segmentación de viviendas en zonas inestables	56
4.2	Caracterización Geológica de la Colina Nueva Prosperina	57
4.2.1	Descripción y Análisis de Muestras de Afloramientos	57
4.2.2	Descripción y Análisis de Láminas Delgadas	59
4.3	Caracterización Geotécnica de la Colina Nueva Prosperina.....	64
4.3.1	Clasificación Geomecánica de Suelos en la zona inestable	65
4.3.2	Modelamiento del Subsuelo mediante Prospección Geofísica	68
4.4	Análisis de Estabilidad de las laderas: Escenarios Pseudoestáticos y Dinámicos	71
4.4.1	Estabilidad en Perfil 1	73
4.4.2	Estabilidad en Perfil 2	75
4.4.3	Estabilidad en Perfil 3	79
4.5	Factores de seguridad (FS) y Medidas Preliminares de estabilización	82
4.5.1	Factores de seguridad para Perfil 1	82
4.5.2	Factores de seguridad para Perfil 2	83
4.5.3	Factores de seguridad para Perfil 3	83
4.5.4	Medidas preliminares de estabilización	84
	CAPÍTULO 5	89
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
5.1	Conclusiones.....	89
5.2	Recomendaciones.....	91

BIBLIOGRAFÍA	93
APÉNDICES.....	101

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
WGS	World Geodetic System
UTM	Universal Transverse Mercator
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
EPOCH	European Community Programme
VANT	Vehículos Aéreos no Tripulados
LNP	Ladera Nueva Prosperina
IGM	Instituto Geográfico Militar
SENPLADES	Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo
SNGRE	Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias
DGRC	Dirección de Gestión de Riesgos y Cooperación
CCC	Cordillera Chongón Colonche
Fm.	Formación Geológica
Mb.	Miembro Geológico
FS	Factor de Seguridad
LP	Límite Plástico
LL	Límite Líquido
IP	Índice de Plasticidad
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
RMR	Rock mass rating
RQD	Rock quality designation
UCS	Uniaxial compressive strength
MDT	Modelo Digital del Terreno
SIG	Sistemas de Información Geográfica
NII	Nícoles Paralelos
NX	Nícoles Cruzados
Qz	Cuarzo
Plg	Plagioclasa
A	Feldespató Alcalino

M	Máficos
NF	Nivel Freático
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción
MASW	Métodos de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales
PMA	Programa Mundial de Alimentos
NbS	Nature-based Solutions

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Polígono preliminar del área de interés	1
Figura 2.1 Partes de un movimiento en masa Deslizamiento rotacional con flujo de tierra	7
Figura 2.2 Representación de un movimiento por Caída	8
Figura 2.3 Representación de un movimiento por Volcamiento	8
Figura 2.4 Representación de un movimiento por Deslizamiento	9
Figura 2.5 Representación de un movimiento por Propagación Lateral	9
Figura 2.6 Representación de los tipos de Flujos.	10
Figura 2.8 Curvatura de Perfil.....	15
Figura 2.9 Curvatura de Plano.....	15
Figura 2.10 Envolvente de rotura en suelos.....	17
Figura 2.11 Calidad de macizo según índice RMR	18
Figura 2.12 Tipos de roturas en suelos.....	19
Figura 2.13 Fuerzas aplicadas en un bloque según el método de Bishop	20
Figura 2.14 Fuerzas que actúan sobre los bloques en el método de Spencer	21
Figura 2.15 Configuración de la metodología de sísmica de refracción	22
Figura 3.1 Ubicación y acceso general al área de estudio	23
Figura 3.2 Perfil en dirección suroeste (A) – noreste (A') a lo largo de la colina LNP.	25
Figura 3.3 Estratigrafía de la Fm. Cayo en Guayaquil	28
Figura 3.4 Metodología implementada.....	29
Figura 3.5 Visita de reconocimiento en la colina Nueva Prosperina.....	31
Figura 3.6 Dron Phantom 4 DJI utilizado para el levantamiento topográfico	32
Figura 3.7 Clasificación de las nubes de puntos densa en Agisoft Metashape	33

Figura 3.8 Curvas de nivel generadas en ArcGIS Pro	33
Figura 3.9 Paralelas trazadas hacia la vía perimetral	34
Figura 3.10 Trabajos de campo realizados en la Vía Perimetral y PARCON ESPOL	35
Figura 3.11 Datos geológicos levantados en la vía Perimetral y PARCON ESPOL. .	36
Figura 3.12 Proceso de elaboración de una lámina delgada..	36
Figura 3.13 Perfiles trazados en zonas de Muy Alta Susceptibilidad	37
Figura 3.14 Proceso general de preparación de muestra previo a tamizado	39
Figura 3.15 Determinación de granulometría mediante tamizado	40
Figura 3.16 Ensayo para la obtención del LL.....	41
Figura 3.17 Ensayo para la determinación del límite plástico.	41
Figura 3.18 Instrumentación para los ensayos de corte directo	42
Figura 3.19 Preparación y procesamiento de muestras en el ensayo de corte directo.	43
Figura 3.20 Envolvente de rotura de una muestra ensayada al corte directo.....	43
Figura 3.21 Ubicación de la línea sísmica A – A’ para el estudio de refracción sísmica.	44
Figura 3.22 Configuración de la prospección mediante sísmica de refracción	45
Figura 3.23 Procesamiento de datos para sísmica de refracción.....	45
Figura 3.24 Modelamiento de los perfiles para análisis de estabilidad a partir del modelo sísmico.....	46
Figura 3.25 Potenciales superficies de falla y FS menos favorable	48
Figura 4.1 Indicadores Morfométricos.....	52
Figura 4.2 Delimitación de la zona inestable o susceptible	53
Figura 4.3 Delimitación de los 7 MM en la colina Nueva Prosperina.....	54
Figura 4.4 Grietas de tracción en los movimientos en masa activos.....	55

Figura 4.5 Segmentación de viviendas para las diferentes zonificaciones en la colina Nueva Prosperina.....	56
Figura 4.6 Muestra de mano NP_01	57
Figura 4.7 Muestra de mano NP_02.....	58
Figura 4.8 Láminas delgadas elaboradas.....	59
Figura 4.9 Vista microscópica de la lámina NP_02 a 4X.....	60
Figura 4.10 Matriz microcristalina de plagioclasas y fenocristales de feldespato	61
Figura 4.11 Presencia de alteración sericítica y cuarzos con extinción ondulante	61
Figura 4.12 Presencia de Clorita y minerales opacos	62
Figura 4.13 Clasificación de la roca mediante el diagrama ternario de Streckeisen ..	63
Figura 4.14 Ubicación de las muestras recolectadas para el estudio.....	64
Figura 4.15 Unidades Geotécnicas de Suelo.....	67
Figura 4.16 Perfiles ajustados para análisis de estabilidad de taludes	68
Figura 4.17 Interpretación del Perfil A-A' de velocidades de Ondas P	69
Figura 4.18 Perfil de velocidades P generalizado	70
Figura 4.19 Perfiles modelados para el Análisis de Estabilidad de Laderas	72
Figura 4.20 Comparación de FS calculados en Perfil 1 para escenarios Pseudoestáticos.	82
Figura 4.21 Comparación de FS calculados en Perfil 1 para escenarios Dinámicos. 82	
Figura 4.22 Comparación de FS calculados en Perfil 2 para escenarios Pseudoestáticos.	83
Figura 4.23 Comparación de FS calculados en Perfil 2 para escenarios Dinámicos. 83	
Figura 4.24 Comparación de FS calculados en Perfil 3 para escenarios Pseudoestáticos.	84
Figura 4.25 Comparación de FS calculados en Perfil 3 para escenarios Dinámicos. 84	

Figura 4.26 Planificaciones comunes de redes de drenaje para estabilización de laderas	85
Figura 4.27 Aplicación de técnicas de reforestación para estabilización de laderas .	86
Figura 4.28 Cubierta de césped para protección inmediata de la escorrentía.....	87
Figura 4.29 Canal de “Piedras adoquinadas” para direccionar el agua por escorrentía.	87
Figura 4.30 Barreras de empalizadas que se convierten en terrazas estabilizadoras.	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Vértices del polígono de interés.....	23
Tabla 3.2	Productos derivados del levantamiento topográfico	33
Tabla 3.3	Base de datos para las muestras recolectadas sobre los taludes	38
Tabla 3.4	Relaciones empíricas para la estimación de parámetros geomecánicos. .	47
Tabla 3.5	Escenarios para el análisis de Estabilidad de Laderas.....	47
Tabla 3.6	Factores de seguridad por corte mínimos según NEC.....	48
Tabla 4.1	Inventario de MM correlacionados con estudios previos y fotointerpretados mediante indicadores morfométricos.	55
Tabla 4.2	Características petrográficas de la muestra NP_02	59
Tabla 4.3	Plagioclasas identificadas mediante Michel-Lévy.....	60
Tabla 4.4	Coordenadas de las muestras recolectadas para el estudio	64
Tabla 4.5	Resultados del ensayo de Clasificación SUCS	65
Tabla 4.6	Parámetros resultantes del ensayo de Corte Directo	66
Tabla 4.7	Correlación de tipos de suelo según valores de ángulo de fricción estándar	66
Tabla 4.8	Clasificación según CNA – 1993 y ASTM – D5777	68
Tabla 4.9	Clasificación geomecánica del material rocoso en el cerro Nueva Prosperina	70
Tabla 4.10	Análisis de Estabilidad en Perfil 1, condiciones pseudoestáticas.	73
Tabla 4.11	Análisis de Estabilidad en Perfil 1, condiciones dinámicas.....	74
Tabla 4.12	Análisis de Estabilidad en Perfil 2, condiciones pseudoestáticas.	76
Tabla 4.13	Análisis de Estabilidad en Perfil 2, condiciones dinámicas.....	77
Tabla 4.14	Análisis de Estabilidad en Perfil 3, condiciones pseudoestáticas.	79
Tabla 4.15	Análisis de Estabilidad en Perfil 3, condiciones dinámicas.....	80

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la historia moderna los movimientos en masa se han establecido como procesos geológicos destructivos, que causan daños en el ámbito económico y social, como miles de muertes y pérdidas por valor de decenas de billones en propiedades cada año (Lario & Bajardí, 2017). No obstante, las personas conscientes de la importancia del análisis de estos eventos son pocas (Cotecchia et al., 2014; Suarez, 1998). Tal desconocimiento viene relacionado con el crecimiento poblacional en las ciudades, acción conlleva a la deforestación y ocupación de laderas en ocasiones de manera ilegal, lo que incrementa la exposición de las poblaciones a los movimientos en masa (Soto et al., 2017).

El 90% de las pérdidas por movimientos en masa se pueden evitar si el problema es identificado y caracterizado con anticipación, permitiendo establecer medidas preventivas o de control (González de Vallejo et al., 2002). Evitar los efectos nocivos hacia los factores sociales y económicos de una comunidad es el objeto del estudio de los movimientos en masa, es decir, caracterizar tipos y mecanismos de estabilidad, factores controlan el movimiento y sus causas principales (González de Vallejo et al., 2002; Suarez, 1998, 2003).

Bajo esta premisa se enfoca el presente trabajo, en donde se considera un área de estudio preliminar de 19.03 Ha ubicado en la Etapa 10 de la Coop. Nueva Prosperina, Guayaquil. Para definir el polígono de interés se han tomado las zonas de posible afectación en base a los reportes de movimientos en masa ocurridos en el sector (**Figura 1.1**).



Figura 1.1 Polígono preliminar del área de interés

En Nueva Prosperina, los reportes de medios de comunicación como El Telégrafo (27 de febrero del 2014) y Manabí Noticias (5 de marzo del 2019) evidencian un aumento de movimientos en masa durante los últimos diez años, sobre todo en épocas lluviosas entre los meses de febrero - abril. Reportes actuales como los presentados por El Comercio (10 de marzo del 2022) y El Universo (11 de marzo del 2022) mencionan daños a infraestructuras que afectan los servicios básicos de los pobladores, como tuberías de agua potable.

Respecto a estudios previos en el sitio, en el año 2014 por solicitud del GAD Municipal de Guayaquil a la consultora SUBSUELO SERVICIOS S.A., se analizó el riesgo por movimientos en masa donde se delimitaron zonas de susceptibilidad y riesgo, además de recomendar acciones de prevención. También se realizó un proyecto de tesis sobre el análisis hidrológico de la cuenca de drenaje para control de inundaciones (Villacreses-Ponce, 2016).

El sector no cuenta con un sistema de drenaje óptimo, además de que los asentamientos ilegales implican el relleno de drenajes naturales, incrementando así el peligro asociado tanto a inundaciones como movimientos en masa. Existe el estudio realizado por GEOESTUDIOS S.A (2011) en el marco de la actualización del mapa geológico de Guayaquil, donde se levantó información como la geomorfología y geología, así como la caracterización de las aceleraciones sísmicas máximas para cada formación geológica.

La colina de interés en Nueva Prosperina comprende asentamientos humanos, en su mayoría ilegales, establecidos sin considerar los problemas que se podrían suscitar respecto a movimientos en masa. Con el pasar de los años la situación relacionada a la inestabilidad de las laderas se ha agravado, con mayor relevancia en etapas lluviosas, durante las cuales se han evidenciado las principales afectaciones a nivel socioeconómico.

Es importante destacar los estudios técnicos realizados por la Dirección de Gestión de Riesgos y Cooperación (DGRC) del GAD Municipal de Guayaquil, que deben ser complementados con el proyecto planteado para conocer acerca del movimiento en masa y los factores que lo generan. Con este insumo la dirección municipal u otro ente pertinente serán capaces de elaborar planes de prevención y mitigación del riesgo, indispensables para el ordenamiento territorial.

1.1 Descripción del problema

Durante los últimos 50 años los desastres causados por movimientos en masa aumentaron su frecuencia diez veces más, principalmente por dos factores, cambio climático y urbanización irregular (Ozturk et al., 2022). Más del 80% de movimientos en masa fatales son desencadenados por lluvias intensas, a menudo durante tormentas (Froude & Petley, 2018). Por otro lado, las proyecciones climáticas promedian que las intensidades de las precipitaciones se dupliquen para el final del siglo (Fowler et al., 2021). En adición, las prácticas asociadas al establecimiento informal de viviendas tales como deforestación irregular, corte de taludes y rellenos de drenajes naturales pueden incrementar la frecuencia de movimientos en masa (Ozturk et al., 2022). Sobre el marco de Reducción del Riesgo de Desastres es necesario considerar interacciones dinámicas entre el ambiente natural, los patrones de lluvias y la urbanización informal; lo que implica asociar el riesgo de desastres debido a movimientos en masa con el cambio climático.

En la cooperativa Nueva Prosperina existen varios cerros donde, durante más de una década, se han expandido los asentamientos de viviendas de manera ilegal (Comité Permanente por la Defensa de los Derechos Humanos, 2013). Los habitantes se han visto perjudicados durante los últimos años, especialmente en temporadas lluviosas, cuando la fisiografía de las colinas permite que el agua de las precipitaciones fluya por escorrentía, generando varios inconvenientes en su diario vivir. A estos inconvenientes se le suman problemas en la componente social, debido el crecimiento constante de densidad poblacional, y las recurrentes actividades criminales del sector.

El riesgo por movimientos en masa en el cerro de la Etapa 10 de la Coop. Nueva Prosperina está presente. Por lo tanto, es imperante abordar el estudio del movimiento en masa en el sector, implicando la necesidad de conocer las características geológicas y geomecánicas de los materiales que conforman sus laderas.

1.2 Justificación del problema

El constante crecimiento de asentamientos humanos ilegales y la falta de criterios por parte de los ciudadanos acerca de los problemas que conlleva asentarse sobre laderas inestables da como resultado una zona de riesgo en el sector de Nueva Prosperina. En la búsqueda de la mitigación de este riesgo es fundamental conocer las características

del movimiento en masa, por lo que se deben tomar las medidas pertinentes para realizar el análisis geológico-geotécnico del sector.

Se debe tener en consideración que los estudios realizados en el sitio dirigidos a comprender la problemática del movimiento en masa son escasos. Además, son mayoritarios los estudios en el ámbito social, económico y arquitectónico (Avilés-Crespin, 2022; Cárdenas-Arévalo, 2021; Larrea-Carreño, 2013).

Se debe destacar que el desarrollo de este proyecto vería su principal impacto reflejado en el contexto social, ligado a la gran cantidad de asentamientos ilegales en el sector. Varios de los habitantes se encuentran tramitando los títulos de terreno donde se encuentran asentados, pero sin conocer el comportamiento geológico del sitio y la factibilidad para la implementación de medidas de control y mitigación. Sobre el aspecto ambiental, las laderas de esta colina podrían ser recuperadas a través de técnicas de reforestación o áreas verdes de recreación. Respecto al contexto económico, la aplicación de medidas preventivas a largo plazo generaría un ahorro respecto al presupuesto previsto por el Municipio de Guayaquil para acciones continuas como respuesta a los movimientos en masa.

El trabajo presentando se alinea a los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Salud y Bienestar, Reducción de Desigualdades, Ciudades y Comunidades Sostenibles y, Vida en Ecosistemas Terrestres (Naciones Unidas, 2018). Respecto al Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 en Ecuador, el proyecto se centra en el eje de Seguridad Integral, Objetivo 9: Garantizar la seguridad ciudadana, orden público y gestión de riesgos (Consejo Nacional de Planificación, 2021). Además, se considera que se toman en cuenta las prioridades de acción planteadas en el Marco de Sendai para la Reducción de Riesgos de Desastres 2015-2030, en específico las prioridades: Comprender el Riesgo de Desastres, Fortalecer la gobernanza del Riesgo de Desastres para gestionar dicho riesgo, Invertir en la reducción del Riesgo de Desastres para la Resiliencia y Aumentar la preparación para casos de desastre (ONU: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), 2015).

El proyecto aporta directamente al Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Guayaquil, enmarcado en los procesos de implementación del Sistema Integral de Gestión de Riesgos Urbanos de Guayaquil (SIGRU-G), en el que de manera participativa

se identifica a nivel comunitario escenarios microterritoriales de amenazas y riesgos (GAD de Guayaquil, 2015, 2021)

Por lo tanto, el beneficio de la implementación de este proyecto es tanto para la población como para los entes municipales, mediante el desarrollo de proyectos sobre caracterización de movimientos en masa bajo el marco de la elaboración de soluciones para estabilización, toma de decisiones preventivas y planes de riesgo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Caracterizar de manera geológica – geotécnica un movimiento en masa a través de la aplicación de técnicas geológicas de campo, ensayos geotécnicos y geofísicos, para mejorar el conocimiento del peligro geológico en la Etapa 10 de la Cooperativa Nueva Prosperina.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar el levantamiento topográfico a detalle para la identificación de zonas susceptibles basadas en indicadores morfométricos, de forma automatizada mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT).
- Llevar a cabo una caracterización geológica y geotécnica de las zonas susceptibles en el cerro de Nueva Prosperina mediante ensayos en campo y laboratorio.
- Establecer la profundidad y volumen de las zonas inestables de la colina mediante la interpretación de perfiles sísmicos.
- Realizar el análisis de estabilidad de taludes para diferentes escenarios geológico - geotécnicos en las zonas inestables del cerro en Nueva Prosperina.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Riesgo de Desastres

El riesgo de desastres se puede definir como la **probabilidad** de materialización de un **peligro natural** que suponga una **amenaza** para el ser humano (Lario & Bajardí, 2017). Es decir, se refiere a cualquier evento de pérdida potencial de servicios y bienes materiales, así como vidas humanas. El riesgo materializado se denomina **desastre o catástrofe** en base a la intensidad de daños y pérdidas, aunque en la mayoría de casos suele usarse indistintamente (Lario & Bajardí, 2017).

2.2 Movimientos en Masa

Sistema físico o proceso geológico por el cual un material terrestre se desplaza por acción de gravedad sobre una ladera o talud resultante de dicho movimiento, sin intervención directa del agua, hielo o viento; se desarrolla a través del tiempo en varios estadios, comprendiendo deformaciones pre-fallamiento, el fallamiento en sí mismo y desplazamientos post-fallamiento (Highland & Bobrowsky, 2008; Hungr et al., 2014; Lario & Bajardí, 2017). El fallamiento es el episodio de movimiento más significativo en un movimiento en masa, el cuál involucra la formación inicial de una superficie de ruptura desarrollada como una discontinuidad de deformación (Hungr et al., 2014).

El fenómeno geológico presenta otras terminologías: *deslizamiento de terreno*, *movimientos de terreno*, *remoción en masa* y *movimientos de ladera*. En general, todos estos términos se pueden utilizar como sinónimos, sin embargo, Vargas-Cuervo (2000) recomienda utilizar el término “movimiento en masa” en trabajos de carácter científico, mientras que los términos como “deslizamientos de terreno” se pueden dirigir a trabajos no técnicos.

Factores como las fuertes pendientes y debilidad en los materiales que conforman las laderas someten a los terrenos a erosión y movimientos en masa, a menudo desencadenados por fuertes precipitaciones, sismicidad o actividades antrópicas agravantes (Aguiló Alonso et al., 2014; Devkota et al., 2014; Suarez, 2003). Las partes de un movimiento en masa típico son ilustradas en la **Figura 2.1**. En la descripción de un movimiento se recomienda el uso de orientaciones geográficas (norte, sur, este, oeste).

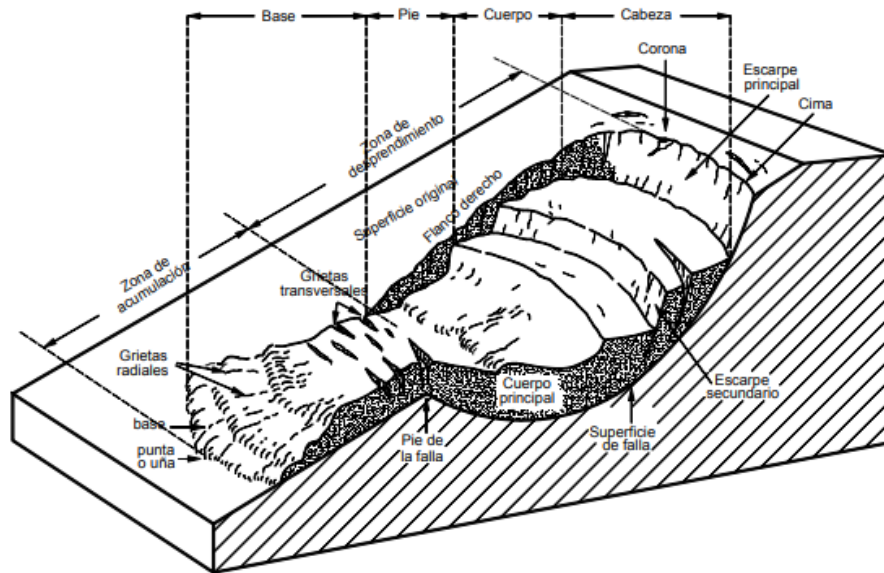


Figura 2.1 Partes de un movimiento en masa

Deslizamiento rotacional con flujo de tierra (Suarez, 2003)

Los movimientos en masa han presentado varios sistemas de clasificación, destacando los propuestos por Sharpe (1938), Hutchinson (1968), Varnes (1958 y 1978) y Cruden (1991). Cada una de ellas presentan diferentes criterios, algunas siendo actualizaciones o combinaciones como las de EPOCH (1993) y Dikau et al. (1996), sin embargo, la clasificación más empleada es la propuesta actualizada de Cruden y Varnes (1996). Esta clasificación, que ha recibido otras actualizaciones a lo largo del tiempo como la presentada por (Hungry et al., 2014), está basada en dos parámetros: tipo de material y movimiento. A continuación se describen brevemente los tipos de movimiento en masa, ampliamente detallados en Highland y Bobrowsky (2008) y Hungry et al. (2014).

Caídas: Inicia con el desprendimiento de suelo o roca, o ambos, desde una pendiente empinada a lo largo de un plano en el que se ha generado poco o ningún desplazamiento por esfuerzos cortantes (**Figura 2.2**). El material desciende principalmente por caída, rebote o rodamiento. Usualmente presenta volúmenes muy limitados.

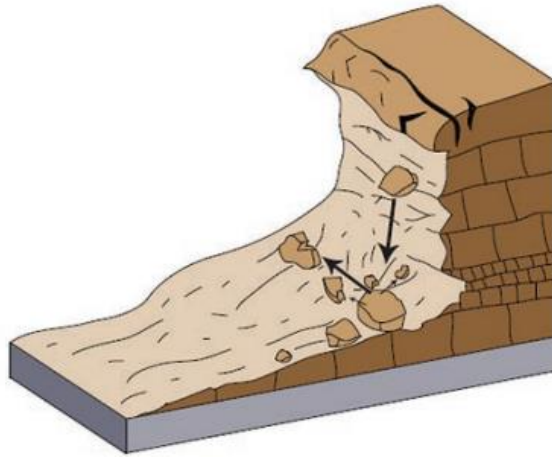


Figura 2.2 Representación de un movimiento por Caída
(Highland & Bobrowsky, 2008)

Volcamientos: Rotación hacia delante desde una ladera de suelo o roca alrededor de un eje por debajo del centro de gravedad de la masa movilizada (**Figura 2.3**). El volcamiento puede ocurrir por varios factores, como el peso del material que se encuentre pendiente arriba del desplazamiento, o también por infiltración de agua o hielo en las grietas. El material involucrado puede ser roca, derrubios o suelo.

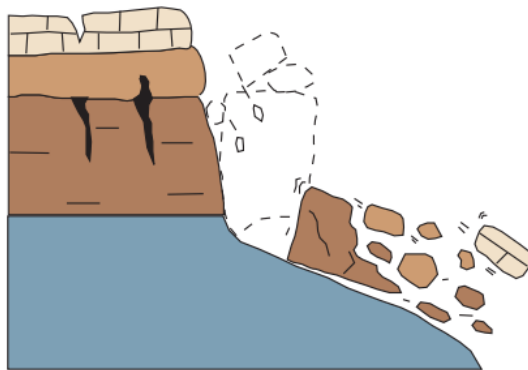


Figura 2.3 Representación de un movimiento por Volcamiento
(Highland & Bobrowsky, 2008)

Deslizamientos: Movimiento pendiente abajo de una masa de suelo o roca sobre superficies de falla. El volumen de material desplazado aumenta desde un área de ruptura local, no se produce instantáneamente. En la **Figura 2.4** se observan dos tipos de deslizamientos: el rotacional se caracteriza por la curvatura hacia arriba de la superficie de ruptura, aparentando una forma de “cuchara”, provocando como tal el movimiento rotacional de la masa alrededor de un eje que es paralelo al contorno de la pendiente. Por otro lado, el traslacional evidencia una superficie de ruptura relativamente plana con poco movimiento de rotación, lo que permite un desplazamiento hacia “afuera”

o, hacia “abajo” y hacia “afuera”, del material movilizado. Debido a esta característica el volumen de materia deslizado puede avanzar distancias considerables si la superficie de ruptura se encuentra lo suficientemente inclinada. Generalmente, los deslizamientos traslacionales se desplazan a lo largo de discontinuidades como planos de estratificación, fallas, diaclasas o contactos entre suelo y roca.

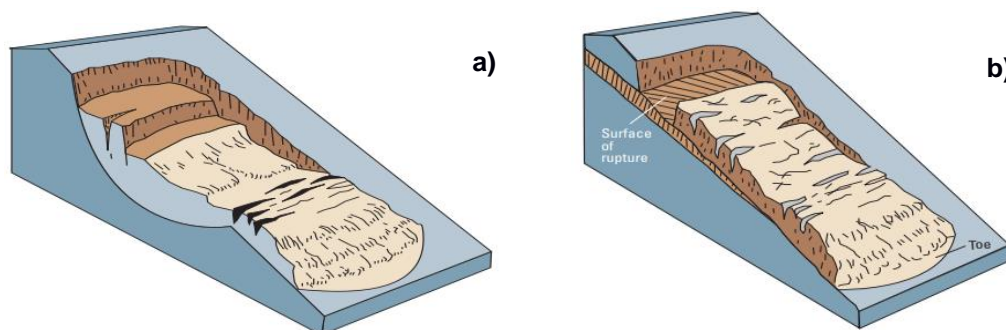


Figura 2.4 Representación de un movimiento por Deslizamiento

a) Deslizamiento Rotacional, b) Deslizamiento traslacional (Highland & Bobrowsky, 2008)

Propagación Lateral: Las propagaciones o extensiones laterales ocurren en pendientes suaves, especialmente donde una capa superior más fuerte de roca o suelo se extiende y se desplaza sobre una capa subyacente más suave y débil (**Figura 2.5**). Este tipo de fallamiento suele ir acompañado de hundimiento general en la capa subyacente de mayor debilidad. Si la unidad subyacente es relativamente gruesa, los bloques fracturados de la capa superior pueden hundirse, trasladarse, rotar, licuarse o incluso fluir.

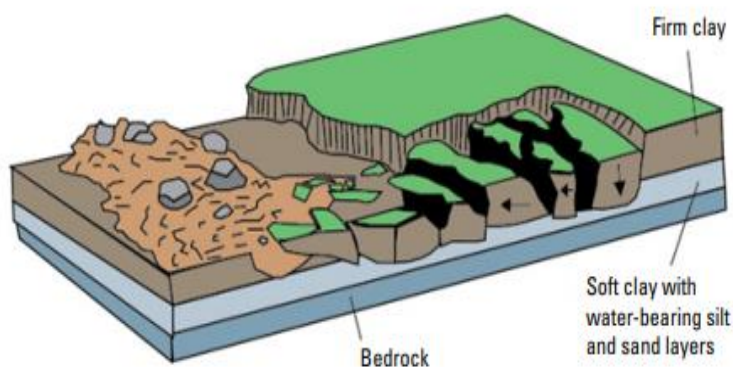


Figura 2.5 Representación de un movimiento por Propagación Lateral

(Highland & Bobrowsky, 2008)

Flujos: Movimiento continuo donde las superficies de ruptura son de corta duración, estrechamente espaciadas y, por lo general no se conservan. Las velocidades de las masas desplazadas se asemejan a las de un líquido viscoso. En ocasiones, un deslizamiento puede pasar a ser un flujo según la cantidad de agua, movilidad y evolución del movimiento. Existen varios tipos de flujos, entre los que destacan (**Figura 2.6**):

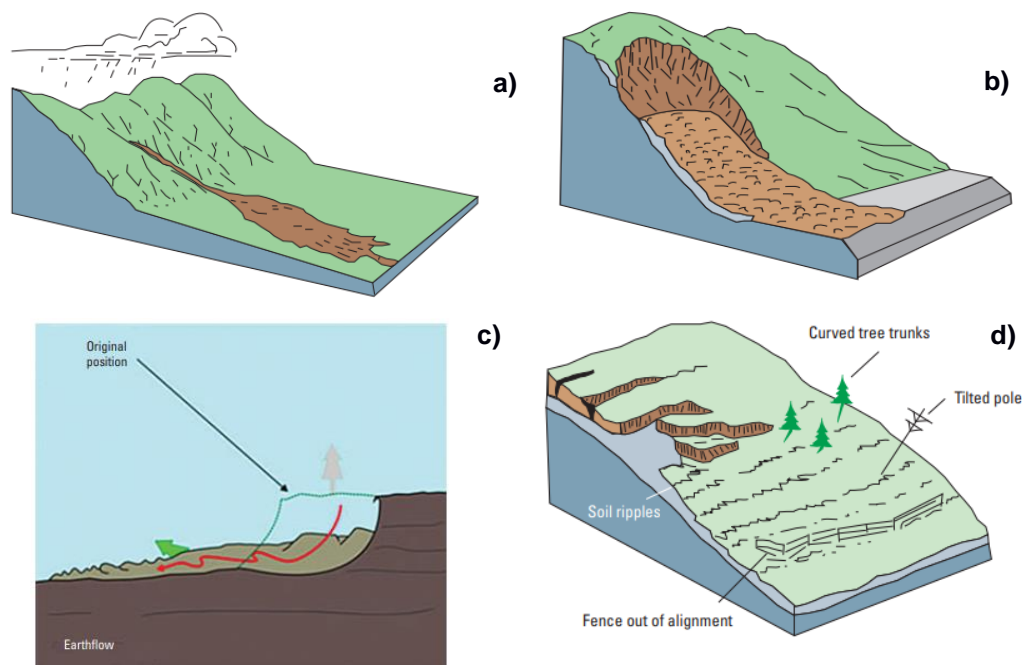


Figura 2.6 Representación de los tipos de Flujos

a) Flujos de detritos; b) Avalancha de detritos; c) Flujo de tierra; d) Reptación (Highland & Bobrowsky, 2008).

- **Flujos de detritos:** Movimiento rápido donde la tierra suelta, las rocas y, a veces materia orgánica se combina con agua para formar un lodo que fluye pendiente abajo (**Figura 2.6a**).
- **Avalancha de detritos:** Son esencialmente flujos grandes, extremadamente rápidos, generalmente de pendientes abiertas; se forman cuando una ladera inestable se derrumba y los escombros resultantes se movilizan rápidamente lejos de la pendiente (**Figura 2.6b**).
- **Flujos de tierra:** Ocurren en pendientes suaves – moderadas, en suelos de grano fino como arcilla o limo, pero también el lechos rocoso arcillosos muy erosionados. La masa en un flujo de tierra se comporta de manera plástica o viscosa con una fuerte deformación interna (**Figura 2.6c**).
- **Reptación:** Nombre informal para flujos de tierra lentos; consisten en movimientos descendentes constantes, imperceptibles, de suelo o roca que conforman las laderas.

Son causados por esfuerzos cortantes internos suficientes para generar deformación, pero insuficientes para ocasionar fallamientos (**Figura 2.6d**). En general existen tres tipos: **estacionales**, afectados por los cambios estacionales de temperatura y humedad del suelo; **continuo**, donde el cortante excede la resistencia del suelo; y **progresivo**, donde las laderas alcanzan un punto de falla y se generan otros tipos de movimientos.

Complejos: Los sistemas de clasificación no suelen contener una clase separada para movimientos en masa complejos, por lo que es necesario usar dos nombres de tipo para describir un caso en el que no se pueda asignar una clase única (Hungry et al., 2014).

2.3 Reconocimiento de movimientos en masa

La identificación de laderas inestables es una etapa fundamental en la caracterización de un movimiento en masa, y se realiza a partir del análisis de imágenes satelitales, fotografías aéreas e interpretación en campo de los siguientes rasgos característicos (Aguiló Alonso et al., 2014):

Formas de erosión y deposición: Identificación de cicatrices y escarpes, depresiones, formas lobuladas, entre otras.

Estructura del depósito: Organización interna del material desplazado.

Elementos de modelado: Grietas en el terreno, cambios de tonalidad del material, redes de drenaje deformadas, surgencias, desvíos de cauces, entre otras.

Vegetación: Tipo de vegetación presente en un área respecto a zonas circundantes, anomalías en crecimiento, entre otras.

2.4 Estados de Actividad un movimientos en masa

Los movimientos pueden ser caracterizados por su estado o grado de actividad (Alcántara-Ayala, 2000); un movimiento que tiene desplazamiento actual se lo denomina **activo**, si el desplazamiento se suscitó durante los últimos doce meses pero no es actual se lo denomina **en suspenso** o **suspendido**, si no ha presentado actividad en esos doce meses se lo denomina como **inactivo** o **apagado**. Los movimientos en masa inactivos también se pueden **reactivar**.

2.5 Factores condicionantes y desencadenantes

La interacción entre los factores que determinan el comportamiento de un movimiento es generalmente compleja, no obstante, es posible discriminar cada uno de los factores

fundamentales para comprender de cierta manera la estabilidad de las laderas (Aguiló Alonso et al., 2014).

2.5.1 Factores Condicionantes

Las **litologías** presentan un patrón de comportamiento determinado, por ejemplo, en una ladera pueden existir materiales homogéneos correspondiente a una sola litología, pero si se compone de varios tipos de material, el comportamiento geotécnico es muy diferente de cada uno de los materiales analizados individualmente (Suarez, 2003). Además de la litología, es importante considerar las **microestructuras** de las partículas, es decir, textura y fábrica de las rocas o suelos (Suarez, 1998).

Las superficies de debilidad en rocas o suelo son aquellas donde a lo largo de su extensión puede ocurrir el desplazamiento de la masa; incluyen planos de estratificación, discontinuidades o superficies de falla, que en conjunto se pueden denominar **estructuras geológicas** (Suarez, 1998). Otros factor de interés es la **geomorfología**, pues esta permite evidenciar los procesos que se están desarrollando sobre las laderas, así como procesos que han actuado en el pasado, no solo de la ladera de interés, sino más bien todo el ambiente de un sector (Suarez, 2003).

Es relevante considerar como factor que afecta la estabilidad de una ladera a la **meteorización**, en específico parámetros como la profundidad, intensidad y tipo de meteorización (Suarez, 1998). No cabe duda que las laderas de alta pendiente presentan mayor susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos, por lo tanto, considerar a la **pendiente** y el **relieve** de una ladera como factores que actúan en su estabilidad está justificado en la mayoría de los casos (Suarez, 2003).

La **hidrogeología** permite tener en cuenta consideraciones como zonas de infiltración en partes altas de la ladera, conductividades hidráulicas y la porosidad de los materiales de la ladera; además de tratar con la determinación de niveles freáticos, corrientes subterráneas y fluctuaciones (Suarez, 2003). Otros factor es la **cobertura vegetal**, por sus efectos como protectores ante erosión, evapotranspiración e infiltración de agua y, estabilización del suelo, principalmente a nivel local.

2.5.2 Factores Desencadenantes

Las **precipitaciones** son determinantes respecto a la estabilidad de las laderas, ya que factores como la temperatura y la cantidad de agua establecen condiciones para

procesos de meteorización química y física (Suarez, 2003). Las precipitaciones pueden reactivar antiguos movimientos y desencadenar nuevos, esto en base a la respuesta del terreno al volumen, intensidad y distribución de las mismas (Lario & Bajardí, 2017).

Otros factores a considerar son la **sismicidad**; **actividad antrópica** cuando el hombre induce cambios que alteran la estabilidad de una ladera, asociado al crecimiento de densidad poblacional en laderas y deforestación de la mismas; y el **tiempo** ya que la mayoría de los procesos que involucren un movimiento en masa no son instantáneos, suelen ser todo lo contrario (Suarez, 1998 y 2003).

2.6 Indicadores Morfométricos involucrados en el análisis de laderas

Se deben estudiar parámetros morfométricos considerados esenciales para análisis del relieve. Entre estos tenemos las pendiente, el aspecto u orientación y la curvatura.

2.6.1 Pendiente

Inclinación de un terreno respecto a un plano horizontal, indicador principal para todo análisis de relieve (Aguiló Alonso et al., 2014). Los gradientes de pendiente se agrupan en clases de forma que el terreno que pertenece a una determinada clase se comporte de forma similar a una acción sobre el relieve. Se pueden determinar estos gradientes en base a la distancias entre curvas de nivel, un proceso automatizado en cualquier SIG teniendo como base un MDT (Modelo Digital del Terreno), el cual es parcialmente derivado en primer orden (Olaya, 2009). La ecuación que define la pendiente es (Aguiló Alonso et al., 2014):

$$\text{PENDIENTE} = \arctan(|\nabla Z|)$$

Donde ∇Z es el gradiente del modelo digital del terreno, es decir, la primera derivada. La pendiente se puede expresar en radianes o grados, pero es más cómodo para las clasificaciones representarlas en porcentaje (Olaya, 2009).

$$\text{PENDIENTE (\%)} = \tan(\text{PENDIENTE}) \cdot 100$$

Existen varias clasificaciones de pendientes con enfoques diferentes según el uso que se le va a dar al territorio en análisis, como estudios agrícolas, actividades urbanas, entre otras.

2.6.2 Aspecto u Orientación

Posición de una superficie respecto a los puntos cardinales, es decir, la dirección de una pendiente (Aguiló Alonso et al., 2014). Al igual que la pendiente, los modelos de orientación se pueden obtener automáticamente mediante el procesamiento de MDTs, donde los valores de cada celda del modelo indican la dirección de brújula a la que apuntaría la superficie en esa ubicación (Olaya, 2009). El aspecto se define matemáticamente como (Wilson & Gallant, 2000):

$$\text{ASPECTO} = 180 - \arctan\left(\frac{q}{p}\right) + 90 \cdot \frac{p}{|p|}$$

Donde p y q son derivadas de primer orden en dos dimensiones aplicadas al MDT. Los mapas de aspectos son importantes ya que definen la dirección de un flujo. Cuando el agua o cualquier otro material se mueve colina abajo bajo la influencia de fuerzas gravitacionales, seguirá la dirección especificada por el aspecto (Olaya, 2009).

2.6.3 Curvatura

La forma de las laderas se ha considerado como la curvatura de sus pendientes, pudiendo ser cóncavas o convexas, formas que se deben a la litología del sustrato y a los procesos que actúan en la morfología de la ladera (Gutierrez, 2008b). En un sentido matemático, la convexidad y concavidad de una superficie se relaciona con la segunda derivada de esta (Olaya, 2009).

Los principales usos de la curvatura como indicador morfométrico son comprender procesos de erosión y escorrentía de una cuenca hidrológica, buscar patrones de erosión del suelo y distribución de agua en la tierra (Gutierrez, 2008b; Olaya, 2009). Hay diversos tipos de curvatura en base a los valores que genere la función de curvatura y la dirección de análisis respecto a la máxima pendiente de la ladera:

2.6.3.1 Curvatura de Perfil

Indican la dirección de máxima pendiente ya que se analiza paralela a la pendiente. Se evalúa para conocer si un flujo acelera o desacelera por la superficie, lo que influye en la erosión y sedimentación (Gutierrez, 2008b). Una superficie convexa hacia arriba se refleja con valores negativos en el modelo, implicando una desaceleración del flujo; valores positivos se refieren a superficies cóncavas hacia arriba donde el flujo acelerará; valores de cero indican que la superficie es lineal (Olaya, 2009) (**Figura 2.8**)

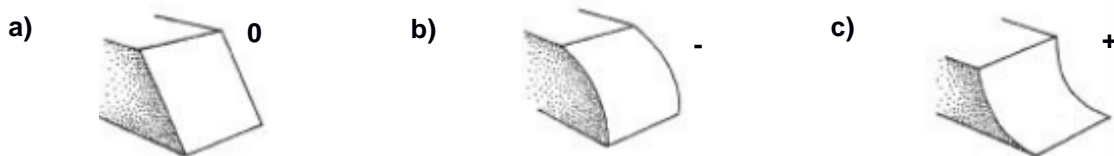


Figura 2.7 Curvatura de Perfil

a) Superficie lineal, b) Superficie convexa hacia arriba, c) Superficie cóncava hacia arriba. (Gutierrez, 2008b)

2.6.3.2 Curvatura de Plano

Tiene relación con la convergencia y divergencia del flujo sobre la superficie, ya que su análisis es perpendicular a la dirección de máxima pendiente (Gutierrez, 2008b). Las superficies convexas lateralmente presentan valores positivos, el flujo diverge; las superficies cóncavas lateralmente presentan valores negativos, el flujo converge; el valor de se refiere a una superficie lineal (Olaya, 2009) (**Figura 2.9**).



Figura 2.8 Curvatura de Plano

a) Superficie lineal, b) Superficie convexa lateralmente, c) Superficie cóncava lateralmente. (Gutierrez, 2008b)

2.7 Métodos y estudios asociados al análisis de la estabilidad de laderas

2.7.1 Clasificaciones Geomecánicas de los Suelos

2.7.1.1 Descripción y clasificación de suelos

Los suelos se clasifican en cuatro grupos en función de la granulometría según normas como DIN, ASTM y AENOR. Las **gravas** con granulometría entre 8-10 cm y 2 mm, por lo que los granos se observan directamente; las **arenas** (2 – 0,060 mm) que aún son observables; los **limos** (0,060 – 0,002 mm) que retienen el agua mejor; y las **arcillas** (< 0,002 mm) que tienen una capacidad grande para retener el agua (González de Vallejo et al., 2002). Para conocer las proporciones de estos materiales se realizan **análisis granulométricos** (González de Vallejo et al., 2002).

Cuando la clasificación con granulometría no es clara se buscar detallar mediante la definición de la consistencia del suelo en función de la cantidad de agua mediante la determinación de la humedad, esto es la **plasticidad** (González de Vallejo et al., 2002).

Se definieron tres límites de plasticidad, **retracción** entre el estado sólido seco del semisólido, **límite plástico (LP)** entre los estados semisólidos y plástico, y **límite líquido (LL)** entre el estado plástico y líquido. Los límites líquido y plástico se determinan con la fracción de suelo que pasa por el tamiz 40 en la norma ASTM, es decir, 0.1 mm. El intervalo para pasar de estado semisólido a líquido se representa a través del índice de Plasticidad (LL – LP) (González de Vallejo et al., 2002).

Los valores de granulometría junto a los de límites de Atterberg se correlacionan para definir el **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)**.

