



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio y proyecto de estabilización
de un talud carretero en rocas ígneas
en el Occidente de México**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Yoali Arisbei Antúnez Valenzuela

ASESOR DE INFORME

Dr. Moisés Dávila Serrano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

DEDICATORIA

Agradezco a mis papás, por forjarme, con su guía y exigencia día a día, confiar totalmente en mí, apoyarme en mis decisiones, son mi ejemplo de valentía.

A mis abuelitos, por quererme incondicionalmente, por ustedes he logrado alcanzar mis metas, son mis seguidores y soportes totales.

A mis tíos, Alan, Esperanza y Sandra, porque me demostraron el verdadero amor de familia, nunca me abandonaron, en mis mejores, pero sobre todo en mis peores momentos, los admiro profundamente.

A mi hermano y primos, que me enseñaron el valor de la paciencia y complicidad, siempre velaré por ustedes.

Y especialmente a mi tía Horte, mi ángel de la guardia, que me enseñó, con su ausencia, el verdadero dolor, el valor de la familia, y la fortaleza que uno puede esconder, mi pilar que me acompaña a diario. Mi amor hasta que nos reencontremos.

A la hermosa familia que escogí; Edher, la persona que me hace añorar su presencia más cada día para embellecer cualquier momento, mi lugar favorito; Adri la complicidad más grande que he encontrado en una amiga, no puedo describir la importancia que tiene desde que la conocí; Cid, muchos años de cariño absoluto respaldan esta bonita amistad; Paty, Eric, Mario, Jorge, Jonathan, por hacerme sentir en casa, hacerme reír, enseñarme y abrirme su corazón, mi más sincero cariño.

A todos los antes mencionados y muchos otros que omití involuntariamente, saben lo mucho que significa para mi compartir este logro.

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería, por darme una educación de primera, agradezco profundamente la guía comprometida de todos mis profesores, quienes fueron una fuente de información y conocimiento fundamental durante toda mi formación universitaria.

De forma especial a mis sinodales quedo en deuda, mi más sincera gratitud por todo. Sus enseñanzas, antes y durante este trabajo, marcaron el camino de mi carrera.

Al Dr. Moisés Dávila, por ser un gran ejemplo, por su paciencia, su gran calidad humana, por creer en mí y darme la oportunidad de demostrarlo, le agradezco sinceramente su confianza. Mi admiración, personal y profesional.

Al M.I. Francisco García por su apoyo y enseñanza constante a lo largo de esta oportunidad brindada y por ser la guía en el campo laboral.

Al M.I. Victor Lojero, M.C. Sergio Salinas, Ing. Mario Galván, por su tiempo dedicado en revisar y retroalimentar mi trabajo para concluirlo satisfactoriamente.

CONTENIDO

Contenido.....	4
Objetivo.....	9
Justificación.....	9
Empresa.....	10
Objetivo	10
Misión	10
Puesto	10
1 Introducción.....	11
1.1 Localización	11
Localización	11
Fisiografía	11
1.2 Clima.....	13
1.3 Generalidades del talud	13
1.4 Condiciones actuales y problemática	14
2 Levantamiento topográfico, Video e informe fotográfico del VANT	15
2.1 Levantamiento topográfico	15
Configuración topográfica.....	15
Condiciones topográficas	15
2.2 Vuelo de VANT	16
3 Estudio geofísico.....	17
3.1 Exploración geofísica	17
Tendidos de refracción sísmica.....	17
3.2 Modelo geofísico	17
Procesamiento de la información	17
Unidades geofísicas	19
4 Trabajos de campo y levantamientos geológicos	21
4.1 Marco geológico regional	21
Tectónica	21
Estratigrafía regional	23
4.2 Geología del talud	27
Litología	27
Parámetros geomecánicos.....	32

Geología estructural.....	33
4.3 Identificación cualitativa de elementos potencialmente inestables.....	35
5 Estudio hidrológico e hidráulico.....	38
5.1 Generalidades hidrológicas.....	38
Localización.....	38
Precipitación.....	38
Temperatura.....	39
Evaporación.....	39
5.2 Características hidrológicas.....	40
Periodo de retorno.....	40
Características de la precipitación.....	40
5.3 Áreas de escurrimiento.....	41
5.4 Cálculo de gastos.....	43
Tiempo de concentración.....	43
Método racional.....	43
Revisión hidráulica de las obras de drenaje.....	44
6 Geotecnia.....	47
6.1 Exploración geotécnica.....	47
Clasificaciones geomecánicas.....	47
Sismicidad.....	47
6.2 Pruebas de laboratorio.....	48
6.3 Modelo geotécnico.....	48
6.4 Análisis geotécnico.....	50
Retroanálisis y calibración de parámetros geomecánicos.....	50
Análisis de estabilidad.....	53
6.5 Recomendaciones y conclusiones geotécnicas.....	57
Propuesta 1: Doble abatimiento. 0.5:1 (H:V) (53°) y 0.75:1 (H:V) (63°).....	57
Propuesta 2: Abatimiento. 1:1 (H:V) (53°).....	57
Propuesta 3: Berma de 5 m de ancho. 0.5:1 (H:V) (53°).....	57
Resumen de las propuestas.....	58
Tabla comparativa.....	59
Conclusiones.....	60

7	Referencias	61
8	ANEXOS	62
8.1	FOTOGRAFÍAS CON VANT (VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO)	63
8.2	ESTUDIO GEOFÍSICO	71
8.3	TRABAJOS DE CAMPO Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS	81
8.4	GEOTECNIA	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Ubicación del sitio en estudio. (Elaborado con datos de INEGI, 2018).	11
Figura 1.2	Fisiografía al sur del estado de Nayarit. (Elaborado con datos de INEGI, 2018).	12
Figura 1.3	Unidades climáticas en el estado de Nayarit. (Elaborado con datos de INEGI, 2009).	13
Figura 2.1	Planta topográfica.....	15
Figura 2.2	Perfil topográfico por la línea de ceros.....	16
Figura 3.1	Esquema del concepto de refracción sísmica (Cruz Jiménez, 2013).	17
Figura 3.2	Ubicación de tendidos de refracción sísmica.	19
Figura 3.3	Sección geofísica del tendido de refracción sísmica TRS-1 y TRS-2.....	19
Figura 4.1	Mapa tectónico.	21
Figura 4.2	Marco tectónico del Bloque de Jalisco.....	22
Figura 4.3	Geología regional.	25
Figura 4.4	Columna estratigráfica.....	26
Figura 4.5	Perfil geológico por la línea de ceros.....	32
Figura 4.6	Concentración estadística de polos.	33
Figura 4.7	Estereograma con familias principales.	34
Figura 4.8	Resultados generales de análisis estereográficos.	34
Figura 4.9	Resultados de análisis estereográfico discretizado.....	35
Figura 4.10	Distribución de elementos potencialmente inestables.....	35
Figura 5.1	Distribución mensual de la precipitación. Estación “San Marcos”.	38
Figura 5.2	Distribución mensual de temperatura. Estación “San Marcos”.	39
Figura 5.3	Distribución mensual de la evaporación. Estación “San Marcos”.	40
Figura 5.4	Curvas de Intensidad-Duración-Periodo de Retorno.....	40
Figura 5.5	Área de escurrimiento-microcuenca	41
Figura 5.6	Área de escurrimiento-talud.....	42
Figura 5.7	Área de escurrimiento-calzada.	42
Figura 5.8	Geometría de la cuneta	44
Figura 5.9	Geometría de la contracuneta.	45
Figura 5.10	Geometría del lavadero.	46
Figura 6.1	Espectro de diseño sísmico. $C_s=0.17$	47
Figura 6.2	Perfil geológico-geotécnico por la línea de ceros.....	48
Figura 6.3	Resultados retroanálisis para falla rotacional - Sección 0+200. Software Slide.	52
Figura 6.4	Perspectiva gráfica de la geometría de la falla en cuña. Software Swedge.	54
Figura 6.5	Perspectiva gráfica de la geometría de la falla plana. Software RocPlane.....	55
Figura 6.6	Factores de seguridad para falla rotacional – Sección 0+060. Software Slide.	56

LISTA DE FOTOS

Foto 1.1 Vista general del talud en estudio.....	14
Foto 2.1 Mosaico fotográfico del talud en estudio.....	16
Foto 3.1 Colocación del cable sísmico	18
Foto 3.2 Acción del golpe a la placa para generar un pequeño sismo y así registrar el sismograma del punto de tiro.....	18
Foto 4.1 Muestras de la litología en el talud.	28
Foto 4.2 Pórfido andesítico intensamente meteorizado.	28
Foto 4.3 Pórfido andesítico intensamente meteorizado.	29
Foto 4.4 Oxidación formada en las fracturas.	29
Foto 4.5 Pórfido andesítico meteorizado.	30
Foto 4.6 Pórfido andesítico.....	30
Foto 4.7 Pórfido andesítico.....	31
Foto 4.8 Toma de datos estructurales.	31
Foto 4.9. Prueba con esclerómetro sobre el pórfido andesítico.	32
Foto 4.10 Grieta de tensión presente en la corona del talud.....	36
Foto 4.11 Bloques de pórfido andesítico susceptible a caída o vuelcos.	36
Foto 4.12 Falla alrededor del km 0+200.	37

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Unidades geosísmicas.....	20
Tabla 4.1 Resistencia a la compresión simple por unidades.	32
Tabla 5.1 Distribución mensual de la precipitación.....	38
Tabla 5.2 Distribución mensual de temperatura.....	39
Tabla 5.3 Distribución mensual de la evaporación.....	39
Tabla 5.4 Áreas de escurrimiento.	42
Tabla 5.5 Gastos obtenidos [m ³ /s].....	43
Tabla 5.6 Capacidad hidráulica de la cuneta.	44
Tabla 5.7 Capacidad hidráulica de la contracuneta.	45
Tabla 5.8 Capacidad hidráulica del lavadero.	46
Tabla 6.1 Clasificaciones geomecánicas.	47
Tabla 6.2 Peso volumétrico natural por unidad.....	48
Tabla 6.3 Correlación entre unidades Geológicas – Geosísmicas – Geotécnicas.	49
Tabla 6.4 Condiciones generales del talud.	50
Tabla 6.5 Resultados retroanálisis para falla estructural.....	51
Tabla 6.6 Resultados retroanálisis para falla rotacional.....	52
Tabla 6.7 Factores de seguridad mínimo para cada condición en el talud.....	53
Tabla 6.8 Factores de seguridad para falla estructural.	55
Tabla 6.9 Factores de seguridad para falla rotacional.	56
Tabla 6.10 Factor de seguridad con doble abatimiento. Software Slide. Método Bishop.	57
Tabla 6.11 Factor de seguridad con abatimiento. Software Slide. Método Bishop.....	57
Tabla 6.12 Factor de seguridad con implementación de berma. Software Slide. Método Bishop.	57
Tabla 6.13 Tabla resumen de factores de seguridad de tipo de falla rotacional. Método Bishop.	58
Tabla 6.14 Tabla resumen de factores de seguridad de tipo de falla estructural.	58
Tabla 6.15 Tabla comparativa de tratamientos.....	59

OBJETIVO

El objetivo principal de un estudio de estabilidad de taludes es el de establecer las medidas de prevención y control para reducir el nivel de peligro. Esto se logra en primera instancia a través de modelo geológico – geotécnico, en el cual se describen las principales características del macizo rocoso, evaluando con ello los diferentes mecanismos de falla que gobiernan al talud, así como la influencia de factores ambientales, hidrológicos, entre otros.

Por otra parte, la recomendación de estabilización debe ser adecuada y funcional para la autopista, con un factor de seguridad que garantice la seguridad de los usuarios y la durabilidad de la vía, así como rentable económicamente.

Fundamentado en lo anterior, se presenta un estudio geológico - geotécnico de un talud carretero en donde se establece el comportamiento, sus propiedades geomecánicas y mecanismos potenciales de falla. Se identifican las condiciones de estabilidad, para proponer una recomendación de tratamiento de estabilización adecuada.

JUSTIFICACIÓN

Los taludes son obras frecuentes en la ingeniería civil y la minería. Los principales objetivos en sus proyectos son buscar la seguridad de las personas, bienes e infraestructuras, aplicar de manera correcta los principios de las ciencias de la tierra para identificar los mayores riesgos, así como caracterizar y predecir comportamientos de los macizos rocosos y por consiguiente cumplir con los estándares de calidad, presupuestos y factores de seguridad pertinentes.

Al trabajar con un macizo rocoso con características, propiedades y comportamiento cambiante, controlado por numerosos factores y condiciones que interactúan de manera simultánea, hace que cada caso con el que nos enfrentemos sea distinto. Toda esta heterogeneidad en los macizos conlleva un reto para la ingeniería, por lo que cada talud debe estudiarse de manera individual.

Existen múltiples casos de taludes mal construidos que han costado la vida de usuarios y trabajadores. Estos accidentes reflejan la urgencia de medidas preventivas ante desastres de esta índole con el fin de salvaguardar la integridad de la sociedad.

EMPRESA

Tecnología y Sistemas S.A. fue creada en 1980 con el fin de buscar soluciones a problemas ingenieriles y de construcción. Sus instalaciones cuentan con oficinas, equipo de cómputo con softwares especializados, laboratorio de resistencia de materiales, equipo de investigación, así como de exploración de campo

Objetivo

El objetivo de la empresa es la prestación de servicios de consultoría técnica y administrativa, así como la realización de estudios de ingeniería básica y proyectos ejecutivos para obras hidráulicas, electromecánicas, eléctricas, de saneamiento y supervisión de obras. También se especializa en el desarrollo de tecnología, así como de equipos especiales e investigación aplicada a problemas específicos.

Misión

Por su parte, la misión de la empresa es otorgar al estado y particulares tanto mexicanos como del extranjero las obras de infraestructura que les permitan aprovechar mejor sus recursos, mediante la prestación de servicios de consultoría de alta calidad en la planeación, estudios, diseño, supervisión y auditoría de los proyectos de dichas obras.

Puesto

En la empresa Tecnología y Sistemas S.A., con sede en Ciudad de México, desempeñé el puesto de **Pasante de Ingeniería Geológica** en el Departamento de Geología y Geotecnia, de junio 2020 a septiembre 2022, en el cual realizaba las actividades enlistadas a continuación:

- Investigación y trabajos preliminares
- Recopilación y análisis de información previa
- Levantamiento geológico-geotécnico en campo
- Conformación del modelo geológicos-geofísicos-geotécnicos
- Análisis de estabilidad de taludes
- Integración del proyecto de estabilización (informe y planos)
- Coordinación de entrega de proyectos entre proyectista y concesionaria
- Generación de estimaciones

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Localización

Localización

El talud en estudio se localiza en la Sierra de Vallejo, al sur del estado de Nayarit, en el Municipio de Bahía de Banderas, cercano a los poblados de Lo de Marcos y San Francisco. La Figura 1.1 es ilustrativa, ya que por acuerdos de confidencialidad la ubicación exacta se conserva reservada.

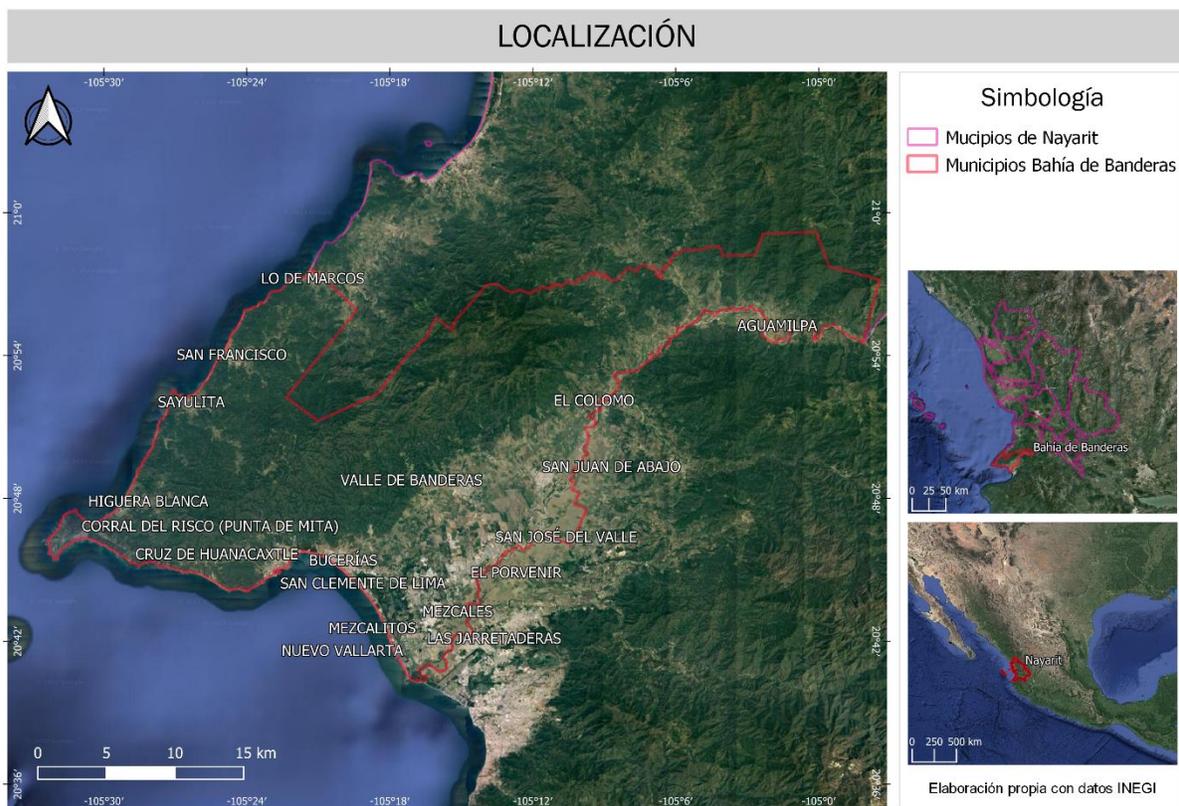


Figura 1.1 Ubicación del sitio en estudio.
(Elaborado con datos de INEGI, 2018).

Fisiografía

El área de estudio se encuentra en la parte norte de la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre del Sur, subprovincia Sierra de la Costa de Jalisco y Colima. En la Figura 1.2 se muestra su distribución.

La Sierra Madre del Sur se extiende aproximadamente 1200 km, desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec al oriente de Oaxaca. Esta provincia limita al norte con la del Eje Neovolcánico, al este con la Llanura Costera del Golfo Sur, las Sierras de Chiapas y la Llanura Costera Centroamericana del Pacífico, y al sur con el Océano Pacífico (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018).

Las rocas volcánicas y plutónicas terciarias de la Sierra Madre del Sur constituyen una amplia provincia magmática cuya actividad precedió en tiempo a la de la Faja Volcánica Transmexicana y cuyo registro se extiende de manera amplia al sur de ésta. La provincia magmática de la Sierra Madre del Sur se desarrolló en un periodo caracterizado por cambios significativos en la geometría e interacciones cinemáticas de las placas que forman el entorno tectónico del sur de México, así como en las condiciones dinámicas de la deformación de la corteza en esta región. Su basamento está conformado por rocas del Paleozoico y Precámbrico (Morán Zenteno, 2000).

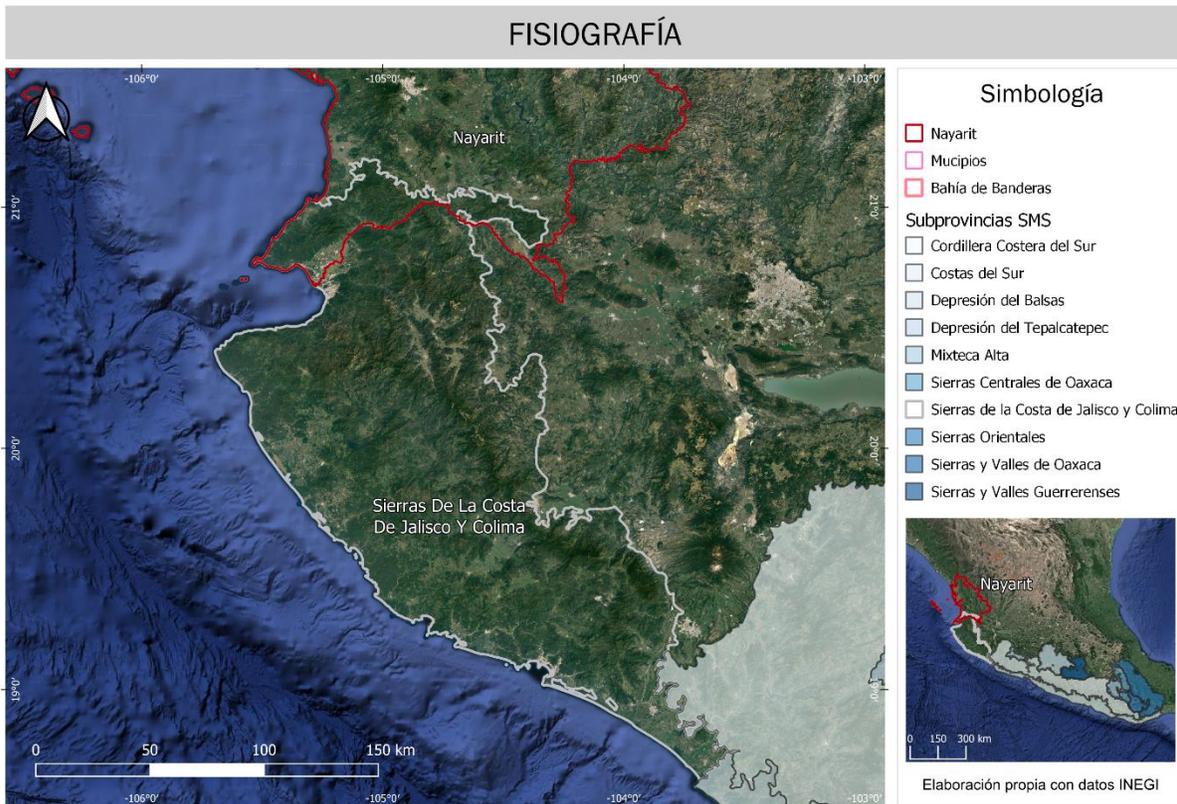


Figura 1.2 Fisiografía al sur del estado de Nayarit. (Elaborado con datos de INEGI, 2018).

1.2 Clima

La mayor parte del estado presenta clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, el clima templado subhúmedo se presenta en las sierras, el seco y semiseco se presenta hacia el sur del estado (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009b). En la Figura 1.3 se observan las unidades climáticas del estado de Nayarit.

La temperatura media es de 25°C, durante el mes de enero se presenta la temperatura mínima promedio de 12°C y las máximas se presentan en mayo y junio, siendo de 35°C. La temporada de lluvias se presenta del mes de mayo a septiembre. La precipitación media del estado es de 1,100 mm anuales, con un rango de entre 780 a 2,000 mm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009a).

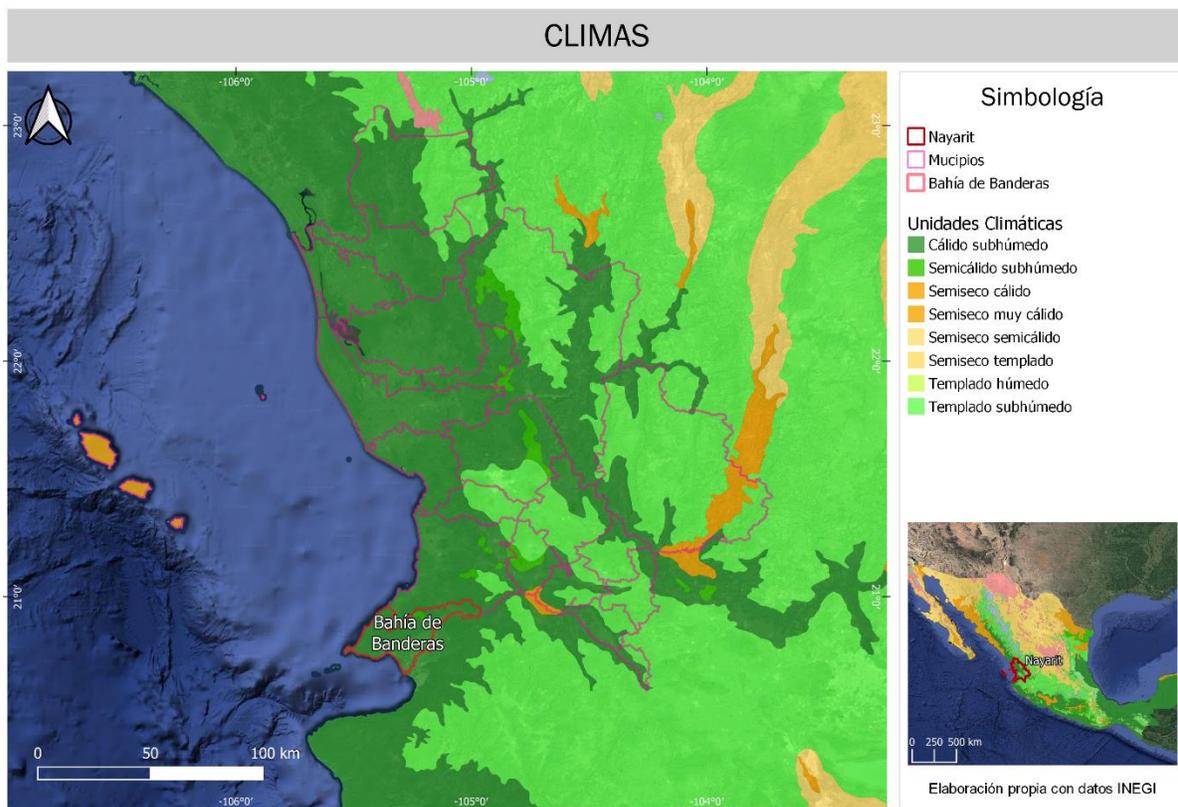


Figura 1.3 Unidades climáticas en el estado de Nayarit. (Elaborado con datos de INEGI,2009).

1.3 Generalidades del talud

El corte en estudio se encuentra localizado en Municipio de Bahía de Balderas, en el estado de Nayarit, en un tramo semirecto, lado izquierdo, de la autopista. Presenta una altura máxima de 26.5 m, longitud de 260 m e inclinación de 53°, excavado en su totalidad.

El corte se encuentra excavado en un cuerpo de pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo con diferentes grados de meteorización y alteración hidrotermal, le sobreyace una capa de suelo residual. En la Foto 1.1 se observa una vista general del talud.



Foto 1.1 Vista general del talud en estudio.

1.4 Condiciones actuales y problemática

El talud en estudio lo encontré excavado en su totalidad con 53° de inclinación como única pendiente. Al momento de hacer el recorrido, no presentaba ninguna obra hidráulica, de estabilización o de control de erosión.

En la parte inicial del talud, en dirección del cadenamiento, se encuentra un antiguo camino de acceso a una propiedad privada.

No observé escurrimientos notables a lo largo de la cara del talud, sin embargo, durante el seguimiento se reportaron brotes de agua a lo largo del talud.

Presenta grietas de tensión en la corona de una distancia de aproximadamente 2 m de la línea de ceros y con una profundidad aproximada de 0.5 m, así como un caído en la parte final del talud, ocurrido en temporada de lluvia.

Se encuentra próximo a su construcción de obras hidráulicas, así como un subdrenaje planteado previamente como proyecto.

2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO, VIDEO E INFORME FOTOGRÁFICO DEL VANT

2.1 Levantamiento topográfico

Configuración topográfica

La topografía del sitio con la que trabajé fue obtenida por medio de Restitución Fotogramétrica a lo largo del trazo de la Autopista. Me encargué de adecuar el Plano TP-1 de planta, perfil y el Plano TP-2 de secciones de proyecto a cada 20 m, mediante el uso de los softwares AutoCad y CivilCad con el fin de plasmar los resultados obtenidos de este estudio. Por acuerdos de confidencialidad los cadenamientos fueron modificados.

Condiciones topográficas

El corte en estudio se encuentra localizado en un tramo semirecto de la autopista

- Altura máxima: 26.5 m (km 0+160)
- Longitud: 260 m
- Inclinación de proyecto: 0.75H:1V equivalente a 53°

El derecho de vía inicial se ubicará a una distancia aproximada de 5 m detrás de los cerros del corte.

En la Figura 2.1 y Figura 2.2 se observa la planta y perfil topográfico obtenido por la Restitución Fotogramétrica, adicionalmente se puede encontrar el Plano Topográfico a escala en el apartado de anexos.

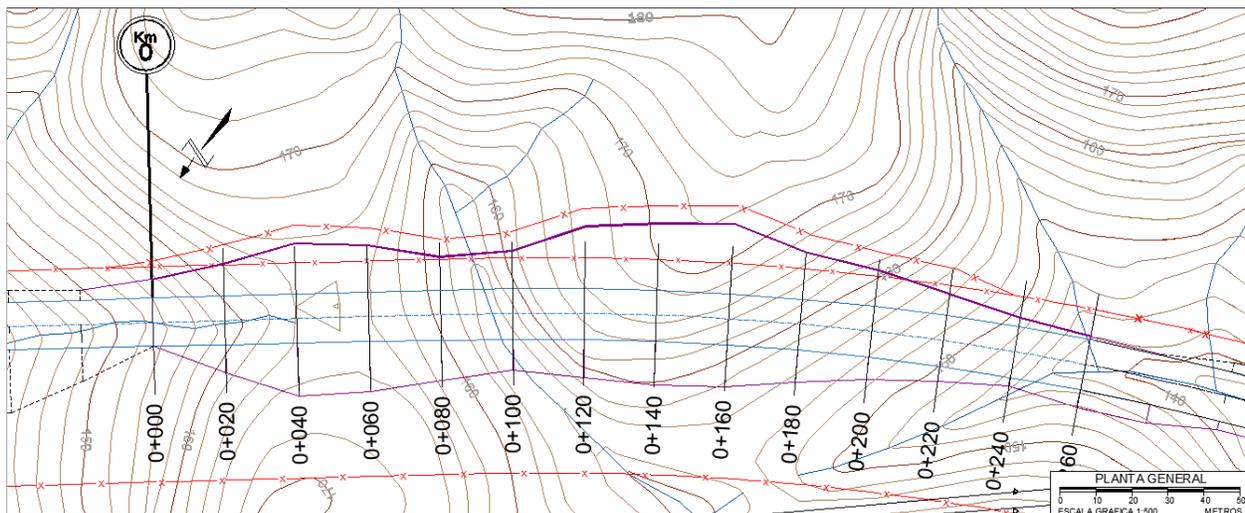


Figura 2.1 Planta topográfica.

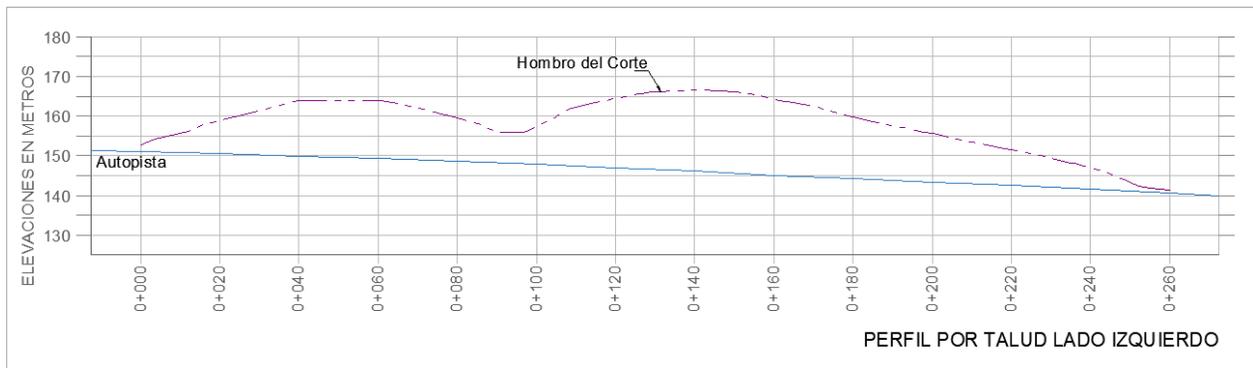


Figura 2.2 Perfil topográfico por la línea de ceros.

2.2 Vuelo de VANT

Planeé un vuelo con VANT (vehículo aéreo no tripulado) Marca DJI modelo Phantom 4 V2.0, a lo largo del corte en el cual configuré la toma del video y fotografías de acuerdo con las condiciones del terreno. Las tomas programadas fueron las siguientes: frontal, cenital, ortogonal y panorámico.

El mosaico fotográfico (Foto 2.1) se observa a continuación, las fotografías más representativas se encuentran en el apartado de anexos 8.1.



Foto 2.1 Mosaico fotográfico del talud en estudio.

3 ESTUDIO GEOFÍSICO

3.1 Exploración geofísica

Tendidos de refracción sísmica

Revisé la exploración geofísica a partir de la técnica de refracción sísmica (TRS). El método sísmico se basa principalmente en observar la velocidad con la que se propagan las vibraciones en los diferentes horizontes refractores del subsuelo (SEHEDIS, 2019).

La técnica básica de la exploración sísmica consiste en medir el tiempo que de las ondas sísmicas generadas bajo control requieren para viajar de la fuente (punto de tiro PT) a una serie de geófonos dispuestos sobre la superficie, a lo largo de una línea recta. Lo anterior se esquematiza en la Figura 3.1 (Cruz Jiménez, 2013).

A partir de la fuente original se forma un frente de onda que se propaga en todas direcciones, alejándose del punto de impacto en forma casi radial en medios homogéneos e isótropos, sin embargo, cuando se presentan estratos subyacentes de características diferentes, la velocidad de propagación sufre un cambio con respecto a la primera capa. Basado en esto y en el marco geológico de referencia, es posible establecer un modelo estratigráfico deduciendo las fronteras entre estratos y las velocidades de propagación (Pérez Escobar, 2017).

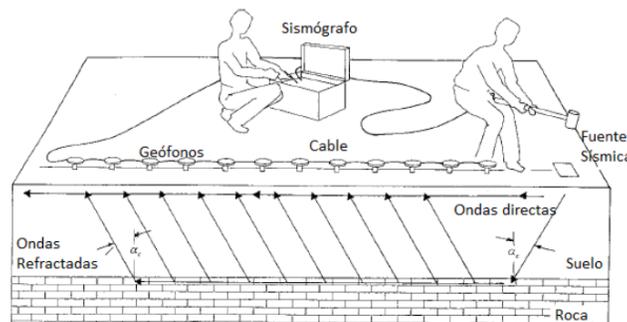


Figura 3.1 Esquema del concepto de refracción sísmica (Cruz Jiménez, 2013).

3.2 Modelo geofísico

Procesamiento de la información

Utilicé dos tendidos de refracción sísmica (TRS) para distinguir la distribución de las unidades geofísicas; ambas líneas se realizaron de forma vertical en la corona del corte y de 60 m de longitud. Se alcanzó una profundidad de prospección variable de 15 a 30 m, se obtuvo la velocidad de transmisión de onda longitudinal en cada uno de los paquetes estratigráficos del subsuelo, referencia indirecta para evaluar la compacidad de los materiales, se definió en forma aproximada las posibles fronteras entre suelos sueltos y compactos, roca alterada y roca no alterada.

Para la ejecución de los tendidos, se utilizó como receptor un sismógrafo marca Geometrics ES-3000 y geófonos de 28 Hz como detectores. Para generar las ondas sísmicas se empleó un marro metálico, el cual golpea sobre una placa metálica colocada sobre el terreno natural (PT), las ondas son detectadas por los geófonos y registradas en el sismógrafo (Foto 3.1 y Foto 3.2).

En el apartado de anexos 8.2 presento los sismogramas y dromocrónicas de los tendidos de refracción sísmica obtenidos.



Foto 3.1 Colocación del cable sísmico



Foto 3.2 Acción del golpe a la placa para generar un pequeño sismo y así registrar el sismograma del punto de tiro.

Unidades geofísicas

Con la información obtenida en campo relacioné los diferentes materiales del subsuelo, como resultado los perfiles de integración se encuentran en el Plano Geológico-Geotécnico (Plano GL/GT), las cuales definí con base en el análisis de rangos de velocidad y su distribución en el talud. El plano presentado lo elaboré mediante los softwares AutoCAD y CivilCad, en este presento la distribución de los tendidos, ubicación de los puntos de tiro (PT) extremos y los perfiles geosísmicos, como se observa en la Figura 3.2 y Figura 3.3.