2.7.1.2 Resistencia al Corte de Suelos

La rotura común de los suelos se da por esfuerzo cortante. Sin embargo, el criterio de rotura generalizado proviene del propuesto por Coulomb, el cual relaciona tensiones esfuerzos cortantes y normales actuando en cualquier plano de suelo (González de Vallejo et al., 2002). La resistencia al corte a favor de un plano viene dada por:

$$\tau = c' + (\sigma_n) \tan \phi'$$

Donde:

τ = Resistencia al corte del suelo

c' = Cohesión efectiva

σ_n = Esfuerzo total normal que actúa sobre el plano

ϕ' = Ángulo de fricción interno efectivo

Esta es la ecuación de una recta denominada Envolvente de Rotura del Suelo (**Figura 2.10**). La ordenada al origen representa la **cohesión efectiva**. La pendiente refleja el **ángulo de fricción interna**. El **punto 1** indica un estado de rotura, el **punto 2** se encuentra en una región donde se tiene cierto factor de seguridad. El **punto 3** se encuentra en una región imposible al estar por encima de la envolvente (González de Vallejo et al., 2002).

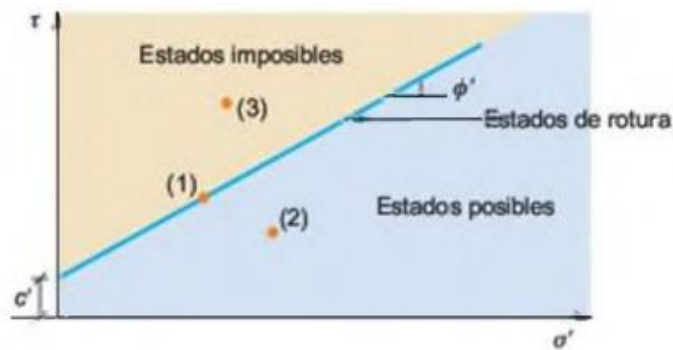


Figura 2.9 Envolvente de rotura en suelos
(González de Vallejo et al., 2002)

2.7.2 Clasificaciones Geomecánicas de las Rocas

Los macizos rocosos son medios discontinuos con comportamientos geomecánicos complejos. No obstante, se pueden estudiar de forma simplificada mediante clasificaciones geomecánicas que aportan índices de calidad en base a la observación directa de las características del macizo y la aplicabilidad de ensayos sencillos. Entre los más utilizados está el RMR (Rock mass rating) (González de Vallejo et al., 2002).

2.7.2.1 Clasificación RMR

Desarrollado por Bieniawski (1976), toma en cuenta los siguientes parámetros:

- Resistencia uniaxial del macizo rocoso (Uniaxial compressive strength - UCS)
- Grado de fracturación según RQD (Rock quality designation)
- Espaciado de discontinuidades
- Condiciones de discontinuidades
- Orientación de las discontinuidades
- Condiciones hidrogeológicas

Los parámetros influyen en el comportamiento geomecánico del macizo, expresado con un índice de calidad, el RMR (de 0 a 100) (Evert Hoek, 2008). El proceso implica la división en regiones del macizo según características más o menos uniformes. Una vez contabilizadas las puntuaciones para cada parámetro caracterizado en el macizo, se asigna una clase de calidad en base a la **Figura 2.11** (González de Vallejo et al., 2002).

CUADRO 3.27

Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy Buena	100-81	> 4 kg/cm ²	> 45°
II	Buena	80-61	3-4 kg/cm ²	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 kg/cm ²	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm ²	15°-25°
V	Muy mala	< 20	< 1 kg/cm ²	< 15°

Figura 2.10 Calidad de macizo según índice RMR

(González de Vallejo et al., 2002)

Los valores de RQD se determinan a partir del análisis del estado de los testigos de roca, indicando las condiciones in situ y comportamiento mecánico del macizo rocoso (Bieniawski, 1973). En ocasiones realizar perforaciones no suele ser factible según varios factores como el tiempo disponible para el trabajo, presupuesto y acceso al sitio. No obstante, se han establecido correlaciones empíricas para este parámetro y también el UCS, respecto a las velocidades de ondas sísmicas P y S de los materiales a analizar (Kiliç & Teymen, 2008; Salaamah et al., 2019).

2.7.3 Tipos de Rotura en Suelos

Los taludes en suelo se rompen en superficies curvas, aproximadamente circulares, como los escenarios presentados en la **Figura 2.12b y 2.12c**, donde varía la profundidad de rotura. Si existen condiciones como la presencia de estratos con diferente competencia como rocas sanas, rocas alteradas, capas de coluviones y circulación de agua, puede tener lugar una rotura a favor de una superficie plana (**Figura 2.12a**) o de una superficie poligonal (**Figura 2.12d**) (González de Vallejo et al., 2002). Las roturas paralelas al talud son básicamente inexistentes, sin embargo en laderas con recubrimientos de suelos sobre rocas este modelo puede ser válido (**Figura 2.12a**).

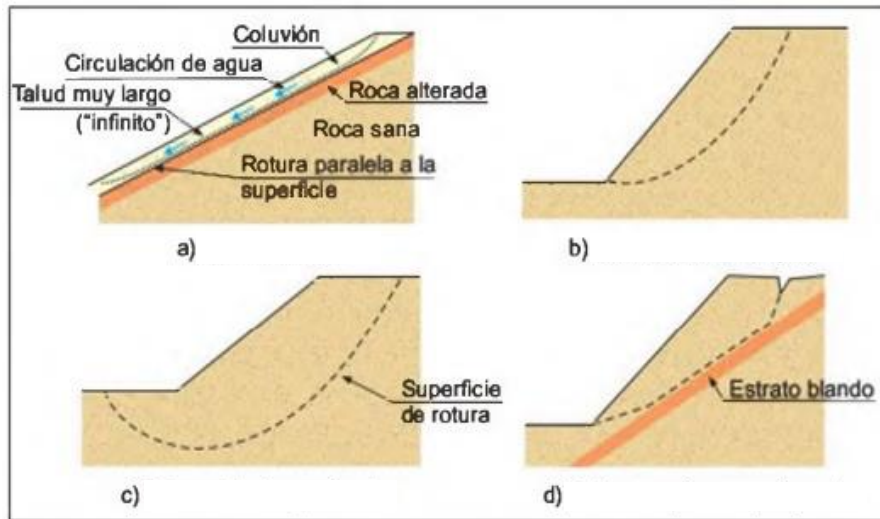


Figura 2.11 Tipos de roturas en suelos

a) Rotura Plana, b) Rotura circular superficial, c) Rotura circular profunda, d) Rotura poligonal (González de Vallejo et al., 2002).

2.7.4 Análisis de Estabilidad de Laderas: Modelos Matemáticos

Los objetivos principales del análisis matemático de laderas son determinar las condiciones de estabilidad de, identificar mecanismos potenciales de falla, establecer la susceptibilidad a diferentes mecanismos de activación como sismicidad o precipitaciones, comparar efectividades de medidas de estabilización y sus efectos sobre los modelos, y diseñar taludes aptos en términos de seguridad, confiabilidad y economía (Suarez, 2003).

Las metodologías comunes consisten en métodos numéricos con buenas aproximaciones al detalle de las condiciones de estabilidad y, métodos dinámicos para análisis de caídas de roca y flujos. No obstante, los métodos de **equilibrio límite** son populares por su facilidad para ser aplicados (Suarez, 1998).

2.7.4.1 Métodos de Equilibrio Límite

Los métodos de Equilibrio Límite asumen que las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de una superficie de falla con equivalencia a un factor de seguridad igual a 1 (Suarez, 1998). Entre los parámetros consideradores para aplicar esta clase de metodologías se pueden listar los siguientes: Topografía, estratigrafía, cohesión, ángulo de fricción, peso unitario, cargas externas y niveles freáticos (Suarez, 2003). La principal ventaja es la existencia de softwares que permiten un análisis automatizado, obteniendo factores de seguridad a partir del ingreso de los parámetros antes mencionados.

Factor de Seguridad (FS): Factor de amenaza para que una ladera falle en condiciones de comportamiento no óptimas. Es la relación entre la resistencia al corte y los esfuerzos de corte que buscan generar la ruptura, sobre una supuesta superficie de posible falla (Evert Hoek, 2008). La ecuación para superficies circulares con ejes de giro, momentos resistentes y actuantes se expresa:

$$FS = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento actuante}}$$

Es común dividir la masa en rebanadas y considerar el equilibrio de cada una por separado. Se analizan condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas.

$$FS = \frac{\sum \text{Resistencias disponibles al cortante}}{\sum \text{Esfuerzos al cortante}}$$

Entre los métodos relevantes que utilizan el criterio de las rebanadas se pueden mencionar los siguientes:

- **Método de Bishop:** Considera el efecto de las fuerzas entre los bloques, asumiendo que estas son horizontales (E_i, E_{i+1}), no tiene en cuenta los esfuerzos cortantes (S_i) (**Figura 2.13**). Solo considera superficies de falla circulares (Suarez, 2003).

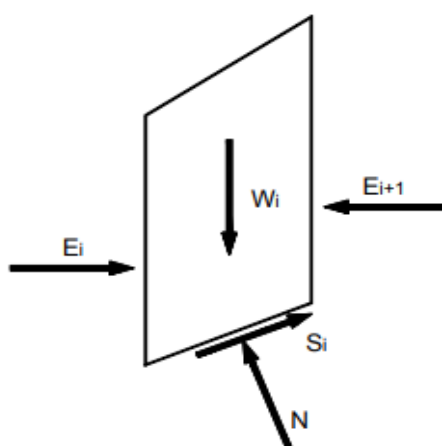


Figura 2.12 Fuerzas aplicadas en un bloque según el método de Bishop
(Suarez, 2003)

- **Método de Janbú:** Las fuerzas entre los bloques son horizontales, tampoco tiene en cuenta las fuerzas cortantes. Las superficies de falla no son necesariamente circulares y establece un factor de corrección en base a la curvatura de la superficie de rotura (Suarez, 2003).

- **Método de Spencer:** Cubre el equilibrio de momentos y esfuerzos; supone que las fuerzas entre bloques son paralelas unas con otras (X_L , X_R), teniendo el mismo ángulo de inclinación (θ) (**Figura 2.14**). El método se puede aplicar para superficies circulares como no circulares, considerándolo preciso y aplicable a casi todo tipo de geometrías (Suarez, 2003).

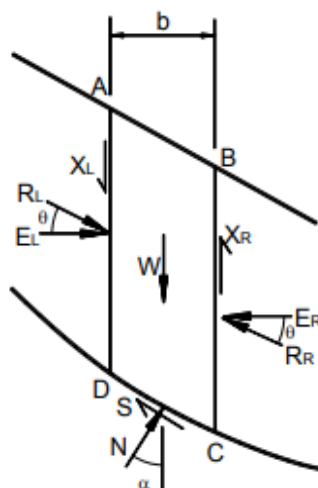


Figura 2.13 Fuerzas que actúan sobre los bloques en el método de Spencer
(Suarez, 2003)

2.7.5 Prospecciones Geofísicas

Entre los más importantes dentro del análisis de masas desplazadas se encuentra la sísmica de refracción y resistividad eléctrica; a partir de las diferencias en las propiedades de la masa movilizada y del sustrato estable, se infieren las superficies de desplazamiento. Es una forma eficiente para obtener información sobre las características del subsuelo en áreas relativamente extensas.

Refracción Sísmica. Es el método no invasivo más empleado dentro de los métodos sísmicos a través de perfiles longitudinales con profundidades aproximadas entre 25 y 100 m, instrumentados con geófonos espaciados una distancia regular y no mayor a 10 m, garantizando un detalle en la investigación (González de Vallejo et al., 2002).

Las propiedades elásticas de los materiales determinan la velocidad de las ondas de cuerpo P y S que se propagan a través de ellos (Suarez, 2003). Esto se explica mediante la **Ley de Refracción**, cuando una parte de un rayo de energía que encuentra una interfaz entre dos medios con distintas propiedades elásticas se refleja y permanece en el medio inicial, mientras que el resto de la energía se transfiere con un cambio de

dirección al siguiente medio (Kearey et al., 2002). El proceso estándar del método se esquematiza en la **Figura 2.15**, y se explica brevemente a continuación (Kearey et al., 2002):

- Se configura un tendido de refracción que consiste en sensores o geófonos enterrados en el suelo.
- En el extremo del tendido se ubica el punto de disparo, y mediante el uso de una fuente como un martillo o mazo se generan ondas sísmicas.
- Las ondas se propagan por el suelo encontrando interfaces donde la energía es refractada y reflejada. La energía que regresa a superficie es medida a través de los tiempos de arribo en cada geófono.
- Los tiempos de arribo son enviados al sismógrafo desde los geófonos por impulsos eléctricos, donde se almacenan y filtran con el fin de determinar el tiempo que ha transcurrido desde el instante de generación de la onda hasta su recepción por el geófono.
- Esto es lo que se conoce como tiro directo. Los puntos de disparo son trasladados a lo largo de la línea sísmica para efectuar tiros intermedios, y hacia el otro extremo de la línea para un tiro inverso. Estos datos crudos son procesados para obtener las variaciones de la velocidad de las ondas con la profundidad. Esto permitirá realizar interpretaciones.

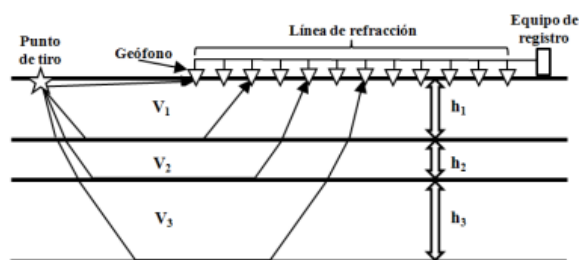


Figura 2.14 Configuración de la metodología de sismica de refracción.

Modificado de (Kearey et al., 2002)

CAPÍTULO 3

3. DATOS Y MÉTODOS

3.1 Área de Estudio

3.1.1 Ubicación Geográfica y Acceso

El cerro de interés se ubica en la provincia del Guayas, al noroeste de la ciudad de Guayaquil en la Etapa 10 de la Coop. Nueva Prosperina. El acceso principal a este sector se lo realiza por la Avenida Cristhian Benítez, localizada al Norte de la ESPOL (Figura 3.1), acceso que conecta con el km 27.5 de la Vía Perimetral. El polígono de interés presenta las siguientes coordenadas en el sistema WGS84 UTM 17S (Tabla 3.1):

Tabla 3.1 Vértices del polígono de interés

Coordenadas	X	Y
NE	615662	9765421
SE	615638	9764946
SW	615236	9764967
NW	615274	9765451

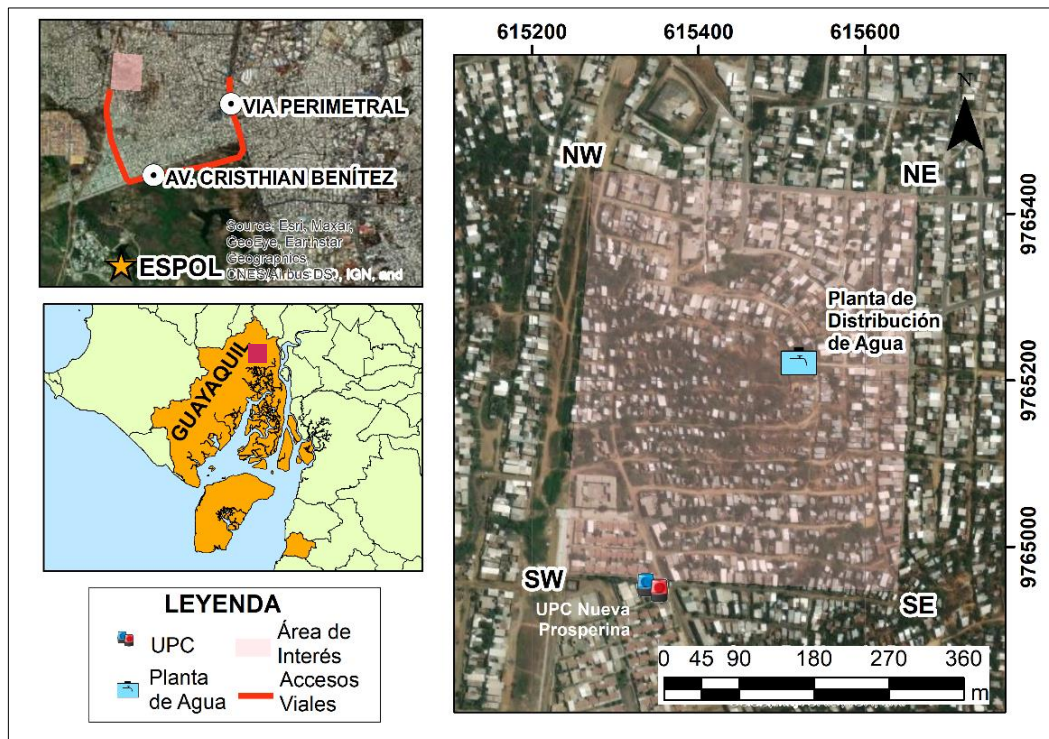


Figura 3.1 Ubicación y acceso general al área de estudio
(Ortofoto Guayaquil 1:5000, IGM)

3.1.2 Población y Vivienda

En base a la información tratada por la Dirección de Gestión de Riesgos y Cooperación del GAD Municipal de Guayaquil a partir del Censo de Población y Vivienda 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), la cooperativa Nueva Prosperina cuenta con 25.590 habitantes distribuidas en todas sus 10 etapas (Larrea-Carreño, 2013). La etapa 10, donde se encuentra gran parte del sitio de estudio, cuenta con 4.264 habitantes, y fue zonificada como susceptible a movimientos en masa por la dirección municipal. Según Larrea-Carreño (2013), el 48% de los asentamientos presentaban estructuras de hormigón, 28% de madera y 17% de hierro; el 95% presentaba techos de cinc, 41% paredes de bloques y 53% pisos de cemento.

Respecto a los servicios, Larrea-Carreño (2013) indicó que el 72% de las viviendas contaban con un pozo séptico, 24% con pozo ciego y solo 3% contaba con alcantarillado. El 98% de las viviendas tenían tuberías para abastecerse de agua, mientras que el 2% se abastecía mediante tanqueros. En un estudio reciente, Avilés-Crespin (2022) indica que las vías dentro de la etapa se encuentran sin asfalto, además, los pobladores siguen sin recibir servicio de alcantarillado. Indica que el 45% de los habitantes está entre los grupos de sociedad económicamente activa mientras que el 55% corresponde a un grupo desempleado.

3.1.3 Relieve

El relieve más importante del cantón Guayaquil se asocia a la Cordillera Chongón Colonche (CCC), el cual se conforma de las formaciones geológicas Piñón, Cayo y San Eduardo. El área de interés se asienta sobre la Fm. Cayo, la cual presenta relieves ondulados bajos, medianos y altos (SENPLADES, 2011). Como se observa en la **Figura 3.2**, el sitio de interés consta de una elevación máxima de alrededor de 140 m, asociado a un relieve colinado medio – alto. Respecto a la hidrografía, en esta ladera se desarrollan corrientes naturales de agua, principalmente por escorrentía.

3.1.3.1 Geomorfología

En base a la información generada por SENPLADES (2011) y el Instituto Geográfico Militar (2019), la zona de interés se asocia a una morfología de Relieve Colinado Alto, con pendientes fuertes mayores al 40 – 70 %. La red de drenaje superficial se establece

como del tipo dendrítico. Con un MDT a más detalle generado para el sector de estudio se conocieron nuevos parámetros acerca del cerro en estudio (**Figura 3.2**):

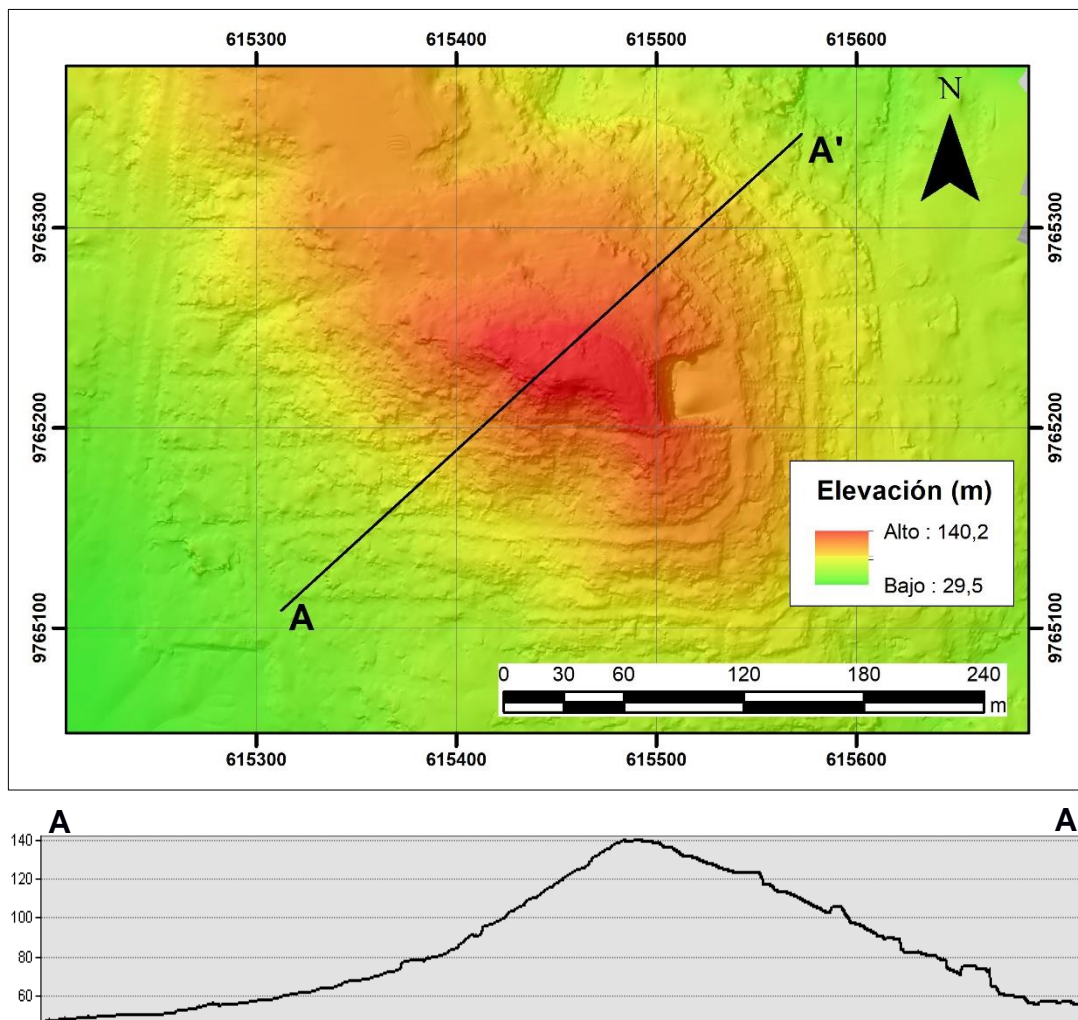


Figura 3.2 Perfil en dirección suroeste (A) – noreste (A') a lo largo de la colina LNP.

- Existe un desnivel relativo de 110.66 metros.
- La pendiente general de la ladera al suroeste de la colina está alrededor del 50%, mientras que al noreste ronda el valor de 38%.
- Las direcciones de inclinación predominantes en la colina son dos: Hacia el suroeste para la ladera sur y hacia el noroeste para la ladera norte.

3.1.4 Clima y Precipitación

Guayaquil posee un clima de transición desde seco, húmedo y semiárido, con épocas del año húmedas y secas, es decir, las estaciones climáticas; invierno desde finales de diciembre hasta abril con temperaturas entre 23°C a 28°C; verano desde mayo a

principios de diciembre con temperaturas superiores a 25°C (Pourrut & Pouyaud, 1995). Según la geoinformación generada por el GAD Municipal de Guayaquil (2022), en el área de estudio hay temperaturas anuales promedio alrededor de 25,77 °C. Por otro lado, las precipitaciones promedio anuales se encuentran entre los 800-900 mm.

3.1.5 Geología Regional

Respecto al contexto geológico regional de Guayaquil, el rasgo más característico es el Grupo Chongón, conformado por las formaciones Orquídeas, Calentura, Cayo y Guayaquil, sobreyaciendo al basamento magmático basáltico (Thalmann, 1946). Este basamento denominado Piñón se relaciona con fallas regionales y ha sido determinada como Aptiano Superior – Albiano; se caracteriza por la presencia de basaltos afaníticos, diabasas y gabros (Benítez, 1995)

La Fm. Calentura está comprendida entre las edades Cenomaniano y Turoniano, y se caracteriza por presentar en la parte superior lutitas y tobas lapilli de la Fm. Cayo, a la Fm. Calentura se la interpreta como una sucesión de plataforma depositada bajo condiciones anóxicas (Benítez, 1995).

Por otro lado las formaciones Cayo se caracteriza por presentar estratificaciones transicionales (Benítez, 1995) de flujos de detritos en la base (producto de actividad volcánica) y productos de erosión de un arco no activo en la otra secuencia (Luzieux et al., 2006). Respecto a la formación Guayaquil es una secuencia que está comprendida de delgadas capas de chert y tobas silicificada.

3.1.5.1 Litoestratigrafía

Según la hoja geológica de Guayaquil (Hoja 33 CT-NV-A), la Fm. Cayo se asienta sobre la zona de estudio. Esta formación es ampliamente descrita por autores como Benítez (1995), Thalmann (1946) o Luzieux et al. (2006). En la Vía Perimetral se reconocen dos miembros: Mb. Basal lutítico y el Mb. Cayo sensu strictu (ss) volcanoclástico. El Mb. Cayo ss se puede dividir en diferentes unidades, descritas a continuación desde la base al tope (**Figura 3.3**):

Unidad C1: Alrededor de 700 m de brechas volcánicas y aglomerados de rocas andesíticas de tamaños decimétricos a métricos. La Edad sería Turoniano medio a Superior considerando las dataciones suprayacentes.

Unidad C2: Potencia de 500 m, compuesta de lutitas calcáreas con fósiles de radiolarios y foraminíferos en los primeros 20 m. La mayor parte se compone de tobas y grauvacas gradadas. Se le asigna una edad Turoniano medio a Coniaciano.

Unidad C3: Con una potencia de 600 m consiste en megaturbiditas decamétricas grano clasificadas, de origen volcanoclástico, con colores típicos verdosos. La composición de los fragmentos líticos varía, comprendiendo andesitas basálticas porfiríticas y dacitas vítreas vesiculares.

Unidad C4: En 300 m de potencia, consiste en lutitas y tobas cineríticas, intercaladas en secuencias estrato decrecientes con grauvacas y tobas. En general, las unidades C3 y C4 no tienen una edad determinada en Guayaquil, aunque por posición estratigráfica serían Santoniano a Campaniano.

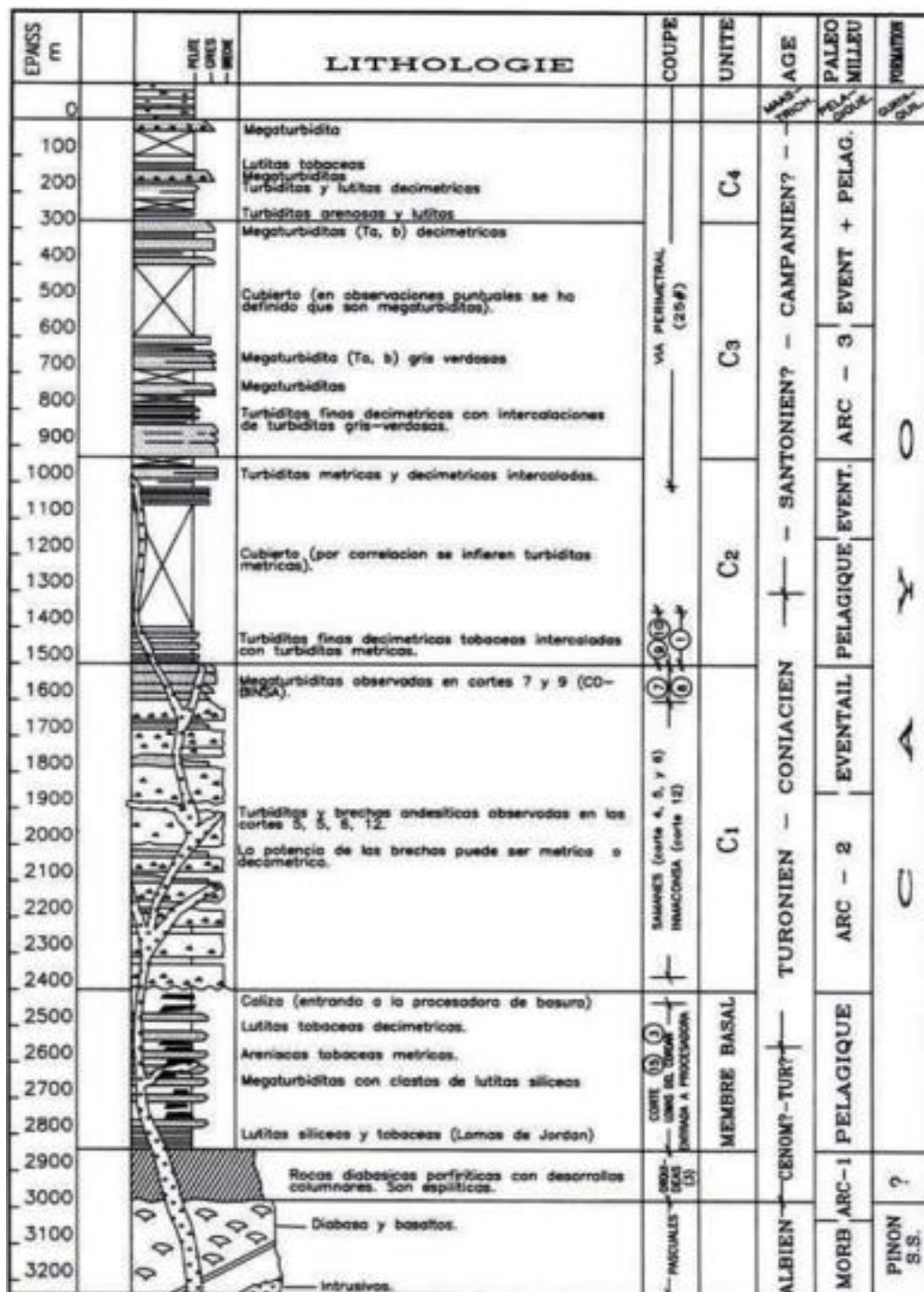


Figura 3.3 Estratigrafía de la Fm. Cayo en Guayaquil
(Benítez, 1995)

3.2 Metodología

La metodología aplicada en el siguiente proyecto se esquematiza mediante el siguiente flujograma de fases (**Figura 3.4**):

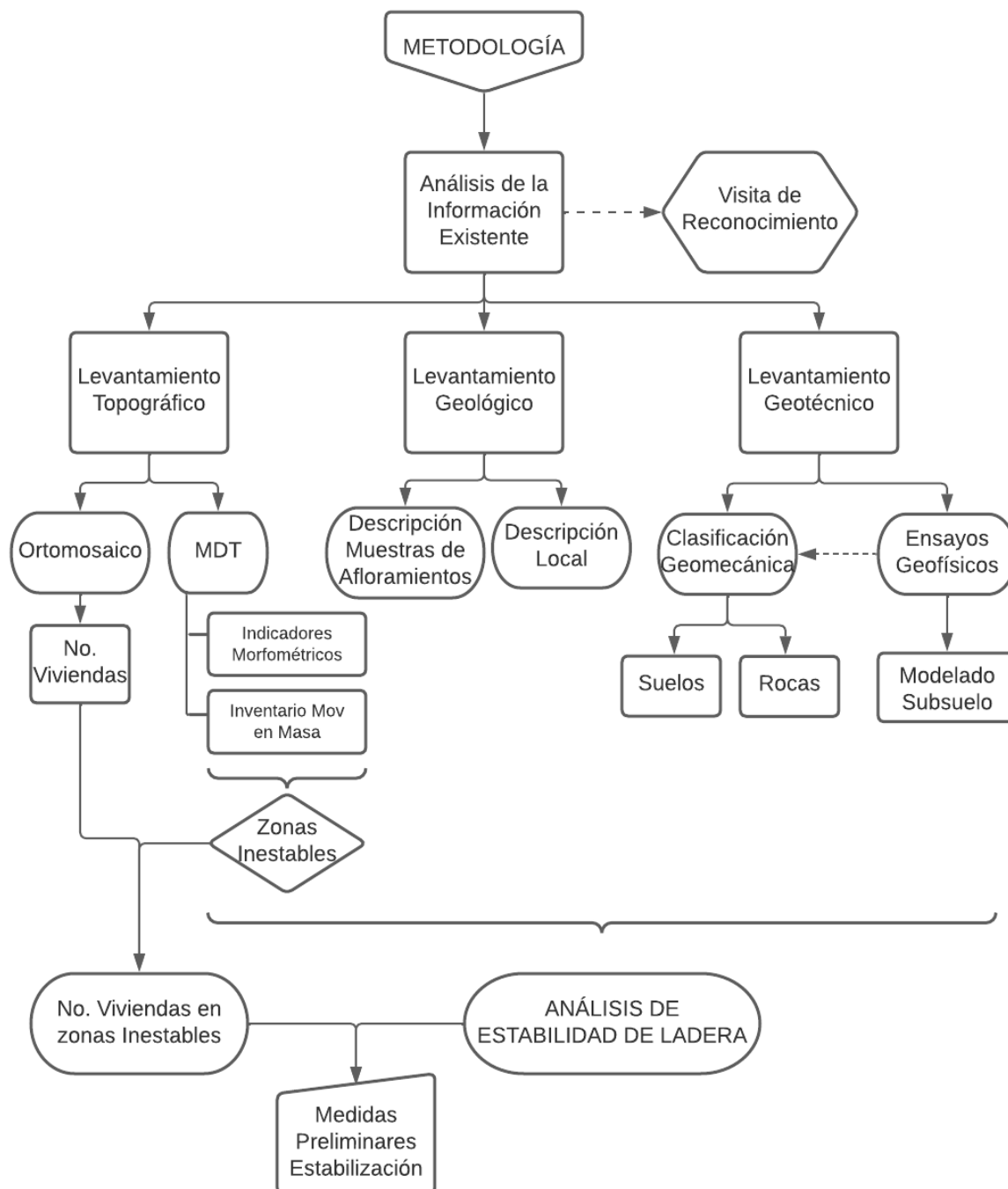


Figura 3.4 Metodología implementada

3.2.1 Análisis de Información Existente

Es relevante utilizar información existente para comprender las características topográficas, geológicas y geotécnicas de los movimientos en masa (Suarez, 1998). Para la revisión de documentos se empleó la metodología “Bola de Nieve” o “Snowball Sampling”, donde se revisaron un total de 20 archivos entre tesis, informes técnicos y bases cartográficas, para finalmente sólo seleccionar 5 de estos con la finalidad de tener una idea general del contexto físico de la zona de estudio:

- Hoja topográfica de Pascuales (PASCUALES NV-A1), escala 1:50.000
- Hoja geológica de Guayaquil (33 CT-NV-A), escala 1:50.000
- Mapa Geotécnico de Guayaquil, escala 1:100.000 (GEOESTUDIOS S.A, 2011)
- Mapa de Aceleración Sísmica del Suelo (PGA) de Guayaquil, escala 1:90.000 (GEOESTUDIOS S.A, 2011).
- Estudio de Riesgo por Movimiento en Masa “Cerro Nueva Prosperina”, elaborado por SUBSUELOS SERVICIOS S.A. en 2014

Se constató la carencia de estudios previos en el sector relacionados a comprender el medio físico, topografía, geología y geotecnia a detalle. En base a lo recopilado y a la necesidad de tener una referencia adecuada del lugar de estudio se partió con un levantamiento topográfico a detalle.

3.2.2 Visita de Reconocimiento

Con la información existente correctamente analizada, fue importante realizar una visita de reconocimiento para definir adecuadamente el área de interés. Según Suarez (2003), esta área debe incluir las laderas afectadas, y las regiones adyacentes que podrían contribuir en las causas de los movimientos. El reconocimiento se dividió en las siguientes fases metodológicas:

1. Acceso al sitio con mayor elevación posible para el vuelo adecuado del dron (**Figura 3.5a**). Destaca la presencia de la Planta de Distribución de Agua Potable – INTERAGUA.
2. Se observó la alta presencia de material residual o suelo, con tonos café claro a oscuro, seco y granular (**Figura 3.5c**).

3. Los taludes a lado de los senderos y casas presentaban agrietamientos de tracción, además, había evidencia de canales de escorrentías (**Figura 3.5b y 3.5d**).
4. Se tomaron muestras de suelo sobre la superficie de las laderas para el análisis preliminar granulométrico, entre otros ensayos.
5. En el sector de la planta de agua se tomaron muestras de roca de un macizo rocoso, para la descripción mesoscópica y microscópica (láminas delgadas).
6. Con base a la información observada y analizada en el sitio se planificaron los levantamientos posteriores: Topográfico, Geológico y Geotécnico.



Figura 3.5 Visita de reconocimiento en la colina Nueva Prosperina.

- a) Vista panorámica desde el cerro en el punto más elevado, b) Grietas de tracción de gran apertura que generan canales de escorrentía, c) Alta meteorización del cerro respecto a la presencia de material residual, d) Grietas de tracción de menor apertura, entre 1 – 2 cm.

3.2.3 Levantamiento Topográfico

El levantamiento topográfico a detalle produjo información esencial para el análisis de los movimientos, ya que permitió la localización de elementos críticos. El levantamiento se llevó a cabo utilizando un dron (VANT) modelo Phantom 4 de DJI (**Figura 3.6**), estableciendo el punto de despegue a una elevación de 130 m aproximados en la colina de estudio, cerca al tanque de distribución de agua potable de INTERAGUA. El proceso, automatizado en la aplicación móvil Pix4Dcapture, constó de la captura de ortofotos solapadas con un mínimo del 80%, a una altura de vuelo establecida en 80 m y un

Ground Sampling Distance (GSD) de 2.18 cm/px. En total se obtuvieron 288 imágenes en un tiempo aproximado de 13 minutos de vuelo, el cual no contó con puntos de control.



Figura 3.6 Dron Phantom 4 DJI utilizado para el levantamiento topográfico

Las ortofotos, georreferenciadas en el sistema UTM WGS84 Zona 17S, se descargan para su posterior procesamiento en el software Agisoft Metashape Pro. Dentro del programa se cargan las fotos, se verifican las coordenadas proyectadas y se sigue un orden de procesamiento en la pestaña “Workflow”:

- Align Photos
- Build Dense Cloud
- Build DEM
- Build Orthomosaic

Para la obtención del MDT se debe filtrar el DEM (Modelo de Elevación Digital) previamente generado, esto a través del mismo software de Agisoft. Se realiza una clasificación de los puntos en la nube creada, siendo relevantes los puntos asignados al terreno (**Figura 3.7**). Para la clasificación automática se usó la opción “Classify Ground Points” y “Select Points by Color”, ambos en la pestaña “Tools”. De manera manual se pueden generar formas libres sobre una cantidad de puntos, y asignar la respectiva clase de interés. El MDT presenta una resolución de 11.8 cm/px, mientras que el Ortomosaico tiene una resolución de 2.96 cm/px.

El Ortomosaico generado se procesó con el software libre Anaconda Prompt (anaconda3), para la segmentación de viviendas en el cerro. Esta aplicación basada en lenguaje Python es usado por varios entes como el Programa Mundial de Alimentos (PMA) para labores de preparación y respuesta a emergencias.

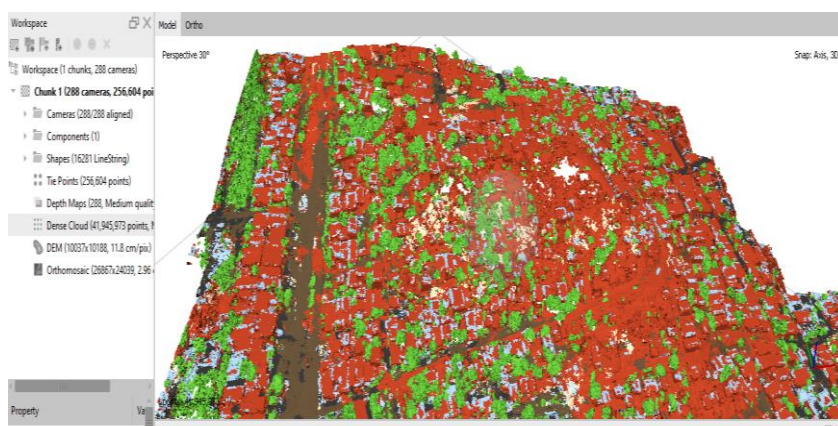


Figura 3.7 Clasificación de las nubes de puntos densa en Agisoft Metashape

El MDT se importó al software ArcGIS Pro para la creación de las curvas de nivel cada metro. Esto se realiza con la herramienta “3D Analyst Tools” → “Raster Surface” → “Contour” (**Figura 3.8**).

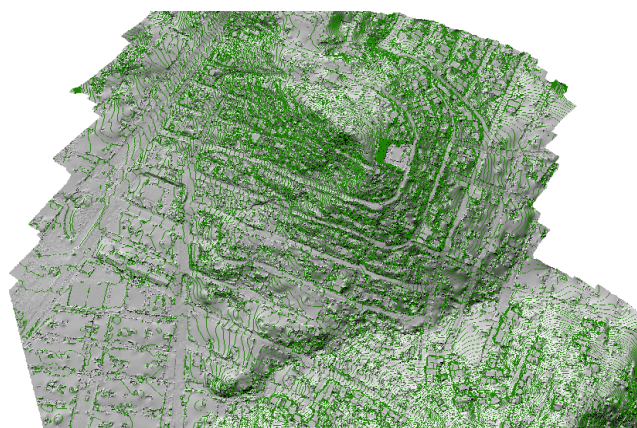


Figura 3.8 Curvas de nivel generadas en ArcGIS Pro

Luego del proceso de limpieza de las curvas de nivel para la nueva construcción de un MDT refinado y Plano Topográfico a escala 1:1.000 (**Apéndice A**), se concluyó esta fase con la generación de los siguientes productos para el análisis físico de la colina, todo a través del uso de ArcGIS Pro (**Tabla 3.2**):

Tabla 3.2 Productos derivados del levantamiento topográfico

Productos generados	Tipo de Análisis
<ul style="list-style-type: none"> Hillshade 	Inventario de Movimientos en Masa
<ul style="list-style-type: none"> Red de Drenaje Pendientes (LS Factor) Aspectos u Orientaciones Curvatura Planta – Perfil 	Indicadores Morfométricos
<ul style="list-style-type: none"> Ortomosaico 	Segmentación de viviendas en el sector

3.2.4 Levantamiento Geológico

Esta fase consistió en la caracterización geológica del cerro en Nueva Prosperina. Como primer paso se organizaron y promediaron datos estructurales conocidos de la Fm. Cayo en una hoja EXCEL (Dip / Dip Direction). Estos datos fueron recolectados en el sector de estudio y en afloramientos de la ESPOL, donde también concurre la misma formación geológica. Se plotearon los datos sobre los flancos noreste y suroeste de la ladera, en curvas de nivel de altura conocida, para luego extender rectas que continúen con la dirección de rumbo de las posibles capas. Estas rectas se extendieron hasta la altura de la Av. Perimetral y PARCON ESPOL, donde intersecan con curvas de nivel de la misma altura de los flancos (**Figura 3.9**). Esto se lo realizó por la limitada información geológica en el sector de estudio, donde hay grandes capas de suelo residual que no permiten un reconocimiento adecuado de la litología del sitio. Con las paralelas interpoladas se procedió a establecer una ruta para la toma de datos, tal como se observa en la **Figura 3.9**. Este ejercicio se realizó directamente en el software ArcGIS Pro, usando las curvas de nivel a escala 1:50.000 brindadas por el IGM.

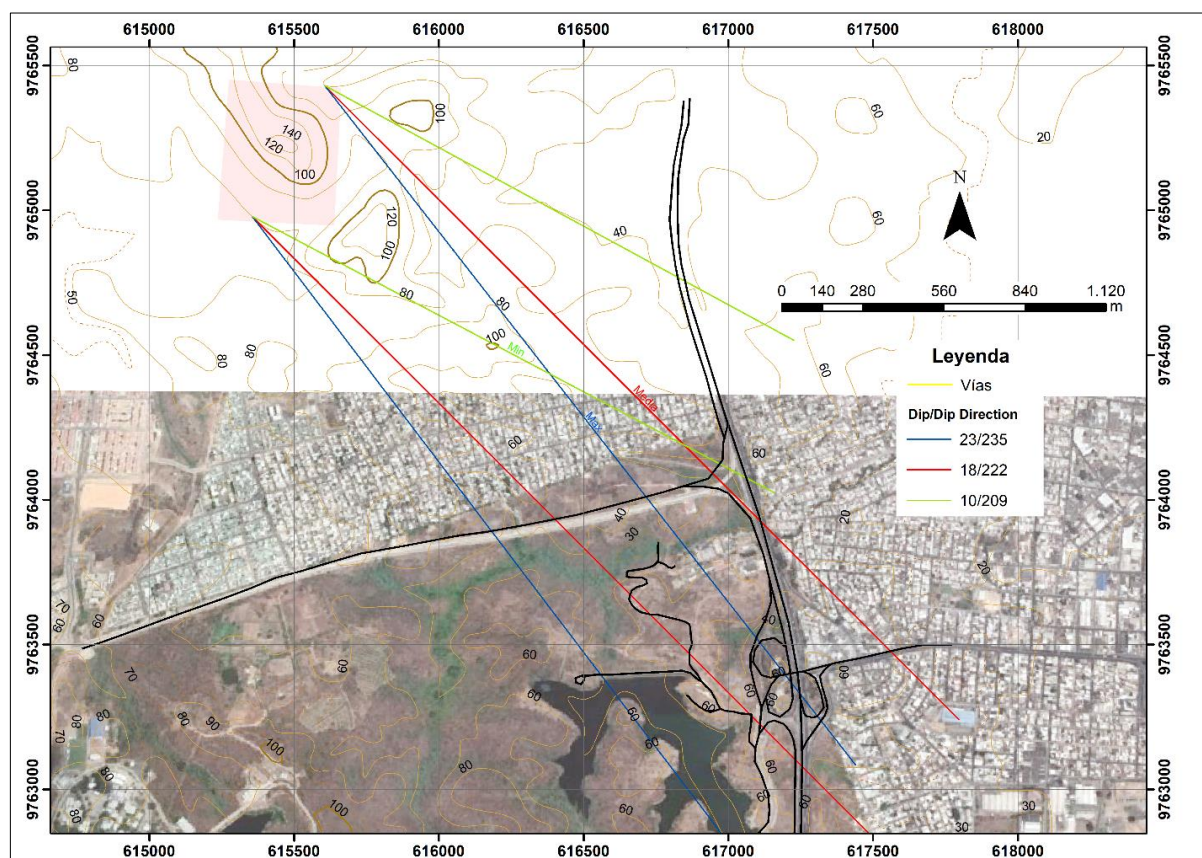


Figura 3.9 Paralelas trazadas hacia la vía perimetral

La información levantada en los sitios visitados se almacenó en una base de datos que luego fue referenciada y ploteada en ArcGIS Pro (**Figura 3.10**).



Figura 3.10 Trabajos de campo realizados en la Vía Perimetral y PARCON ESPOL

En la **Figura 3.11** se observan los puntos ploteados, referenciando tres muestras recolectadas en los sitios de la vía Perimetral, y dos muestras en el cerro Nueva Prosperina cuando se llevó a cabo la visita de reconocimiento. Los datos fueron agrupados según características litológicas y estructurales similares, sin embargo, al zonificar cada una de las unidades encontradas no abarcaban la zona de estudio. También se pudo notar que las muestras recolectadas en la vía Perimetral eran muy diferentes a las muestras NP_01 y NP_02 en cuanto a características petrográficas.

Esta situación motivó el desarrollo de dos láminas delgadas de las muestras recolectadas en la colina para conocer adecuadamente sus características litológicas. Las láminas delgadas se elaboraron en el Laboratorio de Petrografía de la FICT-ESPOL. Un resumen esquemático del proceso se muestra en la **Figura 3.12**: La muestra de mano es cortada hasta tener unas dimensiones aproximadas de 4x2x0.5 cm; luego debe ser pulida con

abrasivos de 9.5 a 17 micras. La cara pulida debe ajustarse sobre todo el vidrio portaobjetos, para luego ser lavada y secada en una plancha durante 1 hora. Una vez seca, la muestra debe ser pegada al vidrio portaobjeto con resina Epoxy durante 5 horas. Luego del secado la muestra debe ser cortada y pulida hasta 30 micras aproximadas. Se debe realizar un último pulido con abrasivos para que la lámina quede limpia y lista para el análisis mediante el microscopio petrográfico y estereomicroscopio.

La fase de levantamiento geológico concluye con una interpretación de las descripciones de las muestras, aplicando los métodos de clasificación propuestos por Michel-Lévy et al (1987) y Streckeisen (1976) en el caso del análisis petrográfico. Las interpretaciones permitieron correlacionar y conocer con más detalle la geología del cerro en Nueva Prosperina.

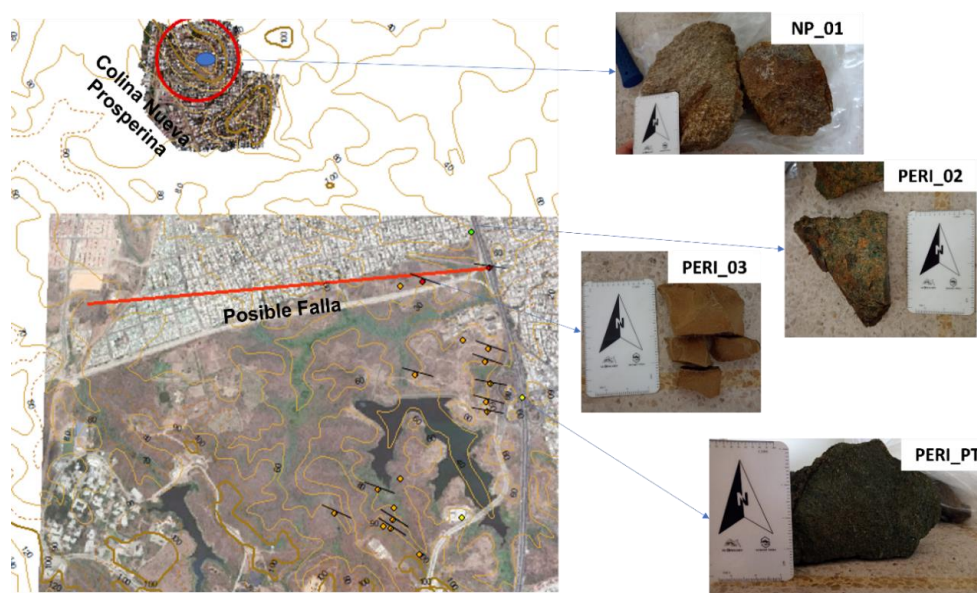


Figura 3.11 Datos geológicos levantados en la vía Perimetral y PARCON ESPOL.

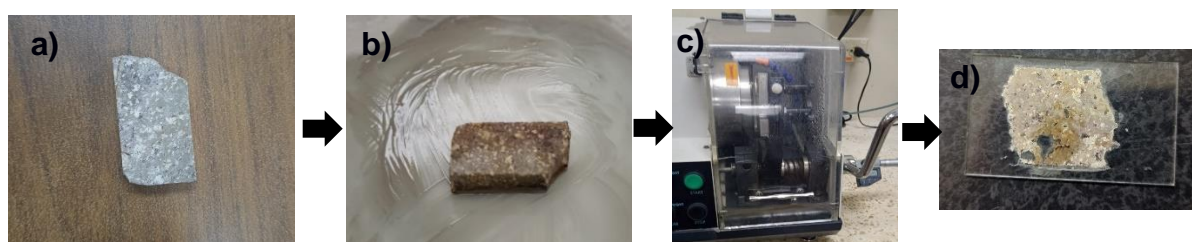


Figura 3.12 Proceso de elaboración de una lámina delgada.

a) Muestra cortada en dimensiones aproximadas de 4x2x0.5 cm, b) Pulido de muestra con abrasivos de 9.5 a 17 micras, c) Luego de secar y pegar la muestra a un portaobjetos se pule con máquina, d) Se pule nuevamente con abrasivos para limpiar la lámina.

3.2.5 Levantamiento Geotécnico

Con una base de información topográfica y geológica consistente, además de conocer adecuadamente la extensión del área de estudio, se pudieron organizar estudios más detallados, de interés para la caracterización. Dichas investigaciones detalladas requirieron de una exploración subsuperficial que incluyó prospección geofísica y ensayos de laboratorio.

Mediante la interpretación visual de antiguos movimientos en masa y zonas de escarpes en el MDT, y su correlación con las zonas consideradas de “Muy Alta Susceptibilidad” en el estudio de análisis de riesgo solicitado por el GAD Municipal de Guayaquil a la consultora SUBSUELO SERVICIOS S.A. (**Figura 3.13**), se establecieron 3 perfiles para la evaluación de la estabilidad de las laderas. A largo de estas se recolectaron muestras de suelo superficial (entre 0.30 y 0.50 cm de profundidad) para el estudio de sus parámetros básicos que permitieron el análisis de su estabilidad. En el Perfil 1 se tomó una muestra, mientras que en los perfiles 2 y 3 se tomaron 2 muestras.

Las muestras pasaron por ensayos en laboratorio, con la finalidad de conocer las propiedades físico – mecánicas del material inestable sobre la colina. La información obtenidos de los ensayos de laboratorio fueron complementados con datos teóricos en base a tablas y, espesores de material residual según la prospección geofísica realizada.

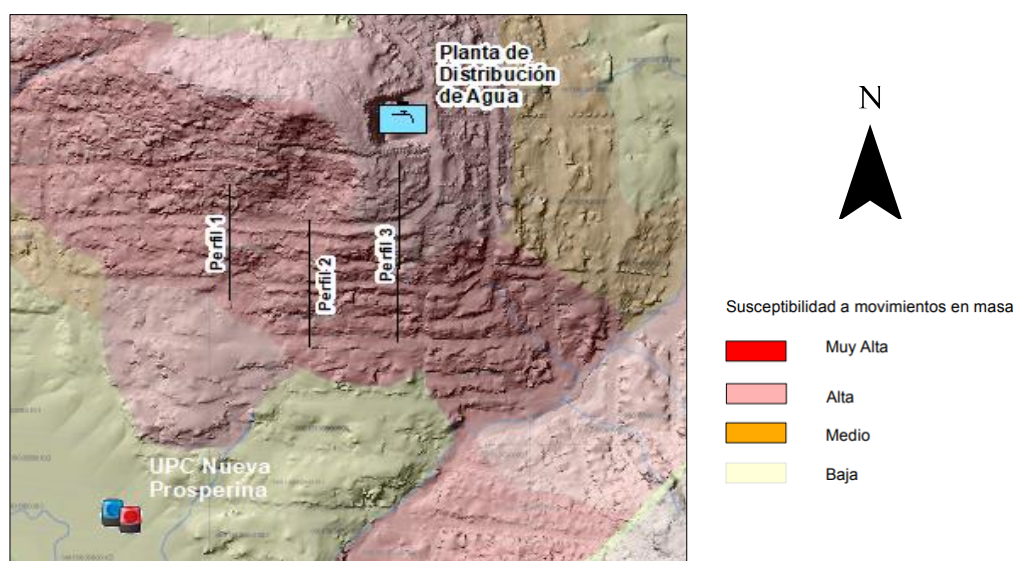







Figura 3.13 Perfiles trazados en zonas de Muy Alta Susceptibilidad.

Según el estudio de SUBSUELOS SERVICIOS S.A, correlacionadas con evidencias de movimientos en masa del MDT.

Las muestras de suelo fueron etiquetadas y selladas para que evitar que el material pierda sus condiciones naturales, organizándolas en una tabla de datos como la presentada (**Tabla 3.3**).

Tabla 3.3 Base de datos para las muestras recolectadas sobre los taludes

Muestra	Profundidad	Talud	Peso	Descripción	Foto
Perfil1_T01	Superficial, sobre talud (0.50 cm)	Perfil 1	3 kg	Suelo residual granular, poco húmedo, color café claro.	
Perfil2_T01	Superficial, sobre talud (0.50 cm)	Perfil 2	4 kg	Suelo residual granular, poco húmedo, color café a gris oscuro.	
Perfil2_T02	Superficial, sobre talud (0.50 cm)	Perfil 2	3 kg	Suelo residual granular, poco húmedo, color café a gris oscuro.	
Perfil3_T01	Superficial, sobre talud (0.30 cm)	Perfil 3	3 kg	Suelo residual granular, muy seco, color café claro	
Perfil3_T02	Superficial, sobre talud (0.30 cm)	Perfil 3	5 kg	Suelo residual granular, muy seco, color café a marrón oscuro	

3.2.5.1 Ensayos de Laboratorio

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción de FICT-ESPOL, para conocer los parámetros geotécnicos necesarios para la caracterización del material inestable que conforman la colina. Estos ensayos se dividieron en dos grupos según su finalidad: Clasificación de Suelo según SUCS y Corte Directo. Se tomaron un total de 7 muestras, 5 de suelo y 2 de roca:

- 2 de las 5 de suelo se trabajaron en la clasificación SUCS.
- Las 5 muestras de suelo para el ensayo de Corte Directo.

Ensayos para la Clasificación de Suelo tipo SUCS

Análisis Granulométrico: El tamizado se realizó bajo la norma ASTM D 422-00, por vía seca. En la **Figura 3.14** se esquematiza el procedimiento de preparación de muestras antes de iniciar el tamizado. Las muestras iniciaron su preparación con el secado al sol durante unos 30 – 40 minutos, para luego ser colocadas sobre una lona donde se empiezan a separar con un martillo de goma los suelos que se encontraban apelmazados. La muestra se procede a secar en el horno durante 16 horas a 110°C. Una vez secada, se cuartea con el cuarteador de arena hasta obtener una porción alrededor de los 600 g. Esta muestra pasa a ser lavada de finos con el tamiz #200 para posteriormente llevarla a secar nuevamente durante 16 horas a 110°C. La muestra seca se pesa antes de iniciar el tamizado.

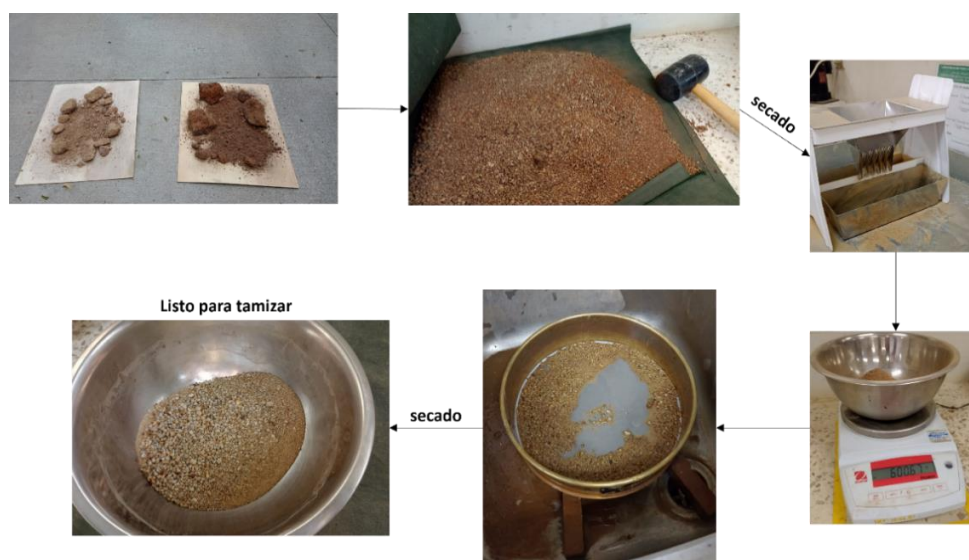


Figura 3.14 Proceso general de preparación de muestra previo a tamizado

La granulometría se efectuó con los siguientes tamices: #4, #16, #30, #40, #50, #100 y #200 (**Figura 3.15**). El proceso de tamizado se realizó con la tamizadora eléctrica RO – TAP durante 2 minutos, luego fueron pesadas cada una de las porciones retenidas. La balanza utilizada tiene una legibilidad de 0.01 g.



Figura 3.15 Determinación de granulometría mediante tamizado

Límites de Atterberg: Los límites de Atterberg se establecen para los contenidos de agua cuando están en transición de un estado a otro.

- **Límite Líquido (LL):** Contenido de agua cuando la transición de estado plástico a líquido tiene lugar. De la muestra secada al horno en primera instancia se obtienen 150 g de material que pase por el tamiz #40. De esos 150 g se toman 100 g en un mortero de porcelana y se empieza a homogenizar con agua gradualmente (cada 10 ml) hasta que el suelo tenga una consistencia suave. El ensayo prosiguió con el empleo de la Cuchara de Casagrande, contabilizando el número de golpes para 4 ensayos (**Figura 3.16**). Las porciones resultantes de los 4 ensayos son pesadas y enviadas a secar durante 16 horas a 110°C.

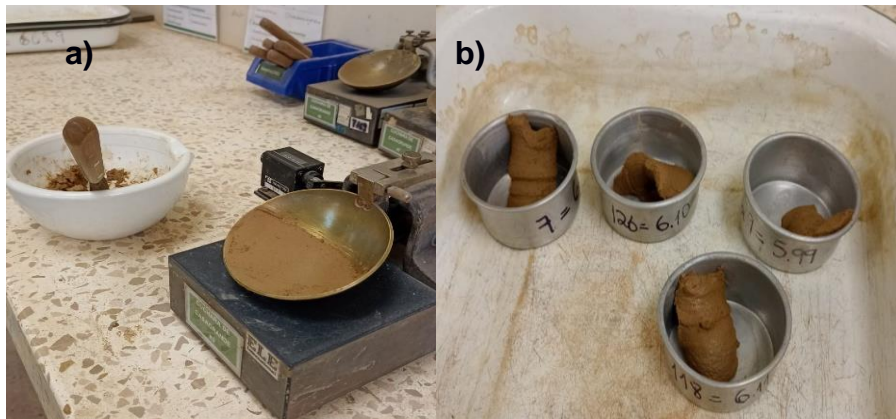


Figura 3.16 Ensayo para la obtención del LL.

a) Preparación de muestra y ajuste de Cuchara de Casagrande, b) Recolección de muestras en recipientes para posterior secado y pesaje.

- **Límite plástico (LP):** Contenido de agua cuando la transición de estado semisólido a plástico tiene lugar. Se toman 18 a 20 g aproximados del restante del ensayo de LL. Se empiezan a tomar pequeñas porciones y se le da una forma elipsoidal con las palmas de la mano. Luego, sobre una placa de vidrio se procede a rodarla formando rollos. Se definió el LP al porcentaje de agua en el cual el suelo se agrieta al formarse un rollo de 3.2 mm de diámetro aproximado (**Figura 3.17**)



Figura 3.17 Ensayo para la determinación del límite plástico.

a) Forma elipsoidal de las muestras de suelo, b) Se rueda la muestra sobre una placa de vidrio para reducir su contenido de humedad hasta obtener un cilindro de 3.2 mm de diámetro.

Índice de Plasticidad (IP): Se obtuvo mediante la diferencia entre los límites líquido y plástico ($IP = LL - LP$).

Corte Directo

Los ensayos se efectuaron a las muestras más representativas de las laderas, con la finalidad de determinar la cohesión c y el ángulo de fricción del suelo Φ , factores que permiten una zonificación geotécnica de los materiales inestables (**Figura 3.18**).



Figura 3.18 Instrumentación para los ensayos de corte directo

Durante el ensayo las muestras inalteradas se someten una fuerza tangencial y carga normal. La preparación de la muestra implica tener aproximadamente 500 g del suelo a ser ensayado. De este total se separan tres porciones de 150 g aproximados (**Figura 3.19a**). Dos muestras se ensayaron con un 20% de humedad, por lo que se agregaron 30 g de agua a cada una de las porciones, para luego homogenizarlas. Las muestras restantes se ensayaron al contenido propio de humedad, con la finalidad de comparar el comportamiento real y estimado del suelo.

En una caja de consolidación se agregó el suficiente material que permitió un ensayo adecuado (**Figura 3.19b**). Además, conociendo las dimensiones específicas de la caja y el peso de las muestras se calculó el peso unitario de estos suelos. Para cada suelo se realizaron tres ensayos, muestras que luego de ser consolidadas y cortadas por la máquina de corte directo se procedieron a secar a 110°C durante 16 h (**Figura 3.19c y 3.19d**). Las muestras secas son pesadas, y sus valores fueron ingresados al software que viene incluido en la instrumentación del corte directo, el cual proporcionó los datos necesarios para procesamiento y posterior obtención de los parámetros necesarios para el análisis de estabilidad.



Figura 3.19 Preparación y procesamiento de muestras en el ensayo de corte directo.

a) Preparación de muestras, b) Relleno de la caja de consolidación con la muestra, c) Corte generado por la máquina, d) Muestras secas y listas para pesaje.

Se observan los diferentes valores de esfuerzos de corte en rotura tangencial y se grafica una línea de falla correspondiente a la tangente común a los círculos de Mohr. Esto dará como resultado la cohesión como ordenada al origen y, el ángulo de fricción interna como la pendiente de la recta (**Figura 3.20**).

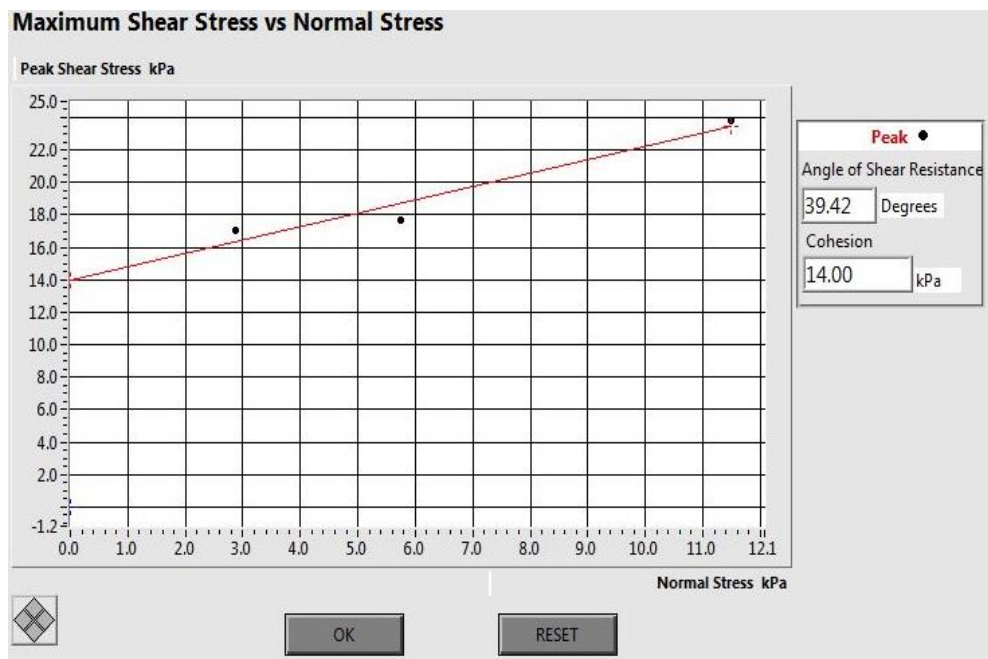


Figura 3.20 Envolvente de rotura de una muestra ensayada al corte directo.

3.2.5.2 Ensayos Geofísicos: Sísmica de Refracción

Consistió en el establecimiento de una línea sísmica de aproximadamente 120 metros sobre uno de los senderos de la colina Nueva Prosperina, perpendicular a la dirección de los perfiles sobre los que se analizó la estabilidad (**Figura 3.21**). Se empiezan a generar ondas sísmicas con un martillo como fuente artificial a la altura de la Planta de Agua, bajando hasta el otro extremo del tendido sísmico (Sentido A – A' del tendido sísmico).

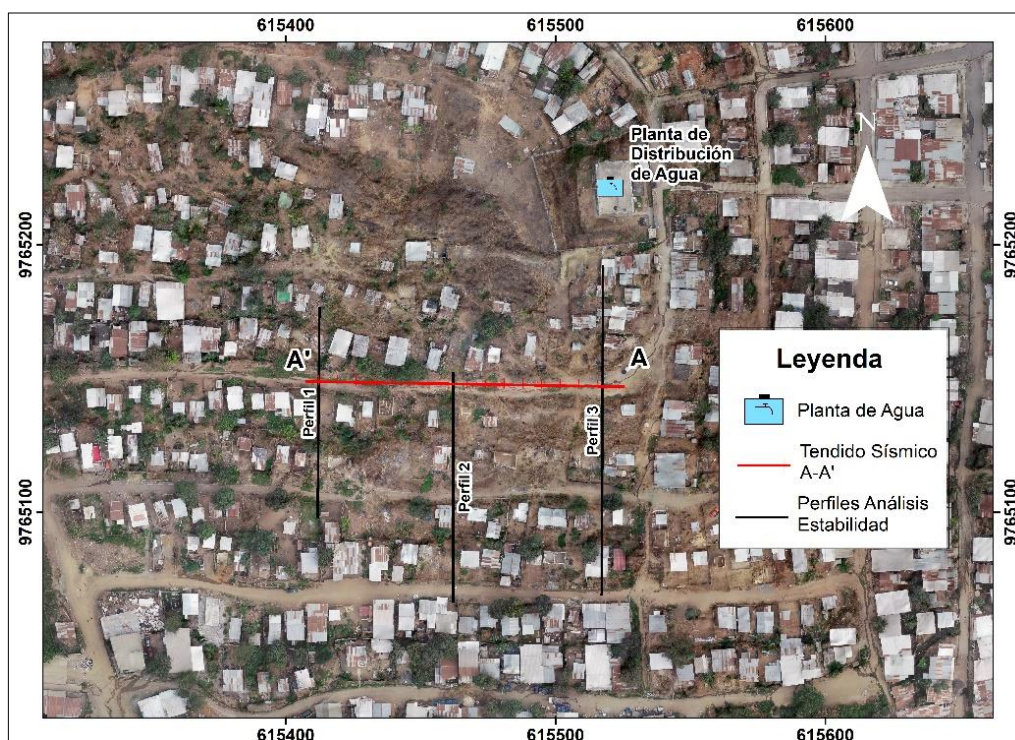


Figura 3.21 Ubicación de la línea sísmica A – A' para el estudio de refracción sísmica.

Los instrumentos y softwares facilitados por el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE) fueron:

- Terraloc Pro 2
- 24 geófonos de 28 Hz
- Martillo de 8 kg
- Plato para recepción del golpeo por martillo
- Reflex – Win v10

El perfil sísmico se obtuvo colocando los 24 geófonos de forma vertical sobre el suelo cada 5 metros a lo largo de la línea sísmica. Esto con la finalidad de que el movimiento a detectar sea uniforme con el medio por el que se transmite. Con el martillo se realizaron 7 disparos de energía desde el primer extremo del tendido sísmico para el tiro directo (10 m antes del primer geófono), pasando a lo largo de esta línea para los tiros intermedios (2.5 m – 37.5 m – 62.5 m – 87.5 m – 117.5 m) hasta el otro extremo para lograr el tiro inverso (a 125 m, fuera del tendido sísmico) Se realizaron al menos tres golpes por tiro ya que la energía transmitida por el martillo no es muy grande. Con esto se busca minimizar el ruido existente por tuberías y equipos de sonido en el sector, además de mejorar el modelamiento de los tiempos de arribo (**Figura 3.22**).



Figura 3.22 Configuración de la prospección mediante sísmica de refracción.

a) Ajuste del Terraloc Pro 2, b) Conexión de geófonos.

Mediante el software Reflex – Win v10 se procesaron los datos, lo cual consiste en la lectura de tiempos de arribo para perfiles de onda P para el posterior picking de los primeros arribos en cada disparo de energía (**Figura 3.23a**). Luego se generaron los gráficos de tiempo de arribo vs distancia o dromocronas para el análisis automático de los tiempos de viaje (**Figura 3.23b**). Los gráficos de tiempos de arribo y dromocronas se encuentran en **Apéndices D**. Las dromocronas se integraron y procesaron para generar el perfil de velocidades de ondas primarias, incluyendo la topografía.

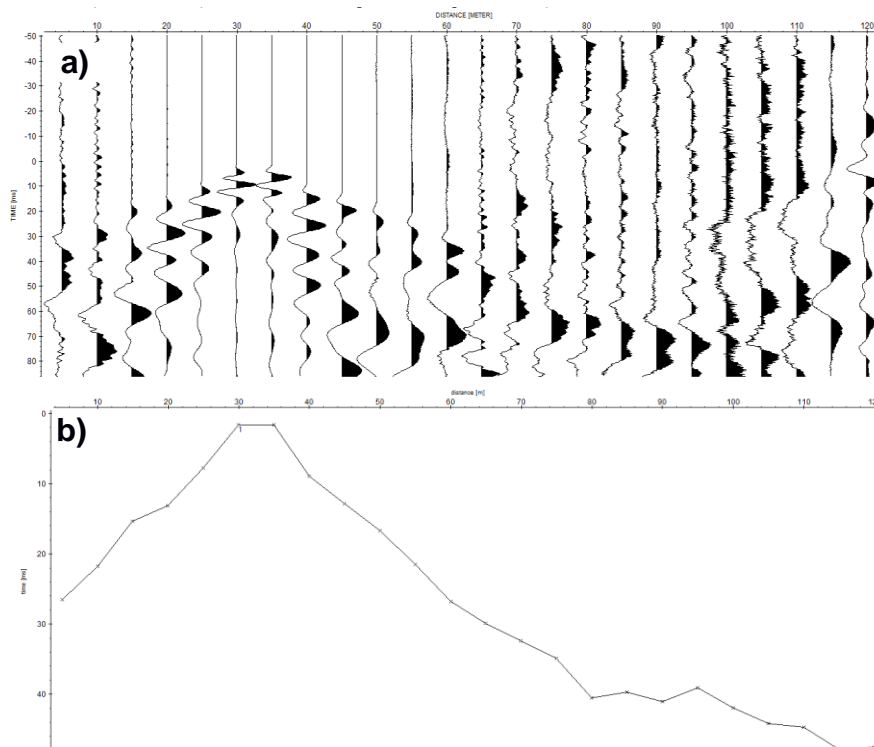


Figura 3.23 Procesamiento de datos para sísmica de refracción.

a) Tiempos de arribo de la onda P a cada geófono, b) Dromocrona (Tiempo de viaje vs distancia), c) Dromocronas de todos los disparos de energía.

Con el perfil sísmico procesado se lograron interpretar las diferentes capas de suelo y roca que conforma el subsuelo del cerro Nueva Prosperina. Ya que el modelo sísmico corta perpendicularmente a la dirección de los perfiles establecidos para el análisis de estabilidad (**Figura 3.24**), se puede modelar adecuadamente la profundidad de los estratos de suelo inestable y roca meteorizada en cada uno de los perfiles.

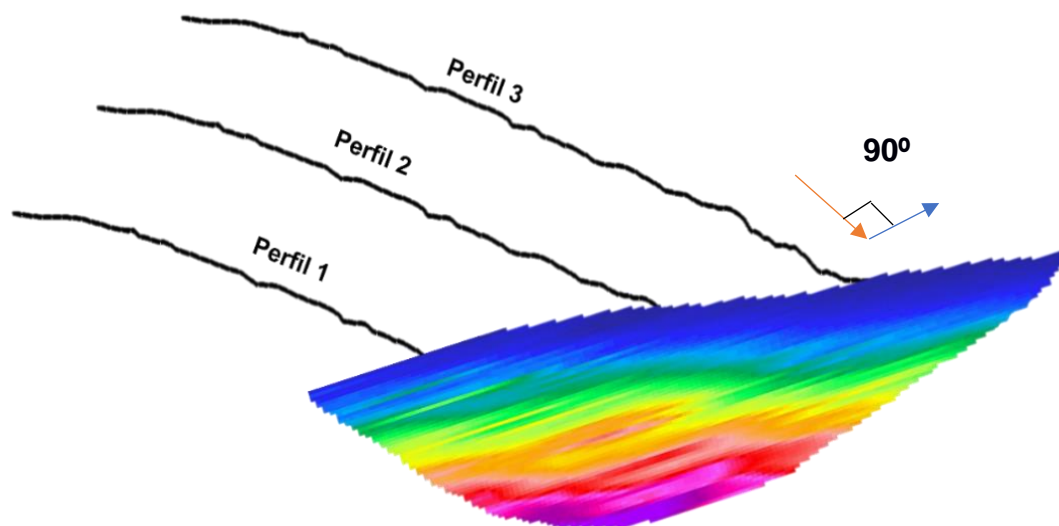


Figura 3.24 Modelamiento de los perfiles para análisis de estabilidad a partir del modelo sísmico.

Con la potencia de material residual establecido se procedió a calcular el volumen de masa inestable en el cerro Nueva Prosperina. Esto se lo realiza con una simple multiplicación entre el área definida como inestable y el espesor de este material. Se elige este método ya que el espesor de suelo inestable interpretado en el perfil sísmico es casi constante. El perfil sísmico solo abarca una parte de toda el área considerada como inestable, pero por limitada accesibilidad y problemáticas sociales sólo se trabajó con el tendido sísmico A-A'.

El modelo sísmico también ayudó a estimar la calidad de la roca en profundidad a través de relaciones empíricas entre las velocidades de las ondas P y parámetros geomecánicos como RQD y UCS. Estas relaciones se resumen en la **Tabla 3.4**. Con la ponderación de otros parámetros geomecánicos tomados en campo como espaciado y persistencia sobre el Talud de INTERAGUA, se procedió a definir un valor de RMR que estime la calidad geomecánica de la roca.

Tabla 3.4 Relaciones empíricas para la estimación de parámetros geomecánicos.

Parámetro Geomecánico	Relación Empírica	Valor R ²	Referencia
RQD	$0.023V_p(m/s) - 0.885$	0.801	(Salaamah et al., 2019)
UCS	$2.304V_p(km/s)^{2.4315}$	0.940	(Kılıç & Teymen, 2008)

V_p : Velocidad de onda P

3.2.6 Análisis de Estabilidad de las Laderas

En esta última fase se utilizan los productos y parámetros obtenidos en los apartados anteriores. Los perfiles de los taludes se obtuvieron gracias al levantamiento topográfico a detalle. Las diferentes de capas de los perfiles de taludes y sus características se establecieron mediante el levantamiento geológico y, la clasificación de suelos y ensayos geofísicos que fueron parte del levantamiento geotécnico. Finalmente, los ángulos de fricción y cohesión resultantes del ensayo de corte directo permitieron calcular los factores de seguridad en las laderas.

El cálculo de factores de seguridad se ha facilitó por el desarrollo de softwares, como el empleado para este proyecto: Slide 9.026 desarrollado por Rocscience. Este software permite el cálculo para diferentes metodologías como Bishop, Janbú, Spencer, entre otros. Permite agregar varias capas de materiales, niveles freáticos y piezométricos, factores sísmicos, además de trabajar con superficies de falla circulares y no circulares, entre otros factores que se pueden determinar previamente en campo o mediante ensayos de laboratorio, como los obtenidos en este proyecto. Las coordenadas de los perfiles de la ladera se exportaron en una hoja EXCEL, se agregaron las capas determinadas previamente y se establecieron diferentes escenarios para el análisis de estabilidad (**Tabla 3.5**).

Tabla 3.5 Escenarios para el análisis de Estabilidad de Laderas

Escenarios Pseudoestáticos	Escenarios Dinámicos (Aceleración Sísmica)
Seco – Sin considerar Nivel Freático	Seco – Sin considerar Nivel Freático
Húmedo – Nivel Freático Superficial (Escorrentía)	Húmedo – Nivel Freático Superficial (Escorrentía)
Húmedo – Nivel Freático a 1 m de profundidad	Húmedo – Nivel Freático a 1 m de profundidad

Los parámetros geotécnicos obtenidos de las muestras ensayadas son ingresados para modelar el comportamiento geomecánico de los materiales mediante el criterio de Mohr-Coulomb. Finalmente, el modelo generado contiene todas las superficies de rotura posibles en base a las condiciones ingresadas, siendo relevante el factor de seguridad respecto a la superficie de falla menos favorable (**Figura 3.25**).

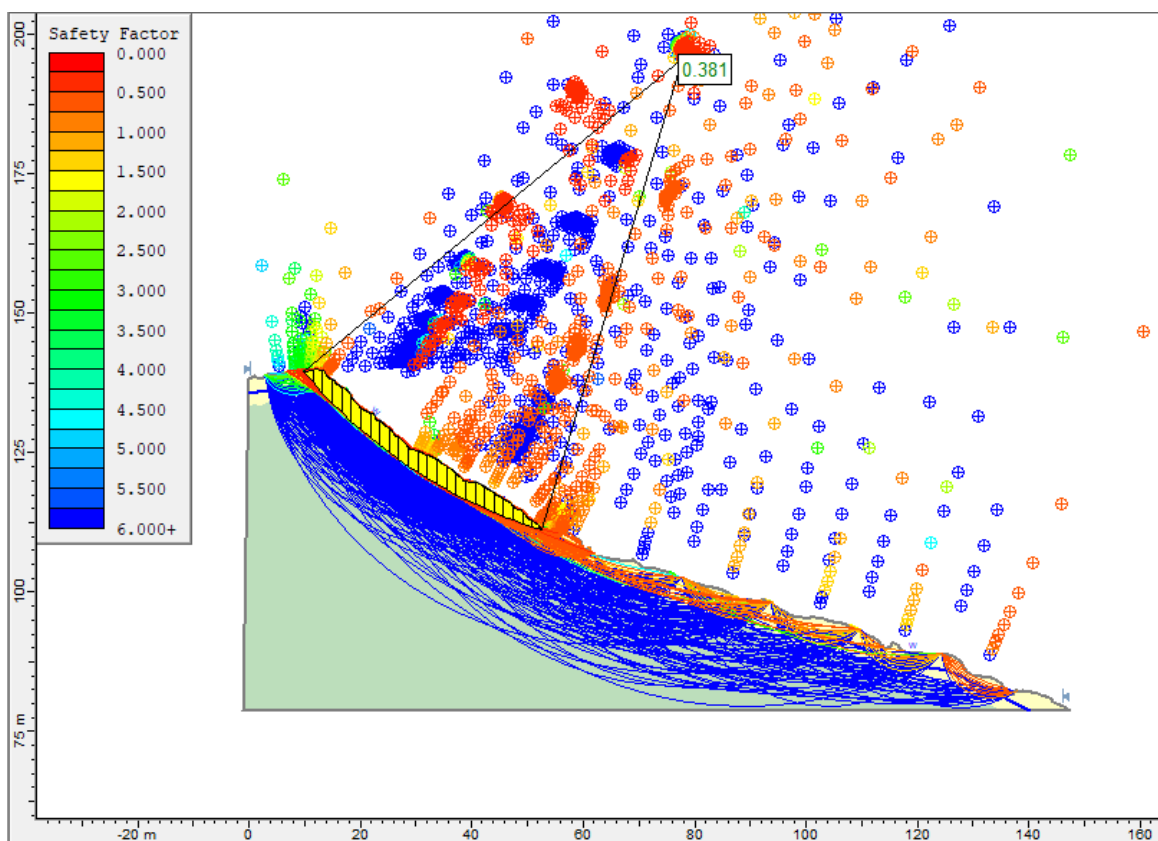


Figura 3.25 Potenciales superficies de falla y FS menos favorable

Los valores de FS obtenidos fueron comparados para tres métodos de análisis en cada talud: Bishop, Janbú y Spencer. Los FS se compararon para determinar una tendencia con los valores establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014) (**Tabla 3.6**).

Tabla 3.6 Factores de seguridad por corte mínimos según NEC.

Condición	FS Corte Mínimo	
	Diseño	Construcción
Carga Muerta + carga viva nominal	1.5	1.25
Carga Muerta + carga viva máxima	1.25	1.1
Carga Muerta + carga viva nominal + sismo de diseño pseudo estático	1.1	1
Taludes – condición estática y agua subterránea normal	1.5	1.25
Taludes – condición pseudo estática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño	1.05	1

Fuente: (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014)

Con los valores de FS asociados para cada ladera analizada se procedieron a plantear medidas de estabilización preliminares.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Identificación de Zonas Inestables

Sobre la base del levantamiento topográfico se identificaron zonas inestables a través del análisis de indicadores morfométricos y visitas de campo, permitiendo la elaboración del inventario de movimientos en masa a través de fotointerpretación. El MDT permitió la elaboración de tres perfiles a lo largo de las zonas consideradas inestables, que luego fueron utilizados para el análisis de estabilidad en las laderas del sector.

4.1.1 Indicadores Morfométricos

A partir del mapa de aspectos se determinaron que las orientaciones de inclinación de las laderas son hacia el norte, noreste, este y suroeste; esta última la de mayor ocurrencia (**Figura 4.1a**). Según la clasificación de pendientes (CLIRSEN, 2011), las laderas suroestes presentan las mayores inclinaciones (Relieves mediana a fuertemente disectados) (**Figura 4.1b**). Se complementa con el Factor Topográfico o LS Factor, el cual refleja la influencia del porcentaje de inclinación del terreno y la longitud de esta sobre las pérdidas de suelo generadas principalmente por escorrentía laminar (**Figura 4.1c**). Los valores altos del Factor LS con mayor ocurrencia en las laderas suroestes indican preliminarmente zonas inestables en esta región de la colina.

Con los indicadores de curvatura en plano y perfil se puede observar que en las laderas con mayor inestabilidad (SW) predominan laderas cóncavas lateralmente, y una intercalación de laderas convexas y cóncavas hacia arriba (**Figura 4.1d y 4.1e**). Esto explica que los taludes construidos favorecen la aceleración del flujo por escorrentía y posterior deposición en partes bajas; además, influyen en su convergencia generando canales de escorrentía con dirección predominante hacia el suroeste. Las redes de drenaje de mayor densidad indican direcciones predominantes hacia el suroeste y oeste en el cerro (**Figura 4.1f**). La particularidad de la red de drenaje es que se alinean con formas del terreno características, como deposiciones y depresiones. Además, la influencia urbana asociada a senderos y vías genera que las corrientes tomen direcciones no convencionales a lo largo de estos caminos. Estas observaciones sirvieron para la fotointerpretación de movimientos en masa.