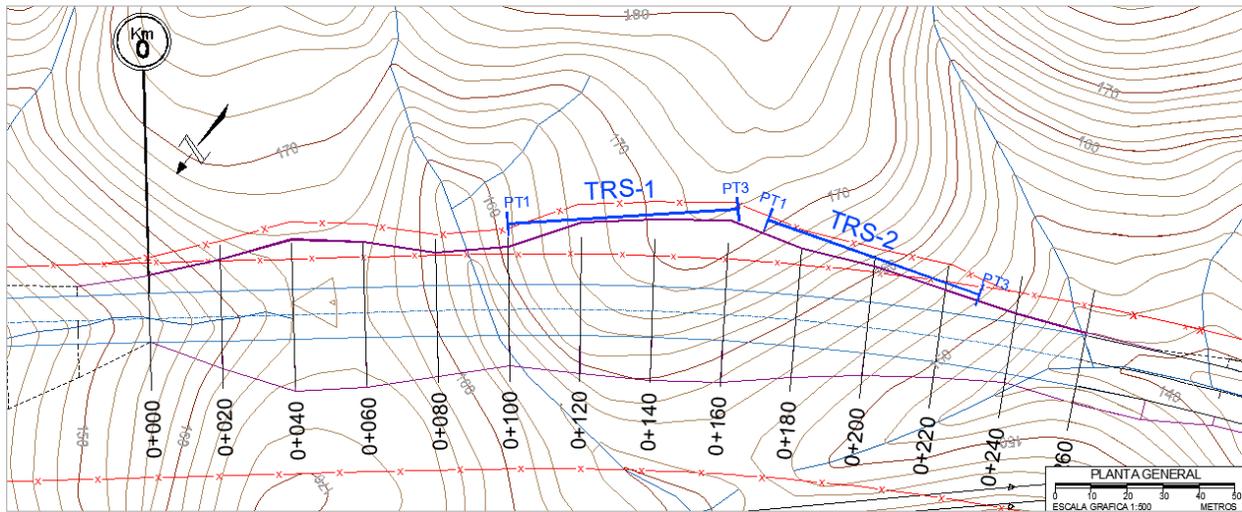


Figura 3.2 Ubicación de tendidos de refracción sísmica.

Las secciones geofísicas obtenidas son las siguientes:

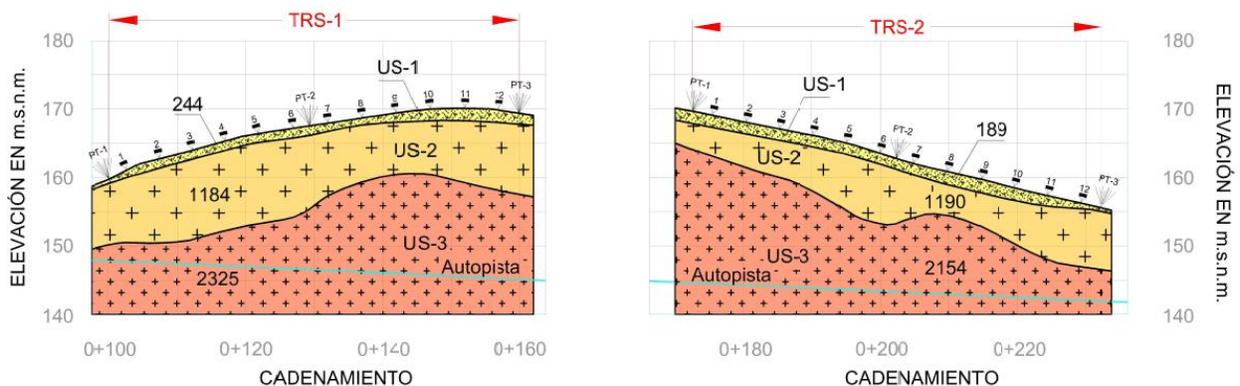


Figura 3.3 Sección geofísica del tendido de refracción sísmica TRS-1 y TRS-2.

Cabe recalcar que las secciones geofísicas las obtuve a partir de topografía directa actualizada, la cual por acuerdos de confidencialidad se mantiene reservada.

El procesamiento, análisis e interpretación de los sismogramas obtenidos en campo en esta zona permitió diferenciar tres principales unidades geosísmicas, con sus correspondientes intervalos de valores de velocidad y espesores, los cuales se indican en Tabla 3.1; estas velocidades se asociaron con las diferentes características de compacidad de los materiales del subsuelo presentes en el área de estudio.

Unidad Geosísmica	Velocidad Sísmica [m/s]	Descripción del Material	Correlación con litología
US-1	189-244	Suelos y roca alterada.	Suelo Residual. (<i>Su</i>) Pórfido andesítico intensamente meteorizado. (<i>PA int</i>)
US-2	1184-1190	Roca fracturada.	Pórfido andesítico meteorizado. (<i>PA met</i>)
US-3	2154-2325	Roca no meteorizada.	Pórfido andesítico. (<i>PA</i>)

Tabla 3.1 Unidades geosísmicas.

4 TRABAJOS DE CAMPO Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS

4.1 Marco geológico regional

Tectónica

El área en estudio se localiza en el Bloque Jalisco, al sur de la boca del Mar de Cortés y separado por la zona de fracturas de Tamayo se encuentra la placa de Rivera. Esta se genera en uno de los segmentos de la dorsal del Pacífico Oriental y subduce, en su porción sureste, en la trinchera Mesoamericana, bajo la estructura del Bloque de Jalisco y que incluye territorios de los estados de Jalisco, Colima, Nayarit y parte de Michoacán. En su borde suroeste la placa de Rivera está separada de la placa del Pacífico por la zona de fractura de Rivera. En la parte oriental de esta zona de fractura se encuentra el límite de placas entre Rivera y Cocos (Núñez Cornú, 2011). El ambiente tectónico de la zona de estudio se representa en la Figura 4.1 y Figura 4.2.



*Figura 4.1 Mapa tectónico.
(Elaborado con datos de INEGI, 2018).*

El Bloque de Jalisco, tiene una edad mesozoica y el basamento es de origen plutónico, que se formó en un ambiente geotectónico de raíz de arco. El Bloque de Jalisco se encuentra delimitado hacia el Oeste por la trinchera Meso-Americana, hacia el Este por el rift de Colima y hacia el norte por la zona de rift Tepic-Zacalco. Este rift incluye un arco volcánico calci-alcantino activo, el cual es el límite hacia el sur del vulcanismo silícico de la Sierra Madre Occidental. En la zona se tienen dos sistemas principales de fallas (de 35°-45°) que presentan un salto de aproximadamente 600 m, así como un complejo de cuerpos intrusivos conocido como el batolito de Puerto Vallarta (Fernández de la Vega-Márquez & Prol-Ledesma, 2011).

El batolito está formado por cuerpos de dioritas, granitos y tonalitas, los cuales presentan edades de 85 Ma. Las estructuras presentes nos definen lo que se conoce como el graben de Puerto Vallarta. Las estructuras volcánicas más comunes en esta región son mesetas, flujos de lava en fisuras y volcanes monogenéticos. Estas estructuras presentan edades de entre 11.2 y 8.7 Ma y se concentran al noreste del cinturón volcánico más reciente, que presenta edades un poco menores de 11 a 8.5 Ma y de 9.6 a 8.1 Ma (Fernández de la Vega-Márquez & Prol-Ledesma, 2011).

Las rocas de esta región se encuentran fracturadas, alteradas y deformadas por movimientos tectónicos regionales. La deformación dúctil se presenta en rocas vulcanosedimentarias y sedimentarias clásticas con desarrollo de esquistosidad, estructuras sigmoidales alargadas y plegamiento isoclinal; la deformación frágil está representada por un sistema de fallamiento con dirección NW-SE y NE, desplazado por fracturamiento conjugado NW-SE y NE-SW, también se presenta un fracturamiento secundario casi norte-sur (Rodríguez Castañeda & Rodríguez Torres, 2019).

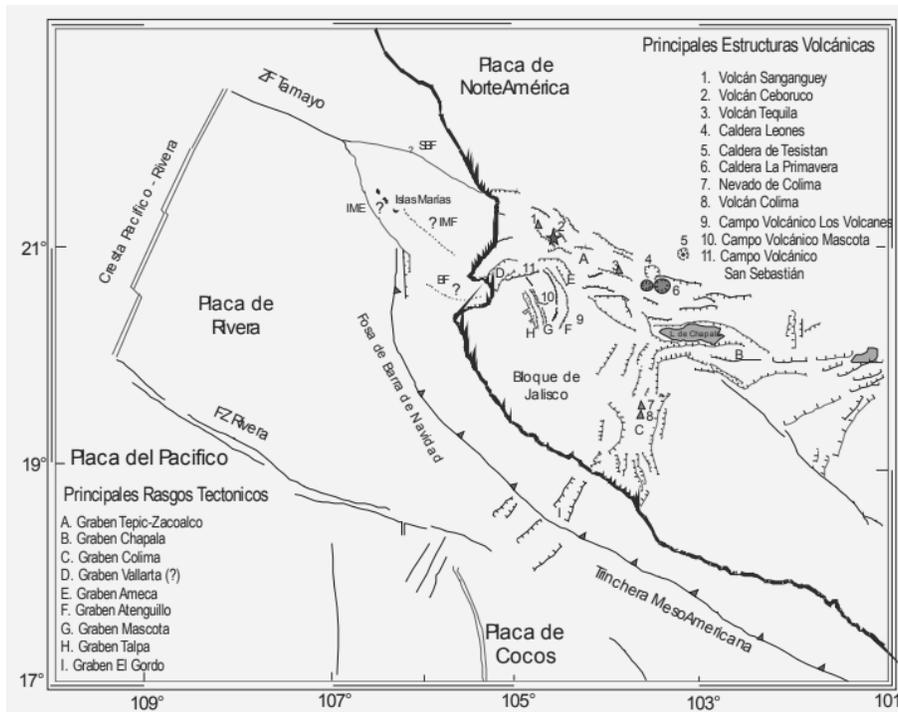


Figura 4.2 Marco tectónico del Bloque de Jalisco.

Tomado de Núñez Cornú (2011).

Estratigrafía regional

En la zona afloran rocas con edades del Mesozoico hasta el Reciente, cuya distribución se indica en el mapa geológico regional mostrado en la Figura 4.3 y en la columna estratigráfica regional de la Figura 4.4. Las unidades Geológicas Regionales se describen a continuación.

Unidad más antigua corresponde a la secuencia vulcanosedimentaria, del Jurásico Titoniano-Cretácico Albiano, se encuentra conformada por horizontes de areniscas calcáreas, lutita, lutita apizarrada, calizas, horizontes tobáceos, conglomerado polimíctico y flujos de andesitas. La secuencia presenta un fuerte plegamiento y fracturamiento y es afectada por metamorfismo regional de bajo grado (Servicio Geológico Mexicano, 2001).

El Batolito de Puerto Vallarta cuenta con una amplia distribución, principalmente presenta granodiorita – granito, con diferentes grados de intemperismo. Con una edad de emplazamiento de 100-90 Ma, es decir, Cretácico Superior y es correlacionable con los intrusivos de los Bloques de Jalisco y los Cabos (Servicio Geológico Mexicano, 2001). El cuerpo intrusivo afectó con piro-metamorfismo de contacto la base de las rocas sedimentarias y por las fallas de las fosas tectónicas (graben) en un ambiente tectónico extensivo, se inició la erupción de material fluido de las rocas volcánicas félsicas de la Sierra Madre del Sur. En la parte superior de este Batolito se encuentran bloques y xenolitos arrastrados de las rocas Paleozoicas (Rodríguez Castañeda & Rodríguez Torres, 2019).

El Mioceno se caracteriza por un vulcanismo intermedio a máfico, asociado con la apertura del Golfo de California; representado por emisiones de basalto con un espesor considerado de 50 a 200 m (Servicio Geológico Mexicano, 2001).

Finalmente, en el Cuaternario-Holoceno se tienen depósitos no consolidados, conformados de limo-arena y litoral, producto del intemperismo de las rocas preexistentes (Servicio Geológico Mexicano, 2001).

En la zona de la Sierra de Vallejo, donde se encuentra el trazo de la autopista afloran las siguientes litologías:

- Suelos residuales o alóctonos.
- Rocas volcánicas máficas que forman parte de Eje Neovolcánico Mexicano de la época Terciario Superior al reciente.
- Rocas volcánicas félsicas del terciario inferior al Terciario medio que pueden corresponder al Grupo Sierra Madre Superior y que actualmente se reportan en las publicaciones como rocas volcánicas de la Sierra Madre del Sur.
- Rocas sedimentarias del Cretácico medio constituidas por areniscas, lutitas y conglomerados en su base y calizas en su parte superior.
- Rocas ígneas intrusivas correspondientes al batolito de Puerto Vallarta que tiene una edad del Cretácico superior al Terciario Inferior.

- Las rocas intrusivas son principalmente dioritas y en menor porcentaje, granodioritas y afloramientos escasos de granito. Estas rocas intrusionaron a las rocas sedimentarias y produjeron una orla de alteración de grado bajo, por piro-metamorfismo que las metamorfoseó convirtiéndolas en pizarras y meta-areniscas con un espesor de 30 a 50 m, en contacto con las rocas intrusivas.
- Las rocas metamórficas de grado medio a alto del tipo gneis y filitas en esta zona se observan con un contenido muy alto de mica del tipo biotita, como grado distintivo. Estas rocas pueden corresponder a una alteración del tipo horfelns o ser bloques acarreados de rocas metamórficas de alto grado de edades Paleozoicas. Estas rocas se encuentran con mineralización diseminada de pirita.
- Existen numerosas vetas de cuarzo que cortan a las rocas intrusivas y a las rocas sedimentarias de la orla de alteración y que corresponden a la última etapa de la formación de las rocas intrusivas. No cortan las rocas volcánicas félsicas.
- Existen diques de doleritas que es una roca félsica que corta a toda la columna de rocas y que fueron formados durante el terciario superior y corresponden a las formaciones del Eje Neovolcánico.

Alteraciones posteriores al depósito y que afectan a las unidades litológicas de la zona en estudio:

- Las rocas intrusivas y metamórficas tienen propiedades mecánicas pobres y se encuentran con alteración del tipo argilitización con minerales de bajo grado de alteración. Esto corresponde a una orla de alteración del tipo geotérmico debido a que las rocas intrusivas en la orla de alteración tenían altas temperaturas, al enfriarse, circuló agua que se convirtió en vapor formando celdas de convección de vapor cargado de minerales que alteró zonas a través de las fracturas y en el contacto rocas intrusivas con metamórficas formó una zona de argilitización con propiedades mecánicas ineficientes de 15 a 20 m de espesor en cada una de las unidades litológicas, a medida que nos alejamos de este contacto las propiedades mecánicas del terreno mejoran hasta tener las de una roca sin alteración.
- Las rocas máficas tienen una alteración meteórica que las ha argilitizado, lo cual se debe a que estas rocas de origen del tipo basalto obstruyeron cauces de flujos superficiales de agua, represándolos, por lo que el nivel freático subía en temporadas de lluvias y bajaba en la temporada de secas y el terreno presentó lixiviación.

En las rocas intrusivas y en las metamórficas una alteración por el intemperismo meteórico a suelos residuales denominados; Tucuruquay y regolito, respectivamente.

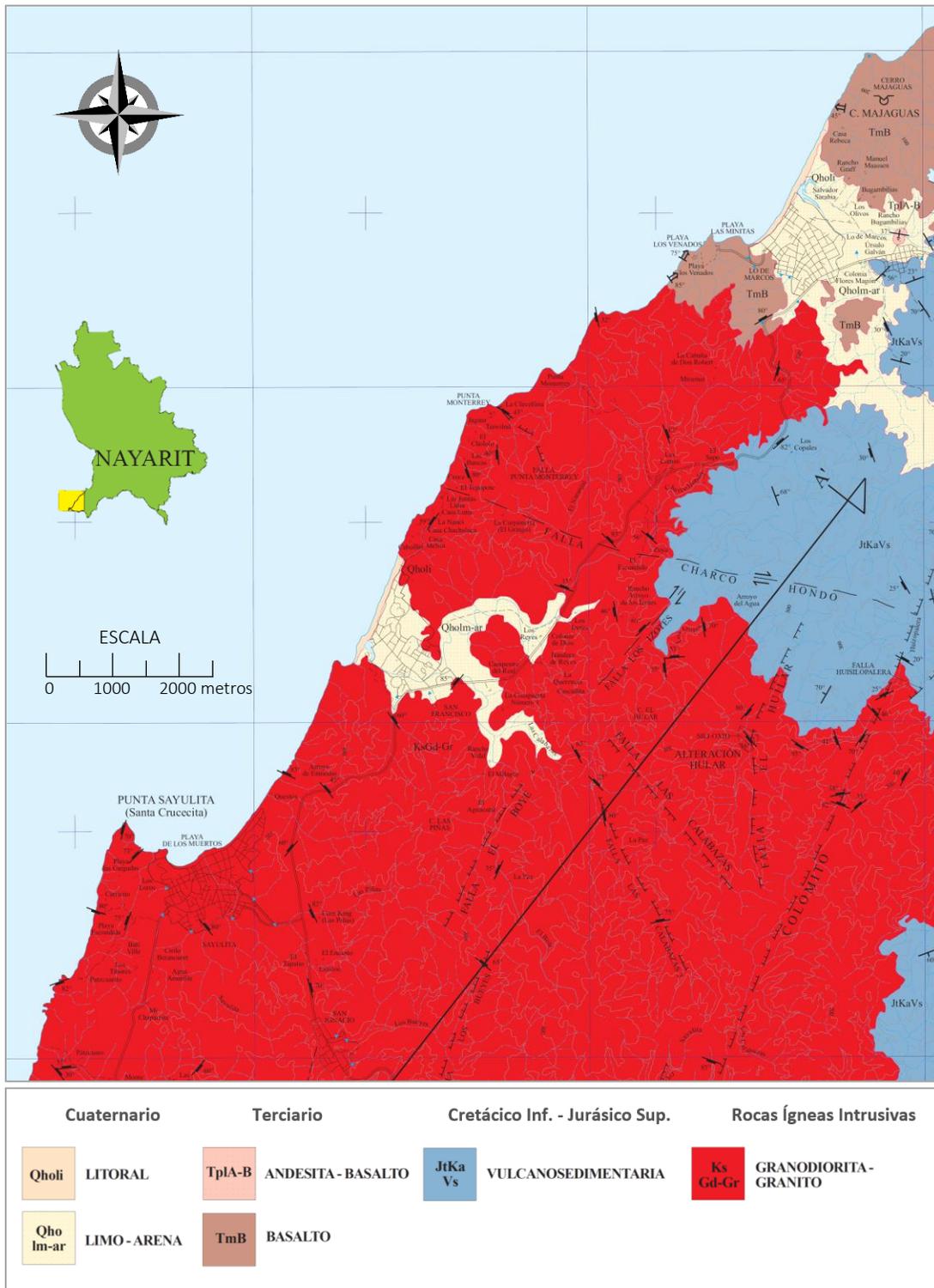


Figura 4.3 Geología regional.