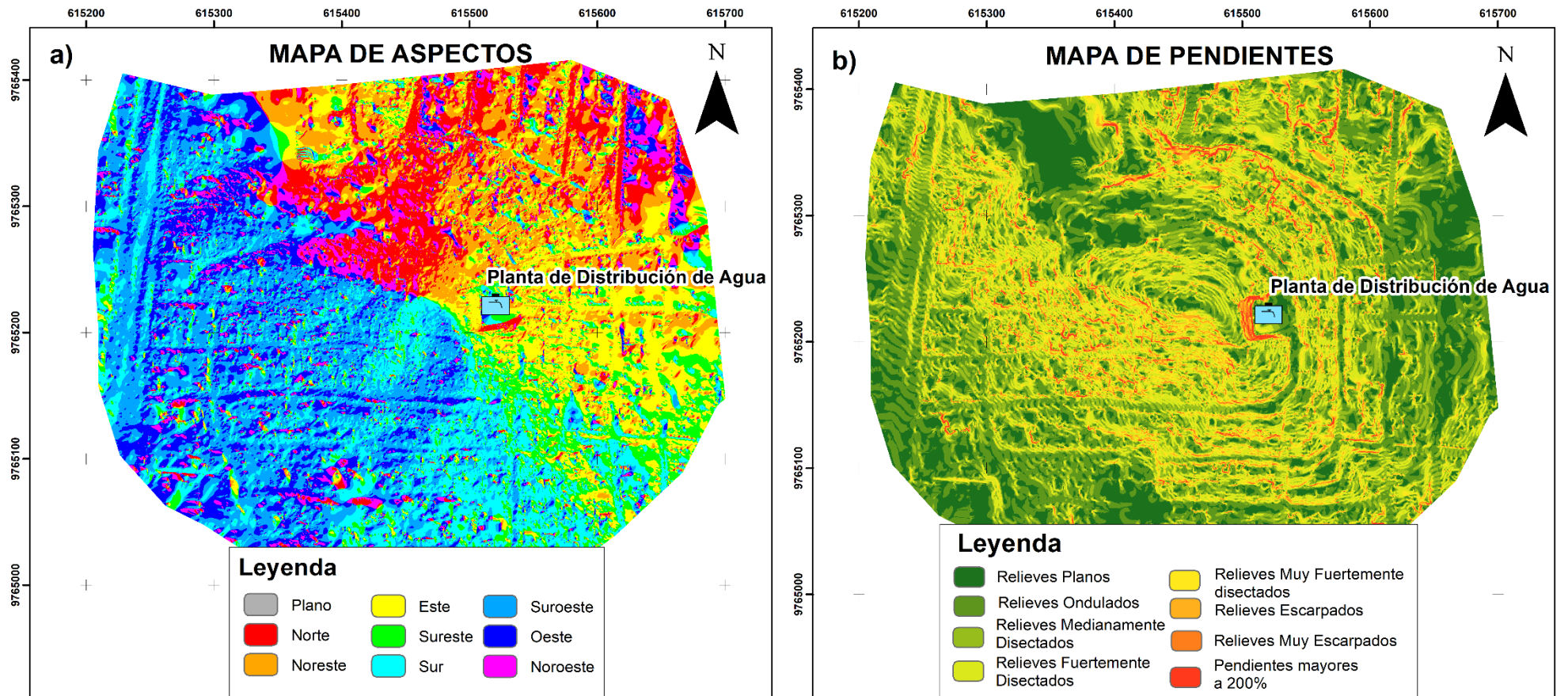


Figura 4.1 Indicadores Morfométricos.

a) Orientaciones de laderas, b) Pendientes

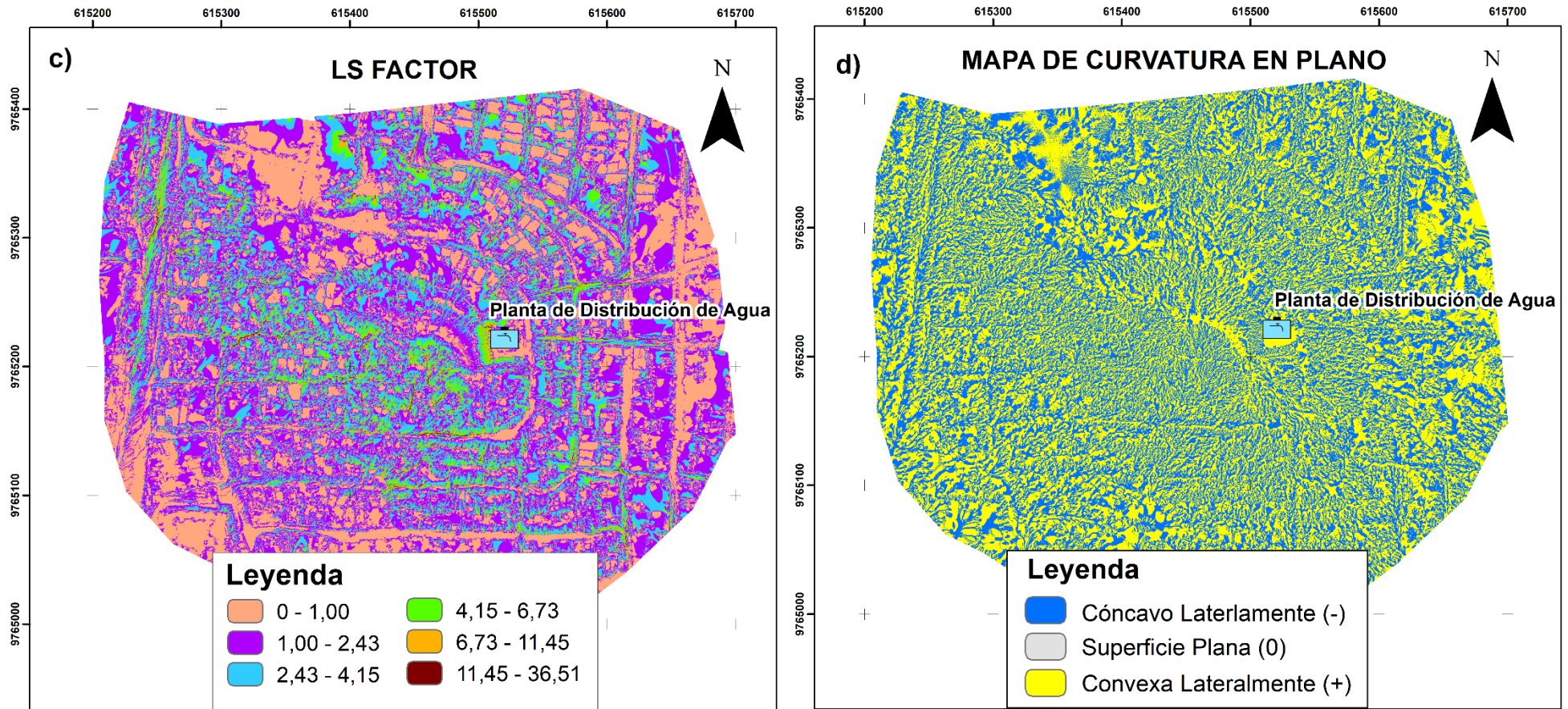


Figura 4.1 Indicadores Morfométricos (Continuación).

c) Factor Topográfico, d) Curvatura de Plano

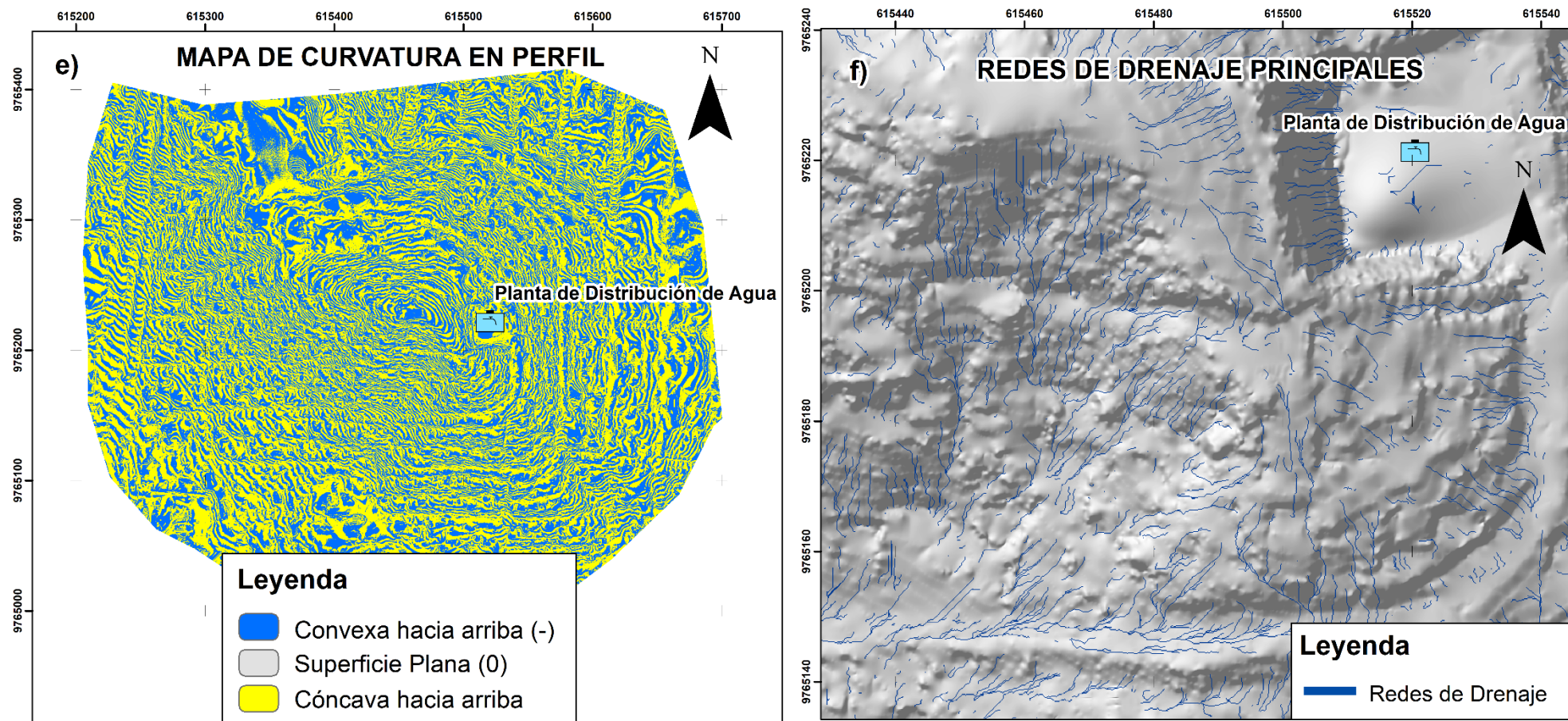


Figura 4.1 Indicadores Morfométricos (Continuación).

e) Curvatura en Perfil, f) Redes de Drenaje

4.1.2 Inventario de Movimientos en Masa

Sobre la base de los indicadores morfométricos analizados y tomando como referencia los estudios realizados por SUBSUELOS SERVICIOS S.A. en 2014 donde se determinaron zonas de alta susceptibilidad e inventariaron antiguos movimientos en masa, se ratifican como zonas inestables a las laderas suroestes de la colina Nueva Prosperina (**Figura 4.2**), con un área alrededor de 5.50 Ha. No obstante, en este trabajo se detalla la morfología de la zona inestable a una mayor escala con base en sus indicadores morfométricos y se consolida en un inventario de movimientos en masa.

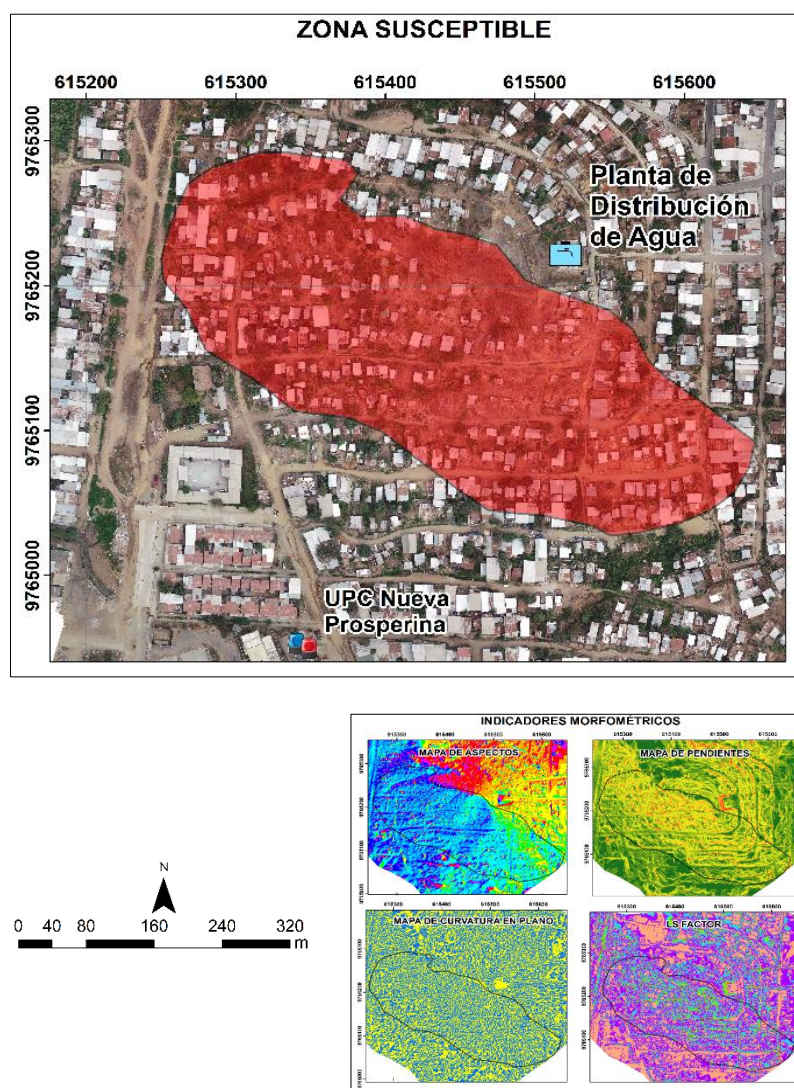


Figura 4.2 Delimitación de la zona inestable o susceptible
Ubicación relativa de la zona susceptible respecto a los indicadores morfométricos

El inventario consta de 7 MM (Movimientos en Masa), delimitados mediante fotointerpretación, que fueron luego inidentificados como de tipo complejos (mezcla de Flujos de tierra y Reptación) (**Figura 4.3**). Las características de estos movimientos, los cuales se desarrollan en suelo o material residual, se sintetizan en la **Tabla 4.1**.

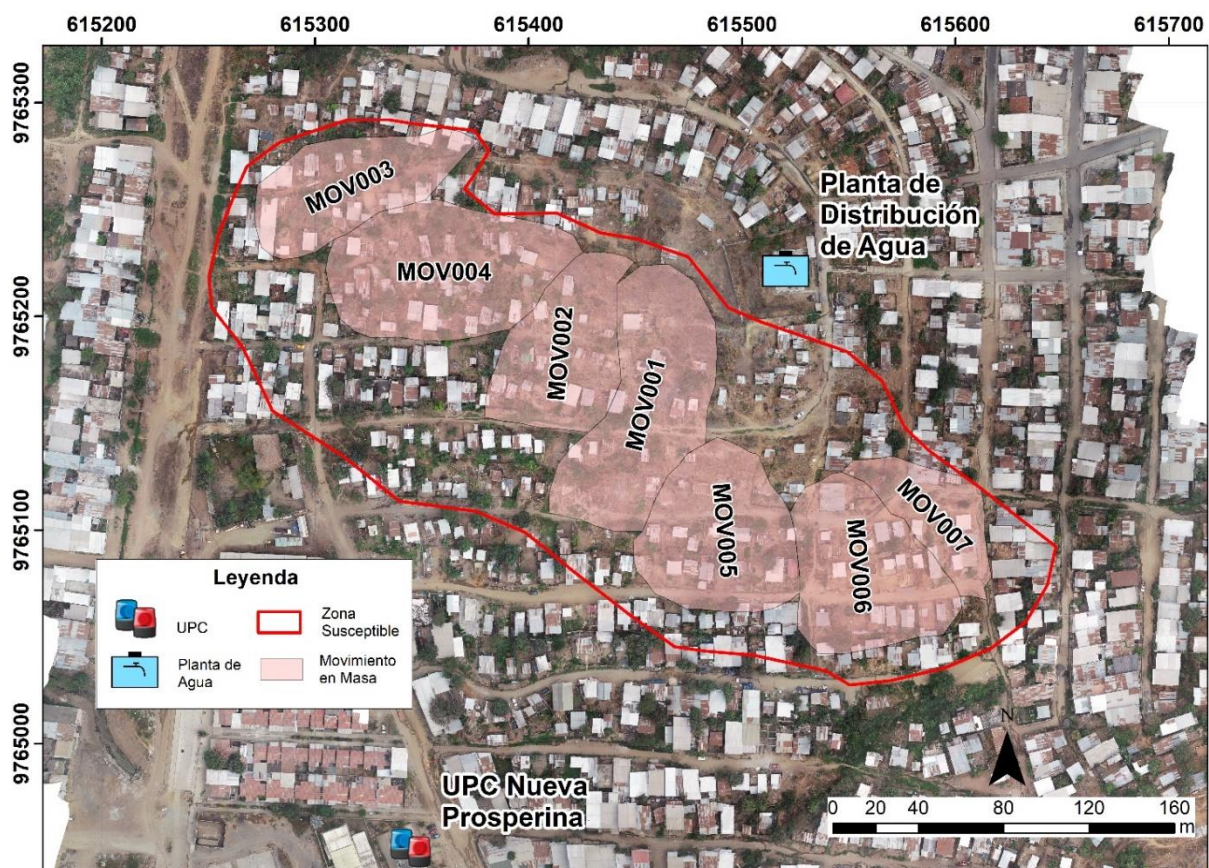


Figura 4.3 Delimitación de los 7 MM en la colina Nueva Prosperina

Durante las visitas de campo se constató que las zonas de los movimientos 006, 005 y 001 se presentan grietas de tracción desde centimétricas a métricas, reflejando el estado de actividad de estos fenómenos (**Figura 4.4**). Por tal razón, se decidió catalogar a estos como movimientos activos, mientras que a los restantes se les decidió categorizar como movimientos potencialmente activos. Los tres movimientos activos se encuentran entre los de mayor superficie, destacando el MOV001 con mayor área y longitud de entre los siete fenómenos identificados. Esto motivó la creación de dos perfiles sobre los movimientos activos y un perfil sobre un movimiento posiblemente activo, para su posterior análisis de estabilidad.

Tabla 4.1 Inventario de MM correlacionados con estudios previos y fotointerpretados mediante indicadores morfométricos.

Código	Área (m ²)	Ancho (m)	Largo (m)	Tipo de Movimiento	Orientación	Tipo Pendiente
MOV001	5669.64	49.13	127.64	Complejos; Flujos de Tierra y Reptación	Suroeste	Mediana a Fuertemente Disectados
MOV002	3958.06	57.32	88.14	Complejos; Flujos de Tierra y Reptación	Suroeste	Mediana a Fuertemente Disectados
MOV003	3662.04	46.15	108.77	Complejos; Flujos de Tierra y Reptación	Suroeste	Mediana a Fuertemente Disectados
MOV004	5513.13	68.43	120.42	Complejos; Flujos de Tierra y Reptación	Suroeste	Mediana a Fuertemente Disectados
MOV005	4705.09	79.20	79.79	Complejos; Flujos de Tierra y Reptación	Sur	Mediana a Fuertemente Disectados
MOV006	4701.06	77.75	84.61	Complejos; Flujos de Tierra y Reptación	Sureste	Medianamente Disectados
MOV007	2189.79	38.47	58.30	Complejos; Flujos de Tierra y Reptación	Sureste	Medianamente Disectados



Figura 4.4 Grietas de tracción en los movimientos en masa activos.

a) Grietas de tracción centimétricas, b) Grietas de tracción métricas de gran extensión, rellenas por maleza y basura.

4.1.3 Segmentación de viviendas en zonas inestables

Para el área delimitada en el cerro de Nueva Prosperina se identificaron aproximadamente 488 viviendas, de las cuales 222 se encuentran en la zona inestable y 142 en las áreas delimitadas para los MM (Figura 4.5). Cerca del 50% de las viviendas en el sitio se encuentran en una zona de peligro por movimientos en masa. Además, estas estructuras influyen en la estabilidad de la colina ya que aplican esfuerzos distribuidos al material que conforma los taludes.

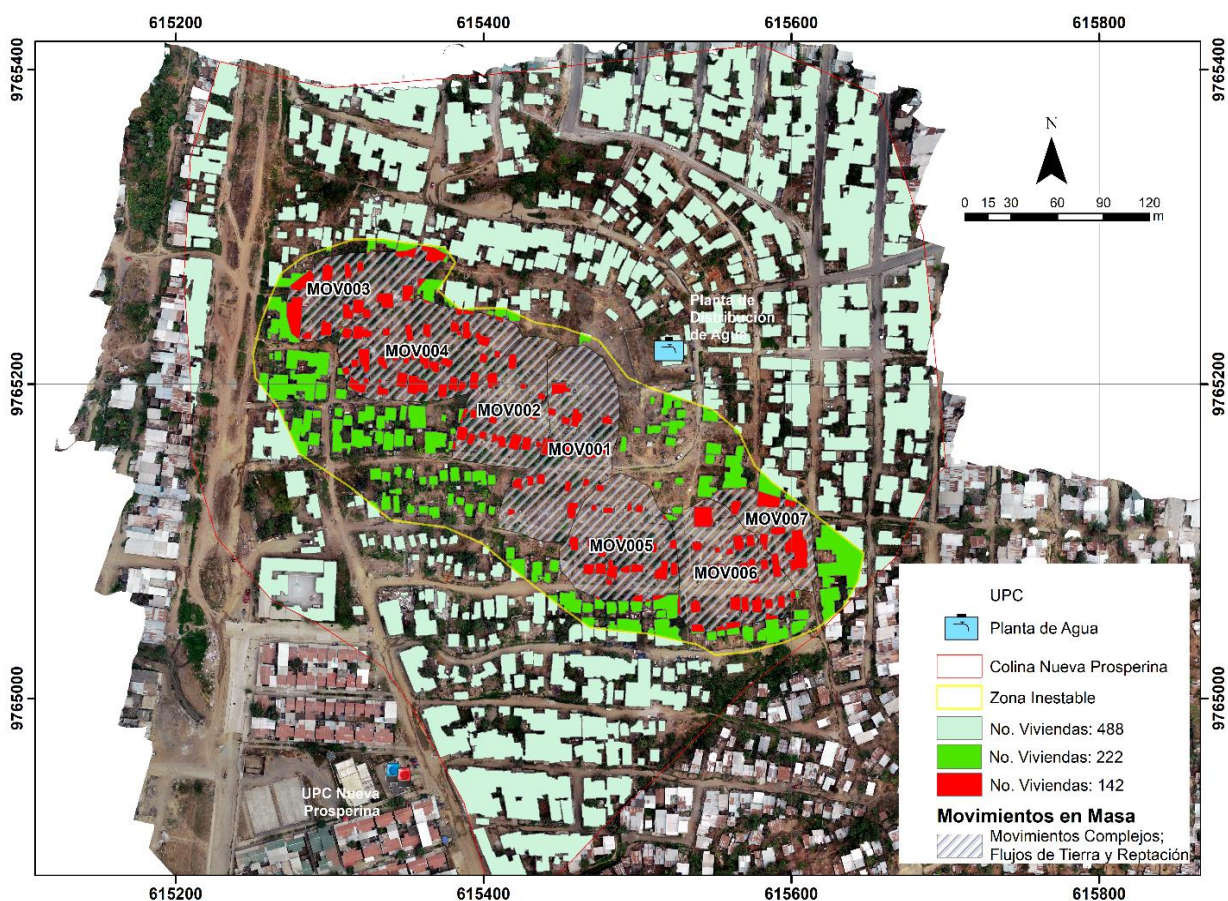


Figura 4.5 Segmentación de viviendas para las diferentes zonificaciones en la colina Nueva Prosperina.

4.2 Caracterización Geológica de la Colina Nueva Prosperina

4.2.1 Descripción y Análisis de Muestras de Afloramientos

4.2.1.1 Muestra NP_01

La descripción mesoscópica de la muestra NP_01 (**Figura 4.6**) recolectada en la colina Nueva Prosperina, en el talud de la Planta de Distribución de Agua INTERAGUA, presenta las siguientes características:

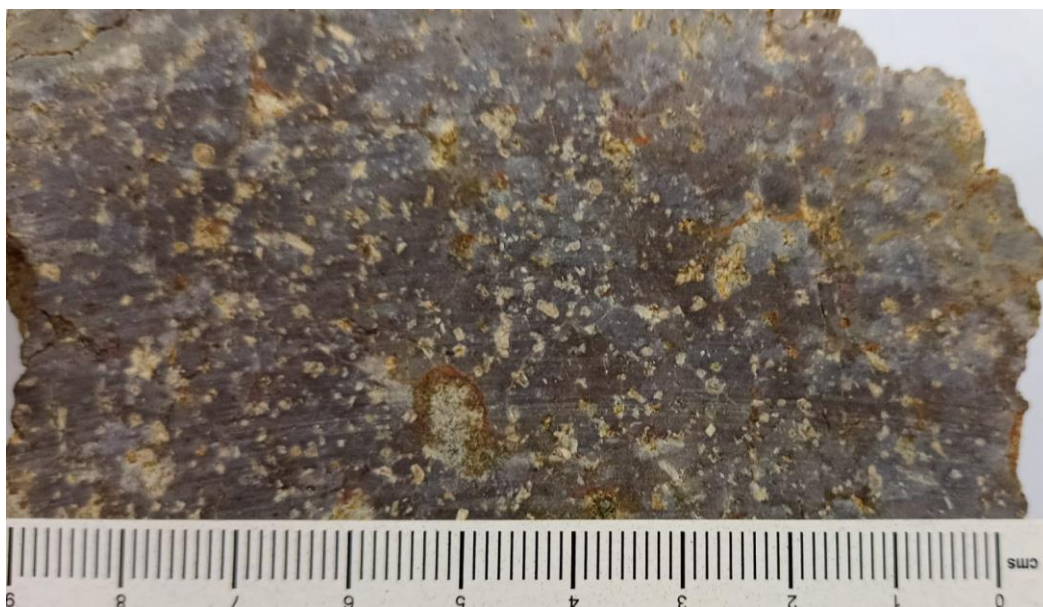


Figura 4.6 Muestra de mano NP_01

Textura: Roca con tamaño relativo de los cristales inequigranular, de textura porfírica, con una matriz microcristalina. Se considera una roca holocristalina, con tamaño de fenocristales entre 1 a 2 mm (grano fino), con formas entre subhedrales y euhedrales. Muy meteorizada.

Estructura: Presenta una estructura homogénea masiva y fábrica isótropa ya que no existe una orientación espacial de los componentes.

Índice de color: Entre leucocrática y mesocrática.

Composición: Entre los minerales principales se encuentran feldespatos, cristales blancos subhedrales a euhedrales tabulares. La matriz presenta una tonalidad violeta. Entre los minerales accesorios destacan las cloritas con tamaños menores a 1 mm, por lo que se analizan directamente con la lupa. Los colores marrones rojizos son parte de

la media a fuerte alteración que presenta el material en el sector de estudio. Al ser rayados los feldespatos desprenden un polvo blanco, asociado a una transformación hacia arcillas. Presenta un magnetismo moderado.

4.2.1.2 Muestra NP_02

La descripción mesoscópica de la muestra NP_02 (**Figura 4.7**) recolectada en un talud de vía en el sector de mayores cotas del cerro Nueva Prosperina, presenta las siguientes características:

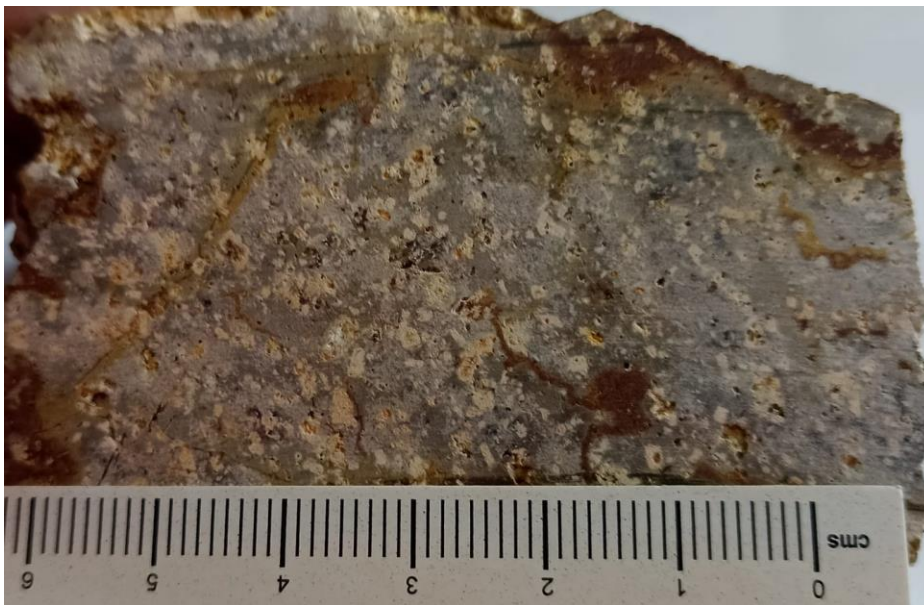


Figura 4.7 Muestra de mano NP_02

Textura: Tamaño relativo de los cristales inequigranular, textura porfírica, con matriz microcristalina. Holocristalina, tamaño de fenocristales entre 1 a 2 mm (grano fino), con formas entre subhedrales y euhedrales. Muy Meteorizada

Estructura: Homogénea masiva y fábrica isótropa.

Índice de color: Entre leucocrática y mesocrática.

Composición: Similar a la muestra NP_01, solo diferenciándose por el color rosáceo de la matriz. Entre los minerales principales se encuentran feldespatos, cristales blancos subhedrales a euhedrales tabulares. Minerales accesorios como las cloritas, con tamaños menores a 1 mm. Los colores marrones rojizos reflejan la alteración de algunos cristales de feldespatos, que se están transformando a arcillas. Magnetismo moderado.

4.2.2 Descripción y Análisis de Láminas Delgadas

El análisis microscópico se llevó a cabo con la muestra NP_02 ya que la muestra NP_01 no presentaba condiciones adecuadas para su visualización debido a al grado elevado de meteorización (**Figura 4.8**).



Figura 4.8 Láminas delgadas elaboradas.

La **Tabla 4.2** resume las características principales petrográficas de la muestra NP_02 (**Figura 4.9**).

Tabla 4.2 Características petrográficas de la muestra NP_02

Textura	Grado de Cristalinidad	Holocristalina, más del 90% en volumen de cristales
	Tamaño relativo cristales	Inequigranular
	Tamaño absoluto cristales	Porfírica, fenocristales finos y matriz microcristalina
	Tamaño de grano	Tamaños entre 0,5 y 1 mm para los fenocristales
	Forma de cristales	Cara de los cristales entre euhedrales y subhedrales
Estructura y Fábrica	Estructura	Distribución homogénea - masiva
	Fábrica	Isótropa, sin orientación espacial de cristales
Color	Índice de Color	Leucocrático, escasez de minerales máficos
Composición	Cuarzo (Qz)	Cuarzo con extinción ondulante
	Plagioclasas (Plg)	Matriz microcristalina compuesta de plagioclasas.
	Feldespatos (A)	Al igual que plagioclasas, con alteraciones sericiticas
	Máficos (M)	Probablemente "destruidos".

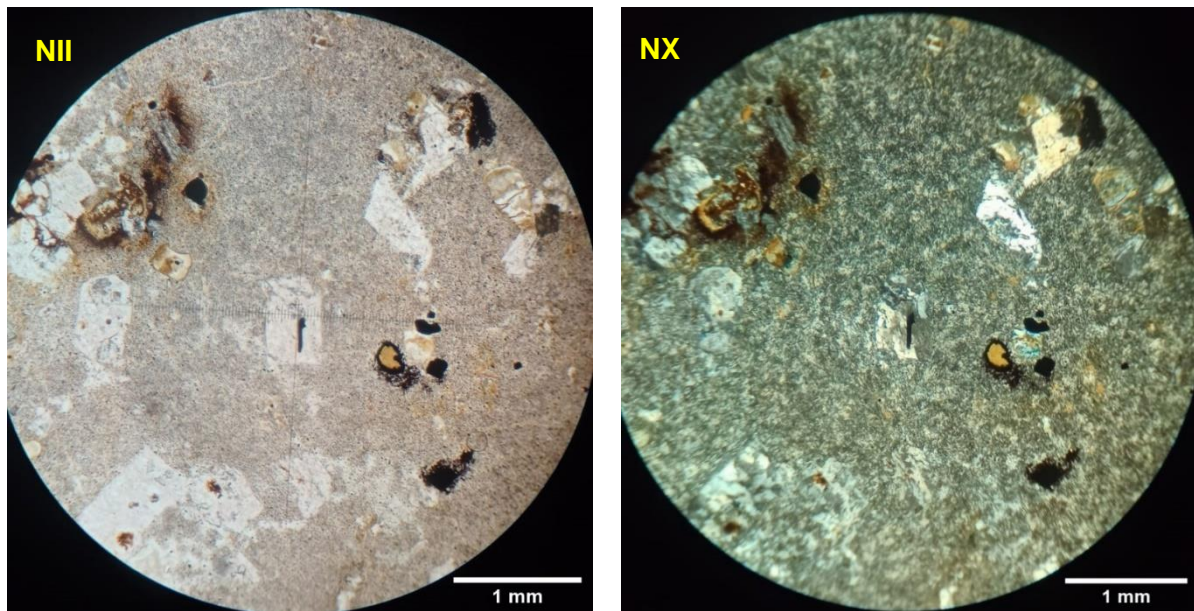


Figura 4.9 Vista microscópica de la lámina NP_02 a 4X.

Mediante el Método Michel-Lévy para la identificación de plagioclasas observables (no de la matriz) (Rengel, 2007) se determinó con promedios de los ángulos de extinción que estas pertenecen al tipo Andesina. La **Tabla 4.3** resume los resultados de este ensayo.

Tabla 4.3 Plagioclasas identificadas mediante Michel-Lévy

# Plg	Medidas			Φ_{mean}
	Φ_{iz}	Φ_c	Φ_{der}	
1	285	305	340	27.5
2	292	315	350	29
3	283	303	337	27
4	55	85	101	23
5	54	85	117	31.5
6	162	197	221	29.5

ÁNGULOS DE EXTINCIÓN DE LAS PLAGIOCLASAS
Para la aplicación del método de Michel Lévi

El examen petrográfico en la muestra NP_02 a 10X indica la presencia de plagioclasas conformando la matriz microcristalina, y algunos fenocristales de feldespato potásico (Figura 4.10).

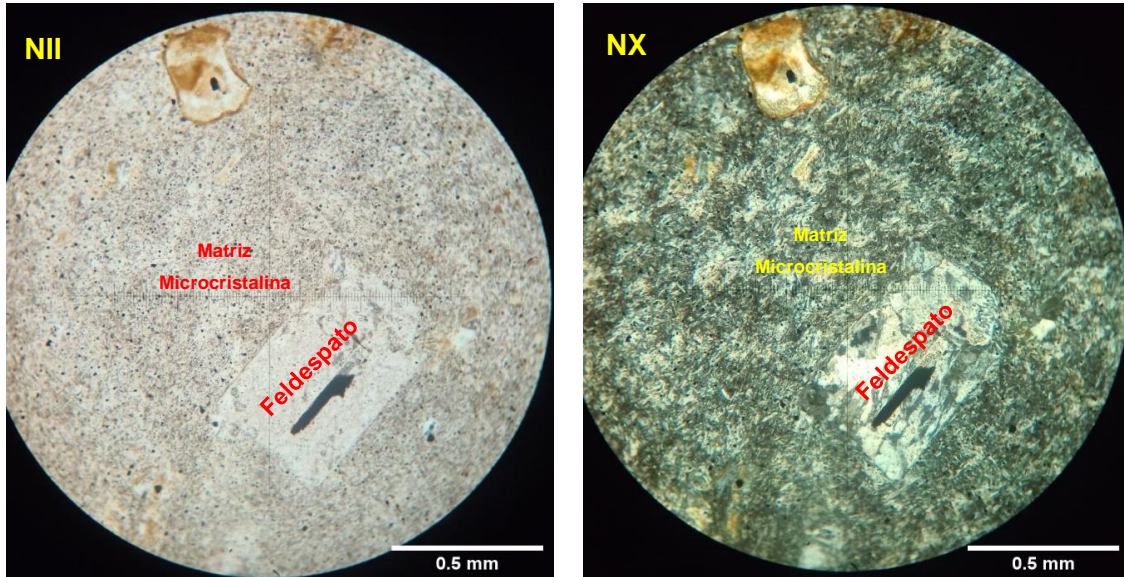


Figura 4.10 Matriz microcristalina de plagioclasas y fenocristales de feldespato

La muestra presenta una alteración sericítica, transformadas a partir de las plagioclasas y feldespatos potásicos. La presencia del cuarzo con extinción ondulante reemplazando las plagioclasas y feldespatos indica que la roca presenta o está ingresando a un estadio de Alteración Fílica (Sericítica o Cuarzo – Sericítica) (Figura 4.11).

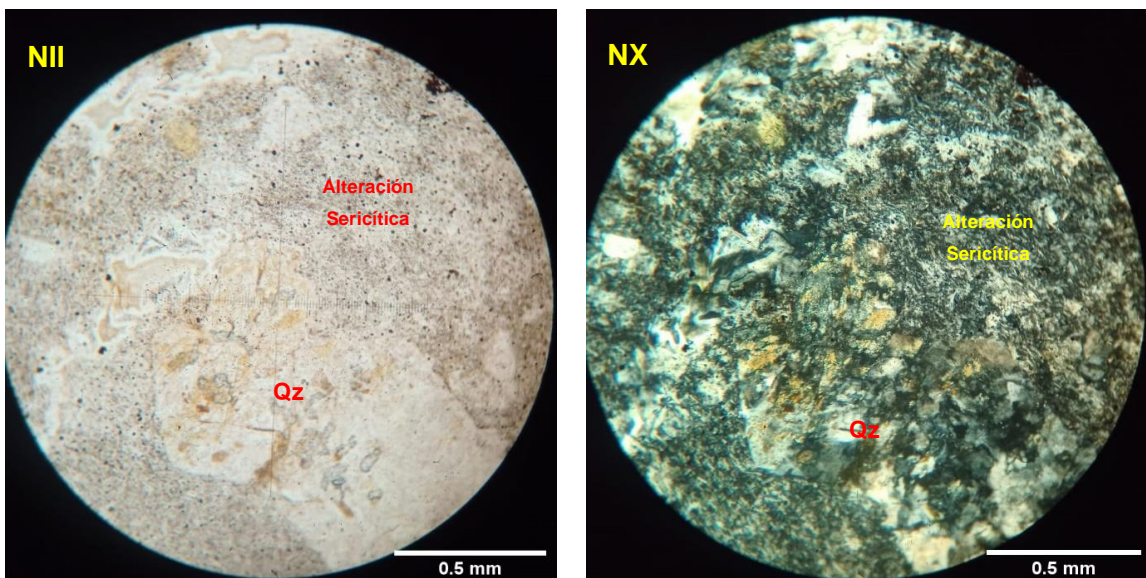


Figura 4.11 Presencia de alteración sericítica y cuarzoes con extinción ondulante

En la **Figura 4.12** se observa nuevamente el cuarzo con extinción ondulante, además de la presencia de cloritas. Los puntos negros y diminutos que se visualizan con más detalle en NII son minerales opacos, probablemente ferromagnéticos ya que la muestra tiene un magnetismo moderado.

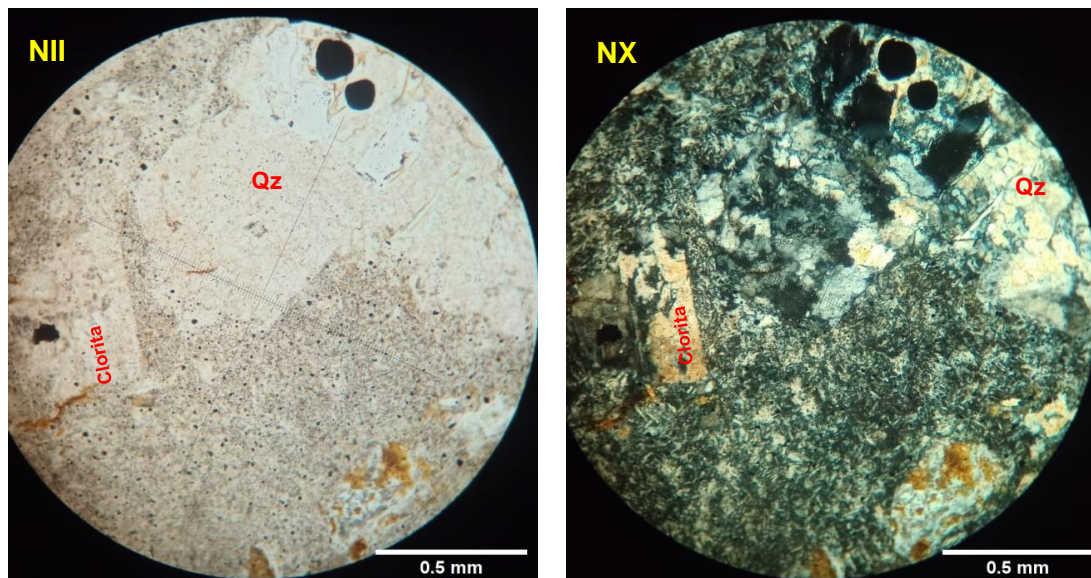
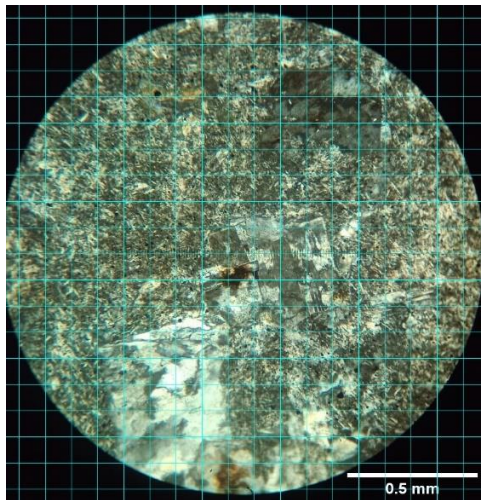
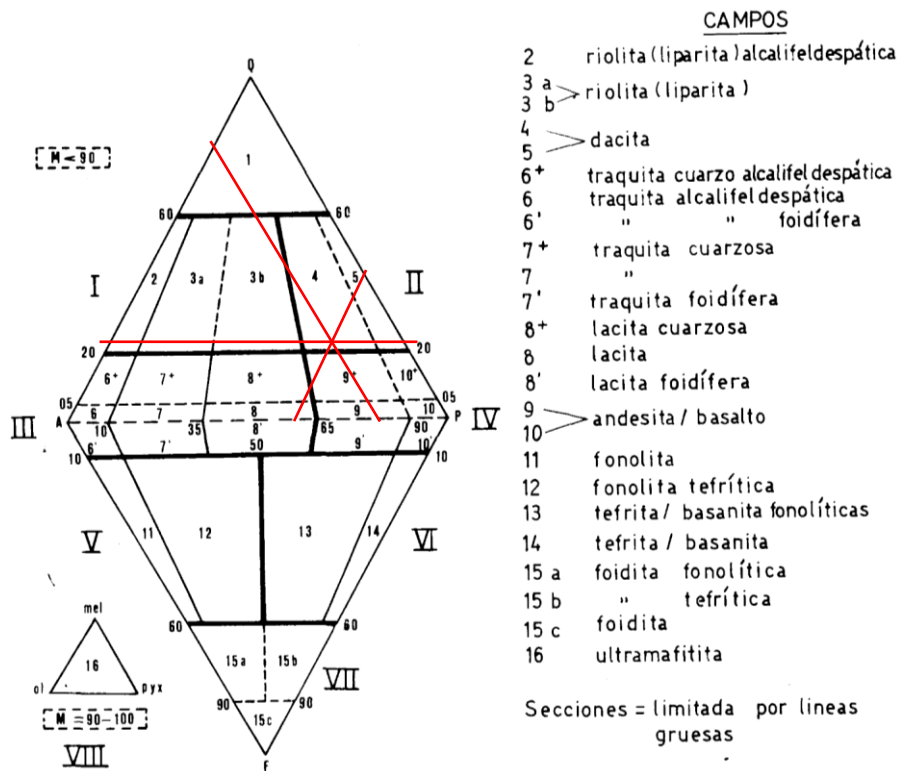


Figura 4.12 Presencia de Clorita y minerales opacos (puntos negros pequeños en NII)

Con el conteo de puntos aplicado para la valoración de ponderaciones de Qz, Plg y A se llevó a cabo la clasificación de la roca mediante el diagrama ternario de Streckeisen (1976) para rocas ígneas volcánicas (**Figura 4.13**).

La roca se clasifica como Dacita, subvolcánica de composición félsica, con textura porfídica característica, tal como las muestras NP_01 y NP_02. Las dacitas contienen máficos como biotita, hornblenda y piroxenos como la augita y la enstatita (Philpotts & Ague, 2022). Sin embargo, estos minerales no se encuentran en abundancia para las rocas de la zona de estudio. Esto se debe por el alto grado de meteorización en el sector asociado a un estadio temprano de alteración fílica (sericítica o cuarzo – sericítica), donde las plagioclasas y feldespatos se transforman a sericita y cuarzo secundario. Además, en esta alteración los minerales máficos se “destruyen” (Meyer & Hemley, 1967; Sillitoe, 2010).



Ponderaciones Normalizadas

Qz = 23.73
 A = 21.19
 Plg = 55.08

Figura 4.13 Clasificación de la roca mediante el diagrama ternario de Streckeisen.

Las celdas de la grilla de conteo son de 100x100 micras.

Las dacitas usualmente se forman como intrusivos tales como un dique o sill, sin embargo, debido a la cantidad moderada – alta de sílice el magma dacítico es viscoso y, por lo tanto, asociado a erupciones explosivas. Sin ahondar en la paragénesis geológica del sitio de estudio, la colina Nueva Prosperina se asociaría a un intrusivo subvolcánico, el cual se encontraría en un estadio temprano de alteración fílica (sericítica), que a la vez influye en la inestabilidad del material que conforma el cerro.

4.3 Caracterización Geotécnica de la Colina Nueva Prosperina

La caracterización geotécnica se centró en los suelos ya que los movimientos en masa inventariados se desarrollan a través de este material residual. Los ensayos realizados para el estudio se presentan en la sección de Apéndices. A continuación, se muestran las ubicaciones y características de las muestras recolectadas en el área de estudio (**Figura 4.14 – Tabla 4.4**). Las primeras muestras ensayadas a corte directo fueron las del Perfil 3 en condiciones estimadas de humedad (20%), mientras que las del Perfil 1 y 2 se ensayaron a condiciones reales de humedad.



Figura 4.14 Ubicación de las muestras recolectadas para el estudio

Tabla 4.4 Coordenadas de las muestras recolectadas para el estudio

Ensayo	No. de muestras	Código	Coord. X	Coord. Y	% Humedad
SUCS / Corte Directo	2	Perfil3_T01	615517	9765153	20%
		Perfil3_T02	615517	9765123	20%
Corte Directo	3	Perfil1_T01	615413	9765174	7%
		Perfil2_T01	615462	9765153	9%
		Perfil2_T02	615412	9765133	11%
Muestra de Roca	2	NP_01	615521	9765139	-
		NP_02	615510	9765231	-

Sistema de Coordenadas: WGS UTM 17S

4.3.1 Clasificación Geomecánica de Suelos en la zona inestable

4.3.1.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

De un total de 5 muestras recolectadas, 2 se seleccionaron para los ensayos de clasificación SUCS (**Apéndice B**). La muestra que se encontraba a mayor altura (Perfil3_T01) registró más del 50% retenido por encima del tamiz # 200, es decir, un suelo de grano grueso. La muestra recolectada a una cota inferior que la anterior (Perfil3_T02) registró que más del 50% de material pasa el tamiz # 200, esto es un suelo de grano fino. La determinación de los Límites de Atterberg para las dos muestras reflejó una clasificación detallada del tipo de suelo (**Tabla 4.5**).

Tabla 4.5 Resultados del ensayo de Clasificación SUCS

Nombre	Material	Gruesos (%)	Finos (%)	LL	LP	IP	SUCS	
Perfil3_T01	Arenas	72	28	38	20	18	SC	Arena Arcillosa
Perfil3_T02	Arcillas	39	61	42	22	20	CL	Arcilla mal gradada arenosa con grava

Esta zonificación permitió establecer que en las partes bajas de la ladera el suelo se considera arcilloso mal gradado con grava y arena, mientras que en las cotas superiores el suelo es una arena arcillosa. Además, el valor de IP (promedio 19%) indica que el suelo requiere de una cantidad significativa de agua para pasar de un estado semisólido a un estado líquido.

4.3.1.2 Peso Unitario, Cohesión y Ángulos de Fricción (ϕ)

En la **Tabla 4.6** se presentan las cohesiones y ángulos de fricción interna resultantes de los 5 ensayos de corte directo (**Apéndice C**), efectuados a los suelos que conforman las laderas del cerro Nueva Prosperina. Las muestras se tomaron en zonas de grietas de tracción ya que son indicio de inestabilidad y fallamiento. Se realizó una correlación de ángulos de fricción y cohesión para las muestras del Perfil 1 y 2 respecto a las muestras del Perfil 3 con la finalidad de asociarlas a uno de los dos tipos de suelo previamente determinados, esto mediante rangos de valores para los suelos SC y CL (Dysli, 2000; MNDOT, 2007) (**Tabla 4.7**).

Tabla 4.6 Parámetros resultantes del ensayo de Corte Directo

Código	Peso Unitario (KN/m ³)	Cohesión (KN/m ²)	Ángulo de Fricción (°)
Perfil1_T01	15.39	6.62	25.97
Perfil2_T01	15.79	5.88	27.19
Perfil2_T02	15.71	7.38	21.58
Perfil3_T01	19.17	13.99	39.43
Perfil3_T02	19.46	10.77	35.68

Tabla 4.7 Correlación de tipos de suelo según valores de ángulo de fricción estándar.

Ángulos de fricción mínimos y máximos según Dysli (2000) y MNDOT (2007)

SUCS	Descripción en bibliografía	Ángulo de Fricción (°)			Muestra
		Φ min	Φ máx.	Φ calculado	
SC	Arenas Arcillosas (Dysli, 2000)	30	40	39	Perfil3_T01
CL	Arcillas inorgánicas, arcillas arenosas (Dysli, 2000)	27	35	35	Perfil3_T02
				27	Perfil2_T01
	Arcilla limosa, arcilla arenosa, franco arcilloso, franco arcilloso limoso (MNDOT, 2007)	18	32	26	Perfil1_T01
				21	Perfil2_T02

Existe una variación importante respecto a la cohesión y ángulos de fricción de las muestras del Perfil 1 respecto a las muestras del Perfil 3 que fueron ensayadas en condiciones de humedad estimadas (20%). En todo caso, los rangos de valores de ángulo de fricción son consistentes respecto a los rangos estándar. La arena arcillosa (SC) puede tener valores entre 30° y 40°, mientras que para el grupo CL donde existen variedades de tipo de suelo hay un amplio rango entre 18° y 35°.

En el caso de que las muestras del Perfil 3 hubieran sido ensayadas con un valor de humedad real se esperaría que los valores sean consistentes con las otras muestras. No obstante, otra interpretación que se le puede dar a esta variación se puede basar en los valores de cohesión. Las muestras de los perfiles 1 y 2 se tomaron a cotas inferiores del Perfil 3, todas presentando cohesiones menores que las tomadas a mayores cotas, las cuales se encuentran por arriba de los 10 KN/m². Esto indicaría que a menores niveles topográficos los materiales son más sueltos o más granulares, incluso pudiéndose encontrar material rocoso suelto, situación que se pudo constatar en campo.

Los ángulos de fricción son altos, exceptuando el caso de la muestra Perfil2_T02. No obstante se pueden acoplar con los valores de IP calculados, es decir, requieren de una cantidad de agua importante para que pasen a estado líquido.

Los datos e interpretaciones permiten realizar una zonificación geomecánica del suelo en dos unidades geotécnicas: SC y CL (**Figura 4.15**). Todas las muestras que se clasificaron como CL se encontraban por debajo de la cota 100, por lo que se tomó este criterio para zonificar las unidades geotécnicas. En base a esta zonificación se ajustaron los perfiles planteados preliminarmente para analizar la estabilidad de las laderas y el tendido sísmico (**Figura 4.16**).

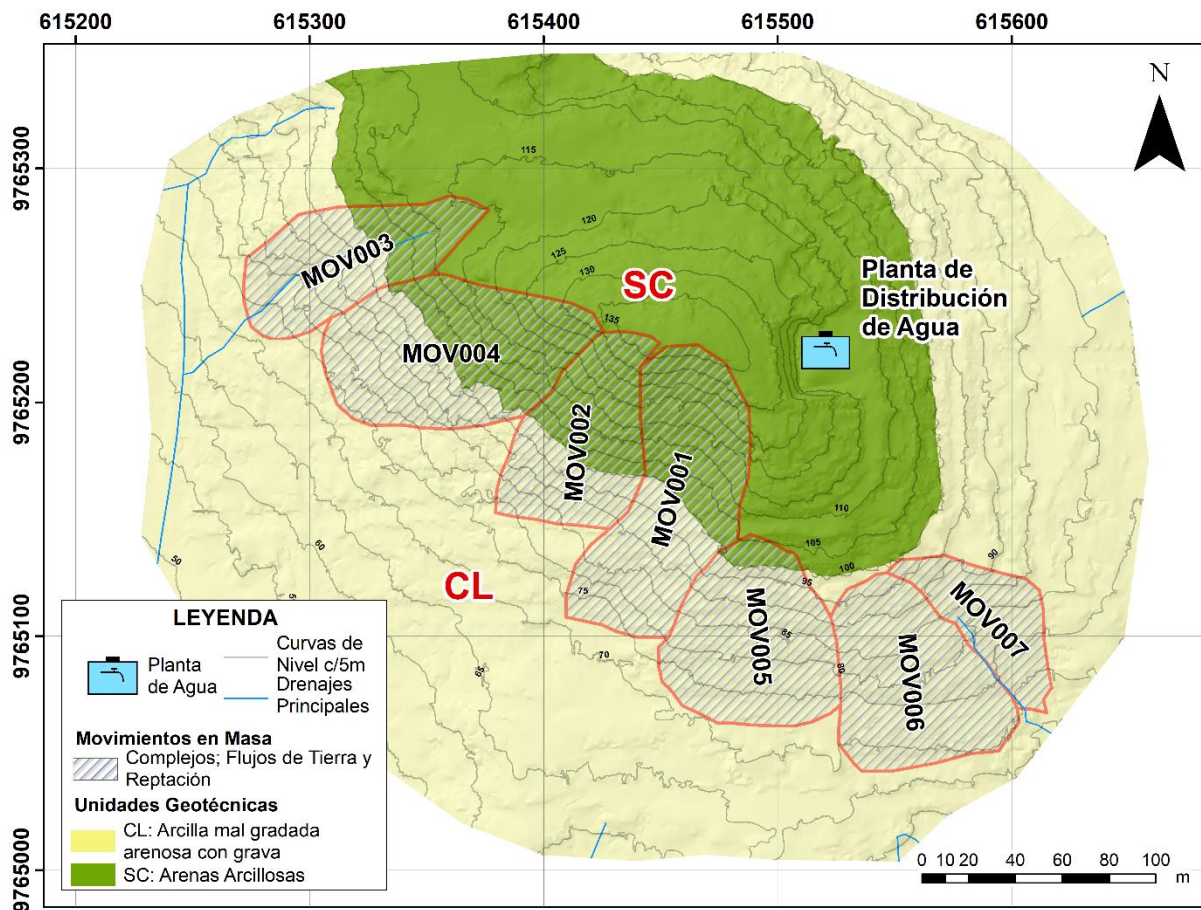


Figura 4.15 Unidades Geotécnicas de Suelo

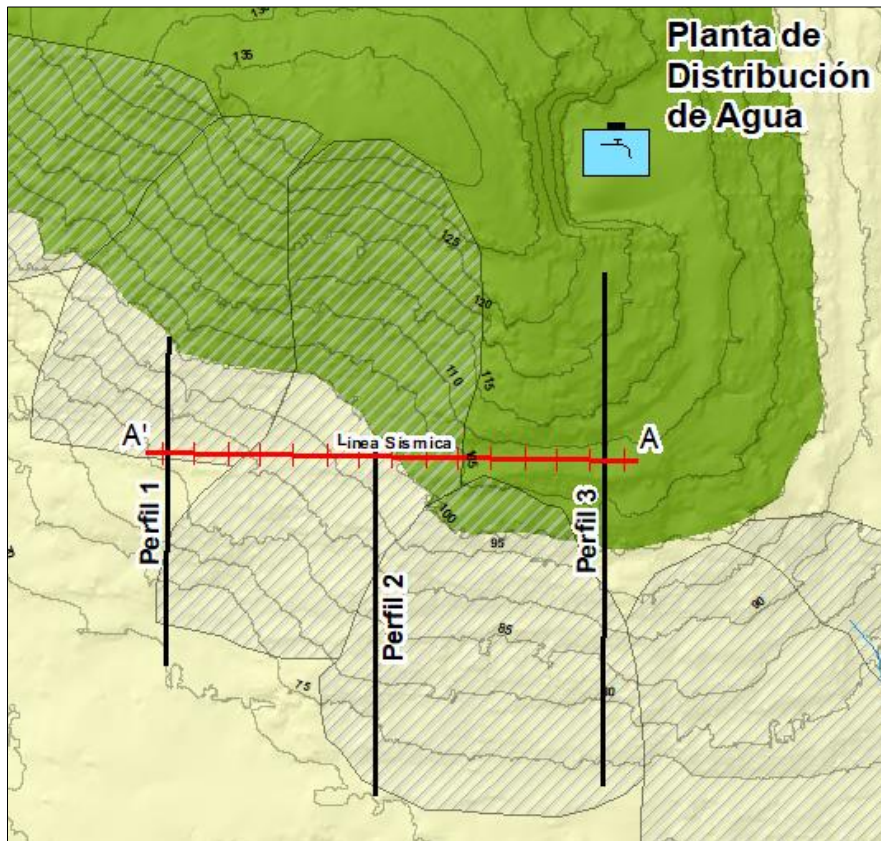


Figura 4.16 Perfiles ajustados para análisis de estabilidad de taludes

4.3.2 Modelamiento del Subsuelo mediante Prospección Geofísica

En base a la normativa ASTM (D5777) y CNA (1993) citada en Bernal & Tavera (2020) para la clasificación de perfiles sísmicos según velocidades de ondas P (Tabla 4.8), se presenta la interpretación del perfil A-A' en la Figura 4.17.

Tabla 4.8 Clasificación según CNA – 1993 y ASTM – D5777

CNA - 1993		ASTM – D5777	
Vp (m/s)	Descripción	Vp (m/s)	Descripción
170 - 450	Suelos arenosos	240 – 610	Suelo intemperizado
300 - 650	Suelos con finos	460- 915	Grava o arena seca
500 - 900	Suelos gruesos	1220 – 1830	Arena saturada
800 - 1400	Depósitos de Talud	910 – 2750	Arcilla saturada
1450 - 1550	Materiales saturados	1430 – 1665	Agua
1400 - 2000	Rocas blandas	1460 – 1525	Agua de mar
1800 - 2500	Roca muy fracturada	1830 – 3960	Arenisca
2000 - 3000	Roca fracturada	2750 – 4270	Esquisto
3000 - 5000	Roca intacta	4575 - 5800	Granito

A lo largo del perfil A-A' se pueden diferenciar adecuadamente 10 capas con espesores casi regulares a lo largo de la línea sísmica. Los primeros 4 a 5 metros representan el material residual o inestable del sector, el cual se correlaciona con el resultado que proporcionó el informe solicitado por el Municipio de Guayaquil a la consultora SUBSUELOS SERVICIOS S.A. Los siguientes 10 a 12 metros se interpretan como roca blanda o meteorizada, además del material de depósitos de los movimientos en masa inventariados en las secciones anteriores. Los siguientes 7 y 8 metros presentan roca muy fracturada y medianamente fracturada, respectivamente. Este material se asocia al intrusivo subvolcánico conformado por Dacita tal como se caracterizó en apartados anteriores. Luego de unos 30 metros de material desde superficie se encontraría la roca sana de este intrusivo.

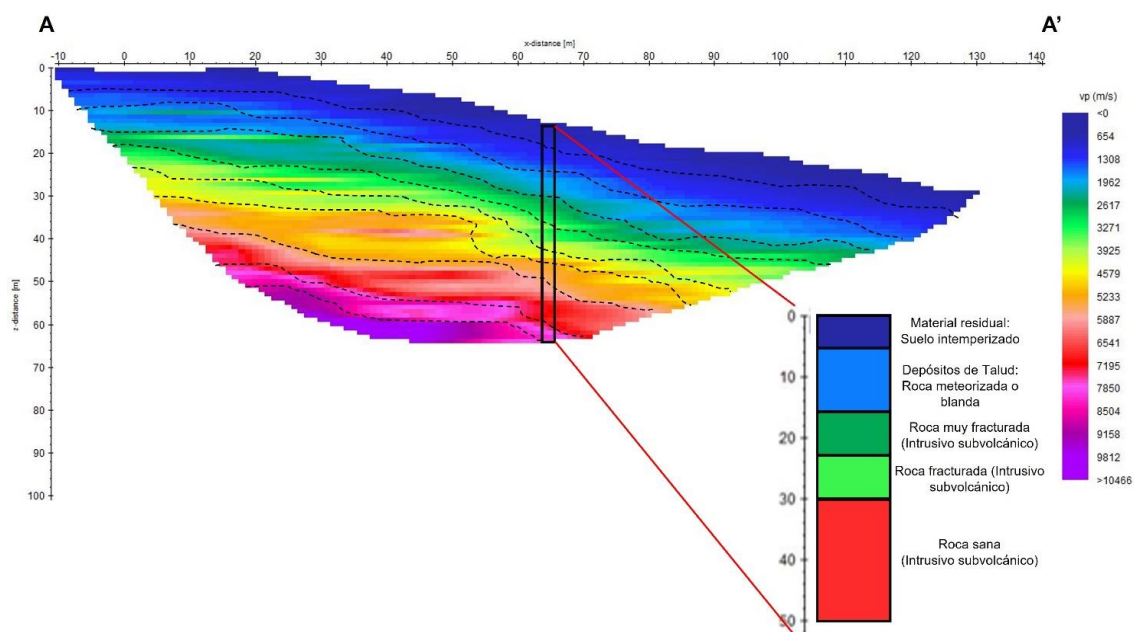


Figura 4.17 Interpretación del Perfil A-A' de velocidades de Ondas P

Con un área de 54 946.84 m² calculada para la zona inestable de la **Figura 4.2** y un espesor de material residual casi constante de 4 metros se obtuvo un volumen de masa inestable de 219 787.38 m³ para el cerro Nueva Prosperina. Los 4 metros de material residual corroboran que los movimientos en que se desarrollan en el sitio son de tipo Flujo de Tierra con una componente de reptación, con un volumen inestable y considerable que puede causar una gran afectación a la comunidad de Nueva Prosperina.

4.3.2.1 Clasificación Geomecánica de Rocas en la zona inestable

Mediante las relaciones de la **Tabla 3.3** se calcularon los RQD y UCS de las capas de roca interpretadas en el Perfil A-A'. Se seleccionaron velocidades promedio de Ondas P para cada una de las secciones del perfil en la **Figura 4.18**. El material del talud en la Planta de Agua se puede asociar a la segunda capa del perfil, con roca meteorizada o blanda, por lo que se complementan los resultados de RQD y UCS con las medidas de discontinuidades levantadas en el talud: espaciado, continuidad, separación, rugosidad y relleno. Estas medidas permiten realizar una ponderación para clasificar la calidad de la roca meteorizada en base el RMR. Los resultados sintetizados se encuentran en la **Tabla 4.9**; las fichas de ponderación se encuentran en la sección **Apéndices E**.

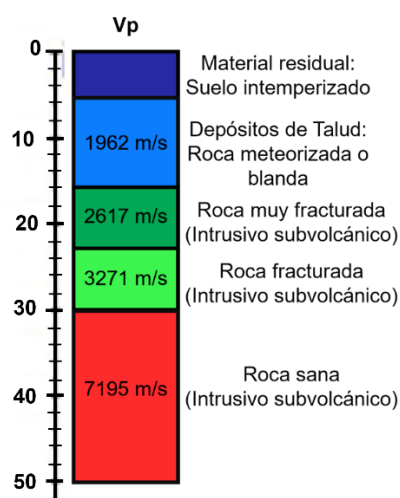


Figura 4.18 Perfil de velocidades P generalizado

Tabla 4.9 Clasificación geomecánica del material rocoso en el cerro Nueva Prosperina

Material	RQD (%)	UCS (MPa)	RMR	Calidad RQD	Calidad RMR
Roca Meteorizada	44	12	53	Pobre	Media (Clase III)
Roca muy fracturada	59	24	-	Media	-
Roca fracturada	74	41	-	Buena	-
Roca sana	100	279	-	Muy Buena	-

Respecto a la calidad del RQD, la calidad de la roca mejora según aumenta la profundidad. Respecto al RMR de clase III (calidad Media) solo se puede calcular para la primera capa ya que se asocian las condiciones de esta roca meteorizada con el macizo rocoso en la Planta de Agua, lugar donde se tomaron datos de discontinuidades como espaciados y aperturas. El valor de RMR permite la obtención de parámetros resistentes del criterio Mohr – Coulomb (Bieniawski, 1976):

$$c = 5RMR \text{ (KPa)}$$

$$c = 5(53) \text{ (KPa)}$$

$$c = 265 \text{ KN/m}^2$$

$$\phi = 5 + \frac{RMR}{2} \text{ (}^\circ\text{)}$$

$$\phi = 5 + \frac{53}{2} \text{ (}^\circ\text{)}$$

$$\phi = 31.5^\circ$$

Las cohesiones y ángulos de fricción interna para este material rocoso son definidos para mejorar el detalle del modelo de análisis de estabilidad de las laderas.

4.4 Análisis de Estabilidad de las laderas: Escenarios Pseudoestáticos y Dinámicos

El análisis de estabilidad de las laderas se realizó mediante simulaciones automatizadas en el software Slide 9.026. Se modelaron dos grupos de escenarios, las condiciones pseudosestáticas y dinámicas, cada una con tres tipos diferentes de modelados: Sin presencia de nivel freático, nivel freático superficial y nivel freático a 1 metro de profundidad. A partir de las características geomecánicas y ajuste de subsuelo por prospección geofísica se modelaron adecuadamente los espesores de suelo residual y sustrato rocoso para cada uno de los perfiles analizados, y así obtener los FS para cada escenario.

Para complementar los parámetros del sustrato rocoso en cada uno de los perfiles se utilizaron valores referenciales establecidos por Hoek y Bray (1981). Los pesos unitarios (KN/m^3) varían entre los rangos de 25 – 30, del cual se tomó el valor promedio (27.5 KN/m^3). Para los escenarios dinámicos se agregó una carga sísmica asociada al valor de aceleración sísmica del terreno, el cual es de 0.34 según el estudio de (GEOESTUDIOS S.A, 2011).

En común, generalmente si una ladera es estable presentará $FS > 1$, y en caso de tener $FS < 1$ se considera inestable (González de Vallejo et al., 2002; Suarez, 2003). Se presentan cada uno de los perfiles modelados en base a la información integrada del presente proyecto (**Figura 4.19**).

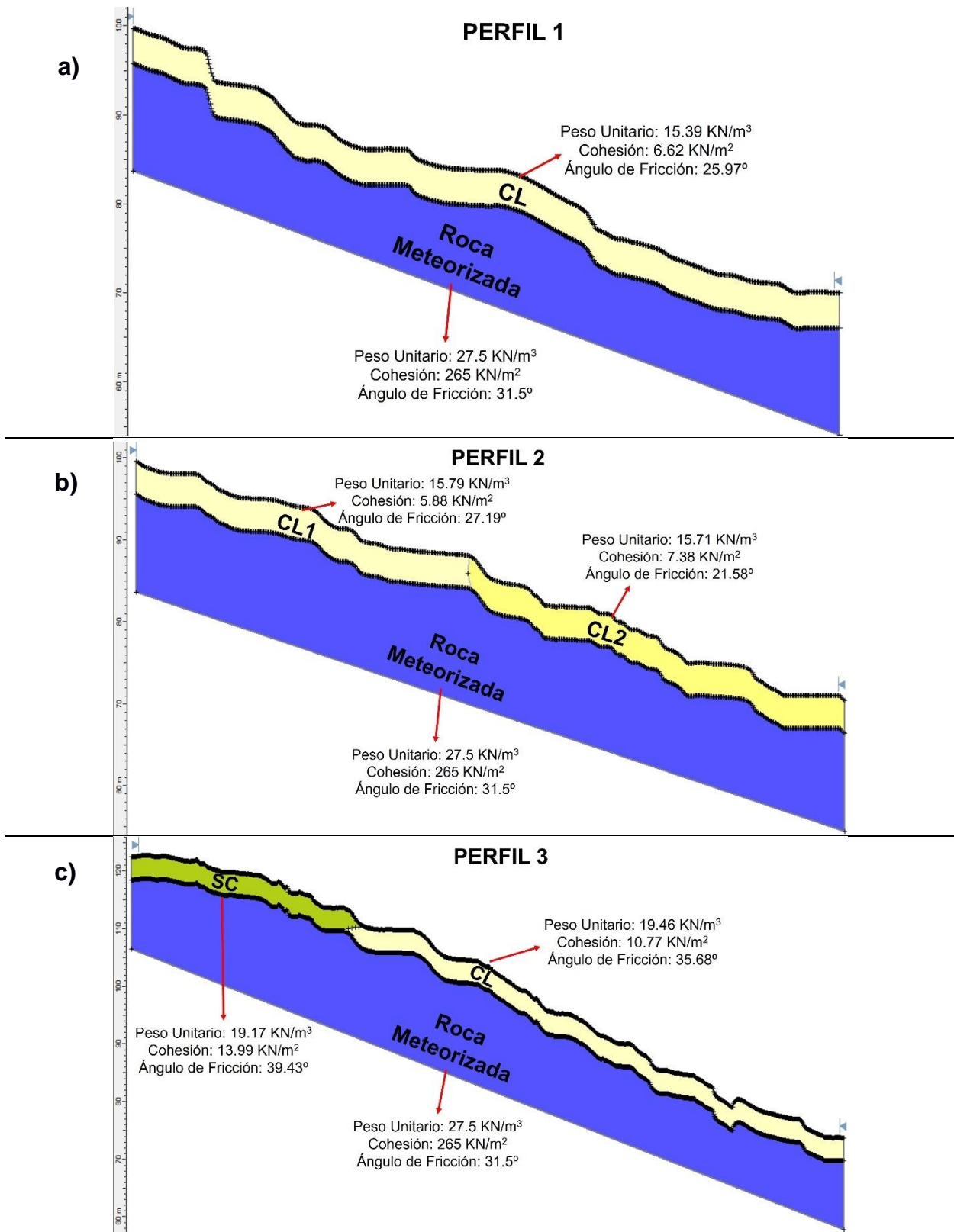


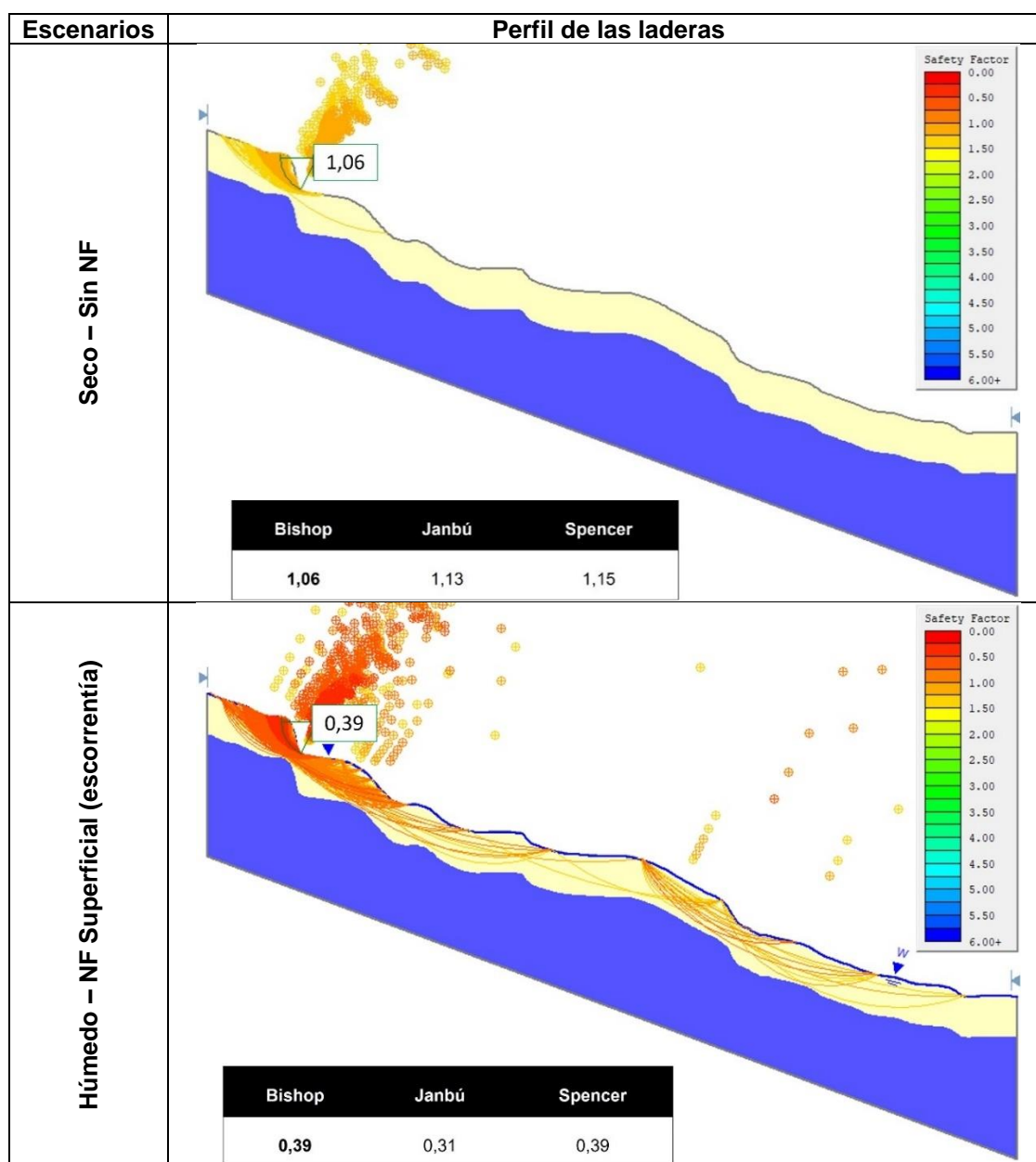
Figura 4.19 Perfiles modelados para el Análisis de Estabilidad de Laderas.

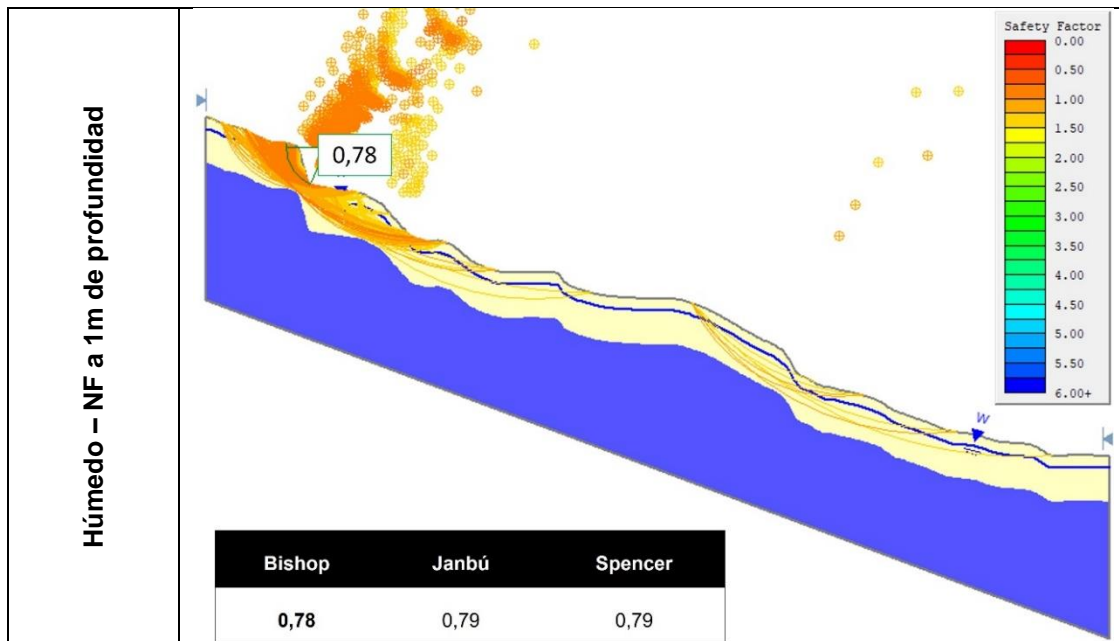
a) Perfil 1 con solo presencia de CL, b) Perfil 2 con dos valores para CL, c) Perfil 3 con valores para CL y SC

4.4.1 Estabilidad en Perfil 1

En condiciones pseudoestáticas sin nivel freático los valores de FS se mantuvieron mayores a 1, y menores a 0.80 con un NF de 1 metro de profundidad (**Tabla 4.10**). Al ingresar el parámetro de escorrentía el valor de FS menos favorable baja considerablemente a un valor de 0.39. Para este caso el material no necesita de una cantidad de agua considerable para ser inestable, por lo que se espera que el IP de este suelo tenga rangos moderados que indiquen el paso a un comportamiento líquido.

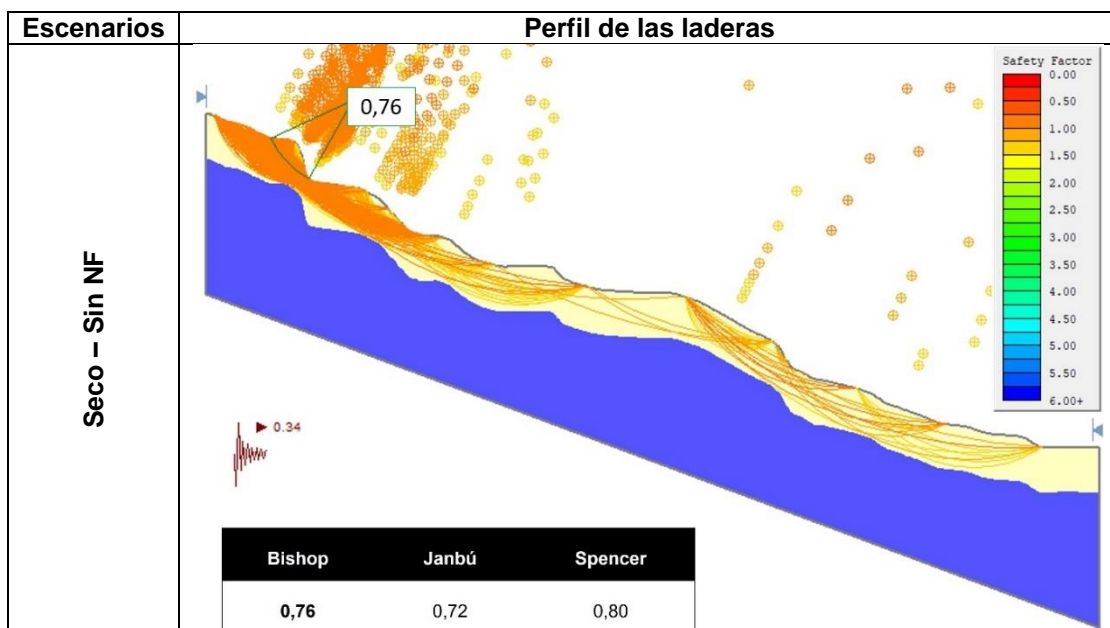
Tabla 4.10 Análisis de Estabilidad en Perfil 1, condiciones pseudoestáticas.

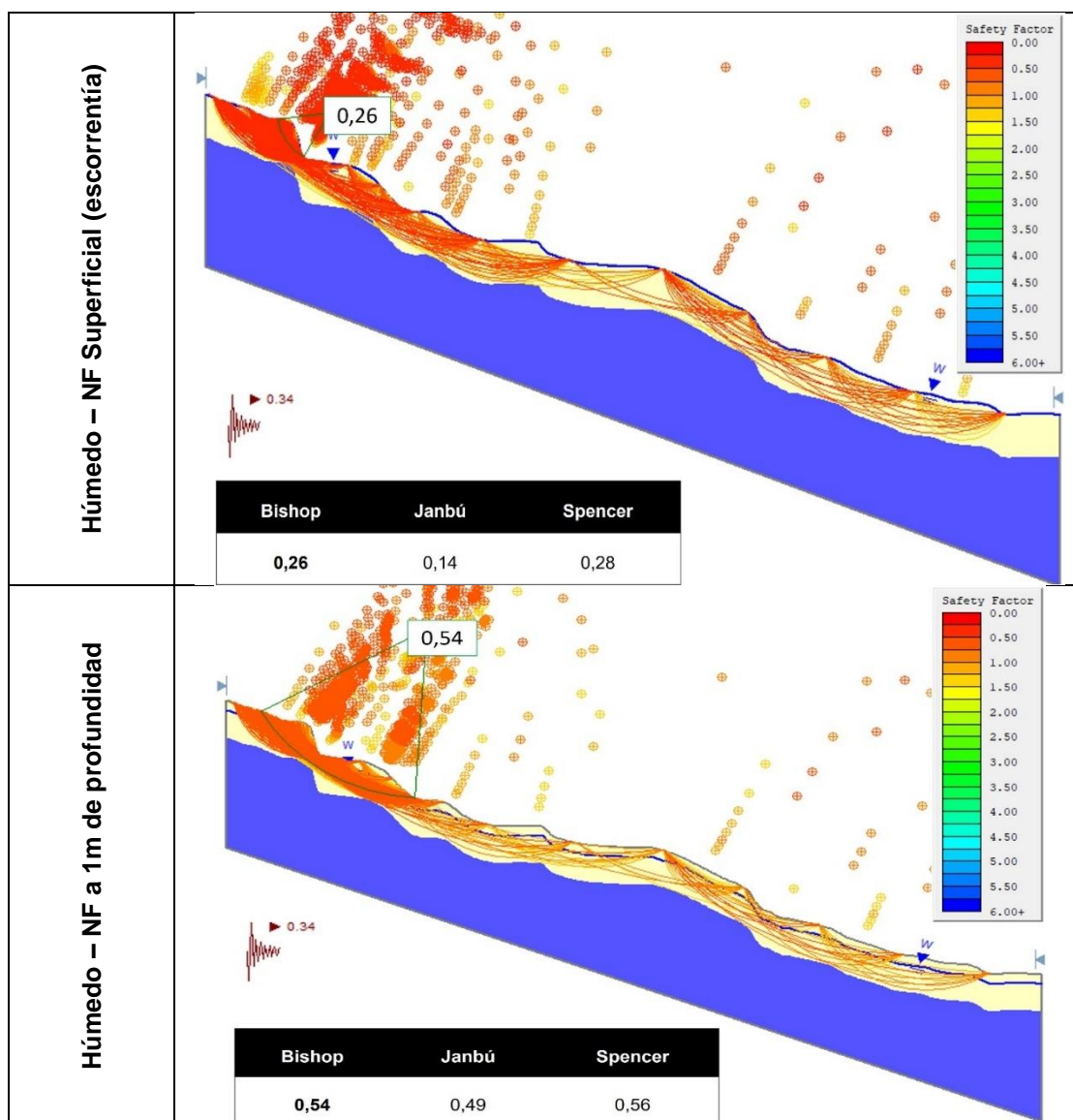




Para condiciones dinámicas los valores de FS disminuyen considerablemente, todos menores a 1 especialmente para niveles de escorrentía y niveles freáticos a 1 metro de profundidad donde el FS llega hasta un valor mínimo de 0.26 esperando que el material falle completamente (**Tabla 4.11**). Es importante observar que para condiciones de NF a 1 metro el plano de falla es más grande que para los otros escenarios.

Tabla 4.11 Análisis de Estabilidad en Perfil 1, condiciones dinámicas.





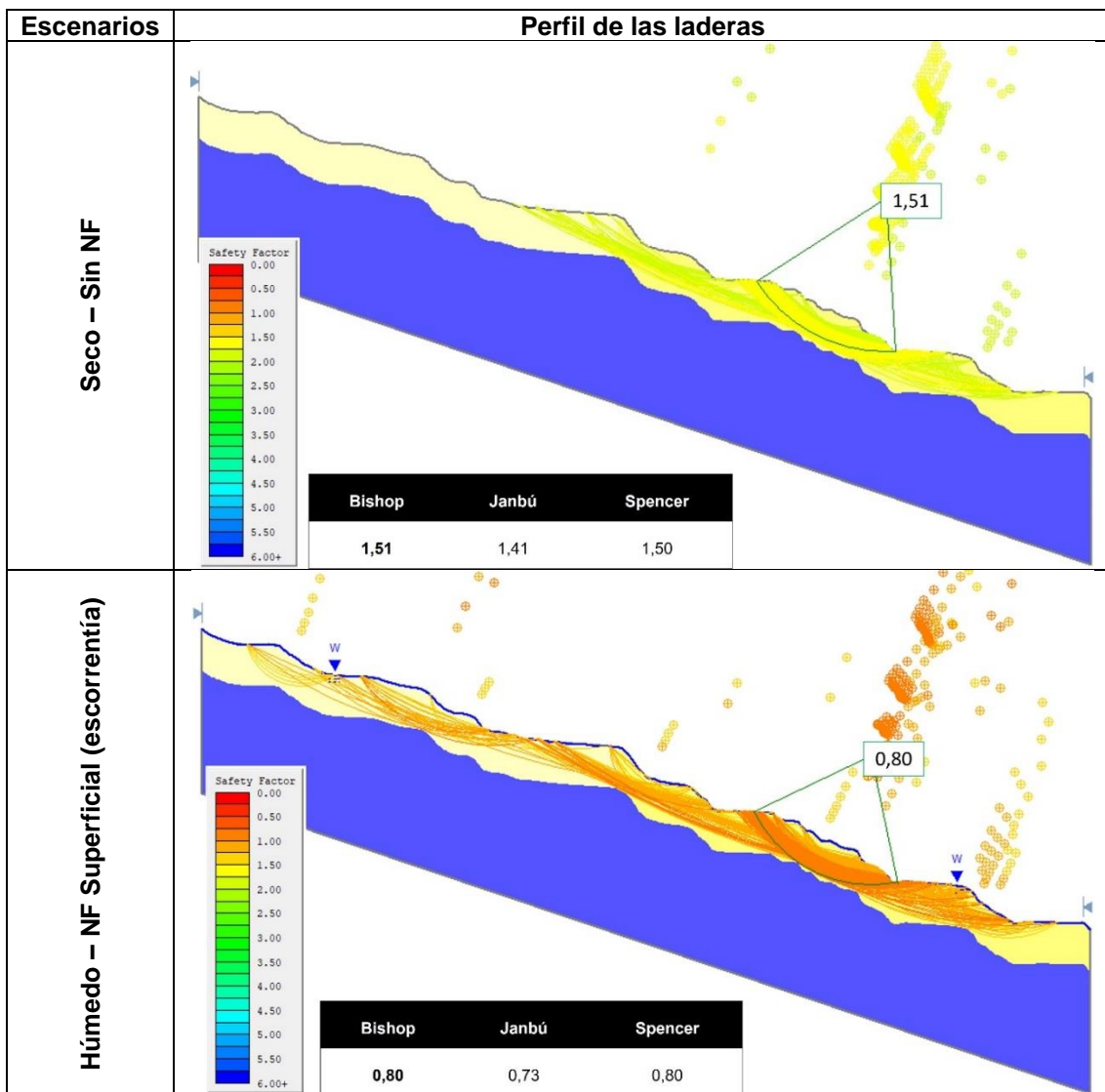
En general, este perfil se mantendrá poco estable en condiciones normales pero en caso de fuertes precipitaciones que generen canales de escorrentía este material pasará a ser inestable y cederá. A diferencia del primer caso (Seco – Pseudoestático), las superficies de falla, con FS menores a 1.5, no son puntuales lo que implicaría un control y monitoreo complejo de los movimientos en masa sobre las laderas.

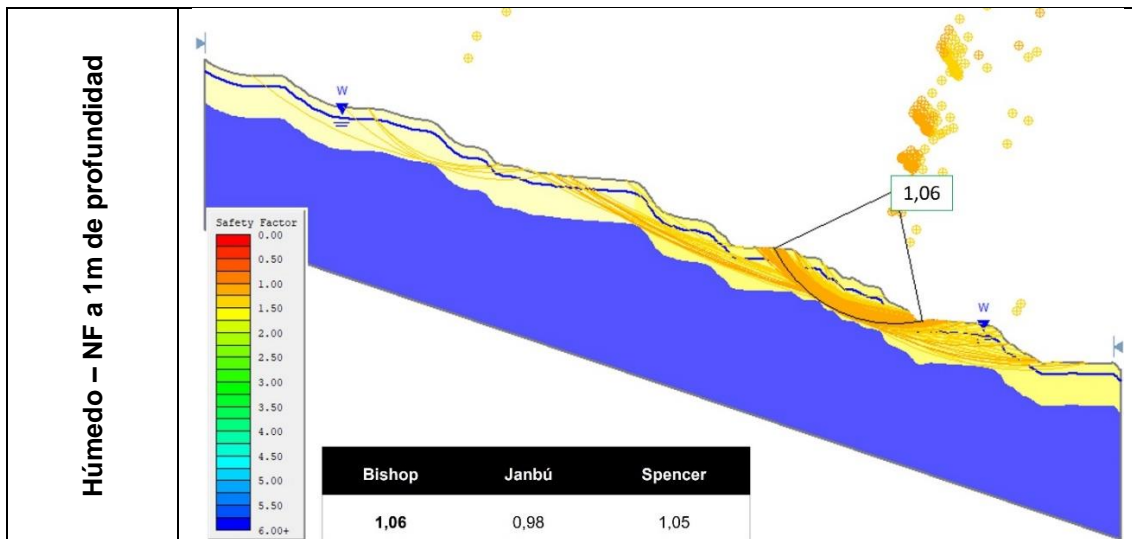
4.4.2 Estabilidad en Perfil 2

En condiciones pseudoestáticas sin nivel freático los valores de FS se mantuvieron mayores a 1.51 e incluso mayores a 1 con un NF de 1 metro de profundidad (**Tabla 4.12**). Sin embargo, al ingresar el parámetro de escorrentía el valor de FS baja a un valor de

0.80. A diferencia del Perfil 1, este se mantendrá estable aún con un NF en profundidad, por lo que es posible que el IP se encuentre entre moderado a alto. La principal similitud que comparte con el Perfil 1 es la escorrentía, ya que al considerar este escenario el material será inestable y tendrá un comportamiento líquido, siempre y cuando el contenido de agua sea suficiente para salir del estado semisólido.