Recopilado de Carta Geológica-Minera del SMG (2001) Punta Sayulita F13-C58, Escala 1:50,000

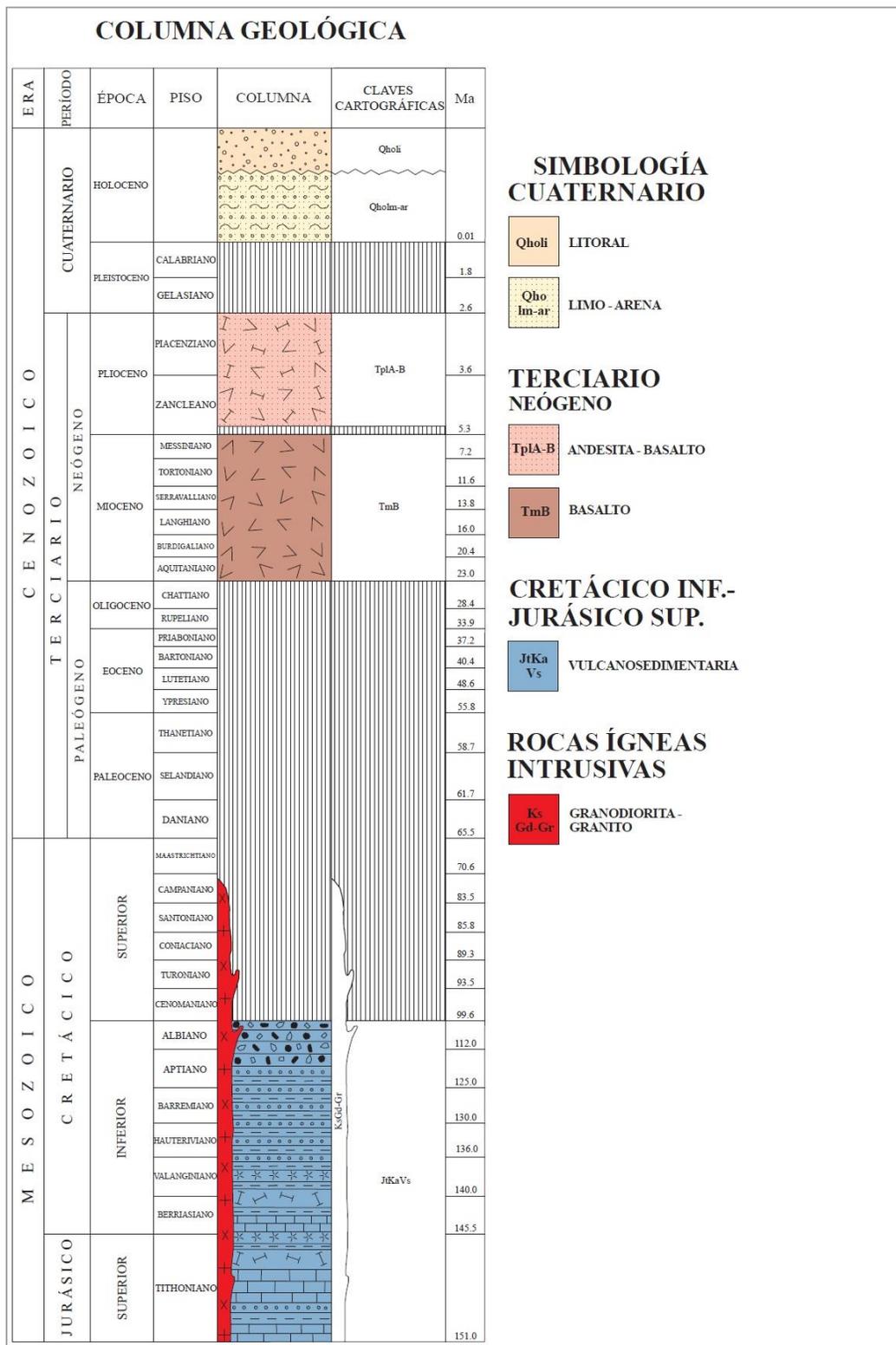


Figura 4.4 Columna estratigráfica.

Recopilado de Carta Geológica-Minera del SMG (2001) Punta Sayulita F13-C58, Escala 1:50,000

4.2 Geología del talud

Litología

Las unidades que observé y diferencié durante mi visita a campo, las enlisto a continuación. Su respectiva muestra de mano se ilustra en la Foto 4.1.

- **Suelo residual (Su)**

Es la capa de suelos residuales que se presenta a lo largo del corte, se desarrolla a consecuencia de la meteorización y degradación de las rocas preexistentes en el sitio, constituidos por materiales de granulometría fina a muy fina, de composición limo-arenosa, con gravas angulosas distribuidas de forma caótica, con regular consolidación. Se desarrolla a lo largo del terreno natural, siendo éste el que sustenta la vegetación. Su color es café claro a oscuro con presencia de materia orgánica, se disgrega fácilmente, tiene espesor variable de 1 a 2 m.

- **Pórfido andesítico intensamente meteorizado (PA int)**

Cuerpo pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo, de color café claro y ocre, altamente meteorizada, con alto grado de oxidación, se rompe fácilmente al golpe de martillo. Se observa en la Foto 4.2 y Foto 4.3.

- **Pórfido andesítico meteorizado (PA met)**

Cuerpo pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo, de café claro a ocre, se encuentra afectado por un grado medio de oxidación. Tiene estructura compacta con alto fracturamiento, éste es cerrado, en algunos sitios las discontinuidades se abren algunos pocos mm, el grado de meteorización varía de moderado a altamente meteorizado. La unidad se extiende a lo largo del corte, en la parte superior, sobre el Pórfido andesítico. Se observa en la Foto 4.5.

- **Pórfido andesítico (PA)**

Pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo, resistente, de color gris a verde claro por alteración hidrotermal, se caracteriza por fenocristales de plagioclasas embebidos en una matriz microcristalina compacta, masivo con fracturamiento de medio a cerrado, los planos de discontinuidad tienen una incipiente oxidación en su superficie; en algunas zonas aumenta el contenido de sílice formando vetillas de cuarzo, la alteración hidrotermal se manifiesta con la presencia de sulfuros diseminados de pirita. Se observa en la Foto 4.6 y Foto 4.7.

En general, los diferentes grados de meteorización encontrados en el talud, se encuentran delimitados por discontinuidades, las cuales se tratan en el Capítulo de Geotecnia.



Pórfido andesítico
intensamente meteorizado
(PA int)



Pórfido andesítico
meteorizado
(PA met)



Pórfido andesítico
(PA)

Foto 4.1 Muestras de la litología en el talud.



Foto 4.2 Pórfido andesítico intensamente meteorizado.



Foto 4.3 Pórfido andesítico intensamente meteorizado.



Foto 4.4 Oxidación formada en las fracturas.



Foto 4.5 Pórfido andesítico meteorizado.



Foto 4.6 Pórfido andesítico.



Foto 4.7 Pórfido andesítico.



Foto 4.8 Toma de datos estructurales.

Su distribución en planta se encuentra en el Plano Geológico-Geotécnico. A continuación, en la Figura 4.5 se observa el perfil geológico del talud.

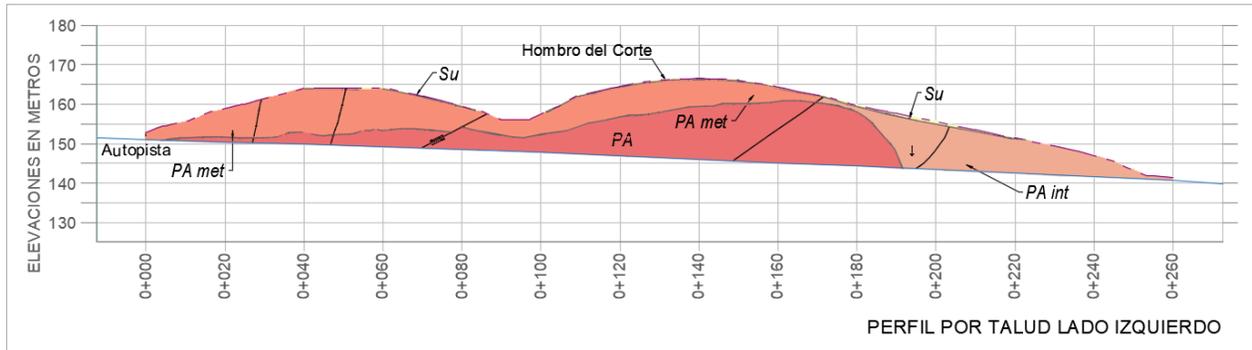


Figura 4.5 Perfil geológico por la línea de ceros.

Parámetros geomecánicos

Durante los levantamientos en campo realicé el ensayo de **Martillo Schmidt** o **Esclerómetro**. Éste mide la resistencia al rebote de una superficie rocosa, directamente sobre las discontinuidades más representativas, que se correlaciona con la resistencia a la compresión simple. A continuación, en Tabla 4.1 se observan los resultados resumidos de las pruebas. Su obtención lo detallo en el apartado de anexos 8.3.

Litología	Resistencia Esclerómetro [MPa]
Pórfido andesítico intencionalmente meteorizado (PA int)	17 - 35
Pórfido andesítico meteorizado (PA met)	25 - 65.5
Pórfido andesítico (PA)	60 - 111

Tabla 4.1 Resistencia a la compresión simple por unidades.



Foto 4.9. Prueba con esclerómetro sobre el pórfido andesítico.

Geología estructural

A partir de los datos estructurales que recabé en campo, fue posible realizar un análisis cinemático por estereografía con el fin de evaluar de manera preliminar la estabilidad del talud. Los datos de los vectores de la máxima pendiente de las familias se obtuvieron midiendo el echado y dirección del echado de las discontinuidades para hacer un análisis estadístico con su dispersión y así identificarlas con el programa Dips V6 (Figura 4.6 y Figura 4.7)

Para realizar el siguiente análisis utilicé el rumbo del echado del talud y de las familias principales de discontinuidades, así como el ángulo de fricción, estimado con el programa RocData, Su obtención lo detallo en el apartado de anexos 8.3.

- Ángulo de fricción
 - **PA: 35°**
 - **PA met: 27°**
- Talud (Dip/Dip Direction)
 - Talud: **53°/324°**
- Principales familias (Dip/Dip Direction)
 - F1: 63°/077°
 - F2: 74°/153°
 - F3: 67°/259°
 - F4: 80°/287°
 - F5: 51°/303°
 - F6: 77°/350°
 - F7: 45°/016°

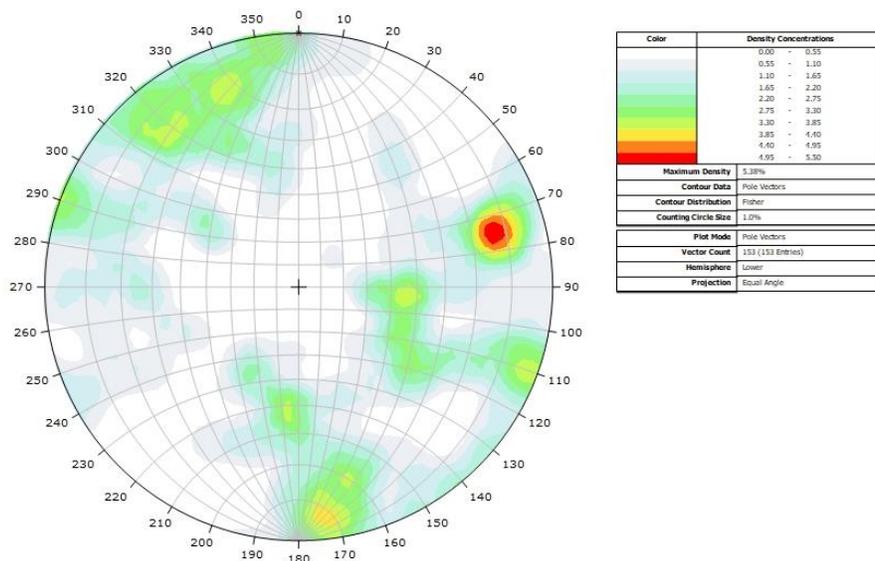


Figura 4.6 Concentración estadística de polos.

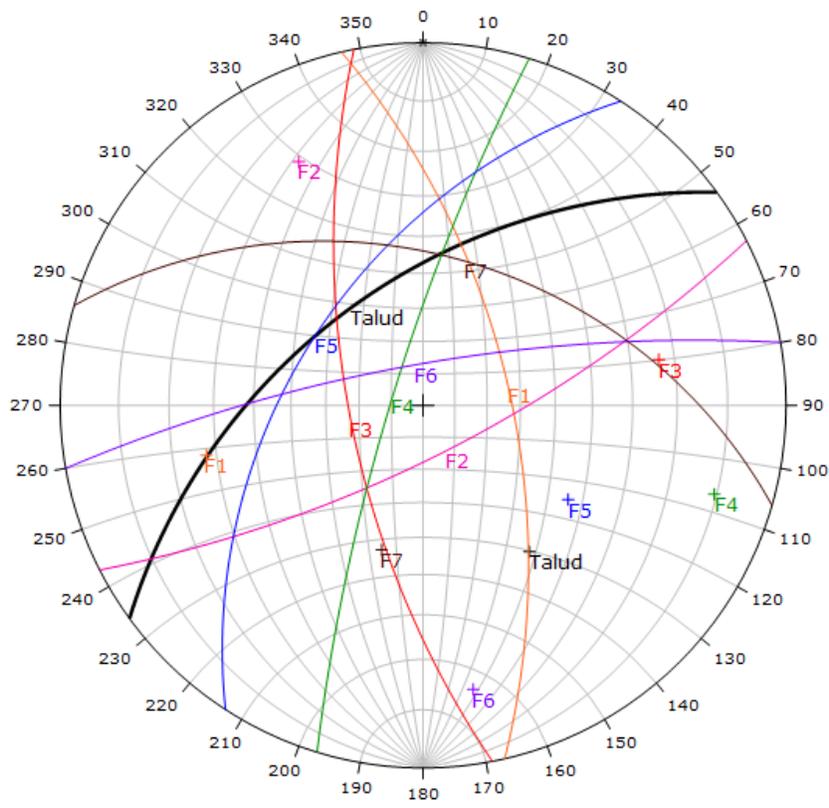


Figura 4.7 Estereograma con familias principales.

Los resultados de los análisis realizados en Dips V6 se encuentran resumidos en la Figura 4.8.

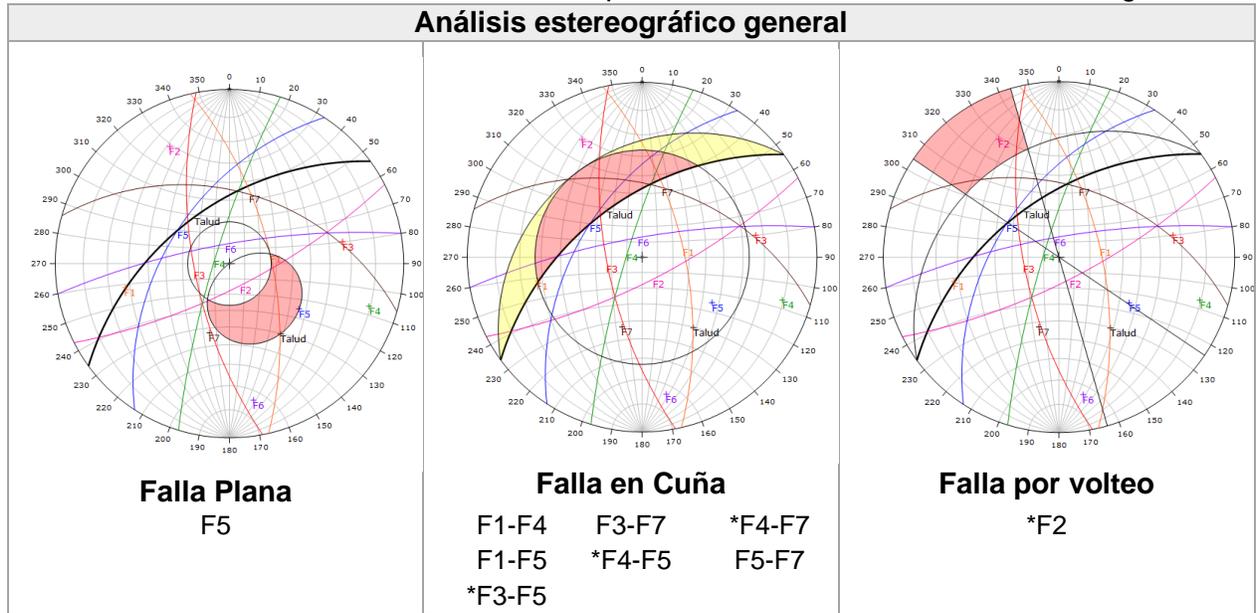


Figura 4.8 Resultados generales de análisis estereográficos.

Al rectificar los datos obtenidos con las observaciones de campo, discreticé los resultados brutos para apegarlo a la realidad (*). El resumen lo presento en la Figura 4.9.

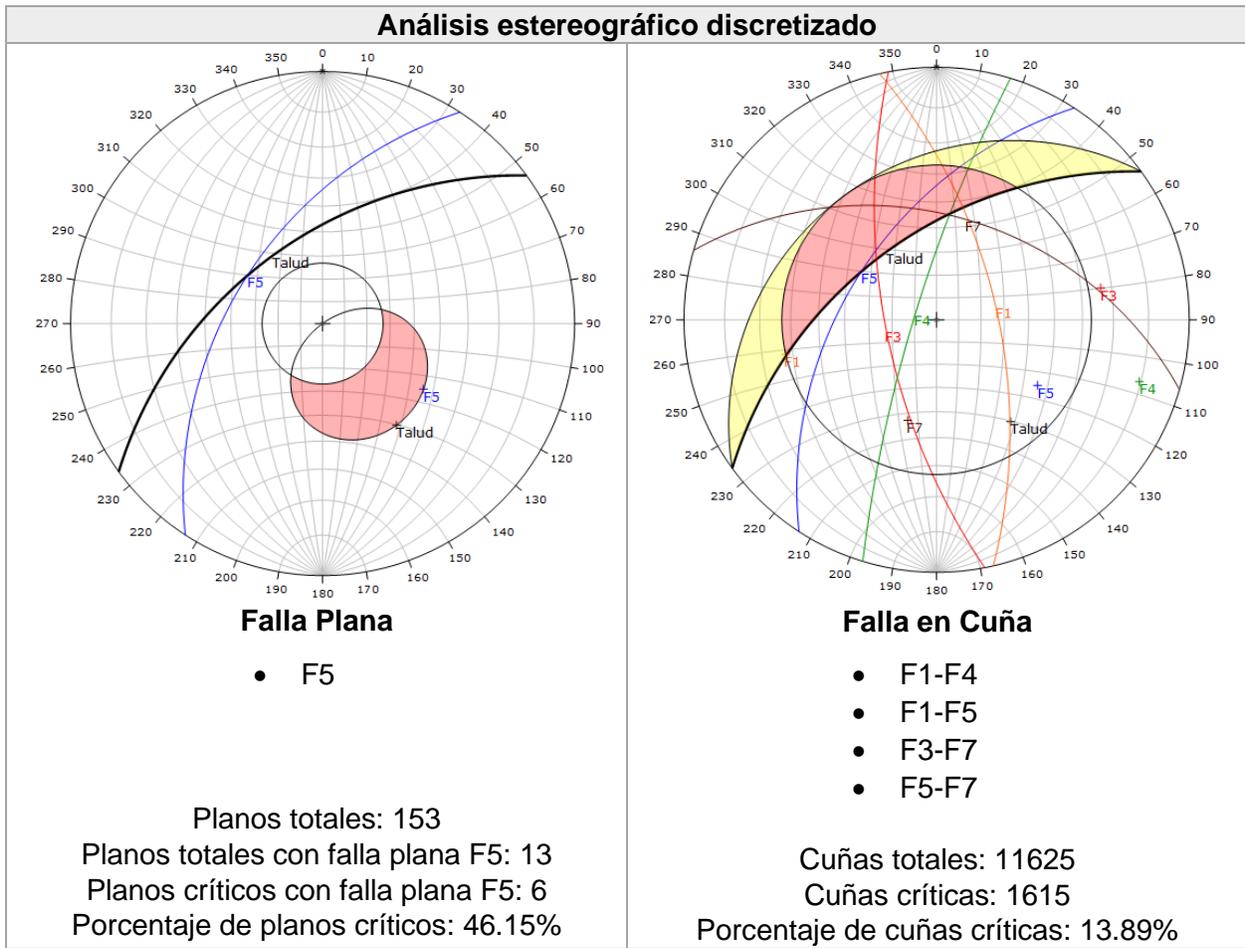


Figura 4.9 Resultados de análisis estereográfico discretizado.