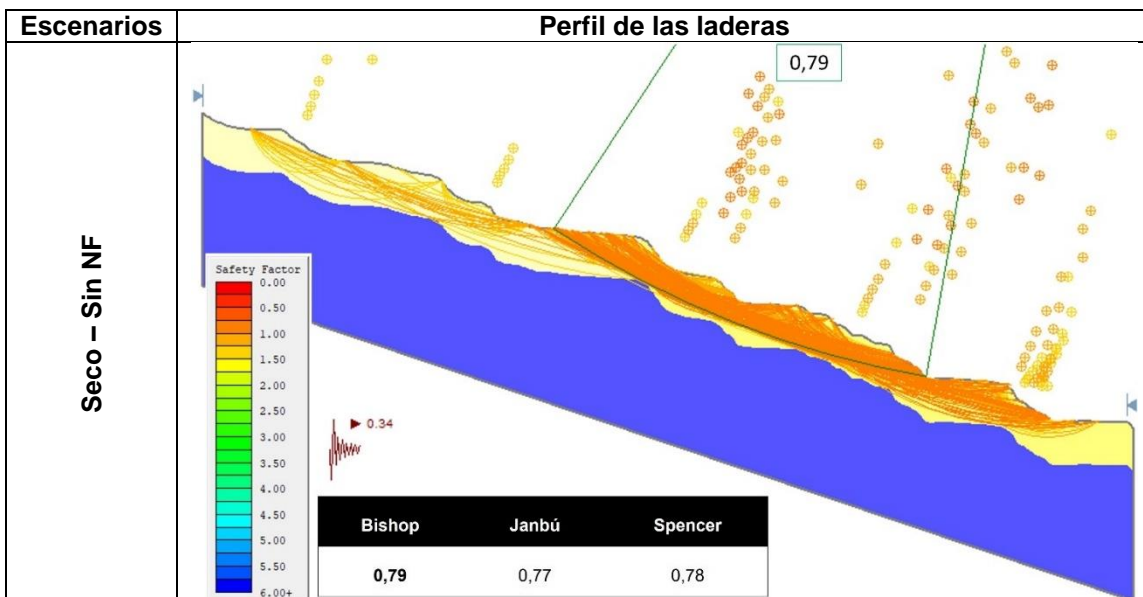
Tabla 4.12 Análisis de Estabilidad en Perfil 2, condiciones pseudoestáticas.

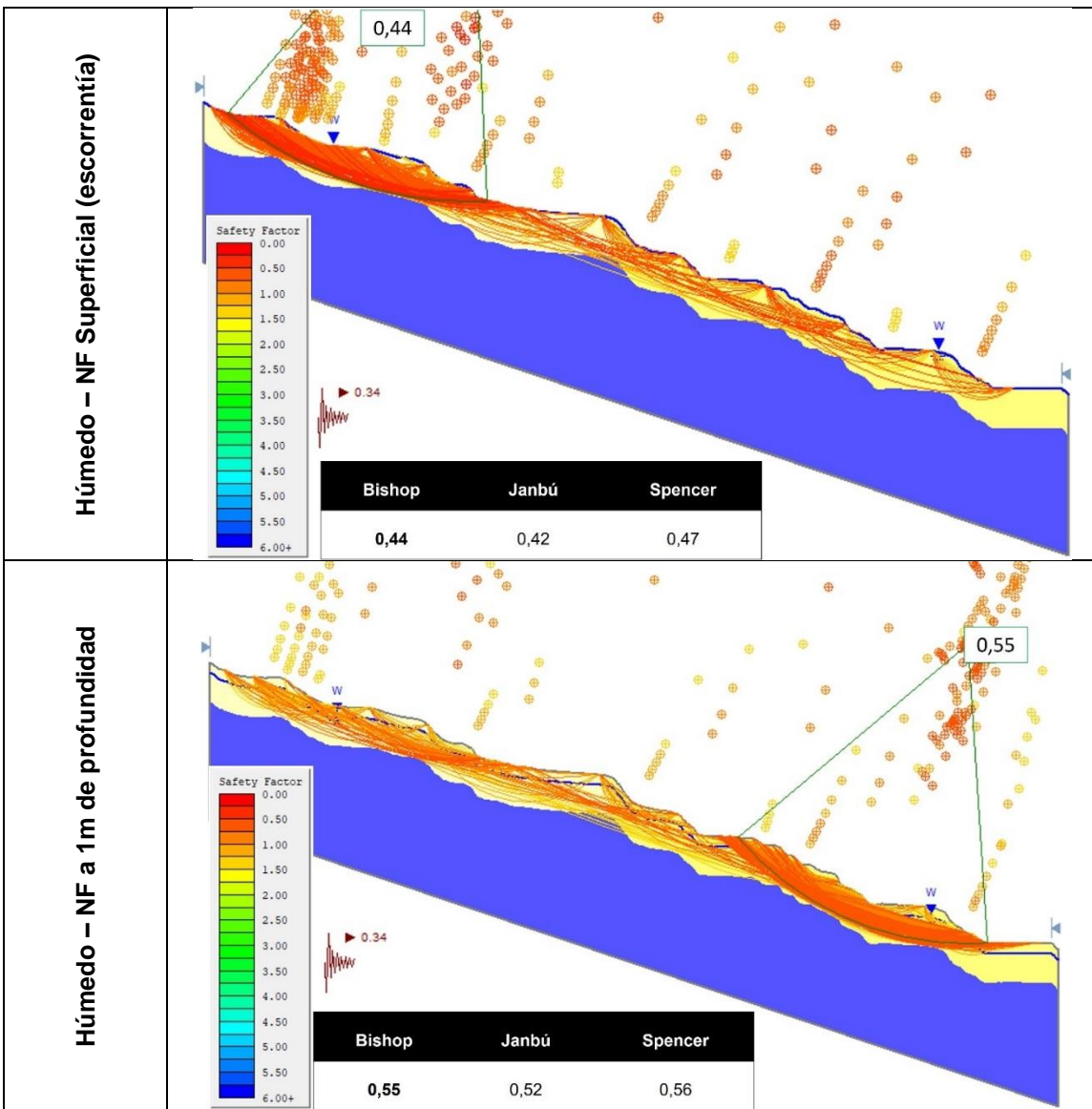




Al igual que en el Perfil 1, cuando se agrega una carga sísmica los valores de FS bajan considerablemente, por debajo de 1 en cualquiera de los escenarios, principalmente especialmente para niveles de escorrentía con un FS mínimo de 0.44 (Tabla 4.13). Es relevante considerar que para cada uno de los 3 escenarios en condiciones dinámicas y pseudoestáticas las superficies de falla cambian de posición, aunque se mantiene similar en profundidad, abarcando casi completamente el espesor de 4 metros de suelo residual.

Tabla 4.13 Análisis de Estabilidad en Perfil 2, condiciones dinámicas.



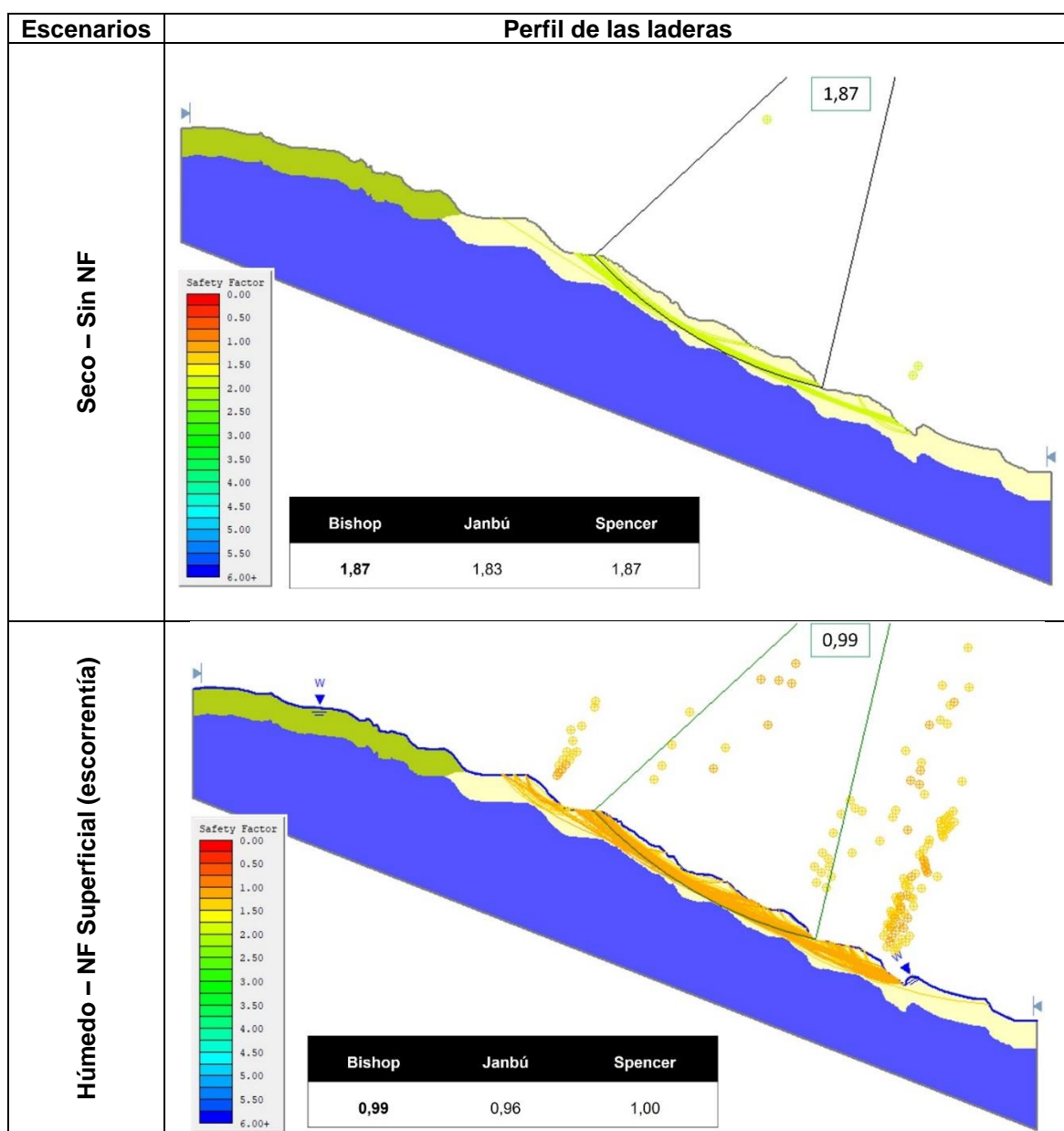


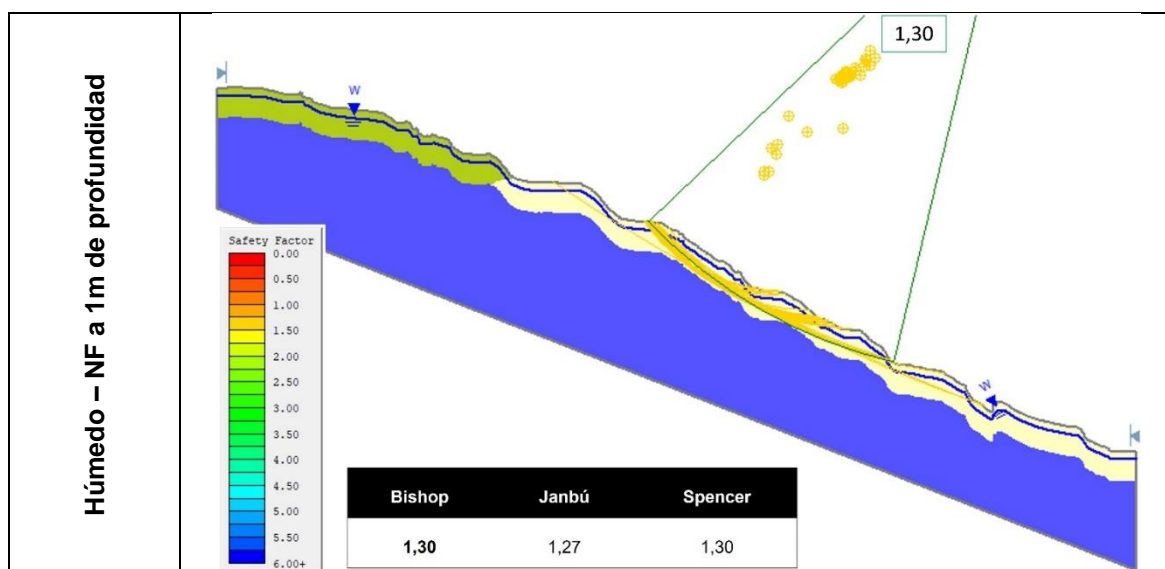
El Perfil 2 se mantendrá estable en condiciones normales, incluso con niveles de NF a 1 metro. No obstante, si hay ocurrencia de precipitaciones que acumulen una gran cantidad de agua en el material inestable además de generar escorrentía, el material pasará a comportarse como un líquido, desarrollando movimientos en masa con componentes de Flujo de Tierra. Para ambas condiciones la superficie de falla es variable en posición, por lo que será más complejo el control de un movimiento a lo largo y alrededor de esta ladera.

4.4.3 Estabilidad en Perfil 3

Para condiciones pseudoestáticas sin nivel freático los valores de FS se mantuvieron mayores a 1.80 e incluso mayores a 1.30 con un NF de 1 metro de profundidad (**Tabla 4.14**). Al ingresar el parámetro de escorrentía el valor de FS baja a un valor de 0.99. Tal como indicaron los ensayos de Límites de Atterberg, los materiales de esta ladera tienen valores de IP altos, por lo que necesitarán de un contenido de agua suficiente para actuar como líquidos y ceder.

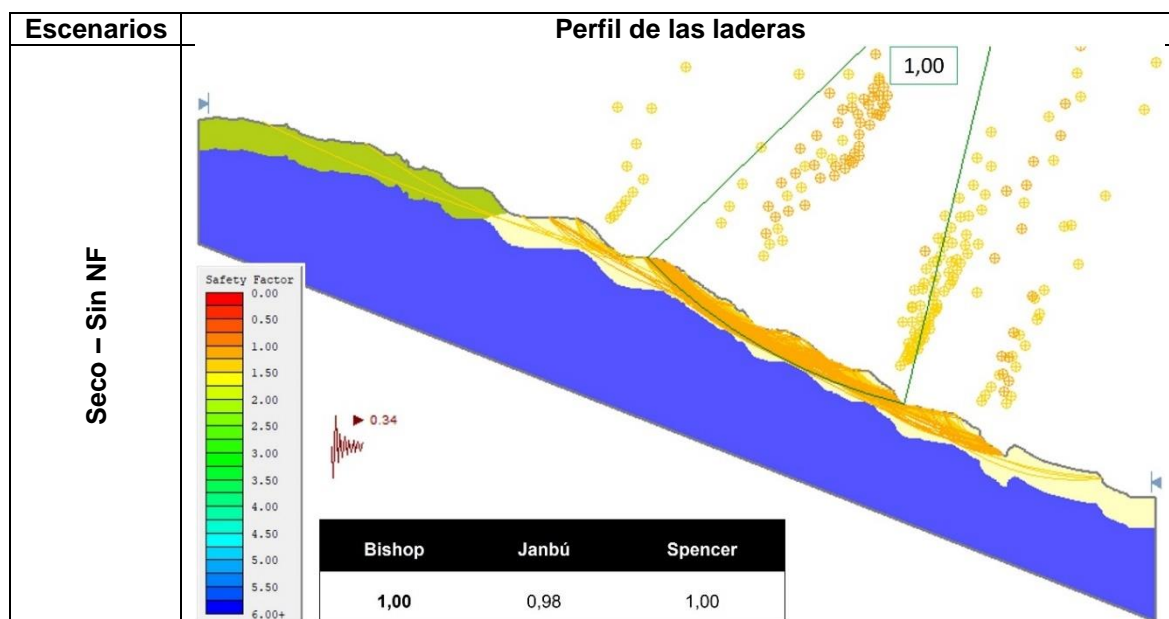
Tabla 4.14 Análisis de Estabilidad en Perfil 3, condiciones pseudoestáticas.

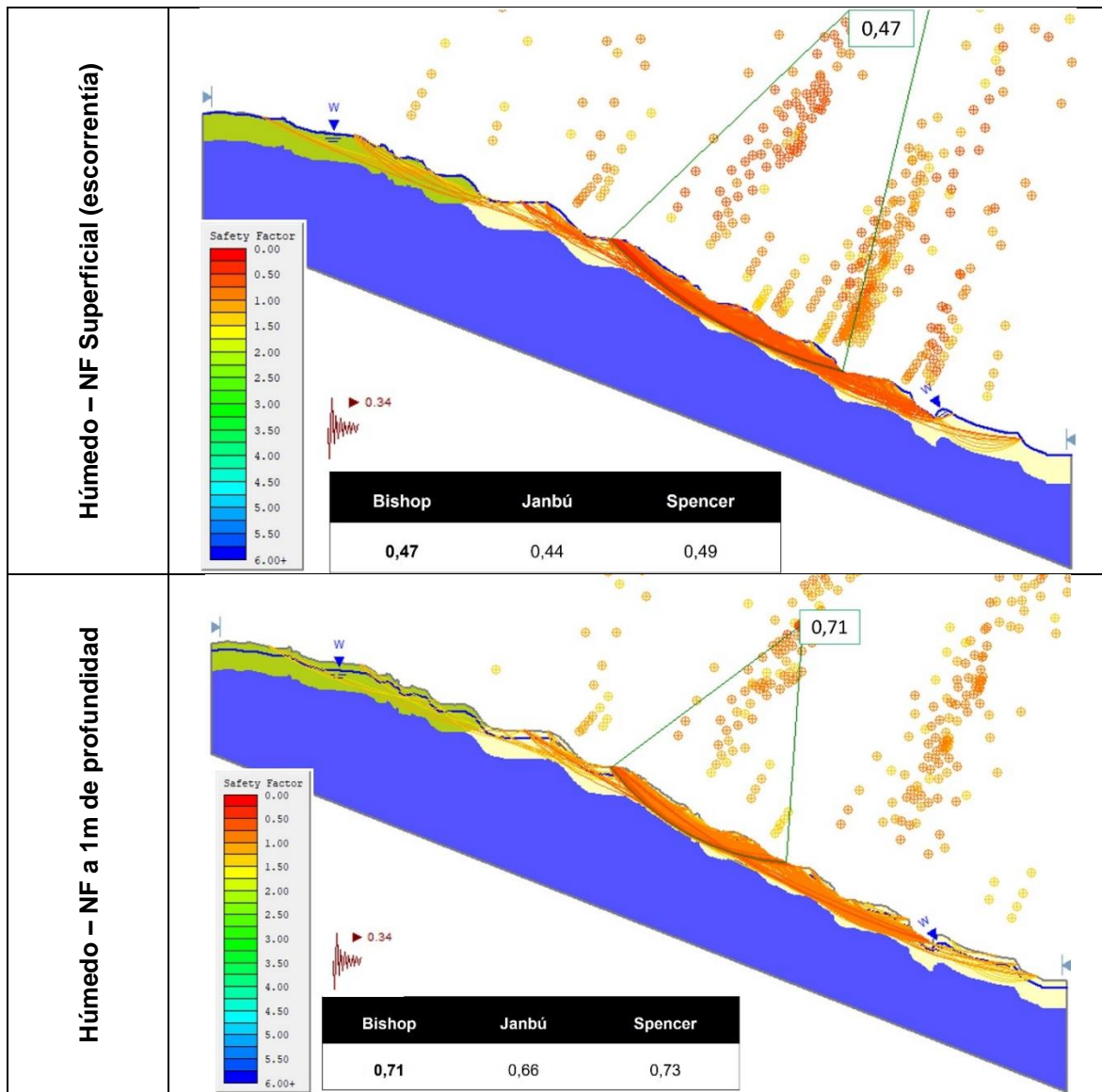




Para condiciones dinámicas los valores de FS disminuyen considerablemente para los escenarios de escorrentía y niveles freáticos a 1 metro de profundidad donde el FS < 0.70 esperando que el material falle (**Tabla 4.15**). Las superficies de falla tanto para las condiciones dinámicas como pseudoestáticas no varían considerablemente su ubicación, lo que permite un mejor control y monitoreo de un posible movimiento en masa.

Tabla 4.15 Análisis de Estabilidad en Perfil 3, condiciones dinámicas.





El Perfil 3 se mantendría poco a medianamente estable en 4 de los 6 escenarios planteados para condiciones dinámicas y pseudoestáticas. Considerando que los perfiles no se encuentran muy espaciados entre ellos es posible que exista una influencia de la cantidad de humedad estimada para el ensayo de corte directo donde se obtuvieron los parámetros de cohesión y ángulo de fricción. Otro factor que se puede considerar para explicar la diferencia en comportamiento con los otros dos perfiles es el desnivel de aproximadamente 20 metros entre estos. El material a mayores cotas presentaría otras características geotécnicas. En todo caso, los resultados de los perfiles indican un nivel de inestabilidad considerable para el flanco suroeste del cerro Nueva Prosperina.

4.5 Factores de seguridad (FS) y Medidas Preliminares de estabilización

En la siguiente sección se asocian cada uno de los FS calculados para diferentes escenarios sobre la base de la NEC (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014). En base a estos rangos de seguridad se proponen ideas de medidas preliminares para prevención en el sector. Ya que no es objetivo del estudio, no se presentan características de diseño detalladas para las medidas de prevención y estabilización. Se consideraron los métodos de Bishop y Spencer para mayor confiabilidad ya que no presentaron amplia variación entre los valores de FS calculados.

4.5.1 Factores de seguridad para Perfil 1

En base a los valores propuestos por la NEC, la ladera en inmediaciones del Perfil 1 no será estable en ninguno de los escenarios considerados (**Figuras 4.20 y 4.21**).

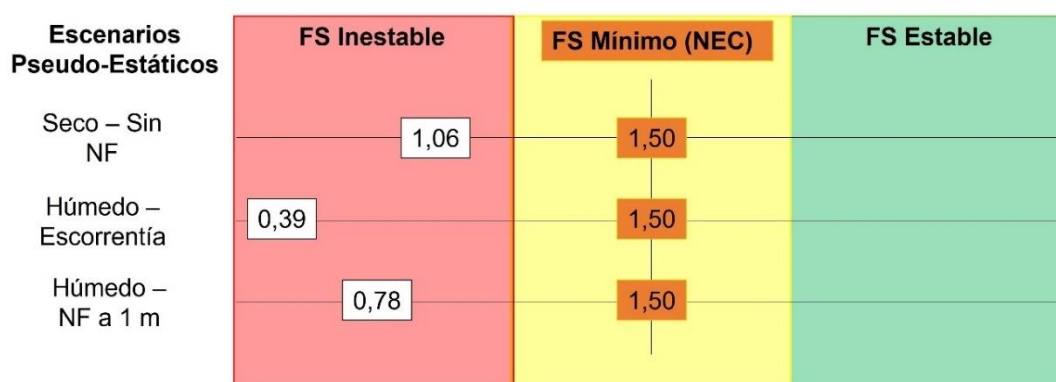


Figura 4.20 Comparación de FS calculados en Perfil 1 para escenarios Pseudoestáticos.

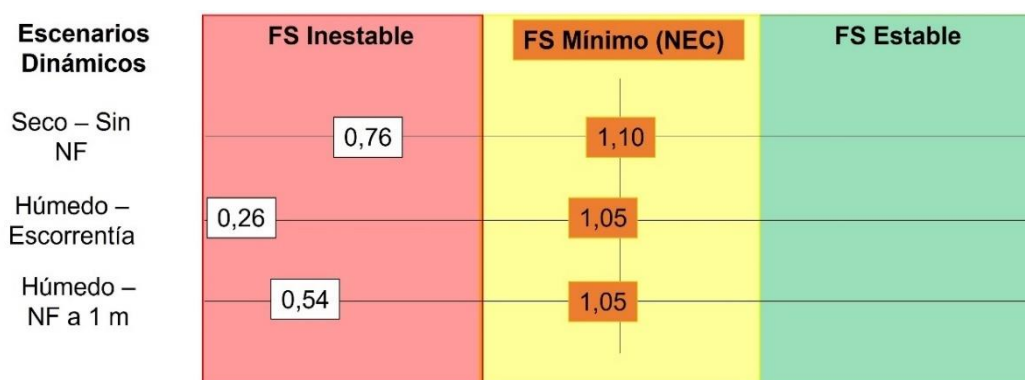


Figura 4.21 Comparación de FS calculados en Perfil 1 para escenarios Dinámicos.

4.5.2 Factores de seguridad para Perfil 2

Comparando los valores de FS con los propuestos por la NEC, la ladera alrededor del Perfil 2 sólo será medianamente estable en condiciones normales pseudoestáticas y sin presencia de nivel freático (**Figuras 4.22 y 4.23**). En cualquier otro escenario considerado será inestable.

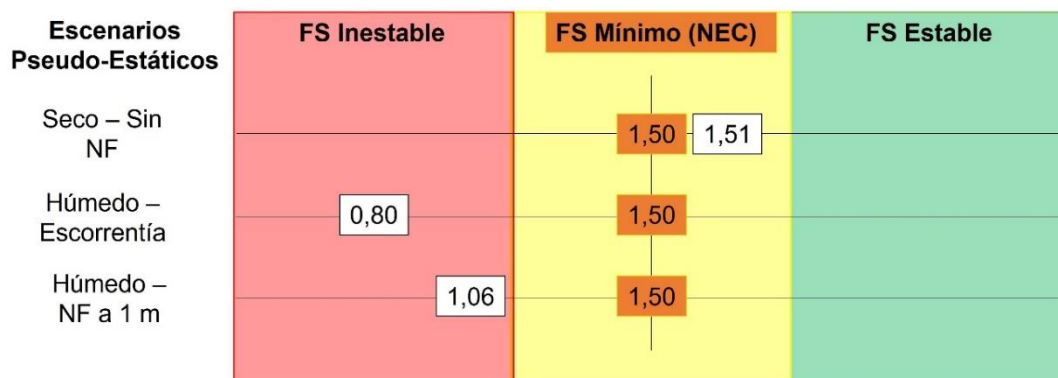


Figura 4.22 Comparación de FS calculados en Perfil 2 para escenarios Pseudoestáticos.

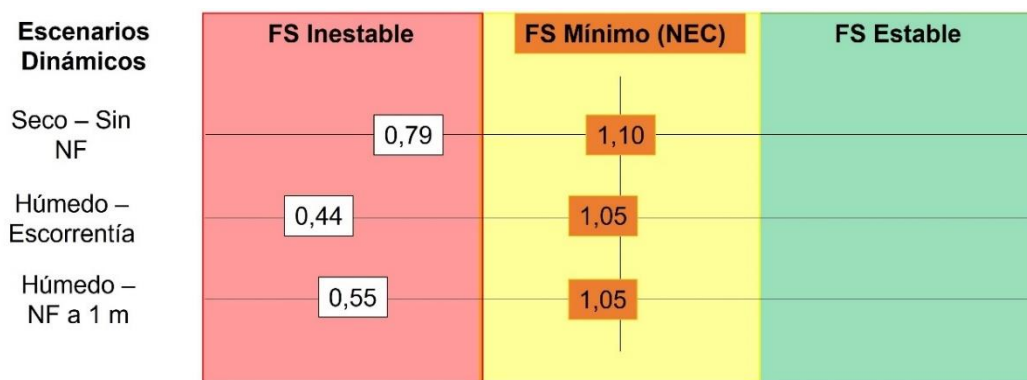


Figura 4.23 Comparación de FS calculados en Perfil 2 para escenarios Dinámicos.

4.5.3 Factores de seguridad para Perfil 3

Al igual que el Perfil 2, la ladera en inmediaciones del Perfil 3 solo será estable en condiciones normales pseudoestáticas y sin presencia de nivel freático (**Figuras 4.24 y 4.25**). En caso de que se haya sobreestimado el análisis de estabilidad de este perfil respecto al contenido de humedad, el resultado respecto a la comparación sería igual de consistente ya que no existe forma de que los FS aumenten con datos de cohesión y ángulos de fricción similares a los resultantes para los Perfiles 1 y 2.

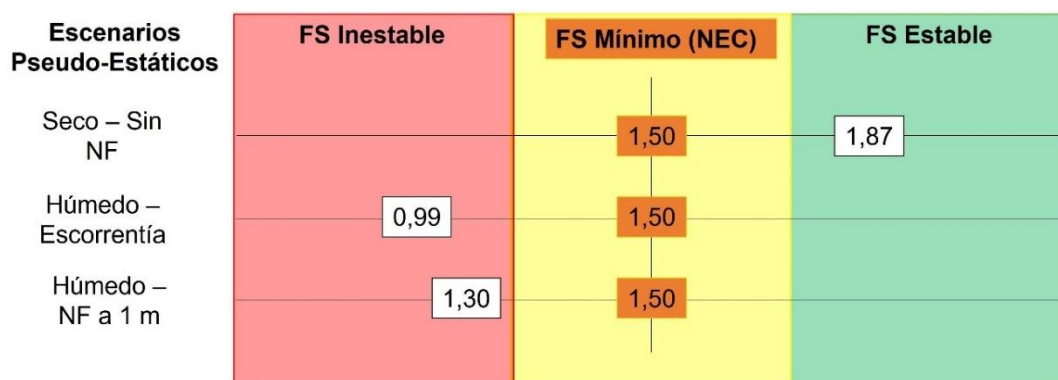


Figura 4.24 Comparación de FS calculados en Perfil 3 para escenarios Pseudoestáticos.

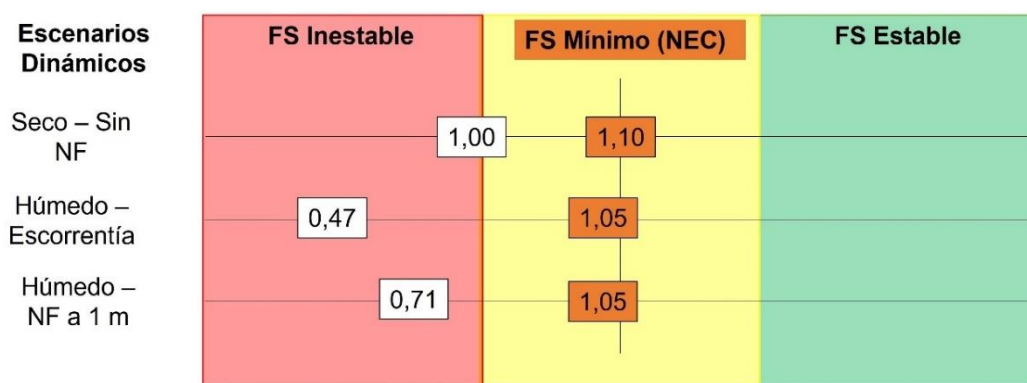


Figura 4.25 Comparación de FS calculados en Perfil 3 para escenarios Dinámicos.

4.5.4 Medidas preliminares de estabilización

Sobre la base del análisis de estabilidad de laderas se evidencia que el peor escenario para los 3 perfiles, tanto en condiciones pseudoestáticas como dinámicas, es el denominado Húmedo – Escorrentía. Por lo tanto se considera que la escorrentía es el principal detonante para la generación de movimientos en masa. Las soluciones preliminares recomendadas para la estabilización de la zona inestable son:

4.5.4.1 Redes de Drenaje superficiales

Optando por su fácil diseño y factibilidad económica se recomiendan implementar redes de drenaje que controlen las aguas superficiales por escorrentía. El diseño permitirá reducir las fuerzas efectivas que producen el movimiento, ya que aminora la carga en la masa inestable, presión intersticial y nivel freático (Suarez, 2003). Para este caso se deberían implementar drenajes como zanjas o canaletas, para los cuales existen varios diseños como los presentados en las Figuras 4.26a y 4.26b.

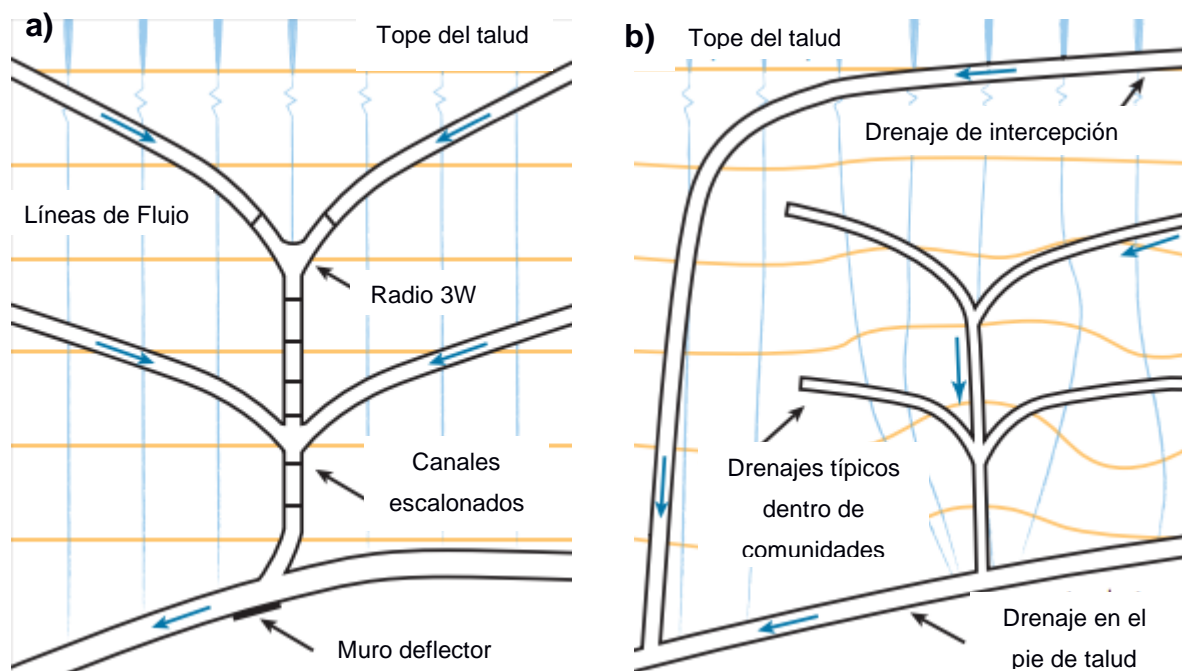


Figura 4.26 Planificaciones comunes de redes de drenaje para estabilización de laderas.

a) Diseño de drenajes ideal que muestra drenajes los drenajes de interceptación sobre la pendiente de la ladera, b) Diseño generalizado para drenajes interceptados en la parte superior de la ladera. Las líneas anaranjadas representan las curvas de nivel de la ladera. (Anderson & Holcombe, 2013).

4.5.4.2 Soluciones basadas en la Naturaleza

Las soluciones basadas en la naturaleza (Nature-based Solutions – NbS) son acciones que buscan la protección, administración sustentable, y restauración de ecosistemas naturales o modificados, que abarquen desafíos sociales de forma efectiva y adaptiva, brindando de manera instantánea mejoras en el bienestar humano y la biodiversidad (Miles et al., 2021). En el marco de la mitigación del cambio climático es importante adaptar esta clase de soluciones a un enfoque de riesgos por movimientos en masa (Asian Disaster Preparedness Center, 2020). Si existe el potencial de implementar esta clase de soluciones en Nueva Prosperina que ayuden a aminorar la carga de agua por escorrentía; se deberían considerar las siguientes:

1. **Técnicas para control de laderas y protección del suelo:** El uso de vegetación para estabilizar laderas y controlar escorrentías es un método económico y adaptable a taludes adyacentes a senderos, vías o terrazas de cultivo (Devkota et al., 2014). Algunos ejemplos son:

- Plantación de líneas de césped a lo largo de las laderas, sea de forma transversal o diagonal.
- Capas de arbustos de diagonales o transversales a la dirección en que se inclina la ladera.
- Cercado de bambú o caña guadua en el pie de talud para protección.

Estas soluciones se pueden integrar en un solo modelo tal como muestra la **Figura 4.27**, donde también se agrega un drenaje a lo largo de la vía o sendero para asegurar la acumulación de agua.

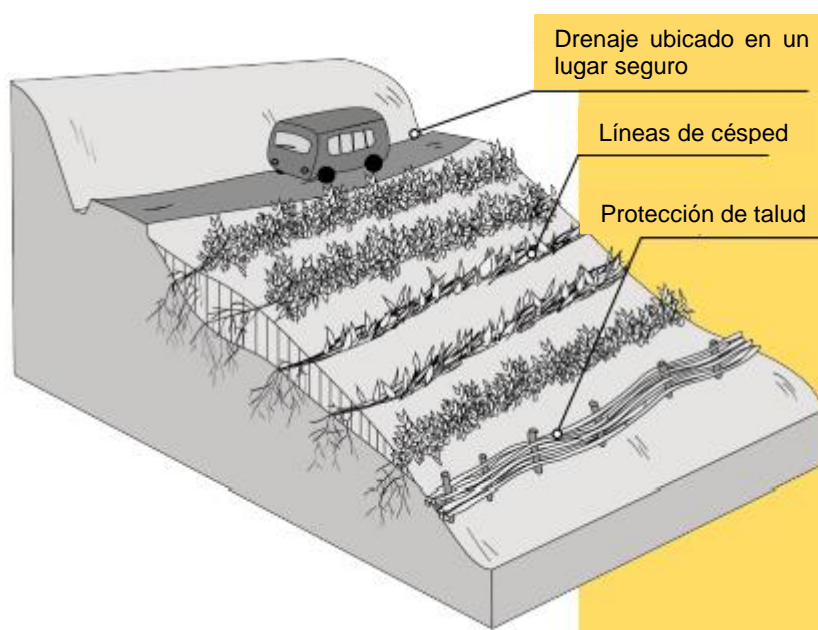


Figura 4.27 Aplicación de técnicas de reforestación para estabilización de laderas.

(Devkota et al., 2014)

2. **Técnicas para el control de escorrentía:** La acumulación de agua sobre el material residual en laderas inestables es la principal causa de erosión laminar (Howell, 1999). Las siguientes soluciones descritas brevemente son las más comunes para el control de esta clase de problemas donde la escorrentía es el principal factor detonante:

- Turfing o cubierta de césped con raíces poco profundas colocadas directamente sobre la pendiente de la ladera (**Figura 4.28**). Se debe usar en materiales bien drenados donde no existe riesgo por hundimiento;

además, es útil para la protección de la capa superior de suelo de la escorrentía inmediata (Howell, 1999).

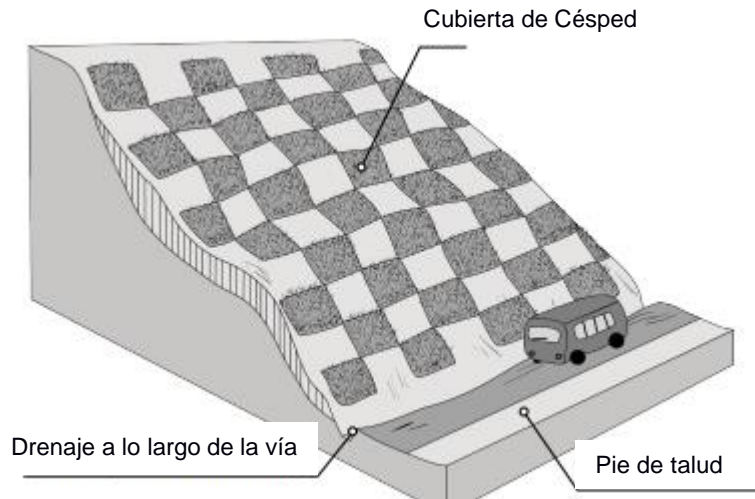


Figura 4.28 Cubierta de césped para protección inmediata de la escorrentía.

(Devkota et al., 2014)

- Stone Pitching o “adoquinamiento de piedra – vegetación”, para reforzar laderas mediante la combinación de piedras secas adoquinadas y vegetación plantada entre los huecos entre estas (**Figura 4.29**). Se agrega un drenaje al tope de la ladera para que el agua por escorrentía discorra sobre las “piedras adoquinadas”.

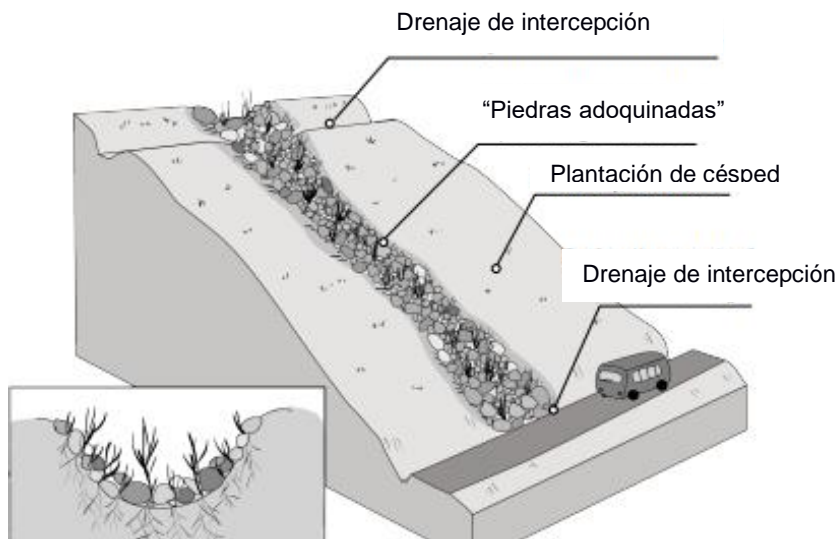


Figura 4.29 Canal de “Piedras adoquinadas” para direccionar el agua por escorrentía.

(Devkota et al., 2014)

- Empalizadas; trozos madera “plantados” transversalmente a la dirección en la que se inclina la ladera (**Figura 4.30**). Conforman fuertes barreras para atrapar material residual que se mueve cuesta abajo, formando a la larga una terraza que estabilizará el talud. Se puede usar en laderas con pendientes mayores a 60° (Howell, 1999).

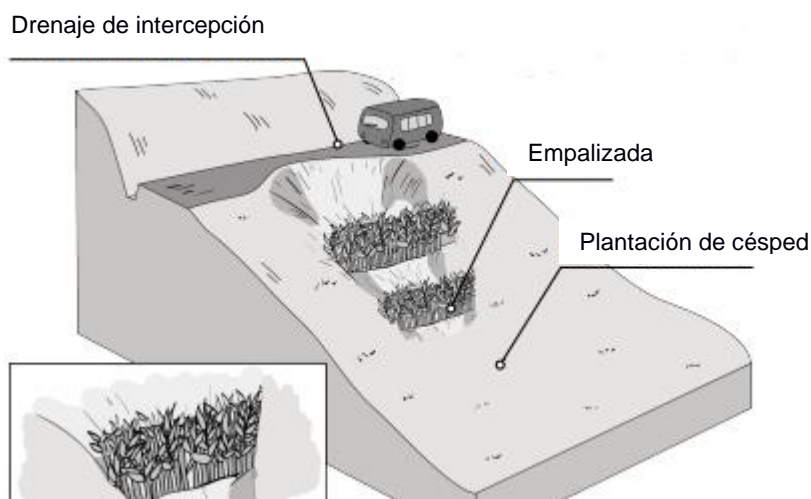


Figura 4.30 Barreras de empalizadas que se convierten en terrazas estabilizadoras.

(Devkota et al., 2014)

4.5.4.3 Geosintéticos

Las ideas de soluciones previas son ideales para “comunidades de bajo costo” como la cooperativa Nueva Prosperina. No obstante, existen otras medidas de tipo estructural consideradas más eficiente pero costosas ya que son puntuales y no abarcan grandes extensiones; estos son los Geosintéticos. Entre las ventajas que posee se encuentra que tienen controles ambientales, son rápidos de instalar y reemplazan diseños complejos que usan materiales de construcción como muros (Koerner, 2012). El geosintético permitiría separar, filtrar, drenar y almacenar el agua de escorrentía que fluye sobre las laderas además de reforzar adecuadamente los taludes a lado de senderos y sobre los que se asientan viviendas.

En todo caso, estas soluciones en caso de ser aplicadas deben ser socializadas con la comunidad ya que la expansión de asentamientos debe ser controlada en la medida de lo posible para que no afecte el funcionamiento de las medidas de estabilización planificadas.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La metodología de trabajo en laboratorio y campo aplicada en el presente proyecto permite una caracterización pertinente de la estabilidad en las laderas y movimientos en masa, mejorando el conocimiento del peligro geológico en el sector.

1. El levantamiento topográfico mediante dron es una metodología eficiente para obtener modelos del terreno que sirven para interpretar indicadores morfométricos de interés, delimitar zonas susceptibles y movimientos en masa del sitio, además de cuantificar las viviendas que se asientan en dichas zonas a través de la segmentación de ortomosaicos. La zona delimitada como inestable abarca un área de 5.50 Ha, donde se asientan alrededor del 50% del total de viviendas (222 de 488) que concurren en el cerro de la Etapa 10 de Nueva Prosperina. Los análisis de fotointerpretación en esta fase son corroborados mediante observaciones en campo, como el ajuste de movimientos en masa complejos activos con componentes de Flujo de Tierra y Reptación y, constatación de la influencia urbana en características morfológicas como la dirección de redes de drenaje.
2. La caracterización geológica del cerro Nueva Prosperina toma mayor relevancia en las fases de laboratorio debido a la ausencia de afloramientos por alta meteorización. Las muestras de mano y láminas delgadas permitieron estimar la presencia de intrusivos de composición subvolcánica, probablemente diques, sills o domos subvolcánicos. Este material subvolcánico se encontraría en un estado temprano de alteración sericítica, que a la vez influye en la inestabilidad del material que conforma el cerro.
3. La caracterización geotécnica se direcciona a dos frentes, suelos y rocas, teniendo más relevancia la primera debido a que los movimientos en masa inventariados son superficiales y se desarrollan en el material residual.
 - 3.1. La clasificación geomecánica de suelos da paso a la zonificación de dos unidades geotécnicas en el cerro: SC y CL. La unidad SC ocurre con menor frecuencia que la unidad CL, estableciéndose sólo en las cotas por arriba de 100 metros. Esto también implica que en condiciones normales el suelo no cederá, por lo que requerirán de una carga adicional para su fallamiento, sea esta carga de tipo

estructural o por incremento de la masa de agua en el suelo. En general, la cohesión en la zona considerada inestable se encuentra entre 6 y 14 kN/m², un rango que determina la moderada a baja resistencia al corte de las masas de suelo.

- 3.2. La clasificación geomecánica de rocas mediante relaciones empíricas asociadas a la velocidad de las ondas P es un recurso sustancial para la caracterización geotécnica tanto a nivel subsuperficial como en profundidad. Se complementan bien con datos tomados en campo para discontinuidades y así establecer una clasificación de la calidad del material rocoso. De manera general, la capa de roca meteorizada que subyace al material residual del cerro presenta una calidad media (Clase III según RMR), la cual aumenta en profundidad hacia una roca más sana.
4. Los perfiles sísmicos interpretados permiten determinar la potencia del material residual que se considera inestable, con un valor entre 4 y 5 metros, mientras que la profundidad de la siguiente capa determinada como roca meteorizada se estableció alrededor de 10 a 12 metros. Conocidas el área de la zona inestable y la profundidad de este material se obtuvo un valor de volumen inestable de 219 787.38 m³.
5. El análisis de estabilidad para los 6 escenarios en los 3 perfiles ubicados estratégicamente sobre los movimientos en masa activos, confirman la inestabilidad de la región considerada y delimitada mediante indicadores morfométricos (FS inestables según comparación con la NEC). El análisis de los escenarios revela que el peor caso es el Húmedo - Escorrentía, por lo que se considera el principal factor detonante para el desarrollo de movimientos en el cerro Nueva Prosperina.

La urbanización y deforestación sin control en las laderas del cerro Nueva Prosperina influyen en la estabilidad de estas. La modificación de la fisiografía del cerro ha generado redes de drenaje donde discurre agua pluvial por mecanismos de escorrentía, factor que se considera el detonante para los movimientos en masa según los FS calculados. La región de mayor susceptibilidad en la cual se ha centrado el estudio se encuentra en el flanco suroeste del cerro, determinada de manera eficiente para comunidades de bajos recursos con problemáticas sociales de alto impacto. Esto prueba que la metodología aplicada es competente para esta clase de contextos.

5.2 Recomendaciones

1. Para mejorar la precisión de los modelos de estabilidad es importante tomar más muestras de suelo y roca para ensayos SUCS y láminas delgadas con la finalidad de ajustar la caracterización. Las muestras para corte directo deben ser ensayadas a su contenido propio de humedad con el fin de conocer el comportamiento real del suelo y no sobreestimar los análisis de estabilidad. La confiabilidad de resultados provenientes de un muestreo superficial se debe comparar con muestreos a mayor profundidad, por lo que es recomendable realizar calicatas de al menos 1 metro o, perforaciones con profundidades entre 4 y 5 metros en el límite entre el material inestable y la roca meteorizada.
2. Con la finalidad de abarcar toda la región considerada en el estudio se deben planificar más campañas de prospección geofísica, nuevamente de sísmica de refracción ya que ha dado buenos resultados en el proyecto, pero complementando con líneas de tomografías eléctricas para un adecuado ajuste de los modelos en subsuelo respecto a la estimación de parámetros como contenido de humedad y niveles freáticos. Además, conociendo el espesor de suelo residual en toda la región de estudio se podrían aplicar otras metodologías para el cálculo de volúmenes, como el método de los perfiles o métodos numéricos.
3. Para asegurar la fiabilidad del método, los valores de RQD, UCS y RMR que se obtienen mediante relaciones empíricas con velocidades de Ondas P, deben ser comparadas con levantamientos geomecánicos convencionales en campo: medición de discontinuidades y ensayos con esclerómetro; y laboratorio: medición de RQD en testigos y resistencia a la compresión simple.
4. Con el motivo de refinar los modelos de perfiles generados para el análisis de estabilidad, se deben implementar parámetros complementarios a los resultados de cohesión y ángulos de fricción. Estos parámetros pueden ser cargas distribuidas por estructuras como viviendas, escalinatas o carreteras, además de características propias del suelo como permeabilidad y porosidad. Para este estudio se aplicaron métodos de equilibrio límite como Bishop, Janbú o Spencer, sin embargo se pueden aplicar otras metodologías para verificar la confiabilidad de estos, como los métodos de tipo numérico o dinámico, modelos finitos y tridimensionales.
5. Como paso fundamental para el análisis del riesgo en los movimientos inventariados, deben ser monitoreados para su control y prevención (Auflič et al., 2023). Este

proceso necesita de la recolección de datos a lo largo del tiempo y en diferentes escalas de observación, de manera regular sobre el movimiento en masa en desarrollo. Entre estos parámetros se pueden considerar la extensión del movimiento, cinemática, cambios en la topografía, parámetros hidrogeológicos y meteorológicos, desarrollo de superficie de fallas, entre otras.

6. Se recomienda evaluar el potencial de implementar soluciones basadas en la naturaleza que ayuden en reducir la carga de agua por escorrentía, además de causar un impacto positivo en el contexto de cambio climático del sitio. Algunos ejemplos de soluciones pueden ser: Redes de drenaje, Reforestación de laderas, Recubrimiento con césped, Adoquines de “piedra – vegetación” o Empalizadas.
7. Se sugiere evaluar la posibilidad de implementar sistemas de alerta temprana comunitarios para prevenir desastres en el cerro Nueva Prosperina y, que se puedan aplicar a sectores con las mismas características a lo largo de las regiones de las cordilleras costeras que concurren en Guayaquil. Esto implica que se deban realizar más zonificaciones de susceptibilidad para estos sectores, lo que ayudará a identificar de manera inmediata las zonas de riesgo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiló Alonso, M., Albaladejo Montoso, J., Aramburu Maqua, M. P., Carrasco González, R. M., Castillo Sánchez, V., Ceñal González-Fierro, M. A., Cifuentes Morales, M., Cifuentes Vega, P., Cristóbal López, M. A., Martín Duque, J. F., Escribano Bombín, R., Glaría Galcerán, G., González Alonso, S., González Barberá, G., Iglesias Gómez, J., Iglesias del Pozo, E., López de Diego, L. Á., Martín Llorente, F., Martínez-Mena García, M., ... Valero Huete, F. (2014). Guía para la elaboración de estudios del medio físico; contenido y metodología. In *Manuales MOPU* (4th ed.).
- Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, 1(41), 7–25. <https://doi.org/10.14350/rig.59101>
- Anderson, M., & Holcombe, E. (2013). *Community-Based Landslide Risk Reduction: Managing Disasters in Small Steps*. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12239>
- Asian Disaster Preparedness Center. (2020). Nature-based Solutions (NbS) for Landslide Risk Management. In *Nature Based Landslide Risk Management Project in Sri Lanka* (Vol. 5, Issue 3).
- ASTM D5777. (n.d.). *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*.
- Auflič, M. J., Herrera, G., Mateos, R. M., Poyiadji, E., Quental, L., Severine, B., Peternel, T., Podolszki, L., Calcaterra, S., Kociu, A., Warmuz, B., Jelének, J., Hadjicharalambous, K., Becher, G. P., Dashwood, C., Ondrus, P., Minkevičius, V., Todorović, S., Møller, J. J., & Marturia, J. (2023). Landslide monitoring techniques in the Geological Surveys of Europe. *Landslides, April*. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-02007-1>
- Avilés-Crespin, M. (2022). *Diseño Urbano - Arquitectónico de espacios resilientes y sostenibles para reducir el riesgo de deslaves e inundaciones en los asentamientos informales de la etapa 2 de la cooperativa Nueva Prosperina de la ciudad de Guayaquil*. Universidad de Guayaquil.
- Benítez, S. (1995). *Evolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur-Tertiaire*. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.

- Bernal, I., & Tavera, H. (2020). *Estudio geofísico de los acantilados de la Costa Verde en el Distrito de Magdalena del Mar*.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese*, 12, 335–343.
- Bieniawski, Z. T. (1976). Rock Mass Classification in Rock Engineering. *Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering*, 97–106.
- Cárdenas-Arévalo, L. (2021). *Estudio y Diseño de Vivienda Colectiva para reubicación de viviendas en zona de posibles desastres de Nueva Prosperina, Etapa 2 y 6, Cantón Guayaquil, 2020-2021*. Universidad de Guayaquil.
- Chorley, R. J. (1969). The Drainage Basin as the Fundamental Geomorphic Unit. In *Introduction to Physical Hydrology* (pp. 77–99). Routledge.
- CLIRSEN. (2011). Proyecto: “Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional”. *Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales Por Sensores Remotos*, 36.
- Comité Permanente por la Defensa de los Derechos Humanos. (2013, July 10). Desalojos forzosos en Guayaquil. *Artículo de Prensa*, 1. <https://www.cdh.org.ec/ultimos-pronunciamentos/176-desalojos-forzosos-en-guayaquil.html>
- Consejo Nacional de Planificación. (2021). *Plan Nacional de Desarrollo 2021, 2025*.
- Cotecchia, F., Santaloia, F., Lollino, P., Vitone, C., Pedone, G., & Bottiglieri, O. (2014). From a phenomenological to a geomechanical approach to landslide hazard analysis. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(9), 1004–1031. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.968744>
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1), 27–29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes. *Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, Special Report No. 247*, 36–75.

- Devkota, S., Sudmeier-Rieux, K., Penna, I., Erble, S., Jaboyedoff, M., Andhikari, A., & Khanal, R. (2014). *Community-Based Bio-Engineering for Eco-Safe Roadsides in Nepal*.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., & Ibsen, M. L. (1996). *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Dysli, M. (2000). Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils. *Strasse Und Verkehr*, 86, 93–94.
- El Comercio. (2022, March 10). Deslizamiento amenaza a 100 familias en Guayaquil. *Artículo de Prensa*, 1. <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/deslizamiento-amenaza-familias-guayaquil-viviendas.html>
- El Telégrafo. (2014, February 27). Las viviendas de cerro de Nueva Prosperina presentan problemas. *Artículo de Prensa*, 1. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/guayaquil/1/las-viviendas-de-cerro-de-nueva-prosperina-presentan-problemas>
- El Universo. (2022, March 11). Una falla geológica pone en riesgo a 100 casas del cerro de Nueva Prosperina, en el noroeste de Guayaquil; se alerta de mayores deslizamientos. *Artículo de Prensa*, 1. <https://www.eluniverso.com/guayaquil/comunidad/una-falla-geologica-pone-en-riesgo-a-100-casas-del-cerro-de-nueva-prosperina-en-el-noroeste-de-guayaquil-se-alerta-de-mayores-deslizamientos-nota/>
- EPOCH. (1993). *Temporal occurrence and forecasting of landslides In the European Community* (J. C. Flageollet (ed.)).
- Fowler, H. J., Lenderink, G., Prein, A. F., Westra, S., Allan, R. P., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., Blenkinsop, S., Do, H. X., Guerreiro, S., Haerter, J. O., Kendon, E. J., Lewis, E., Schaer, C., Sharma, A., Villarini, G., Wasko, C., & Zhang, X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(2), 107–122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161–2181.

<https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>

GAD de Guayaquil. (2015). *Sistematización del Programa de Gestión de Riesgos Urbanos de Guayaquil (SIGRU-G)* (p. 85).

GAD de Guayaquil. (2021). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial (PDOT) Cantón Guayaquil 2019-2023* (p. 321).

GAD Municipal de Guayaquil. (2022). *Geoportal del GAD Municipal de Guayaquil*. Geoinformación. <https://geoportal-guayaquil.opendata.arcgis.com/>

GEOESTUDIOS S.A. (2011). Actualización del Mapa Geológico de la ciudad de Guayaquil. In *Elaboración del documento de la Microzonificación Sísmica y Geotécnica de la ciudad de Guayaquil según la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2011* (p. 58). <https://docplayer.es/79454413-Tomo-1-0-actualizacion-del-mapa-geologico-de-la-ciudad-de-guayaquil.html>

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. In *Editorial Pearson Education, Madrid*.

Gregory, K. ., & Walling, D. E. (1973). *Drainage Basin. Form and Process: A Geomorphological Approach*. Edward Arnold.

Gutierrez, M. (2008a). Geomorfología Fluvial. In *Geomorfología* (pp. 288–289). Pearson Prentice Hall.

Gutierrez, M. (2008b). Laderas y movimiento de masas. In *Geomorfología* (p. 920). Pearson Prentice Hall.

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The landslide Handbook - A guide to understanding landslides. *US Geological Survey Circular, 1325*, 1–147. <https://doi.org/10.3133/cir1325>

Hoek, E, & Bray, J. (1981). *Rock slope engineering*. CRC Press.

Hoek, Evert. (2008). Rock mass properties. In *Practical Rock Engineering* (p. 341). <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union, 13*(1), 350. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>

- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370.
- Howell, J. (1999). *Roadside bio-engineering. Site Handbook and Reference Manual*. Department of Roads, Nepal and His Majesty's Government of Nepal.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hutchinson, J. N. (1968). Mass movement. In *Geomorphology* (pp. 688–696). Encyclopedia of Earth Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_238
- Instituto Geográfico Militar. (2019). “GENERACIÓN DE INFORMACIÓN GEO-ESPACIAL A ESCALA 1: 5 000 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA APTITUD FÍSICA DEL TERRITORIO Y DESARROLLO URBANO MEDIANTE EL USO DE GEOTECNOLOGÍAS.” In *Memoria Técnica: Ciudad de Guayaquil* (Issue 2007).
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). An introduction to geophysical exploration. In *John Wiley & Sons* (Vol. 4).
- Kılıç, A., & Teymen, A. (2008). Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2), 237–244. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0128-3>
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Publishing Co.
- Lario, J., & Bajardí, T. (2017). *Introducción a los riesgos geológicos*. Editorial UNED.
- Larrea-Carreño, V. (2013). *Diagnóstico de Vulnerabilidad Ambiental de los habitantes en relación al Riesgo de Deslizamiento de laderas e inundaciones en Nueva Prosperina*. Universidad Casa Grande.
- Luzieux, L. D. A., Heller, F., Spikings, R., Vallejo, C. F., & Winkler, W. (2006). Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1°N and 3°S: Paleomagnetic, radiometric and fossil evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3–4), 400–414. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.008>
- Manabí Noticias. (2019, March 5). Una casa colapsó por lluvias en Guayaquil. *Artículo*

de Prensa, 1. <https://manabinoticias.com/atencion-una-casa-colapso-por-lluvias-en-guayaquil/>

Meyer, C., & Hemley, J. . (1967). Wall rock alteration. In H. . Barnes (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (pp. 166–235). Rinehart and Winston.

Michel-Lévy, C., Bourot-Denise, M., Palme, H., Spettel, B., & Wänke, H. (1987). L'eucrite de Bouvante. Chimie, pétrologie et minéralogie. *Bulletin de Minéralogie*, 110(4), 449–458.

Miles, L., Agra, R., Sengupta, S., Vidal, A., & Dickson, B. (2021). Nature-based solutions for climate change mitigation. *United Nations Environment Programm*. <http://www.un.org/Depts/Cartographic/>

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). Norma Ecuatoriana de la Construcción: Geotécnia y cimentaciones. In *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. https://cicp-ec.com/documentos/NEC_2015/NEC_SE_GC_Geotecnia_y_Cimentaciones.pdf

MNDOT. (2007). *Pavement Design*.

Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*.

Olaya, V. (2009). Basic land-surface parameters. *Developments in Soil Science*, 33(C), 141–169. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00006-8)

ONU: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres. 2015-2030*. <https://www.refworld.org/es/docid/5b3d419f4.html>

Ozturk, U., Bozzolan, E., Holcombe, E. A., Shukla, R., Pianosi, F., & Wagener, T. (2022). How climate change and unplanned urban sprawl bring more landslides. *Nature*, 608(7922), 262–265. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-02141-9>

Philpotts, A. R., & Ague, J. J. (2022). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108631419>

Pourrut, P., & Pouyaud, B. (1995). El agua en el Ecuador: Clima, precipitaciones, escorrentía. In Colegio de Geografos del Ecuador & ORSTOM (Eds.), *Estudios de*

Geografía. Corporacion Editora Nacional.

Rengel, J. (2007). *Mineralogía Óptica para estudiantes de Ciencias de la Tierra*.

Salaamah, A. F., Fathani, T. F., & Wilopo, W. (2019). Correlation of P-wave Velocity with Rock Quality Designation (RQD) in Volcanic Rocks. *Journal of Applied Geology*, 3(2), 11. <https://doi.org/10.22146/jag.48594>

SENPLADES. (2011). *Memoria Técnica Cantón Guayaquil Proyecto: Generación De Geoinformación Para La Gestión Del Territorio a Nivel Nacional Escala 1: 25 000" Componente 2: Geopedología Y Amenazas Geológicas" Geomorfología*. 1–121. http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/ZONA8/NIVEL_DEL_PDOT_CANTONAL/GUAYAS/GUAYAQUIL/MEMORIA_TECNICA/mt_geomorfologia.pdf

Sharpe, S. (1938). Landslide and related phenomena: a study of mass-movements of soil and rock. *Columbia University Press*, 3–137.

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>

Soto, J., Galve, J. P., Palenzuela, J. A., Azañón, J. M., Tamay, J., & Irigaray, C. (2017). A multi-method approach for the characterization of landslides in an intramontane basin in the Andes (Loja, Ecuador). *Landslides*, 14(6), 1929–1947. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0830-y>

Strahler, A. (1952). Dynamic Basis of Geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 63, 923–938.

Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12(1), 1–33. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0)

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (Ingeniería de Suelos Ltda (ed.)). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Suarez, J. (2003). *Deslizamientos: Análisis Geotécnico* (Ingeniería de Suelos Ltda (ed.)). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Thalman, H. (1946). Micropaleontology of Upper Cretaceous and Paleocene in Western

Ecuador. *AAPG Bulletin*, 30. <https://doi.org/10.1306/3D933802-16B1-11D7-8645000102C1865D>

Vargas-Cuervo, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa. *Boletín de Geología*, 22(37), 39–67. <https://trid.trb.org/view/1046635>

Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and Engineering Practice*, 24, 20–47.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Landslides: Analysis and Control*, 176, 11–33.

Villacreses-Ponce, L. (2016). *Análisis Hidrológico de la cuenca de drenaje en el sector Nueva Prosperina cooperativa Socio Vivienda al NorOeste de la ciudad de Guayaquil, para control de inundaciones* [Universidad de Guayaquil]. http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/14184/1/TESIS_Gs.111_tesis_final_tocte.pdf

Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (2000). Digital Terrain Analysis. In *Terrain Analysis: Principles and Applications* (pp. 1–27). John Wiley & Sons, Ltd.

APÉNDICES

APÉNDICE A: PLANO TOPOGRÁFICO 1:1.000

PLANO TOPOGRÁFICO DE LA COLINA NUEVA PROSPERINA - ETAPA 10

615300

615400

615500

615600

9765300

9765300

9765200

9765200

9765100

9765100

615300

615400

615500

615600

Movimientos en Masa



Complejos; Flujos de Tierra y Reptación

Código	Área (m ²)	Ancho (m)	Largo (m)
MOV001	5669,64	49,13	127,64
MOV002	3958,06	57,32	88,14
MOV003	3662,04	46,15	108,77
MOV004	5513,13	68,43	120,42
MOV005	4705,09	79,20	79,79
MOV006	4701,06	77,75	84,61
MOV007	2189,79	38,47	58,30

Simbología Topográfica



Sendero



Vía Convencional



Drenaje



Viviendas

Curvas de Nivel c/1m



Principal



Secundaria

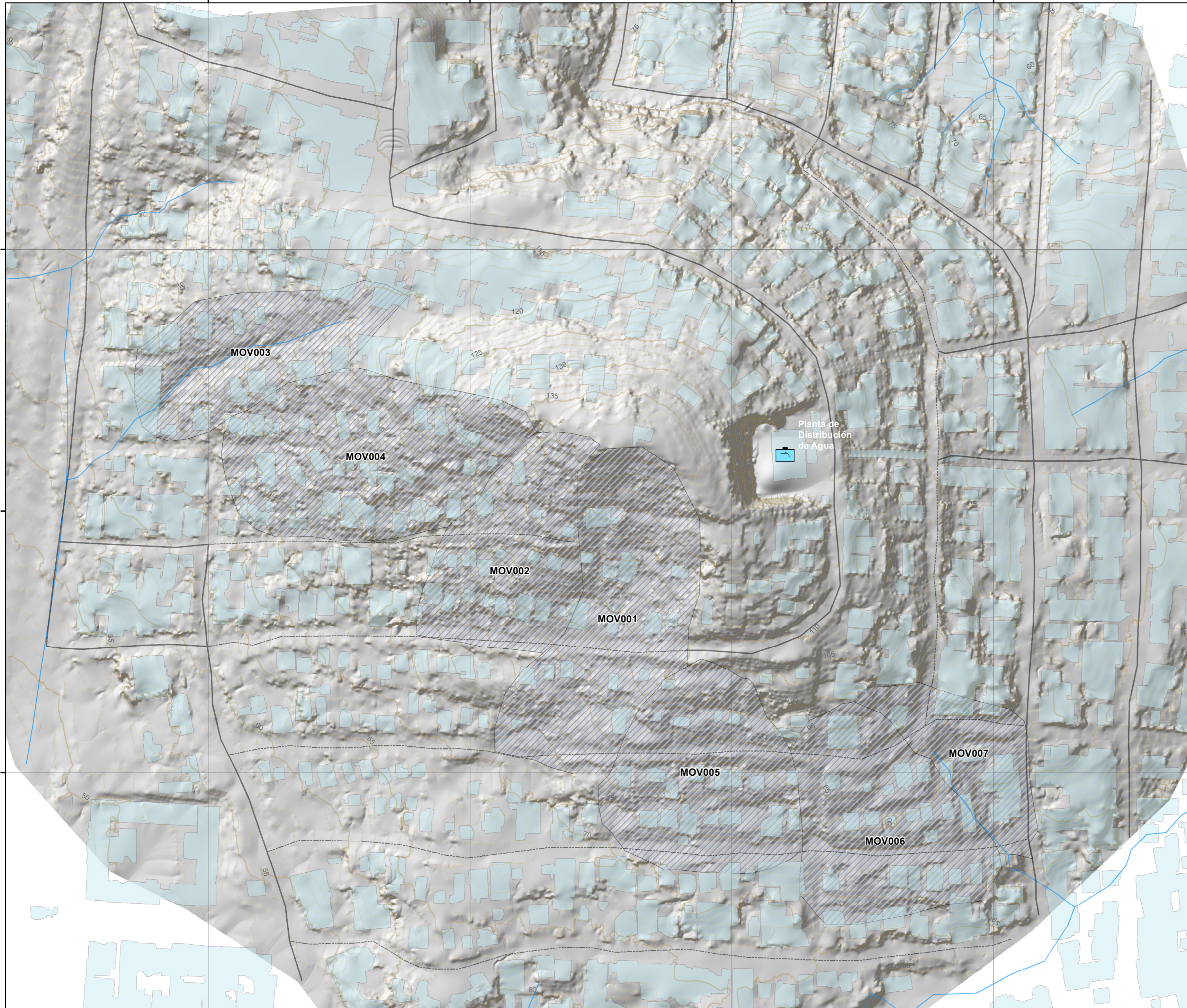
N



1:1.000

0 12,5 25 50 75 100 m

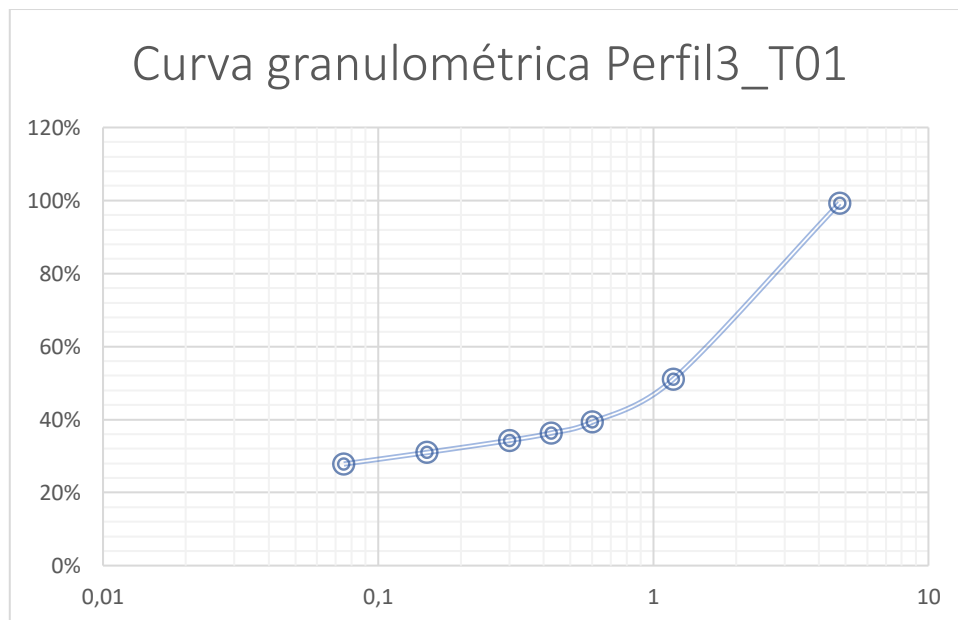
Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 17 S
 Proyección: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Metros



APÉNDICE B: ENSAYOS CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS

Masa inicial = 600,17

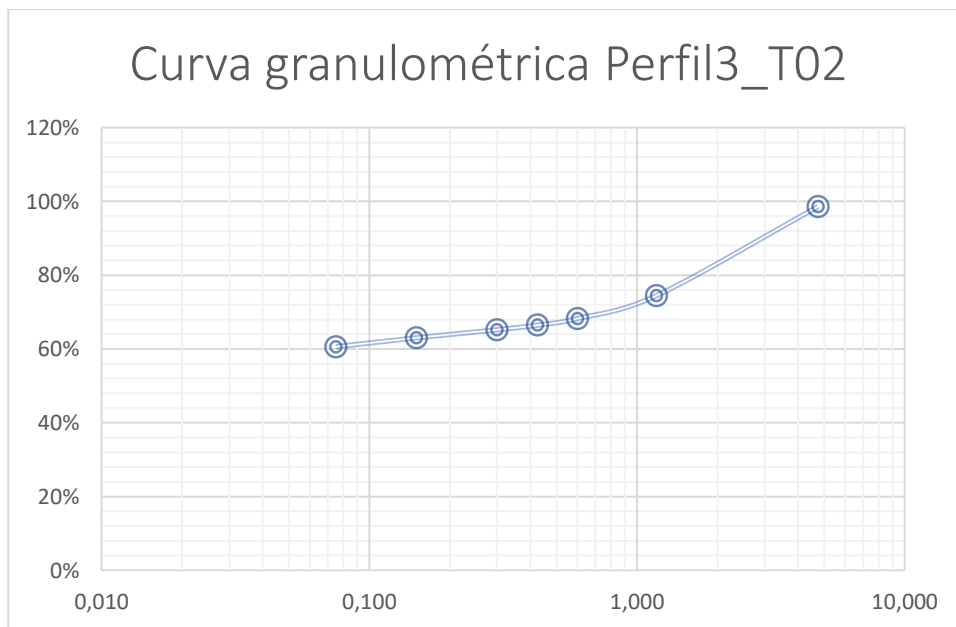
Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	Porcentaje de finos
4	4,75	4,3	1%	1%	99%
16	1,18	290,5	48%	49%	51%
30	0,6	70,3	12%	61%	39%
40	0,425	18,1	3%	64%	36%
50	0,3	12,1	2%	66%	34%
100	0,15	20	3%	69%	31%
200	0,075	18,9	3%	72%	28%
fondo	-	167,44	28%	100%	0%
Total		601,64			



Masa inicial = 600,6

Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	Porcentaje de finos
4	4,750	8,5	1%	1%	99%
16	1,18	145,4	24%	26%	74%
30	0,6	37,2	6%	32%	68%
40	0,425	10,8	2%	34%	66%
50	0,3	7,5	1%	35%	65%
100	0,15	13,2	2%	37%	63%
200	0,075	14,5	2%	39%	61%
fondo	-	364,7	61%	100%	0%

Total 601,8

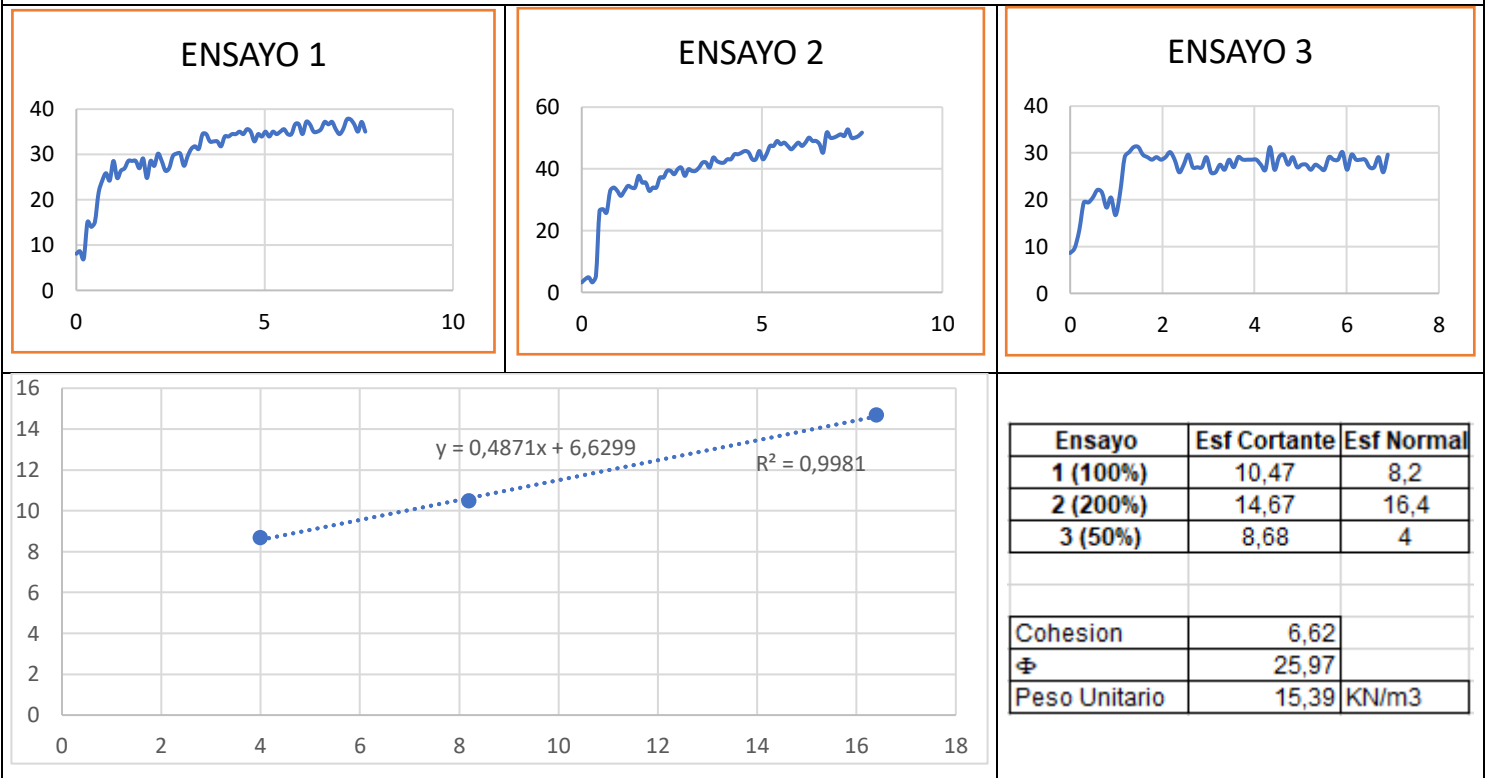


Determinación de Límites de Atterberg para Perfil3_T01				
Límite Líquido (LL)				
N. Ensayo	1	2	3	4
Id del recipiente	7	126	29	118
Masa del recipiente (R) (g)	6,09	6,09	6	6,1
R + suelo húmedo	17,61	16,4	15,19	16,11
R + suelo seco	14,5	13,6	12,7	13,2
Masa del agua	3,11	2,8	2,49	2,91
Masa de suelo seco	8,41	7,51	6,7	7,1
Contenido de humedad	37%	37%	37%	41%
N golpes	36	28	20	16
Límite Plástico (LP)				
N. Ensayo	1	2		
Id del recipiente	10	20		
Masa del recipiente (R) (g)	6,34	6,29	Perfil3_T01	
R + suelo húmedo	13,27	13,52	LL	38
R + suelo seco	12,1	12,3	LP	20
Masa del agua	1,17	1,22	IP	18
Masa de suelo seco	5,76	6,01		
Contenido de humedad	20%	20%		

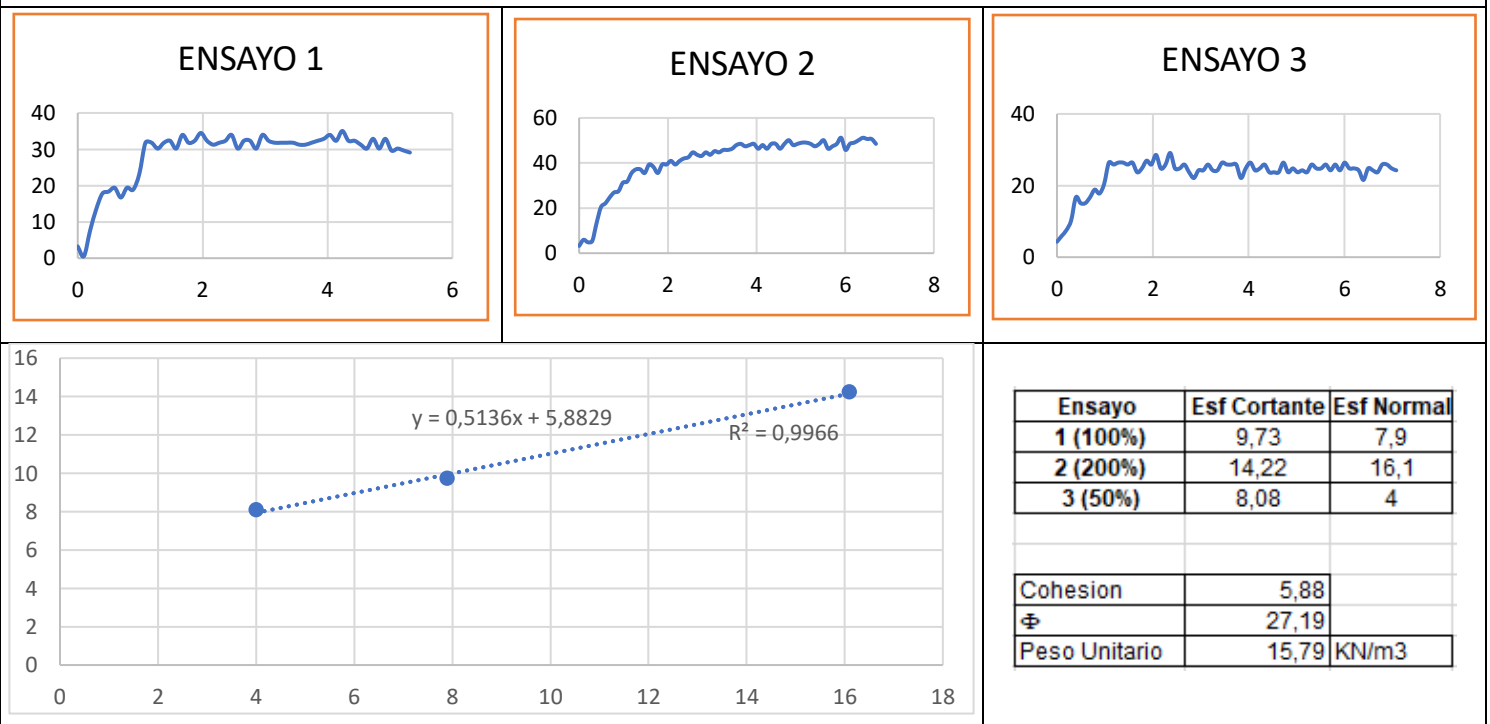
Determinación de Límites de Atterberg para Perfil3_T02				
Límite Líquido (LL)				
N. Ensayo	1	2	3	4
Id del recipiente	67	14	50	33
Masa del recipiente (R) (g)	6,18	6,37	5,78	5,77
R + suelo húmedo	12,88	12,6	12,9	13,9
R + suelo seco	10,9	10,8	10,8	11,4
Masa del agua	1,98	1,8	2,1	2,5
Masa de suelo seco	4,72	4,43	5,02	5,63
Contenido de humedad	42%	41%	42%	44%
N golpes	39	31	25	18
Límite Plástico (LP)				
N. Ensayo	1	2		
Id del recipiente	18	102		
Masa del recipiente (R) (g)	6,38	6,35	Perfil3_T02	
R + suelo húmedo	12,67	12,99	LL	42
R + suelo seco	11,6	11,8	LP	22
Masa del agua	1,07	1,19	IP	20
Masa de suelo seco	5,22	5,45		
Contenido de humedad	21%	22%		

APÉNDICE C: ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Ensayo de Corte Directo Perfil1_T01

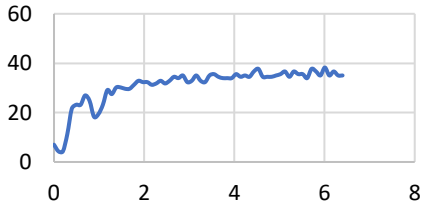


Ensayo de Corte Directo Perfil2_T01

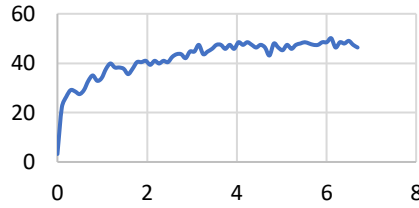


Ensayo de Corte Directo Perfil2_T02

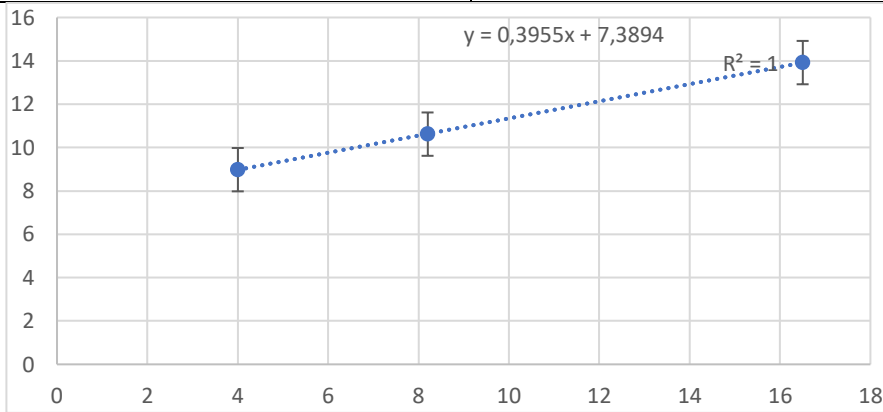
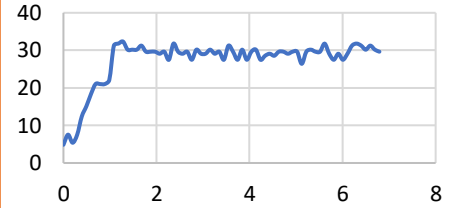
ENSAYO 1



ENSAYO 2



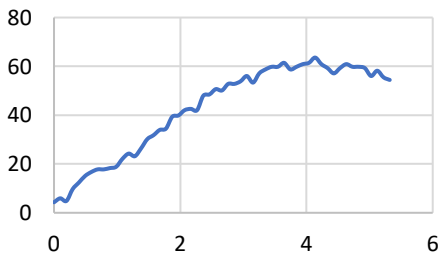
ENSAYO 3



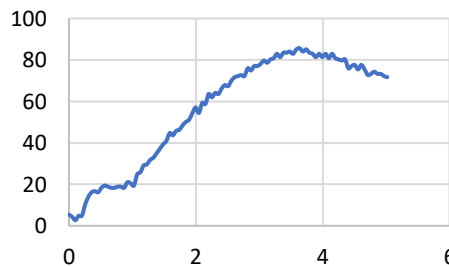
Ensayo	Esf Cortante	Esf Normal
1 (100%)	10,62	8,2
2 (200%)	13,92	16,5
3 (50%)	8,98	4
Cohesion	7,38	
Φ	21,58	
Peso Unitario	15,71	KN/m ³

Ensayo de Corte Directo Perfil3_T01

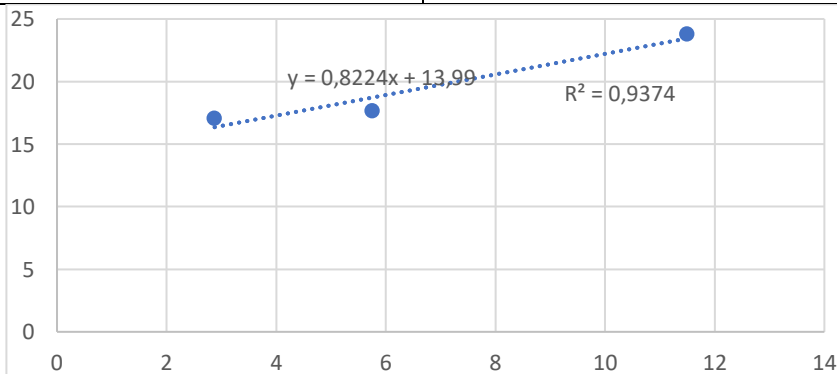
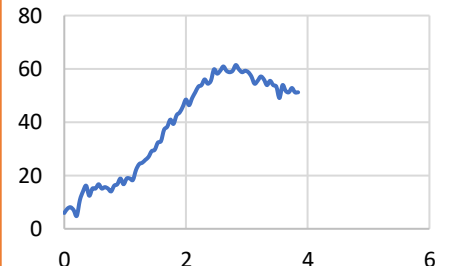
ENSAYO 1



ENSAYO 2



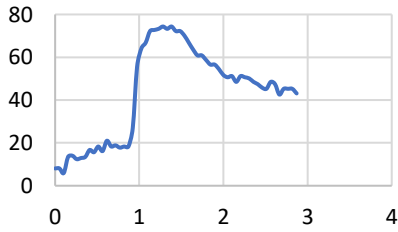
ENSAYO 3



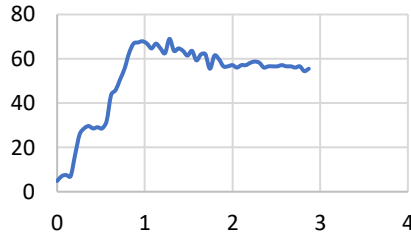
Ensayo	Esf Cortante	Esf Normal
1 (100%)	17,66	5,75
2 (200%)	23,8	11,5
3 (50%)	17,06	2,875
Cohesion	13,99	
Φ	39,43	
Peso Unitario	19,17	KN/m ³

Ensayo de Corte Directo Perfil3_T02

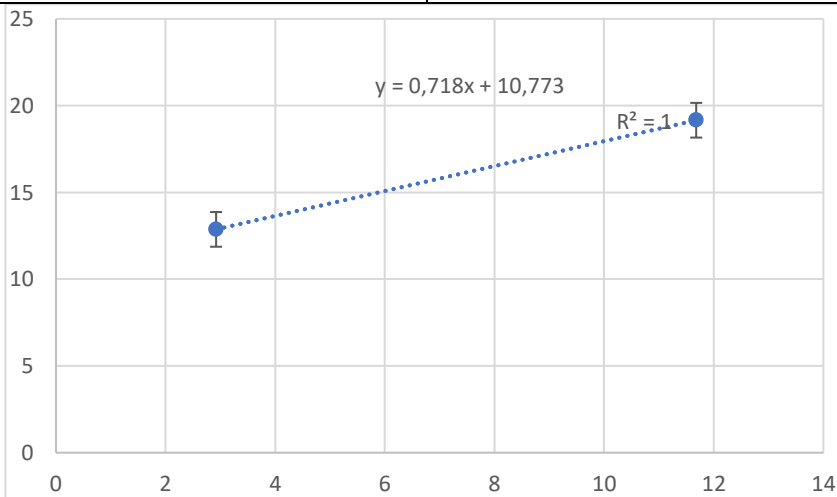
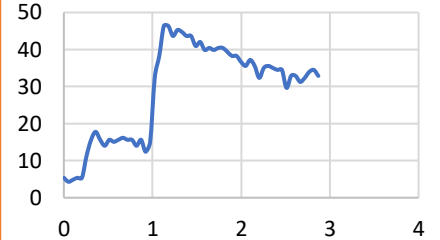
ENSAYO 1