4.3 Identificación cualitativa de elementos potencialmente inestables

Delimité zonas con evidencia de desprendimientos, zonas inestables y caídos previos. Su distribución se proyecta en el Plano Geológico-Geotécnico y se observa en la Figura 4.10, y de la Foto 4.10 a la Foto 4.12.

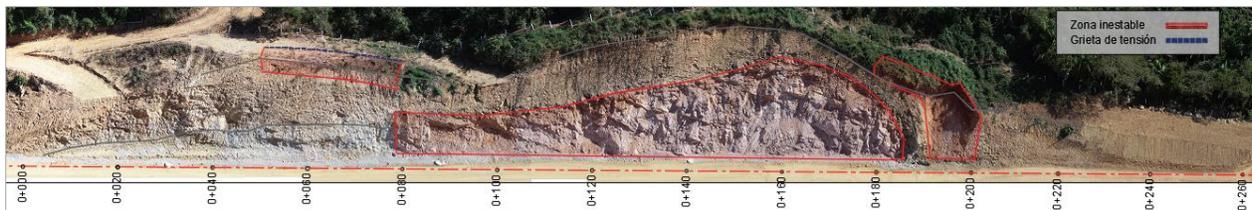


Figura 4.10 Distribución de elementos potencialmente inestables.

De manera puntual, en la parte superior de la corona se presentan grietas de tensión a una distancia de aproximadamente 2 m de la línea de ceros y de una profundidad aproximada de 0.5 m, se muestra en la Foto 4.10.



Foto 4.10 Grieta de tensión presente en la corona del talud.



Foto 4.11 Bloques de pórfido andesítico susceptible a caída o vuelcos.



Foto 4.12 Falla alrededor del km 0+200.

5 ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

5.1 Generalidades hidrológicas

Localización

El sitio del proyecto se localizó en la Región Hidrológica N° 13, denominada Cuenca del Río Huicicila. La Región Hidrológica Número 13 está comprendida íntegramente en el estado de Nayarit.

Precipitación

Para esta caracterización utilicé los datos de la estación climatológica “San Marcos” con clave de identificación de C18080, la cual está en funcionamiento desde el año de 1981, se encuentra localizada en la cuenca del río Huicicila-San Blas, en el Municipio de Bahía de Banderas del estado de Nayarit, al NE de la zona de estudio, a una distancia aproximada de 4 km (Comisión Nacional del Agua, 2020).

Con base en la información registrada por la estación “San Marcos” se puede decir que la zona en estudio describe una lluvia promedio de 88.5 mm, lluvia anual de 897.9 mm con una variación máxima de 280.0 mm y mínima de 1.9 mm en los meses de septiembre y abril respectivamente como se observa en la Tabla 5.1 y gráficamente en la Figura 5.1.

Distribución mensual de la precipitación												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
17.0	11.3	2.9	1.9	13.0	99.8	205.7	280.0	277.5	94.4	30.3	29.3	897.9

Tabla 5.1 Distribución mensual de la precipitación.

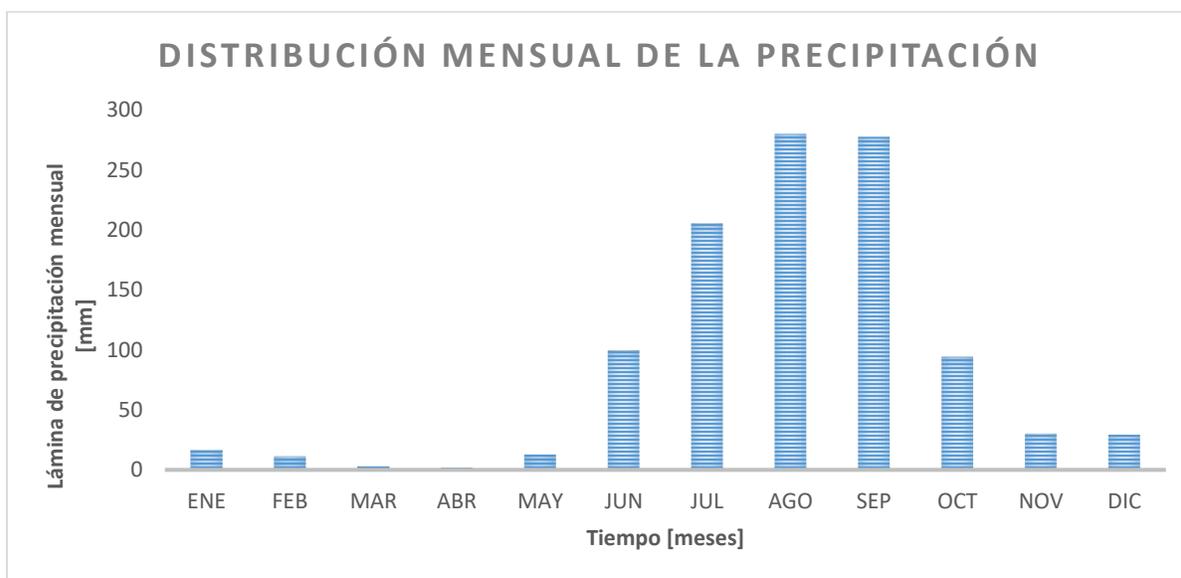


Figura 5.1 Distribución mensual de la precipitación. Estación “San Marcos”.

Temperatura

En este caso también consideré la información disponible en la estación climatológica “San Marcos”. La distribución de la temperatura se muestra en la Tabla 5.2 y gráficamente en la Figura 5.2, presenta un promedio anual de 25.5 °C, con una mínima de 22.5 °C y máxima de 28.4 °C, en febrero y octubre respectivamente.

Distribución mensual de temperatura												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
23.2	22.5	22.8	24.3	25.7	28.3	28.0	28.2	28.0	28.4	26.2	24.5	25.5

Tabla 5.2 Distribución mensual de temperatura.

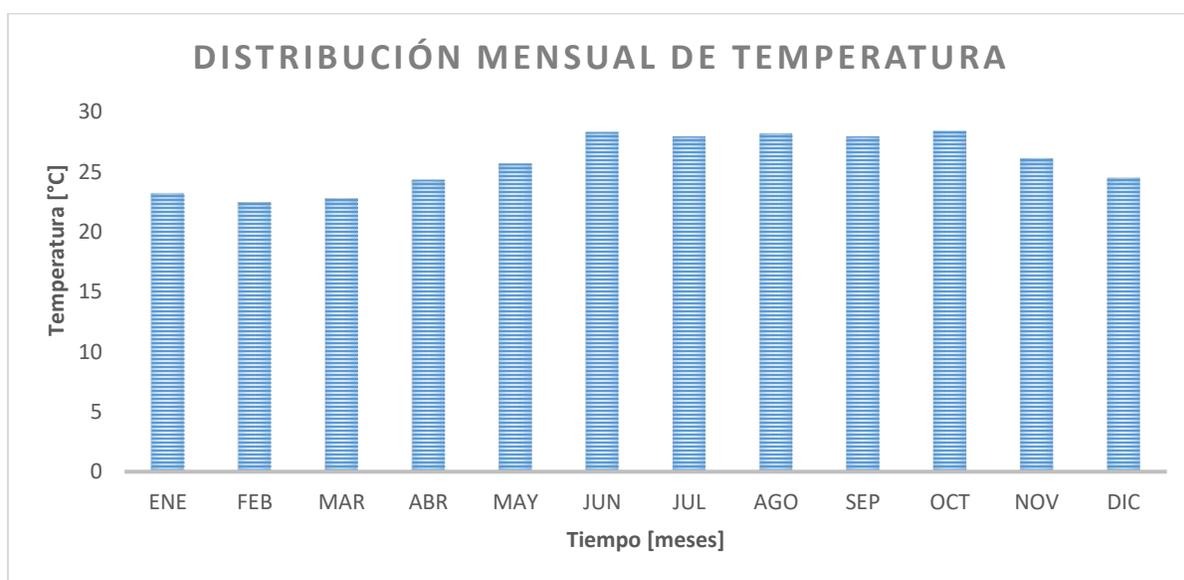


Figura 5.2 Distribución mensual de temperatura. Estación “San Marcos”.

Evaporación

Según la estación climatológica “San Marcos” la distribución media de la evaporación mensual se muestra en la Tabla 5.3 y en la Figura 5.3 de manera gráfica, presenta un promedio anual de 145.3 mm, con una mínima de 99.23 mm y máxima de 189.17 mm en los meses de febrero y agosto respectivamente.

Distribución mensual de la evaporación												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
107.1	99.2	138.2	153.5	175.3	170.0	163.4	189.2	179.3	167.0	128.1	123.9	145.3

Tabla 5.3 Distribución mensual de la evaporación.

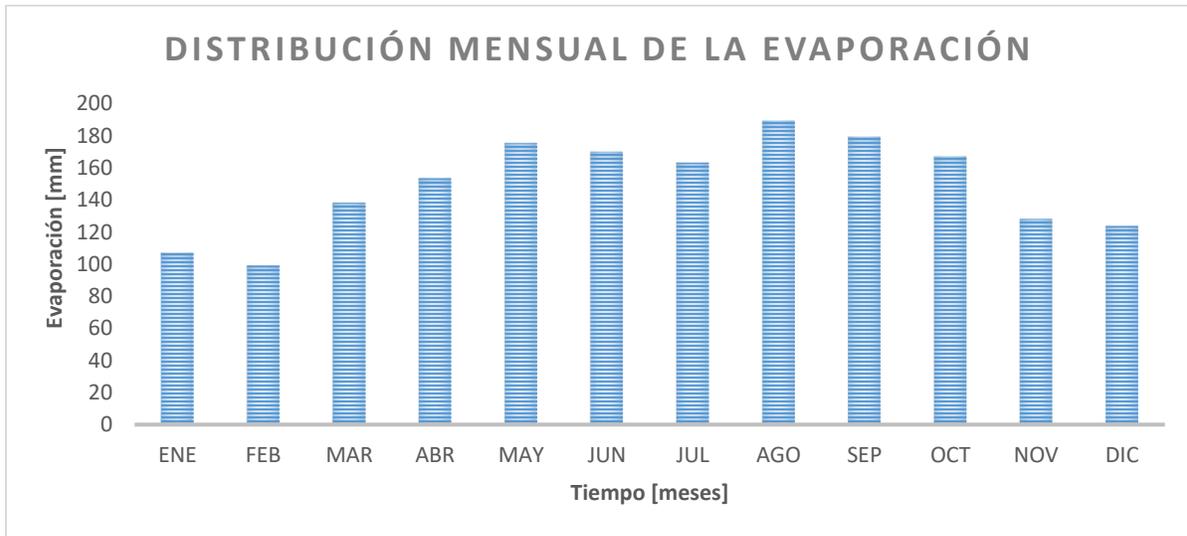


Figura 5.3 Distribución mensual de la evaporación. Estación "San Marcos".

5.2 Características hidrológicas

Periodo de retorno

El periodo de retorno que empleé para obtener el gasto de diseño de las obras complementarias de drenaje lo determiné de acuerdo con la Normatividad vigente, la cual indica un $Tr=50$ años aplicado en este caso para la estación climatológica de San Marcos (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016).

Características de la precipitación

En la Figura 5.4 plasmé el recabado del registro de intensidades de lluvia, la cual obtuve de isoyetas para diferentes duraciones de tormentas y periodos de retorno

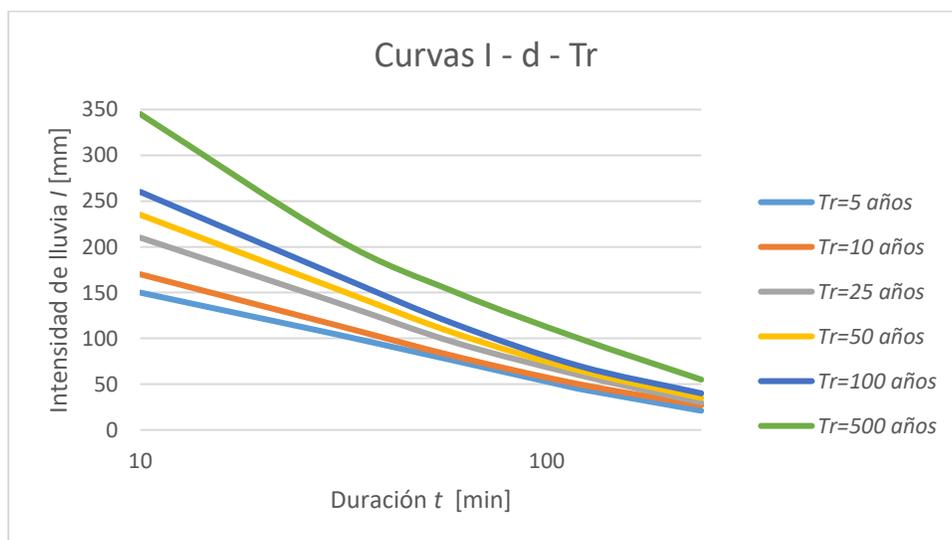


Figura 5.4 Curvas de Intensidad-Duración-Periodo de Retorno

5.3 Áreas de escurrimiento

El talud en estudio con base en la interpolación del levantamiento topográfico y las curvas de nivel del INEGI, Esc. 1: 50,000, generé el modelo digital de elevación (MDE) y el modelo de escurrimientos del cual obtuve la delimitación de las microcuencas C1 y C2, así mismo, con el levantamiento topográfico, el área de escurrimiento del talud y de la calzada.

El área de la microcuenca C1 es de 1,135.081 m² y de la microcuenca 2 igual a 2,467.292 m². Figura 5.5.

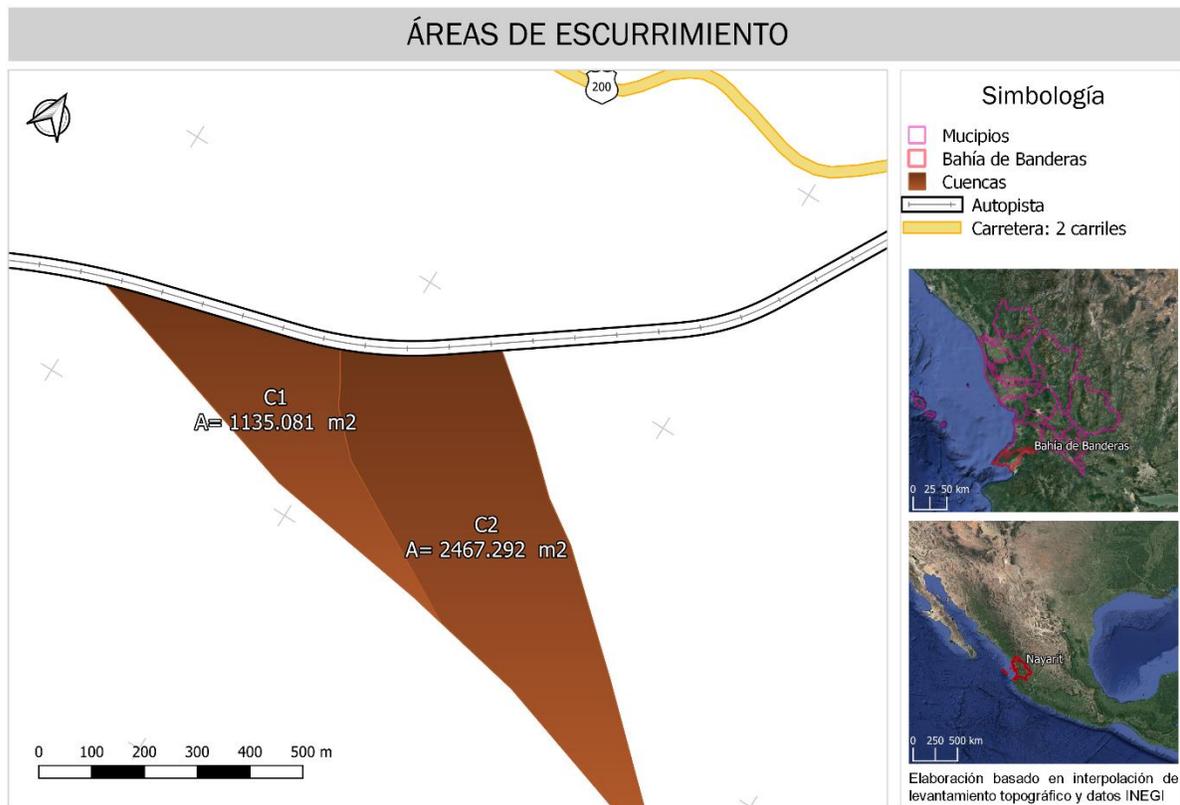


Figura 5.5 Área de escurrimiento-microcuenca

El corte tiene una longitud de 260 m, un área de 3,159.05 m² (Figura 5.6). Para la calzada consideré un ancho de 14 m, por lo que obtuve un área de escurrimiento de 3,640 m². (Figura 5.7).