ENSAYO 2



ENSAYO 3



Ensayo	Esf Cortante	Esf Normal
1 (100%)	20,65	5,84
2 (200%)	19,16	11,68
3 (50%)	12,87	2,92

Corrección (Eliminar el 100% y dejar los dos puntos extremos)

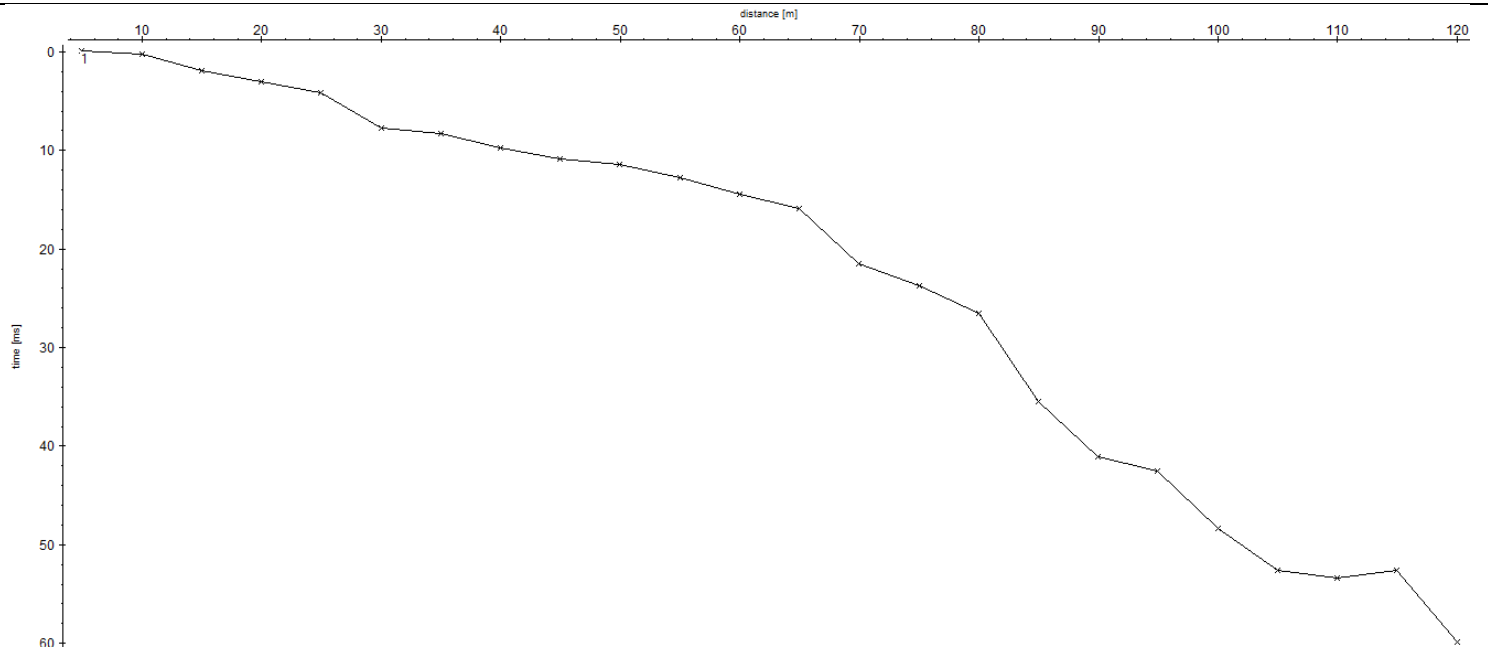
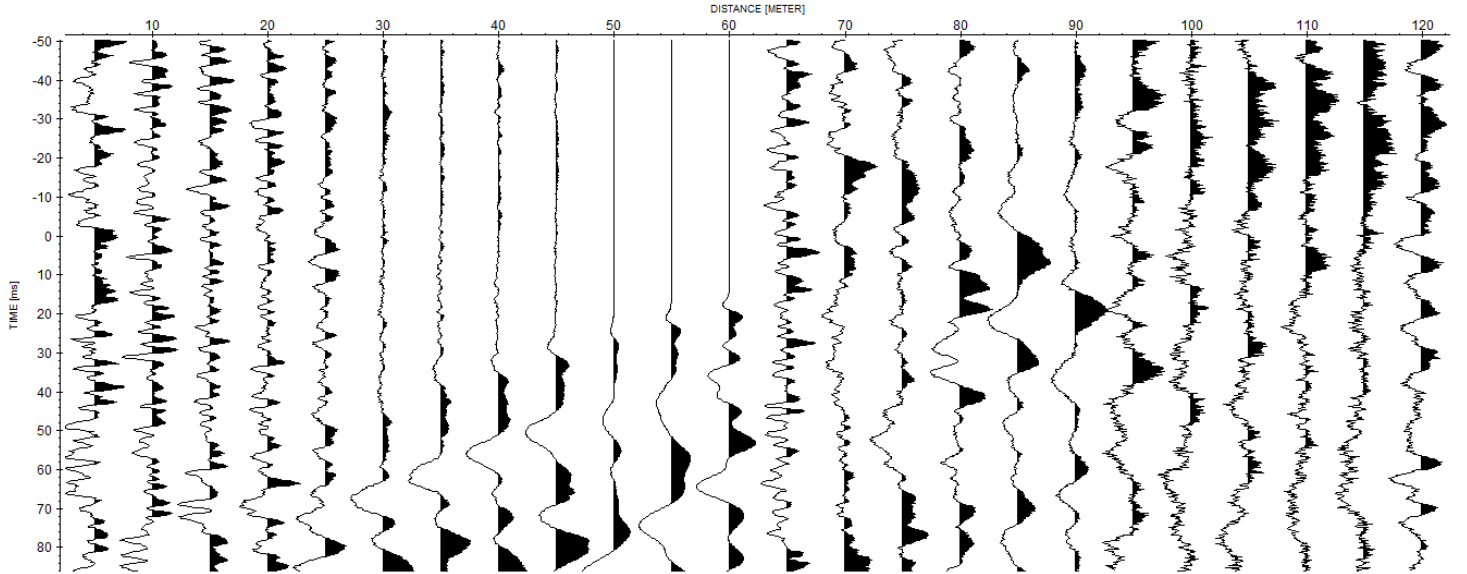
Ensayo	Esf Cortante	Esf Normal
1 (100%)		
2 (200%)	19,16	11,68
3 (50%)	12,87	2,92

Cohesion	10,77
Φ	35,68
Peso Unitario	19,46 kN/m ³

APÉNDICE D: TIEMPOS DE ARRIBO Y DROMOCRONAS

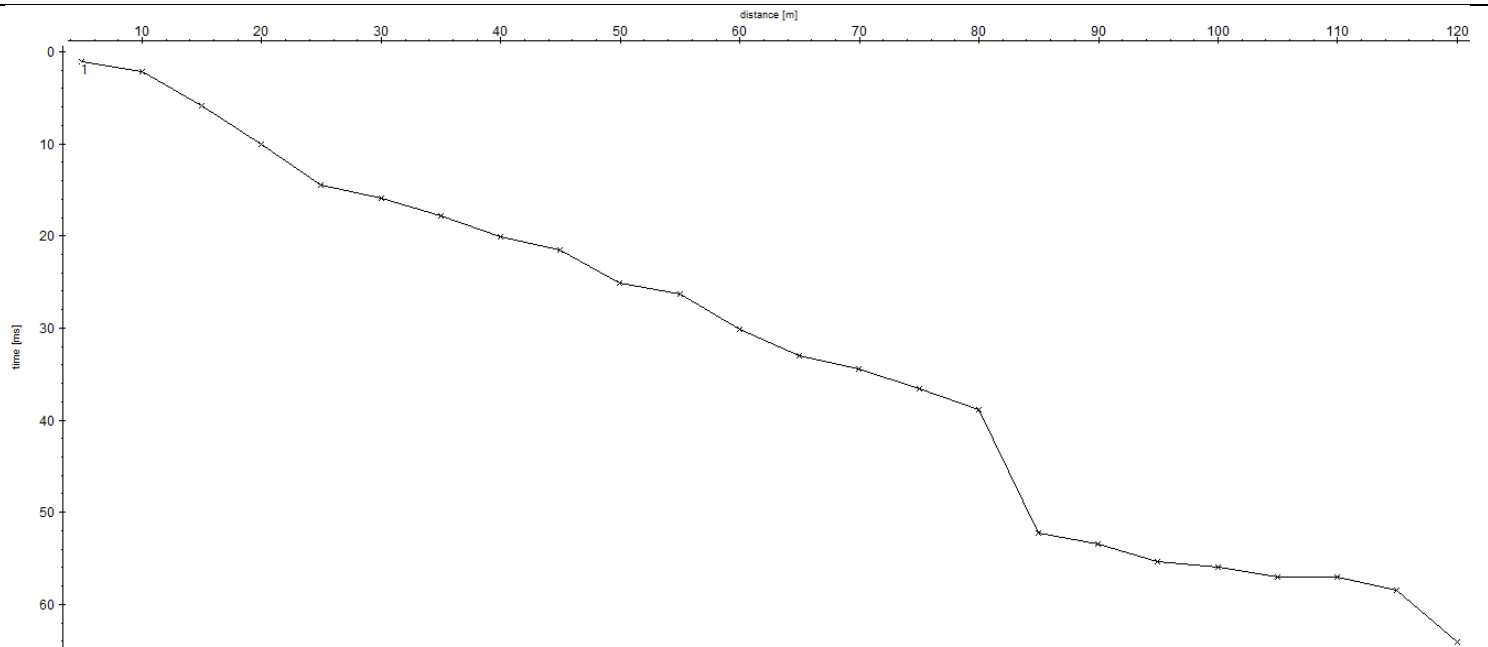
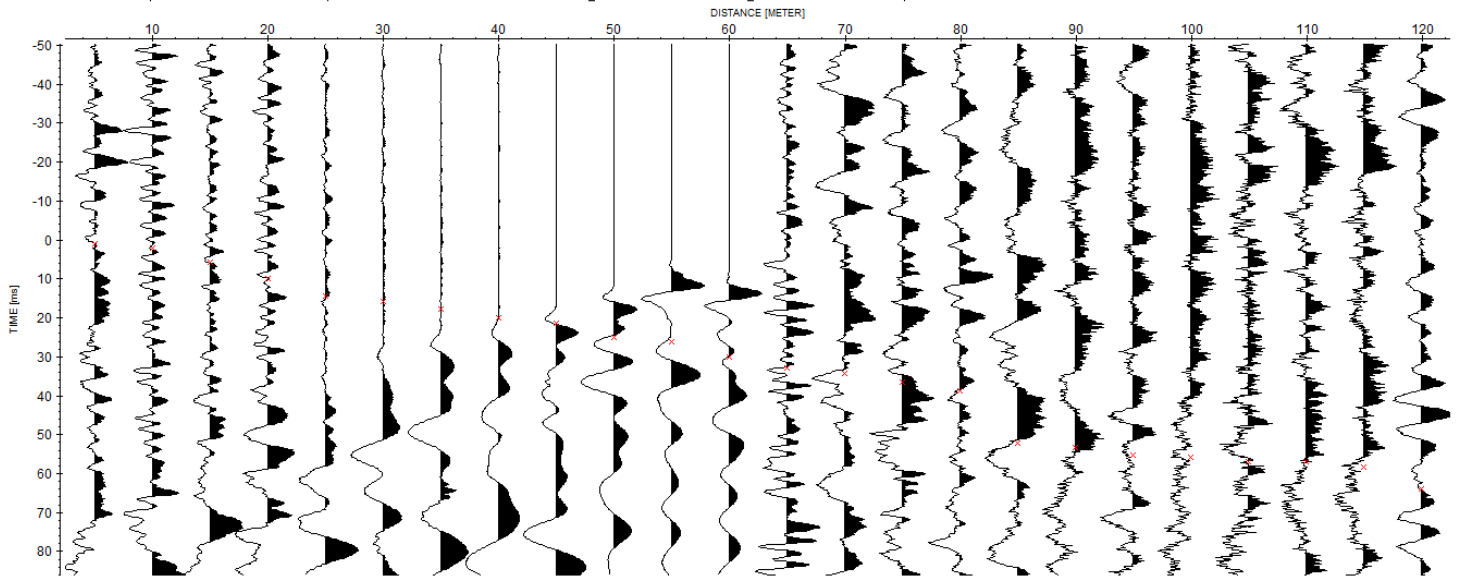
DAT001

1. C:\Users\Lenovo\Desktop\PROYECTO INTEGRADOR\Capitulo IV\Resultados Preliminares\Geofisica\Datos_Sismica\23\ROHDATA\DAT_0001.DAT / traces: 24 / samples: 4096



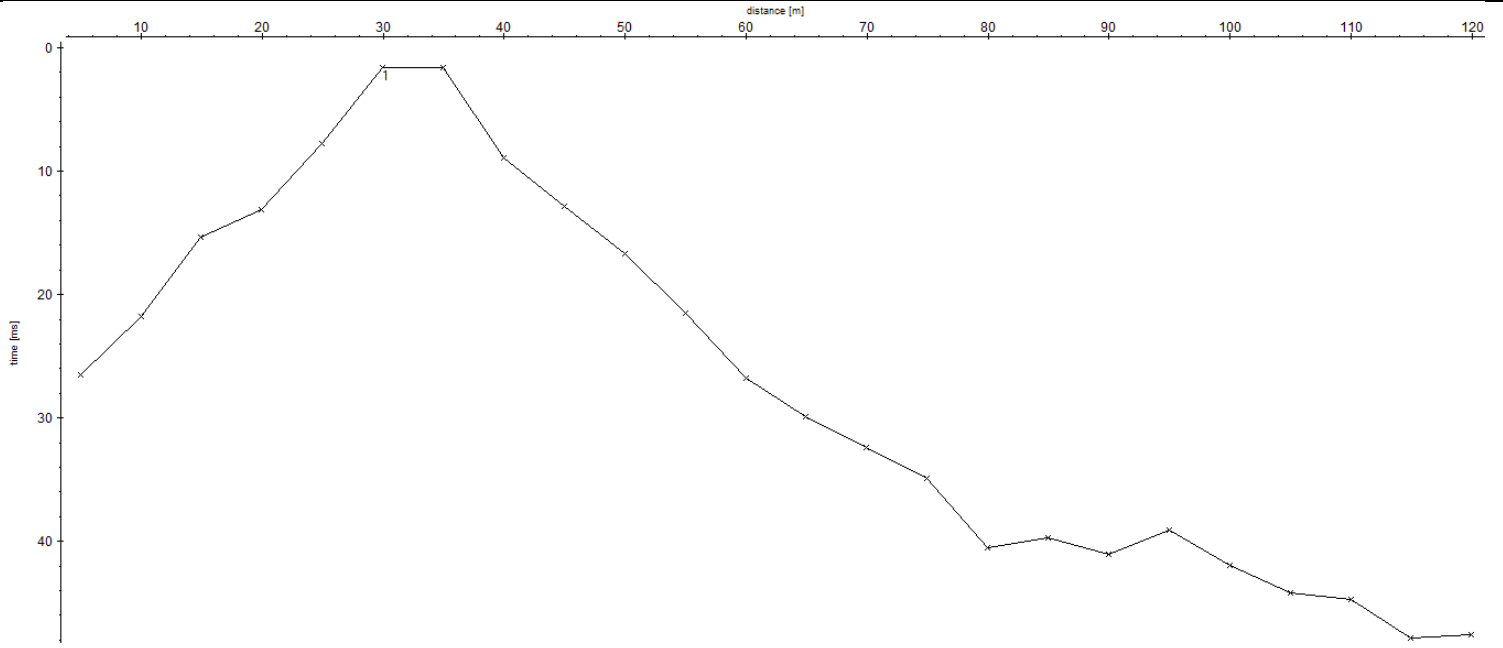
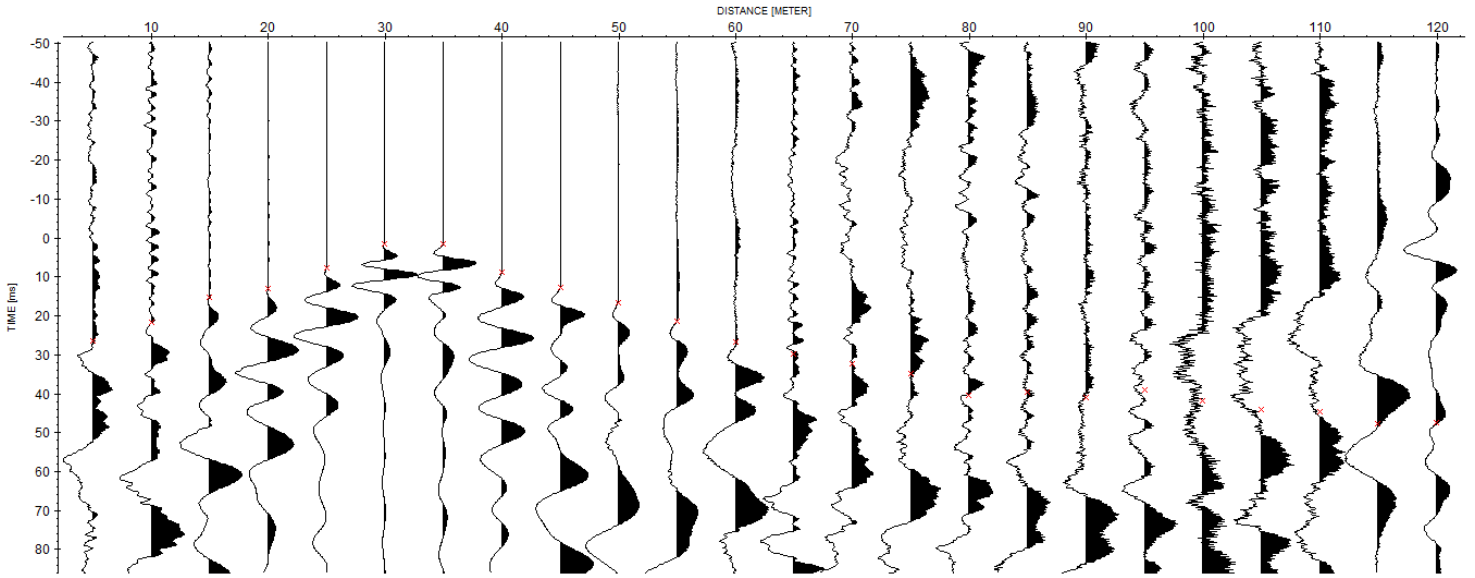
DAT002

1. C:\Users\Lenovo\Desktop\PROYECTO INTEGRADOR\Capítulo IV\Resultados Preliminares\Geofísica\Datos Sísmica\23\ROHDATA\DAT_0002.DAT / traces: 24 / samples: 4096



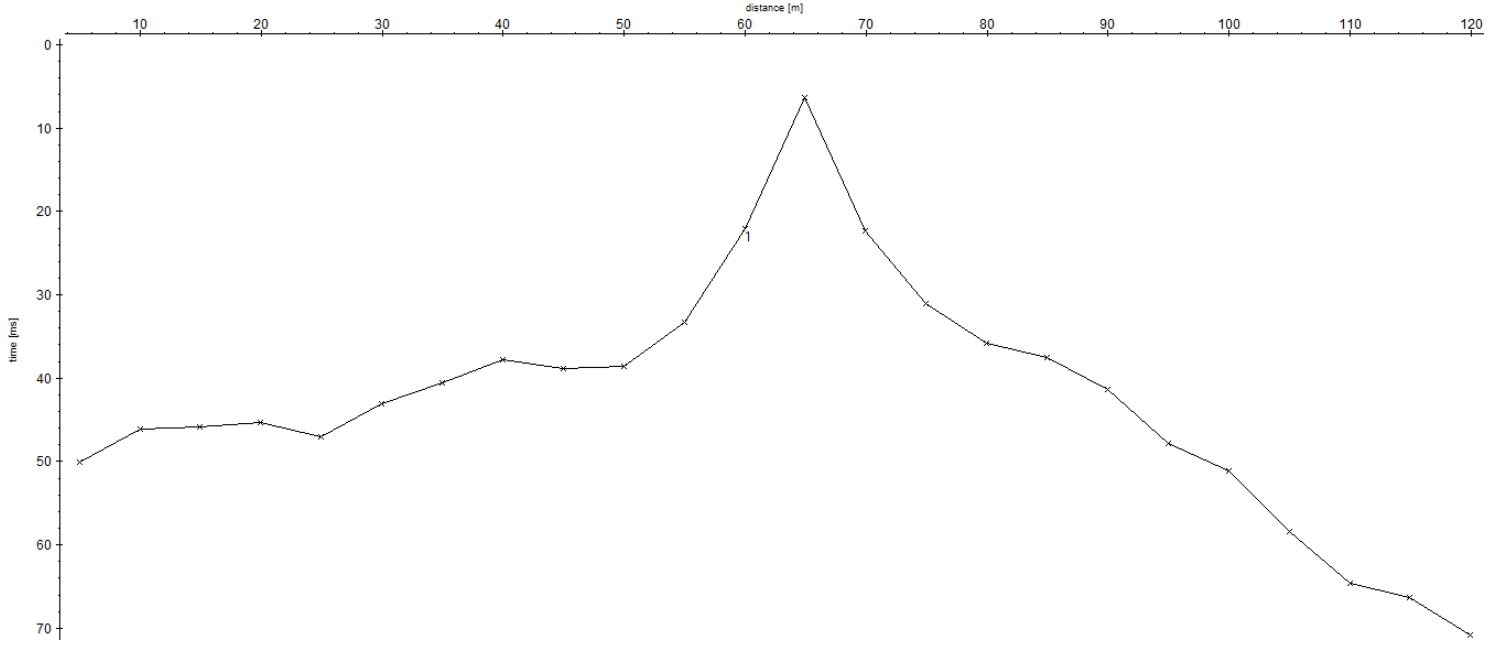
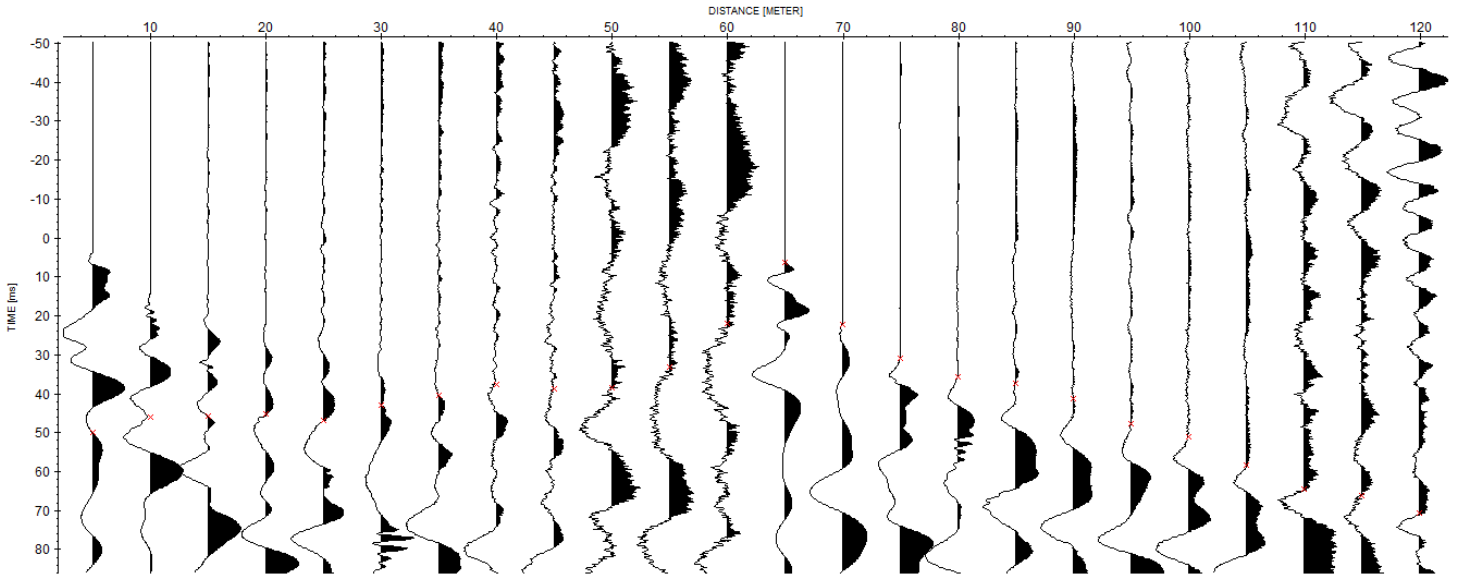
DAT003

1. C:\Users\Lenovo\Desktop\PROYECTO INTEGRADOR\Capitulo IV\Resultados Preliminares\Geofísica\Datos_Sísmica\23\ROHDATA\DAT_0003.DAT / traces: 24 / samples: 4096



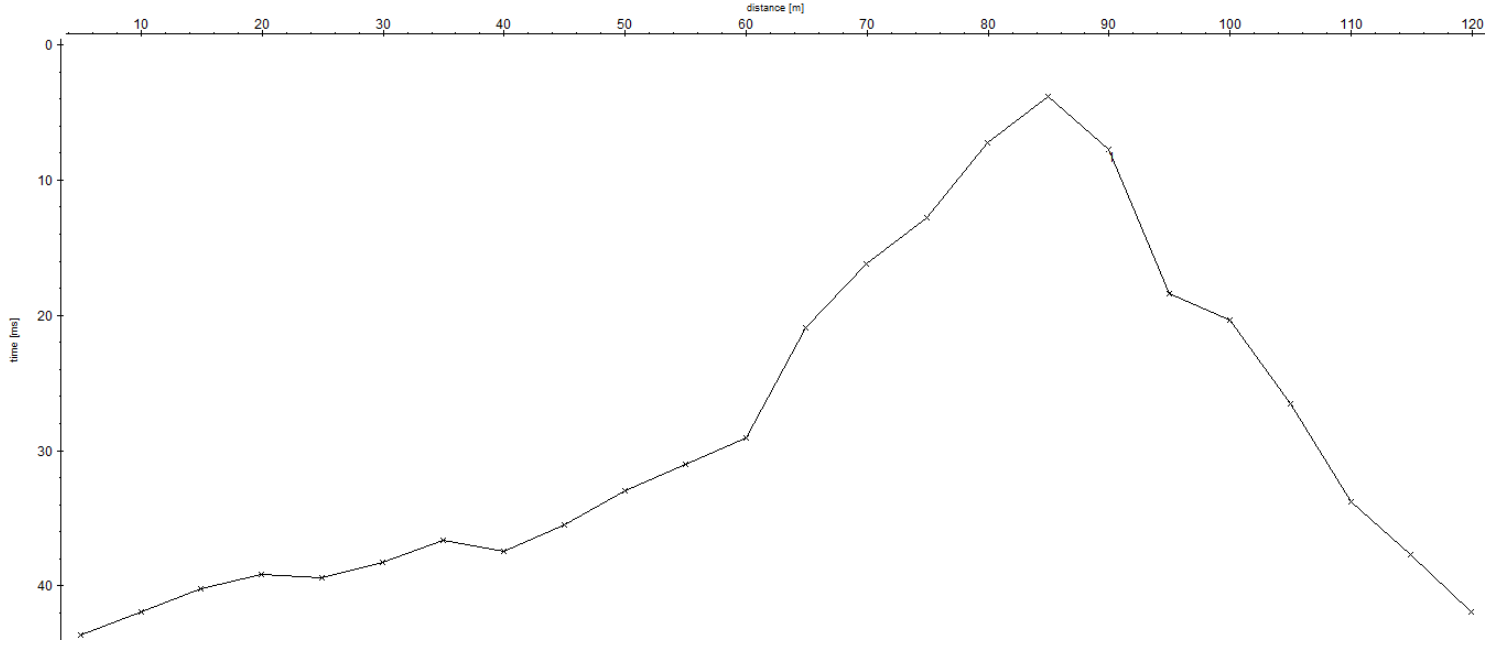
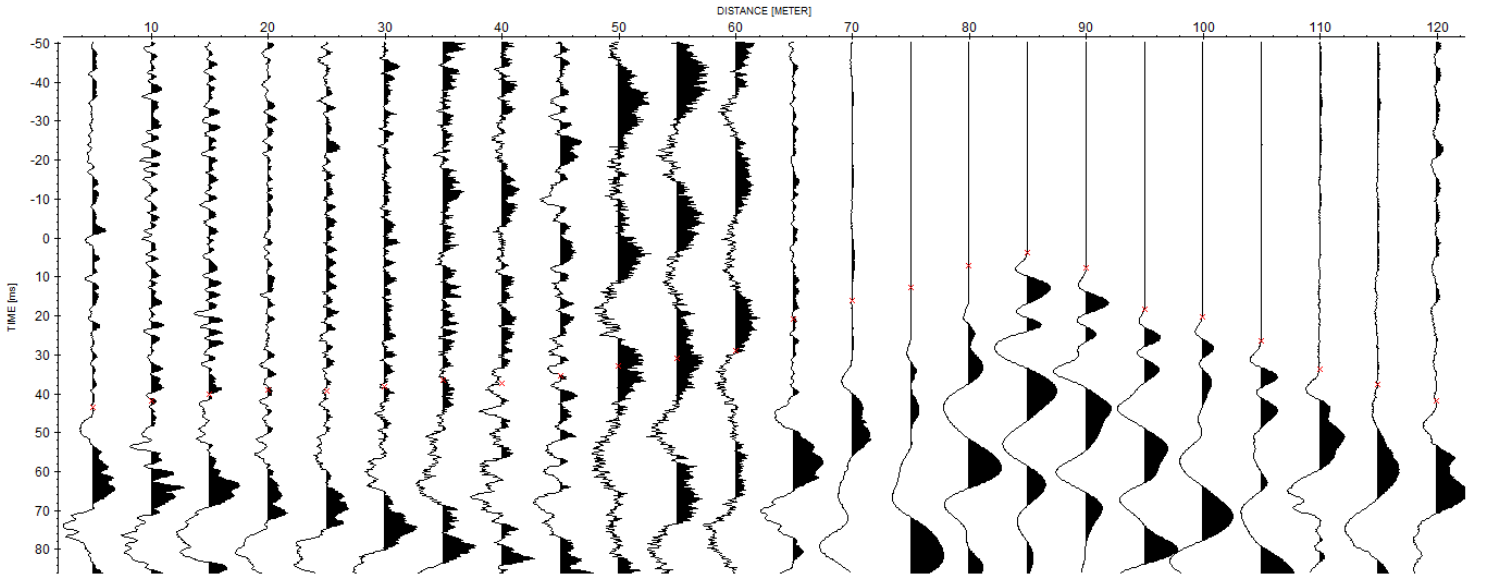
DAT004

1. C:\Users\Lenovo\Desktop\PROYECTO INTEGRADOR\Capítulo IV\Resultados Preliminares\Geofísica\Datos Sísmica\23\ROHDATA\DAT_0004.DAT / traces: 24 / samples: 4096



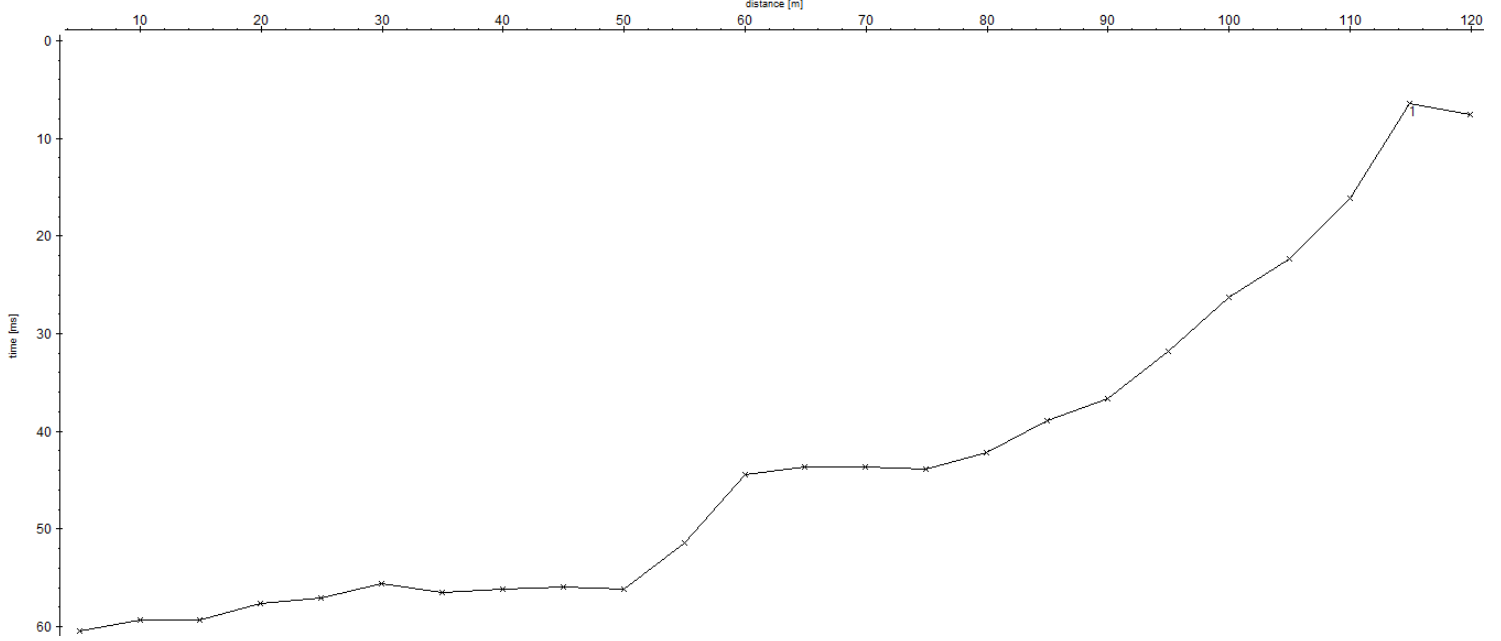
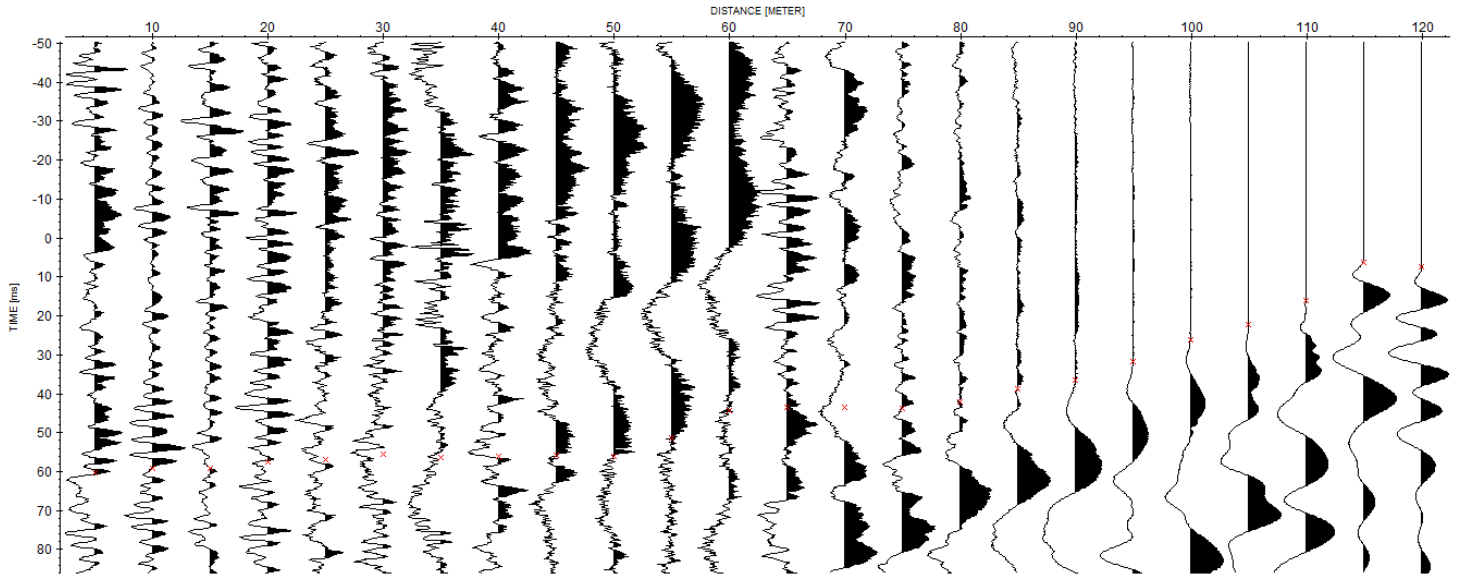
DAT005

1. C:\Users\Lenovo\Desktop\PROYECTO INTEGRADOR\Capitulo IV\Resultados Preliminares\Geofísica\Datos_Sísmica\23\ROHDATA\DAT_0005.DAT / traces: 24 / samples: 4096



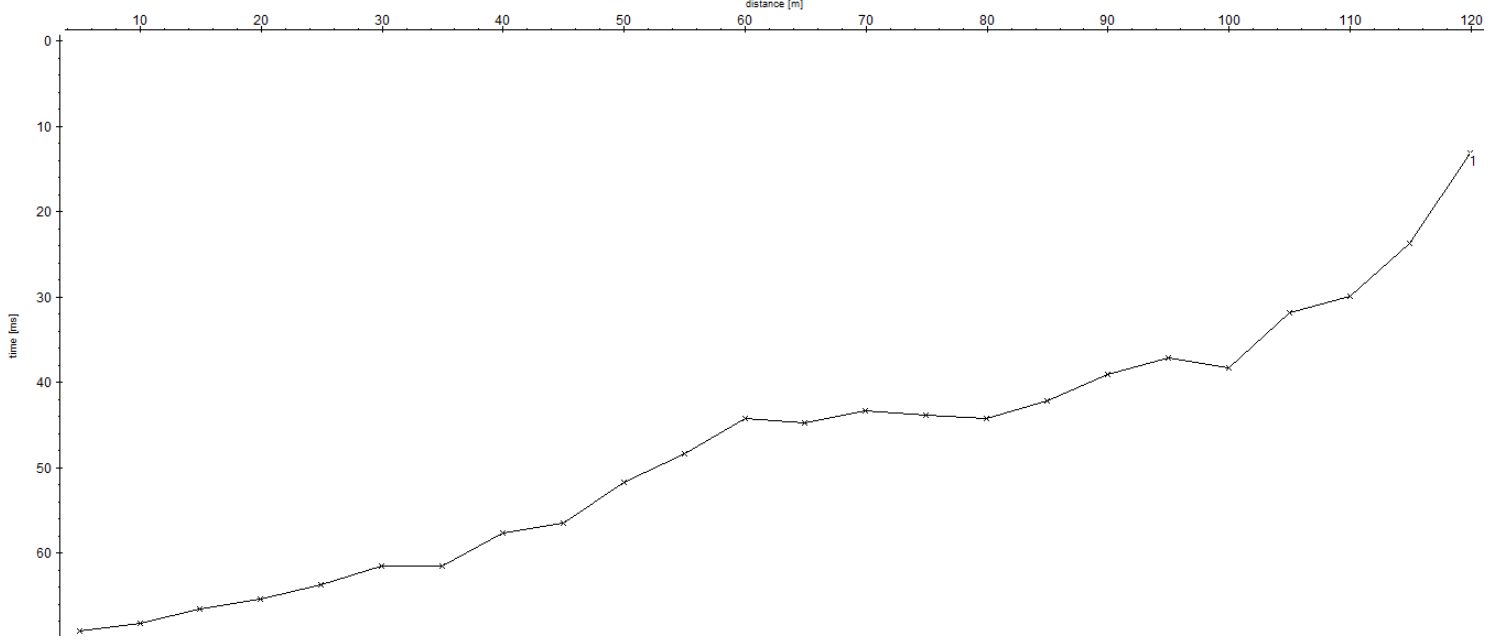
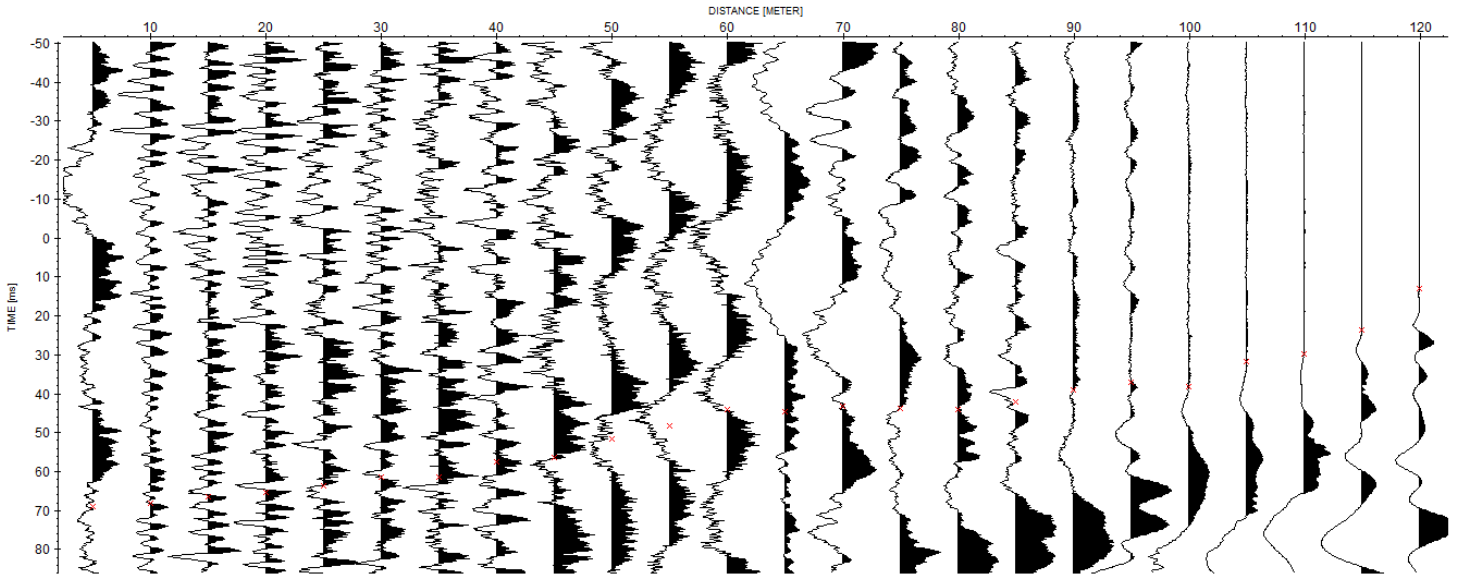
DAT006

1. C:\Users\Lenovo\Desktop\PROYECTO INTEGRADOR\Capítulo IV\Resultados Preliminares\Geofísica\Datos Sísmica\23\ROHDATA\DAT_0006.DAT / traces: 24 / samples: 4096



DAT007

1. C:\Users\Lenovo\Desktop\PROYECTO INTEGRADOR\Capítulo IV\Resultados Preliminares\Geofísica\Datos Sísmica\23\ROHDATA\DAT_0007.DAT / traces: 24 / samples: 4096



APÉNDICE E: RMR TEST TALUD INTERAGUA

Material	Vp (m/s)	Vp (km/s)	RQD	UCS (MPa)
Roca Meteorizada	1962	1,962	44	12
Roca muy fracturada	2617	2,617	59	24
Roca fracturada	3271	3,271	74	41
Roca sana	7195	7,195	165	279

Datos promedio Talud INTERAGUA	
Espaciado	500 mm
Continuidad	10 m
Separación	1 mm
Rugosidad	Rugoso Ondulado
Relleno	Sin Relleno
Meteorización	Muy Meteorizado
Hidrogeología	Sin Presencia de Agua

RMR Roca Meteorizada: 53 - Calidad Media (Clase III)								
Parámetros			Rango de valores					
1	Resistencia del material rocoso intacto	Índice de carga Puntual (Mpa)	>10	4-10	2-4	1-2	Para valores bajos es preferible el ensayo de compresión uniaxial	
		Resistencia a la compresión uniaxial	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5
	Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Designación de calidad de roca (RQD)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25	
	Rating		20	17	13	8	3	
3	Espaciado de discontinuidades		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60mm	
	Rating		20	15	10	8	5	
4	Condición de discontinuidades	Continuidad	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m	
		Rating	6	4	2	1	0	
		Separación	Ninguno	<0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	>5 mm	
		Rating	6	5	4	1	0	
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Slickensided	
		Rating	6	5	3	1	0	
		Relleno		Relleno Duro		Relleno Suave		
			Ninguno	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5mm	
		Rating	6	4	2	2	0	
		Meteorización	Sana	Algo meteorizada	Med. Meteorizada	Muy meteorizada	Completamente meteorizada	
Rating	6	5	3	1	0			
5	Hidrogeología	Flujo en 10 m de longitud de túnel (L/min)	Ninguno	<10	45-931	25-125	>125	
		Condiciones Generales	Sin presencia de agua	Represado	Húmedo	Goteos	Flujo	
	Rating	15	10	7	4	0		