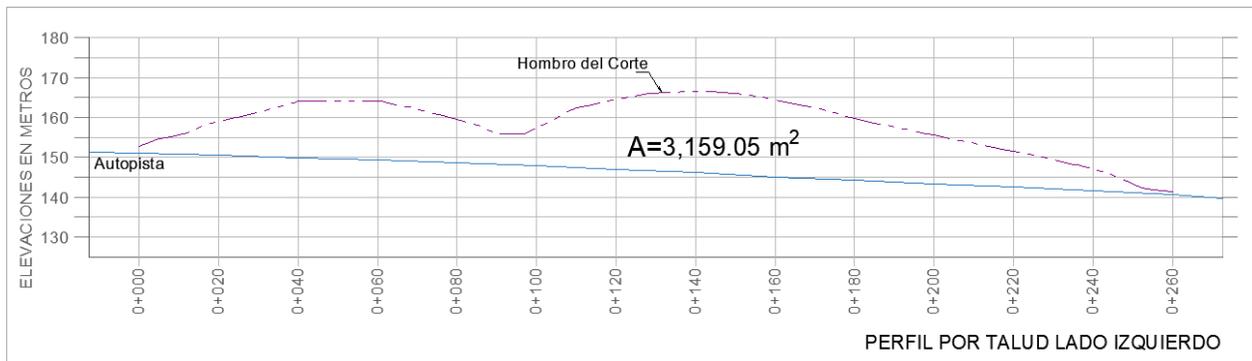


Figura 5.6 Área de escurrimiento-talud.

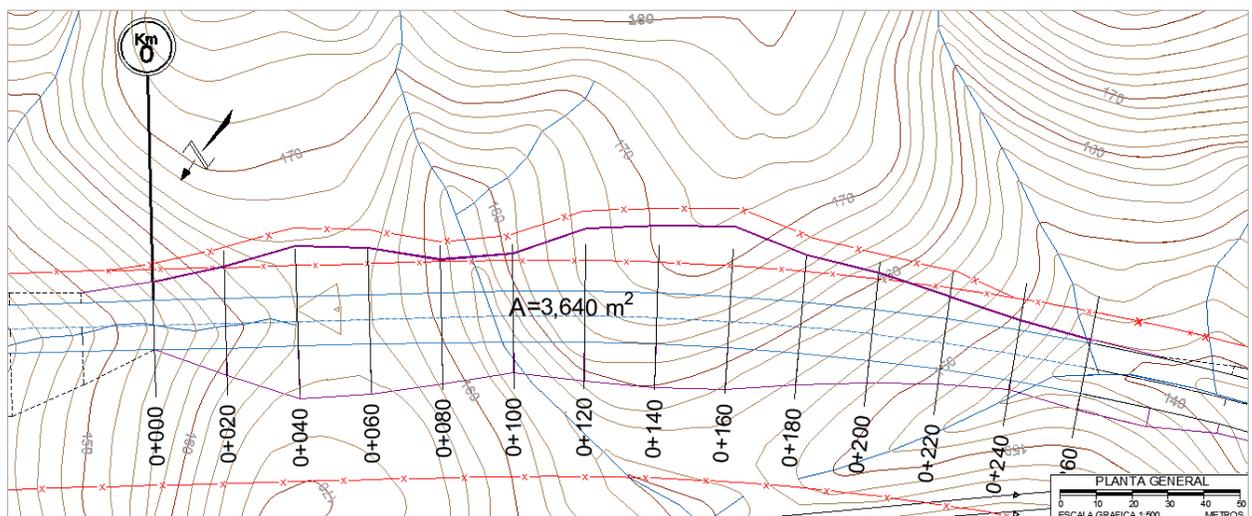


Figura 5.7 Área de escurrimiento-calzada.

El resumen de las características fisiográficas encontradas se presentan en la Tabla 5.4.

Áreas de escurrimiento		
Microcuenca	C1	C2
A= Área [km ²]	0.00113508	0.00246729
L= Longitud del cauce principal [m]	43.2	102.3
H= Desnivel del cauce [m]	55	140
S= Pendiente de escurrimiento	1.27314815	1.36852395
	Calzada	Talud
A= Área [km ²]	0.00364	0.00315905
L= Longitud [m]	260	260
H= Desnivel [m]	10.26	-
S= Pendiente	0.03946154	-

Tabla 5.4 Áreas de escurrimiento.

5.4 Cálculo de gastos

Tiempo de concentración

El cálculo del tiempo de concentración (T_c), para este estudio lo realicé basándome en la Normativa vigente (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016).

Se obtiene un tiempo menor a 2 min debido a las dimensiones de las microcuencas estudiadas, por lo que, se considera un tiempo de concentración de 5 min para los cálculos correspondientes.

Método racional

Aplicando la fórmula del método racional, utilicé un coeficiente de escurrimiento de 0.15 para las microcuencas y 0.85 para la calzada. Los gastos se presentan en la siguiente Tabla 5.5.

Gastos				
Tr [Años]	Microcuencas		Calzada	Talud
	C1	C2		
5	0.0078	0.0170	0.1419	0.0217
10	0.0085	0.0185	0.1548	0.0237
25	0.0104	0.0226	0.1892	0.0290
50	0.0118	0.0257	0.2150	0.0329
100	0.0130	0.0283	0.2365	0.0362

Tabla 5.5 Gastos obtenidos [m^3/s].

Revisión hidráulica de las obras de drenaje

La revisión hidráulica final la llevé a cabo bajo el método de Manning, a continuación, presento las capacidades hidráulicas de las obras de drenaje propuestas.

- Cuneta

Sumando los gastos correspondientes que desbordarán en la cuneta, obtuve un gasto de diseño de 0.29 m³/s. La geometría de la cuneta se presenta en la Figura 5.8 y el cálculo del gasto en la Tabla 5.6.

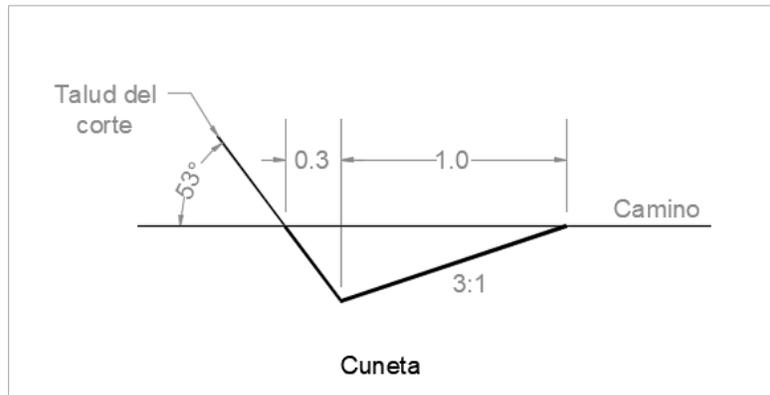


Figura 5.8 Geometría de la cuneta
Tomado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2016)

Cuneta												
Obra de drenaje	A _h [m ²]	P _m [m]	r _h [m]	r _h ^{2/3} [m]	Pendiente			s ^{1/2}	C	v [m/s]	Gasto [m ³ /s]	Gasto de diseño [m ³ /s]
					ΔH [m]	L [m]	S					
Cuneta 33	0.21	1.47	0.14	0.27	9.36	260	0.04	0.19	0.012	4.30	0.895	0.285

Tabla 5.6 Capacidad hidráulica de la cuneta.

Puesto que la capacidad de la cuneta es mayor que el gasto generado por el área de aportación, las dimensiones mínimas asignadas son suficientes y no se requiere ninguna obra de alivio intermedia.

- Contracuneta

En revisión de la contracuneta, mi propuesta consistió en una sección trapezoidal de 60 cm de profundidad, consideré que ésta se localizará a 5 m mínimo de los ceros de corte, con una longitud suficiente para conducir el agua desde el parteaguas hasta su desembocadura. La geometría de la contracuneta propuesta se presenta en la Figura 5.9 y el cálculo del gasto en la Tabla 5.7.

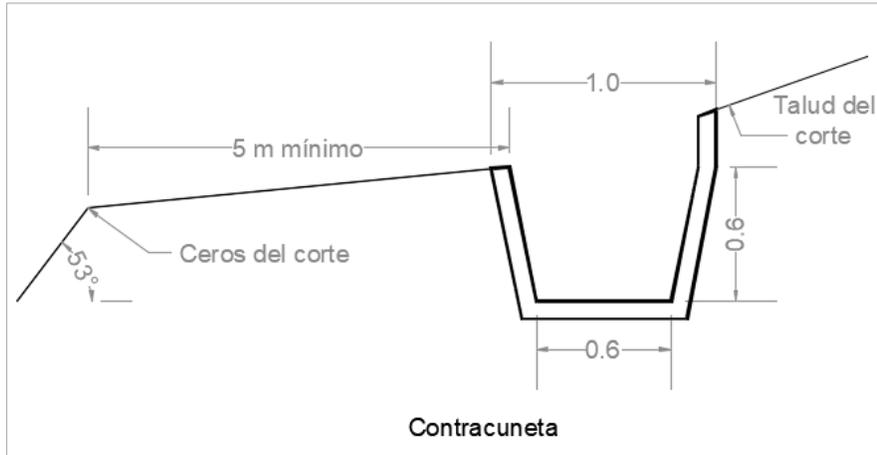


Figura 5.9 Geometría de la contracuneta.
Tomado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2016)

Contracuneta												
Obra de drenaje	A_h [m ²]	P_m [m]	r_h [m]	$r_h^{2/3}$ [m]	Pendiente			$s^{1/2}$	C	v [m/s]	Gasto [m ³ /s]	Gasto de diseño [m ³ /s]
					ΔH [m]	L [m]	S					
Contracuneta 60, C1	0.43	1.82	0.24	0.38	16.9	78.5	0.22	0.46	0.02	8.89	3.842	0.012
Contracuneta 60, C2	0.43	1.82	0.24	0.38	29.8	107.9	0.28	0.53	0.02	10.07	4.352	0.0257

Tabla 5.7 Capacidad hidráulica de la contracuneta.

Con base a los resultados, concluí que la contracuneta propuesta, tiene la capacidad para canalizar el gasto total calculado. Debido a que se tienen velocidades mayores a las permitidas, se colocarán cajas reductoras de velocidad.

- Lavadero

Realicé la revisión hidráulica de un lavadero propuesto de 1.50 m de ancho, como se observa en la Figura 5.10. El gasto de diseño es el obtenido para la microfrecuencia C1, igual a 0.0118 m³/s, en la Tabla 5.8 se presentan los resultados.

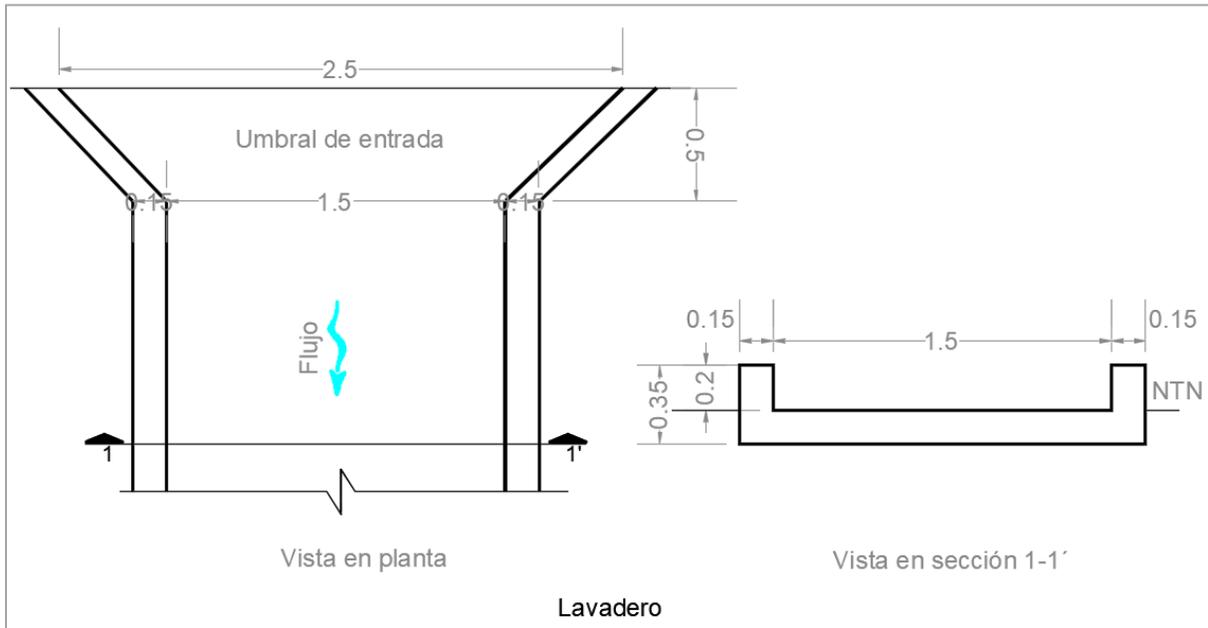


Figura 5.10 Geometría del lavadero.
Tomado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2016)

Lavadero												
Obra de drenaje	A _h [m ²]	P _m [m]	r _h [m]	r _h ^{2/3} [m]	Pendiente			s ^{1/2}	C	v [m/s]	Gasto [m ³ /s]	Gasto de diseño [m ³ /s]
					ΔH [m]	L [m]	S					
Lavadero	0.3	1.9	0.16	0.29	9.78	10.26	0.95	0.98	0.05	5.70	1.711	0.012

Tabla 5.8 Capacidad hidráulica del lavadero.

En conclusión, la capacidad hidráulica del lavadero es suficiente para canalizar el gasto que genera la microfrecuencia.

Cabe resaltar, para el sistema de control de aguas, en el diseño de la carretera se tiene contemplado un subdrenaje, el cual quedó fuera de mis alcances en este estudio.

6 GEOTECNIA

6.1 Exploración geotécnica

Clasificaciones geomecánicas

Las clasificaciones geomecánicas que obtuve, principalmente, mediante la observación directa de las características del macizo rocoso, fueron **RMR** (Rock Mass Rating) y el índice **GSI** (Geological Strength Index) lo detallo en el anexo 8.4, en la Tabla 6.1 se observan los resultados.

Clasificaciones geomecánicas				
Litología	RMR			GSI
	Valor	Calificación	Clase	
Pórfido andesítico intensamente meteorizado (PA int)	38	MALO	IV	32
Pórfido andesítico meteorizado (PA met)	47-51	MEDIO	III	39-43
Pórfido andesítico (PA)	82	MUY BUENO	I	74

Tabla 6.1 Clasificaciones geomecánicas.

Sismicidad

El coeficiente sísmico lo determiné por medio de la aplicación de cómputo PRODISIS, tomando en cuenta los lineamientos del “Manual de Diseño de Obras Civiles” de la Comisión Federal de Electricidad (2015). Obtuve el valor de la aceleración máxima del terreno en función de las coordenadas geográficas del sitio y de la importancia estructural, Figura 6.1. De acuerdo con Hynes Griffin y Franklin (1984) apliqué el 50% de la aceleración máxima del terreno.

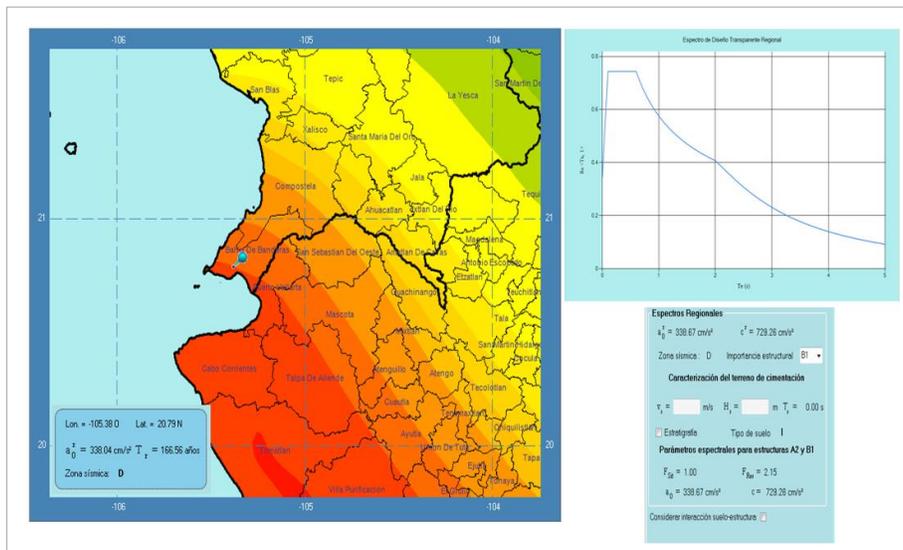


Figura 6.1 Espectro de diseño sísmico. $C_s=0.17$.

6.2 Pruebas de laboratorio

Una vez que definí las características macroscópicas y cualitativas de las distintas unidades litológicas, tomé muestras representativas de cada una de ellas para definir sus propiedades índices.

Las propiedades índices me permiten conocer de manera cualitativa las características de los distintos materiales, el ensayo “peso volumétrico natural”, fue realizado de acuerdo con la normativa vigente (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016).

Los resultados los presento a continuación:

Litología	Peso volumétrico [t/m ³]
Pórfido andesítico intensamente meteorizado (PA int)	2.53 - 2.6
Pórfido andesítico meteorizado (PA met)	2.48
Pórfido andesítico (PA)	2.61

Tabla 6.2 Peso volumétrico natural por unidad.

6.3 Modelo geotécnico

A partir de la información que recabé de topografía, geofísica y geología, elaboré una integración con la finalidad de obtener Modelo Geológico-Geotécnico, en el cual correlacioné: la distribución geométrica de las diferentes unidades del talud, unidades geofísicas y las propiedades geomecánicas, éste lo presento en la Figura 6.2 y se proyecta en el Plano Geológico-Geotécnico. El resumen puede encontrarse en la Tabla 6.3.

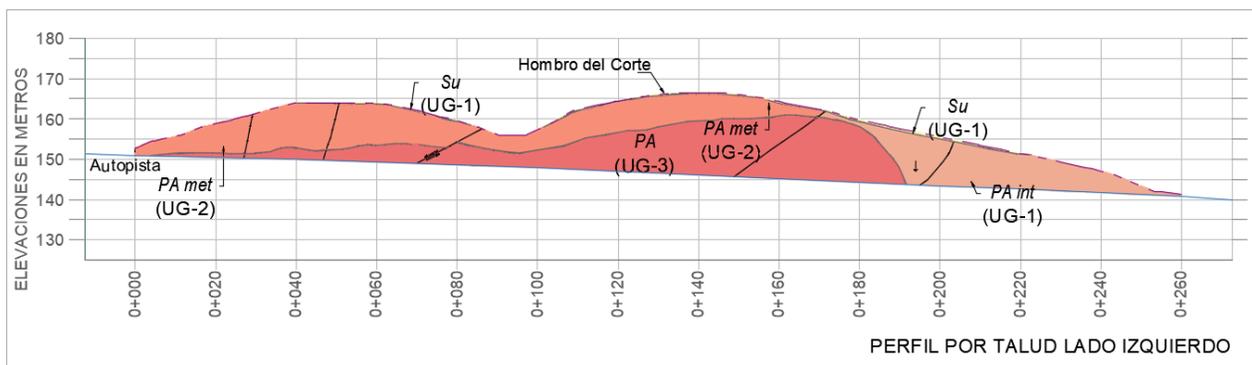


Figura 6.2 Perfil geológico-geotécnico por la línea de cerros.

Unidades Geológicas – Geosísmicas – Geotécnicas											
ERA	PERIODO	ÉPOCA	LITOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS	PESO VOLUMÉTRICO [t/m ³]	RESISTENCIA MARTILLO SCHMIDT [MPa]	RMR	GSI	Vp [m/s]	UNIDADES GEOTÉCNICAS	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Su	Suelo Residual	Capa de suelos residuales limo-arenosos con gravas angulosas distribuidas de forma caótica, con regular consolidación, unidad que se presentan a lo largo del terreno natural, presenta color café claro a oscuro y tiene un espesor de 1 a 2 m	-	N/A	N/A	N/A	UG-1	
			PA int	Pórfido Andesítico intensamente meteorizado	Cuerpo pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo, de color café claro y ocre, altamente meteorizada, con alto grado de oxidación, se rompe fácilmente al golpe de martillo.	2.53-2.6	17-35	38	32		244 189
	TERCIARIO NEÓGENO	PLIOCENO	PA met	Pórfido Andesítico meteorizado	Cuerpo pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo, de café claro a ocre, se encuentra afectado por un grado medio de oxidación.	2.48	25-65.5	47 51	39 43	1184 1190	UG-2
			PA	Pórfido Andesítico	Cuerpo pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo, de color gris a verde claro, su textura es porfídica, se caracteriza por fenocristales de plagioclasas embebidos en una matriz microcristalina compacta de minerales ferromagnesianos, presenta diversos grados de alteración hidrotermal, con presencia abundante de sulfuros disseminados de pirita, así como abundante sílice en forma de vetas o en la estructura de la roca como silicificación.	2.61	60-111	82	74	2325 2154	UG-3

Tabla 6.3 Correlación entre unidades Geológicas – Geosísmicas – Geotécnicas.

6.4 Análisis geotécnico

En la Tabla 6.4 retomo las condiciones generales del talud que utilicé para el análisis.

Condiciones generales del talud	
Longitud	260 m
Altura máxima	26.5 m
Inclinación de proyecto	53°

Tabla 6.4 Condiciones generales del talud.

Retroanálisis y calibración de parámetros geomecánicos

Consideraré las variaciones de meteorización en la litología del talud y las evidencias encontradas en campo, he discretizado el tipo de falla aplicable a cada unidad geotécnica.

Falla Rotacional No Circular. Evidencia de falla por el macizo rocoso.

- UG-1 (*Su y PA int*)

Falla Estructural. Evidencia de falla por las discontinuidades.

- UG-2 (*PA met*)
- UG-3 (*PA*)

Con el fin de conocer la veracidad de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción que obtuve, realicé dos retroanálisis, el primero en condiciones de equilibrio límite, consideré un factor de seguridad igual a la unidad ante las condiciones de fuerza evaluadas; el segundo retroanálisis lo basé en la sección 0+200, donde ya había ocurrido un deslizamiento previo, esto con el objetivo de simular las condiciones desencadenantes en las que un talud llega a su equilibrio límite, cuando se da origen al deslizamiento. Es importante recalcar que lo analicé con un material saturado al 50%.

- **Retroanálisis: Falla estructural**

Retroanálisis para falla estructural										
Tipo de falla	c (t/m ²)	ϕ (°)	Familias	Ángulo de salida	Fractura o falla		FS sin tratamiento			
					Familia F1	Familia F2	Estático	Dinámico	Saturado	Accidental
Cuña	0.5	27	F3-F7	35	67°/259°	45°/016°	1.11	0.86	0.99	0.77
	0.5	25					1.02	0.79	0.91	0.71
	0.7	29					1.25	0.96	1.11	0.87
	0.5	27	F5-F7	41	51°/303°	45°/016°	0.81	0.64	0.73	0.58
	0.7	27					0.88	0.70	0.80	0.64
	0.7	29					0.94	0.74	0.85	0.68
	0.7	30					0.97	0.77	0.87	0.70
0.7	31	1.00	0.79	0.90	0.72					
Plana	0.5	27	F5	51	51°/303°	0.83	0.66	0.00	0.00	
	0.7	27				1.00	0.81	0.00	0.00	
	0.7	29				1.04	0.83	0.00	0.00	
	0.8	30				1.14	0.92	0.00	0.00	

Tabla 6.5 Resultados retroanálisis para falla estructural.

Como resultado, los parámetros a utilizar para el análisis de falla estructural son los siguientes:

$$c: 0.7 \text{ t/m}^2 \quad \phi: 29^\circ$$

- **Retroanálisis: Falla rotacional no circular**

A partir de las evidencias que encontré en el talud, para el retroanálisis consideré una grieta de tensión, con las mismas características a la encontrada durante el levantamiento de campo integradas al modelo. En el año 2020, durante la temporada de lluvias se suscitó la falla estudiada, derivado de esto consideré en mis análisis la condición accidental. El retroanálisis se puede observar en la Figura 6.3 y el Tabla 6.6.

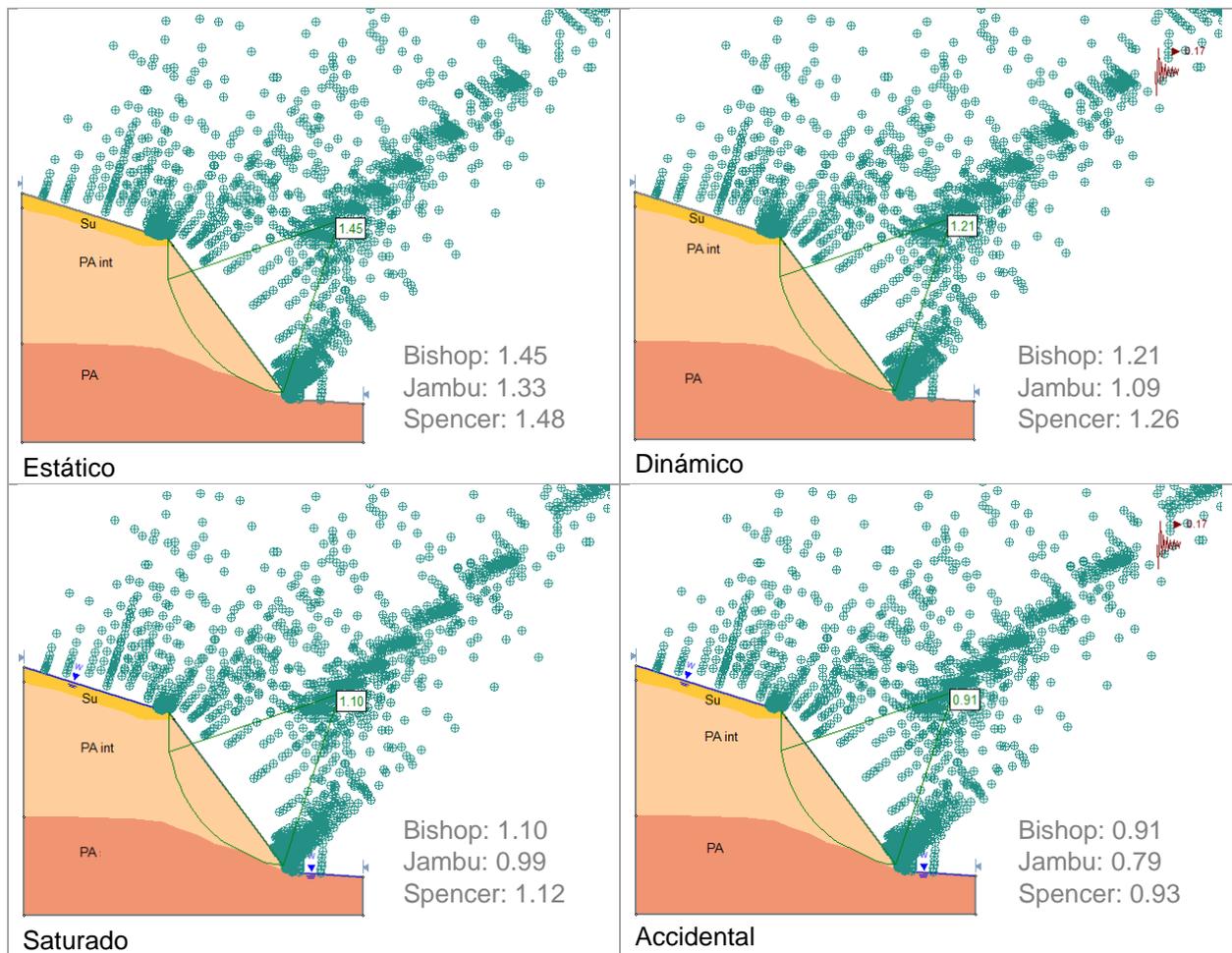


Figura 6.3 Resultados retroanálisis para falla rotacional - Sección 0+200. Software Slide.

Resultados retroanálisis para falla rotacional						
Tipo de falla	Litología	Método	FS sin tratamiento			
			Estático	Dinámico	Saturado	Accidental
No circular 0+200	Su	Bishop	1.45	1.21	1.10	0.91
	PA int	Janbu simplified	1.33	1.09	0.99	0.79
	PA	Spencer	1.48	1.26	1.12	0.93

Tabla 6.6 Resultados retroanálisis para falla rotacional.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 6.6 los factores de seguridad obtenidos son cercanos al equilibrio límite, por lo que se puede considerar que los parámetros geomecánicos son adecuados.

Como resultado, los parámetros a utilizar para el análisis de falla rotacional, en el software Slide, son los siguientes:

<i>Su</i>	c= 2 t/m²	φ=20°
<i>PA int</i>	c= 4 t/m²	φ=27°
<i>PA met</i>	c= 5 t/m²	φ=28°
<i>PA</i>	c= 10 t/m²	φ=32°

Análisis de estabilidad

Los métodos de equilibrio límite analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura (González de Vallejo et al., 2002).

$$FS = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

siendo:

FS = Factor de Seguridad

Las fuerzas actuando sobre un plano de rotura o deslizamiento potencial, suponiendo que no existen fuerzas externas sobre el talud, son las debidas al peso del material, a la cohesión, y a la fricción del plano (González de Vallejo et al., 2002).. El factor de seguridad viene dado por:

$$FS = \frac{(R_c + R_\phi)}{S}$$

siendo:

R_c = Fuerzas cohesivas

R_φ = Fuerzas friccionales

S = Fuerzas que tienden al deslizamiento

De acuerdo con el criterio anterior, una vez aplicadas las acciones preventivas sobre el talud, el factor de seguridad (FS) deberá respetar los siguientes mínimos, dictados por la revisión de proyectos de la SICT para el diseño de este proyecto. Como lo mencioné antes, el talud tiene antecedentes de combinación de factores (Agua + Sismo), por lo que consideré la condición Accidental dentro del análisis.

Condiciones	Factor de Seguridad
Estático	FS≥1.5
Dinámico	FS≥1.3
Saturado	FS≥1.3
Accidental	FS≥1.1

Tabla 6.7 Factores de seguridad mínimo para cada condición en el talud.

Por lo que marcaré en rojo los casos críticos que se deben atender, enfocándonos en dichos casos principalmente.

- **Falla estructural**

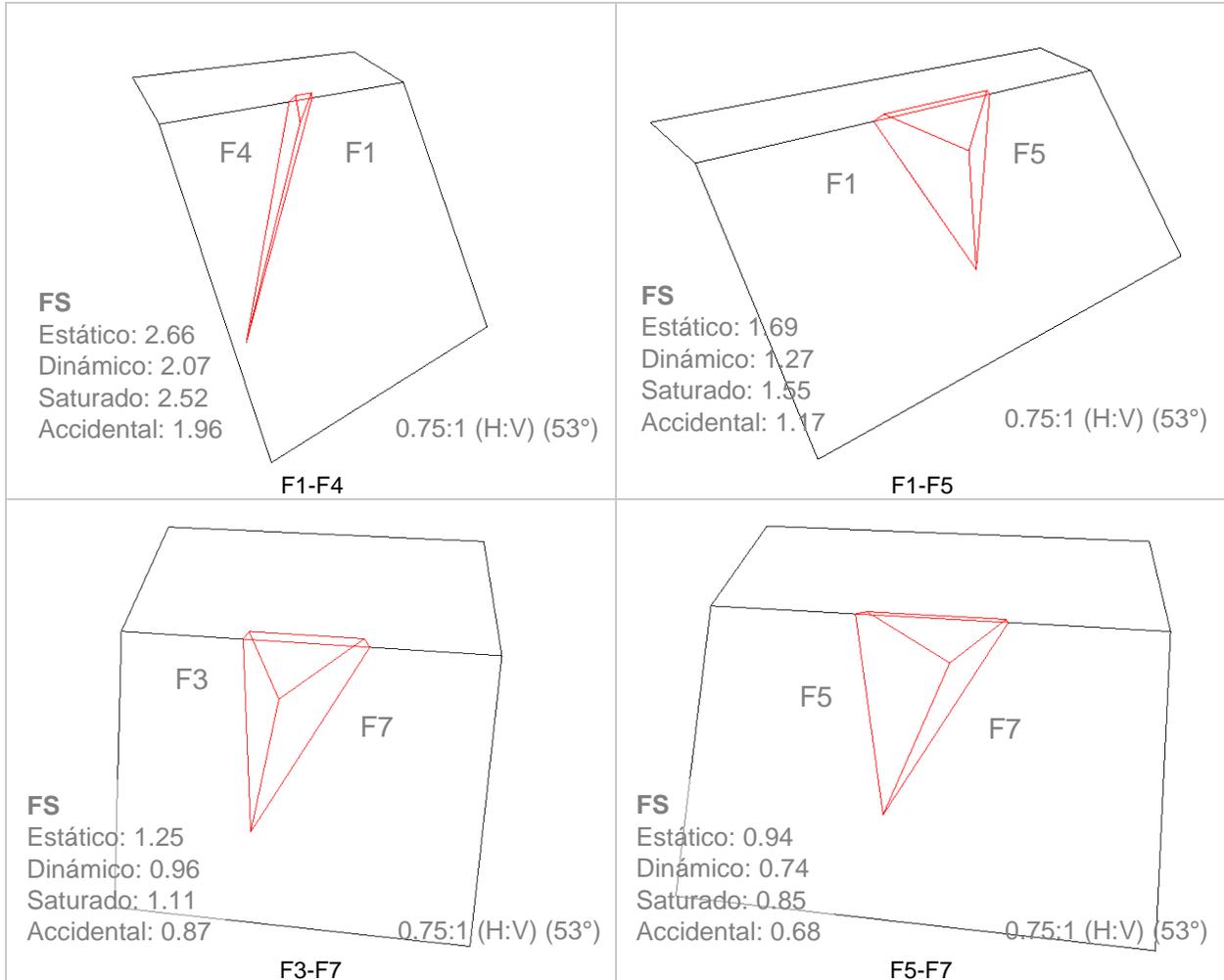


Figura 6.4 Perspectiva gráfica de la geometría de la falla en cuña. Software Swedge.

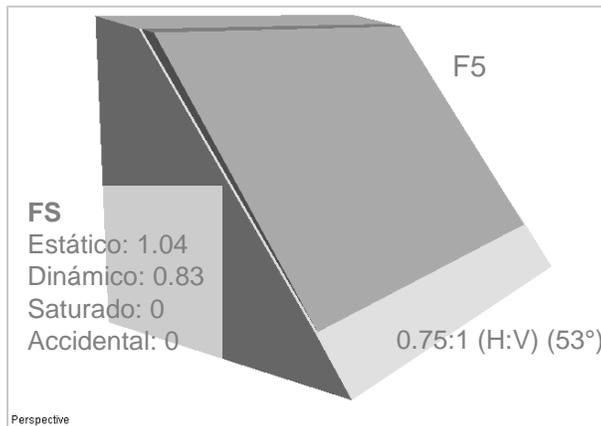


Figura 6.5 Perspectiva gráfica de la geometría de la falla plana. Software RocPlane.

Factores de seguridad para falla estructural							
Tipo de falla	Familias	Dip / Dip Direction	FS sin tratamiento				
			Estático	Dinámico	Saturado	Accidental	
$c = 0.7 \text{ t/m}^2$ y $\phi = 29^\circ$							
Cuña	F1-F4	63°/077°	80°/287°	2.66	2.07	2.52	1.96
	F1-F5	63°/077°	51°/303°	1.69	1.27	1.55	1.17
	F3-F7	67°/259°	45°/016°	1.25	0.96	1.11	0.87
	F5-F7	51°/303°	45°/016°	0.94	0.74	0.85	0.68
Planar	F5	51°/303°		1.04	0.83	0.00	0.00

Tabla 6.8 Factores de seguridad para falla estructural.

• **Falla rotacional**

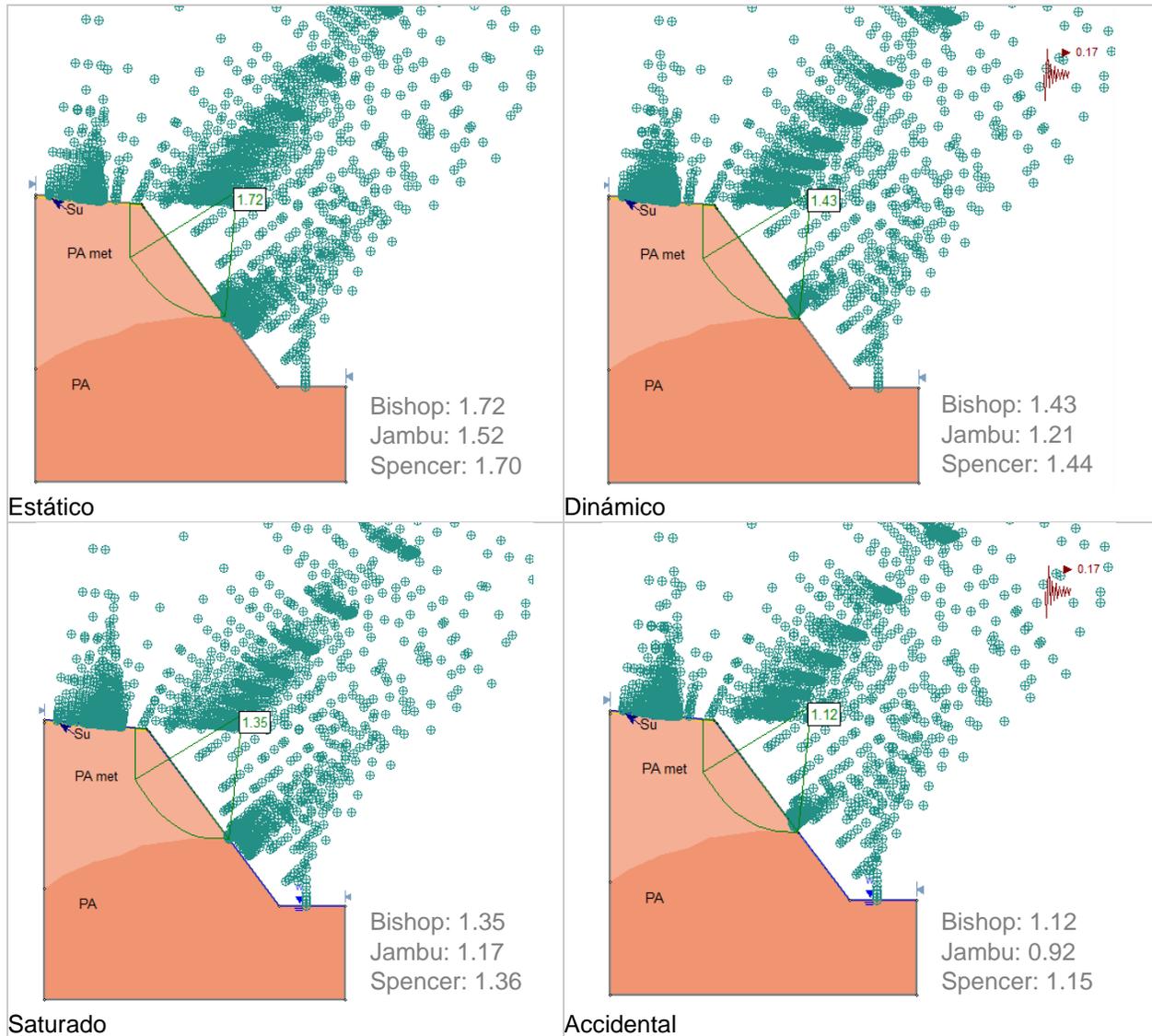


Figura 6.6 Factores de seguridad para falla rotacional – Sección 0+060. Software Slide.

Factores de seguridad para falla rotacional						
Tipo de falla	Litología	Método	FS sin tratamiento			
			Estático	Dinámico	Saturado	Accidental
No circular 0+060	<i>Su</i>	<i>Bishop</i>	1.72	1.43	1.35	1.12
	<i>PA met</i>	<i>Janbu simplified</i>	1.52	1.21	1.17	0.92
	<i>PA</i>	<i>Spencer</i>	1.7	1.44	1.36	1.15

Tabla 6.9 Factores de seguridad para falla rotacional.

6.5 Recomendaciones y conclusiones geotécnicas

De acuerdo con las características geológicas y propiedades geomecánicas, analicé tres posibles soluciones, basadas en el cambio de geometría del talud, con el fin buscar la estabilidad. Es importante recalcar que consideré un 30% menos de saturación debido a las obras de drenaje.

Propuesta 1: Doble abatimiento. 0.5:1 (H:V) (53°) y 0.75:1 (H:V) (63°).

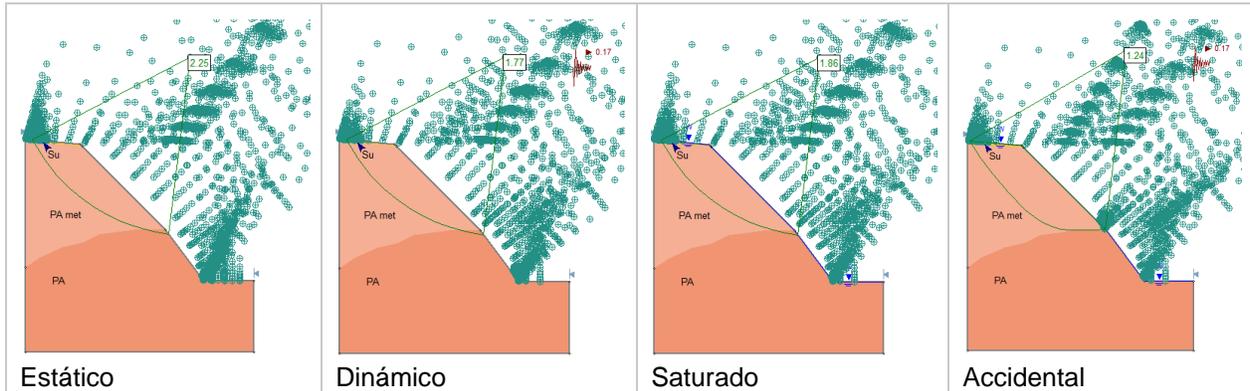


Tabla 6.10 Factor de seguridad con doble abatimiento. Software Slide. Método Bishop.

Propuesta 2: Abatimiento. 1:1 (H:V) (53°)

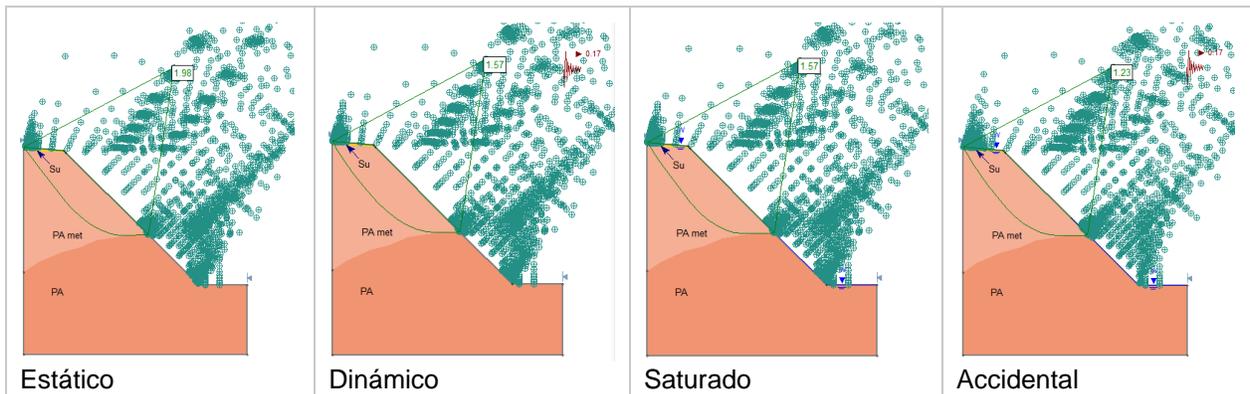


Tabla 6.11 Factor de seguridad con abatimiento. Software Slide. Método Bishop.

Propuesta 3: Berma de 5 m de ancho. 0.5:1 (H:V) (53°)

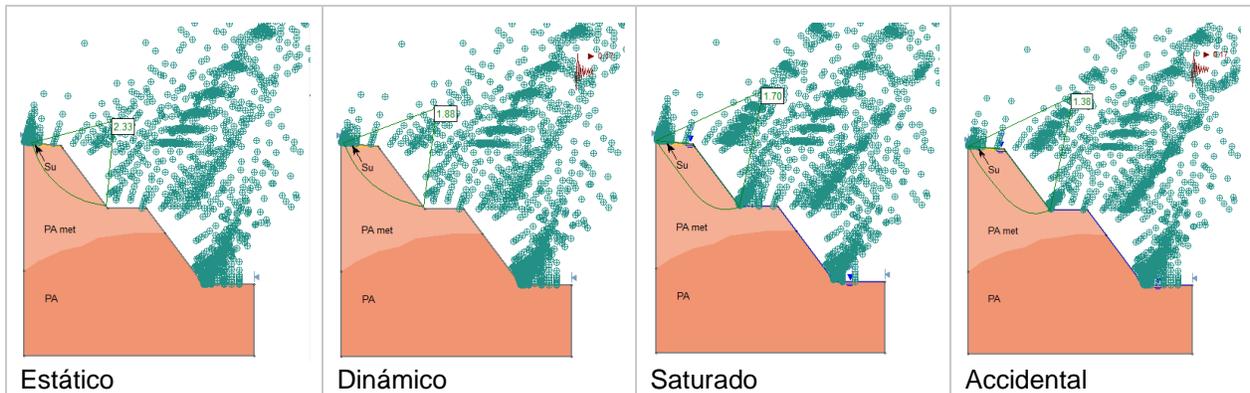


Tabla 6.12 Factor de seguridad con implementación de berma. Software Slide. Método Bishop.

Resumen de las propuestas

Resumen factores de seguridad. Falla rotacional					
Tipo de falla	Tratamiento	Estático	Dinámico	Saturado	Accidental
No circular 0+060	Doble abatimiento	2.25	1.77	1.86	1.24
	Abatimiento	1.98	1.57	1.57	1.23
	Berma	2.33	1.88	1.70	1.38

Tabla 6.13 Tabla resumen de factores de seguridad de tipo de falla rotacional. Método Bishop.

Resumen factores de seguridad. Falla estructural						
Tipo de falla	Familias	Tratamiento	Estático	Dinámico	Saturado	Accidental
Cuña	F1-F4	Doble abatimiento	1.92	1.90	1.91	1.90
		Abatimiento	Eliminada	Eliminada	Eliminada	Eliminada
		Berma	4.16	3.24	4.02	3.13
	F1-F5	Doble abatimiento	1.67	1.55	1.66	1.55
		Abatimiento	1.92	1.44	1.85	1.38
		Berma	2.41	1.81	2.37	1.78
	F3-F7	Doble abatimiento	1.51	1.41	1.50	1.41
		Abatimiento	1.38	1.07	1.33	1.03
		Berma	1.99	1.54	1.96	1.51
	F5-F7	Doble abatimiento	1.47	1.36	1.46	1.34
		Abatimiento	2.43	1.93	2.17	1.72
		Berma	1.37	1.08	1.32	1.05

Tabla 6.14 Tabla resumen de factores de seguridad de tipo de falla estructural.

Tabla comparativa

Soluciones Propuestas					
Doble Abatimiento		Abatimiento		Berma	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Factor de seguridad admisible	Compra de derecho de vía	Retiro de grieta de tensión	Explosivos necesarios para realizar abatimiento	Retiro de grieta de tensión	Explosivos necesarios para realizar berma
Retiro de grieta de tensión			Sobrepasa derecho de vía	Retención de caídos en la berma	Sobrepasa derecho de vía
Explosivos no necesarios			Mayor costo en obras hidráulicas		Mayor costo en obras hidráulicas
Menos tiempo de ejecución			Mayor tiempo de ejecución		Mayor tiempo de ejecución
Menor costo			Mayor costo		Mayor costo
Menor volumen de material 4000 m ³			Mayor volumen de material 10000 m ³		Mayor volumen de material 5000 m ³

Tabla 6.15 Tabla comparativa de tratamientos.

Estas tres propuestas las consideré principalmente por el cambio de geometría, eliminar la grieta de tensión impacta significativamente para la estabilidad buscada en el corte carretero. La nueva línea de ceros quedó a una distancia de:

- **Propuesta 1:** Doble abatimiento. 1.0 m de la antigua grieta de tensión
- **Propuesta 2:** Abatimiento. 2.9 m de la antigua grieta de tensión
- **Propuesta 3:** Berma 0.7 m de la antigua grieta de tensión

Para procedimiento constructivo final consideré “Amacice y perfilado” en el cual se contempla eliminación de la falla plana, partiendo de evidencias vistas en la misma autopista.

A partir de los resultados y comparativa entre las tres propuestas de estabilización del talud, concluí que el mejor tratamiento para este talud es la “**Propuesta 1: Doble Abatimiento**”, cabe señalar que, esta solución considera las condiciones actuales del talud.

Debido a los antecedentes del talud, el estudio hidrológico e hidráulico es pieza fundamental para conocer las principales variantes climáticas predominantes de la zona y verificar la correcta funcionalidad de las obras de drenaje, para garantizar que el 30% menos de saturación se cumpla según lo calculado en el capítulo 5, donde se señala que tienen la capacidad hidráulica para canalizar adecuadamente el gasto de diseño, sin embargo, esto está directamente relacionado con su construcción y adecuado mantenimiento para evitar obstrucciones y mayor acumulación de agua en el talud.

Conclusiones

La falla de un talud implica la convergencia de múltiples condicionantes exclusivos para cada caso, es nuestra tarea identificarlos y anticiparnos a ellos, adecuándonos a las necesidades de cada uno. Para esto, es prioridad contar con información confiable y clara, desde la topografía actualizada, levantamiento geológico, modelo geofísico, hasta datos del laboratorio, con la finalidad de tener la mínima incertidumbre en la caracterización del macizo.

Como aprendizaje de abordar la estabilidad de taludes, es importante tener claro que, como ingenieros, debemos de proponer una solución integradora, eficiente, y como punto a destacar, que antepone la seguridad de los transeúntes y trabajadores, evaluando la factibilidad constructiva, económica y social, con el fin obtener la propuesta más favorecedora.

En el país aún queda un camino largo de aprendizaje, es posible mejorar la normativa con puntos más claros y precisos. El acompañamiento geotécnico lo propondría como un programa permanente de revisión, desde el inicio de la exploración hasta la apertura de la obra, así como durante su operación. En casos necesarios, no limitarnos en ampliar el estudio adecuadamente, por ejemplo, el monitoreo con instrumentación, ya que la sensibilización que se puede obtener nos ayuda a generar un modelo más apegado a la realidad y así predecir apropiadamente el comportamiento de los macizos rocosos.

7 REFERENCIAS

- Comisión Federal de Electricidad. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo*. México.
- Comisión Nacional del Agua. (2020). *Proyecto de Bases de Datos Climatológicos*. Ciudad de México: Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional.
- Cruz Jiménez, Y. (Mayo de 2013). Estudio de prospección geofísica somera usando los métodos de Tomografía Sísmica de Refracción y Electromagnético de Inducción. Ciudad de México, México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Fernández de la Vega-Márquez, T., & Prol-Ledesma, R. M. (2011). Imágenes Landsat TM y modelo digital de elevación para la identificación de lineamientos y mapeo litológico en Punta Mita (México). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 109-118.
- González de Vallejo, L. et al. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Hynes Griffin, M. E. (1984). Rationalizing the seismic coefficient method. *Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009a). *Cuéntame... Información por entidad. Clima*. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009b). *Prontuario de información geográfica de los Estados Unidos Mexicanos. Bahía de Banderas, Nayarit*. Ciudad de México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *Aspectos Geográficos. Nayarit*. Ciudad de México.
- Morán Zenteno, D. et al. (2000). Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 27-58.
- Núñez Cornú, F. J. (2011). Peligro Sísmico en el Bloque de Jalisco, México. *Física de la Tierra*, 23(1), 199-229.
- Pérez Escobar, O. A. (2017). *Estudio Geofísico de Refracción (TRS) para caracterización del terreno*. Ciudad de México: Constructora Fagas S.A. de C.V.
- Rodríguez Castañeda, J. L., & Rodríguez Torres, R. (2019). Geología estructural y estratigrafía del área entre Guadalajara y Tepic, estados de Jalisco y Nayarit, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 10(2), 99-110.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). Estudios. *Normativa para la Infraestructura del Transporte*. Ciudad de México, México. Obtenido de <https://normas.imt.mx/>
- SEHEDIS. (2019). *SDS Sísmica de Suelos*. Obtenido de <https://sismica.com.mx>
- Servicio Geológico Mexicano. (2001). *Carta Geológica-Minera Punta Sayulita F13-C58, Escala 1:50,000*.

8 ANEXOS

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración I. Fotografía con VANT km 0+000 al km 0+030 aproximadamente.....	63
Ilustración II. Fotografía con VANT km 0+000 al km 0+060 aproximadamente.....	64
Ilustración III. Fotografía con VANT km 0+030 al km 0+090 aproximadamente.....	65
Ilustración IV. Fotografía con VANT km 0+060 al km 0+130 aproximadamente.	66
Ilustración V. Fotografía con VANT km 0+100 al km 0+160 aproximadamente.	67
Ilustración VI. Fotografía con VANT km 0+120 al km 0+180 aproximadamente.	68
Ilustración VII. Fotografía con VANT km 0+150 al km 0+210 aproximadamente.	69
Ilustración VIII. Fotografía con VANT km 0+180 al km 0+250 aproximadamente.	70
Ilustración IX. Sismograma TRS-1. PT-1.....	71
Ilustración X. Sismograma TRS-1. PT-2.....	72
Ilustración XI. Sismograma TRS-1. PT-3.....	73
Ilustración XII. Sismograma TRS-2. PT-1.....	74
Ilustración XIII. Sismograma TRS-2. PT-2.....	75
Ilustración XIV. Sismograma TRS-2. PT-3.....	76
Ilustración XV. Dromocrónicas TRS-1.	77
Ilustración XVI. Procesado dromocrónicas TRS-1.	77
Ilustración XVII. Dromocrónicas digitalizadas TRS-1.....	78
Ilustración XVIII. Dromocrónicas TRS-2.	79
Ilustración XIX. Procesado dromocrónicas TRS-2.	79
Ilustración XX. Dromocrónicas digitalizadas TRS-2.	80
Ilustración XXI. Ensayo de Martillo Schmidt.....	81
Ilustración XXII. Pórfido andesítico (PA). Criterio de Barton-Bandis.....	82
Ilustración XXIII. Pórfido andesítico meteorizado (PA met). Criterio de Barton-Bandis.....	83
Ilustración XXIV. Pórfido andesítico (PA). Criterio de generalizado de Hoek-Brown.	84
Ilustración XXV. Pórfido andesítico meteorizado (PA met). Criterio de generalizado de Hoek-Brown.	85
Ilustración XXVI. Pórfido andesítico intensamente meteorizado (PA int). Criterio de generalizado de Hoek-Brown.....	86
Ilustración XXVII. Datos estructurales.	87
Ilustración XXVIII. Falla plana.....	88
Ilustración XXIX. Falla en cuña.....	89
Ilustración XXX. Falla por volteo.....	89
Ilustración XXXI. RMR.....	90
Ilustración XXXII. GSI.....	91

LISTA DE PLANOS

Plano Topográfico TP-1. Planta y perfil.....	92
Plano Topográfico TP-2. Secciones.	93
Plano Geológico-Geotécnico GT-1. Planta y perfil.....	94
Plano Geológico-Geotécnico GT-2. Secciones.....	95

8.1 FOTOGRAFÍAS CON VANT (VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO)



Ilustración I. Fotografía con VANT km 0+000 al km 0+030 aproximadamente.



Ilustración II. Fotografía con VANT km 0+000 al km 0+060 aproximadamente.



Ilustración III. Fotografía con VANT km 0+030 al km 0+090 aproximadamente.



Ilustración IV. Fotografía con VANT km 0+060 al km 0+130 aproximadamente.

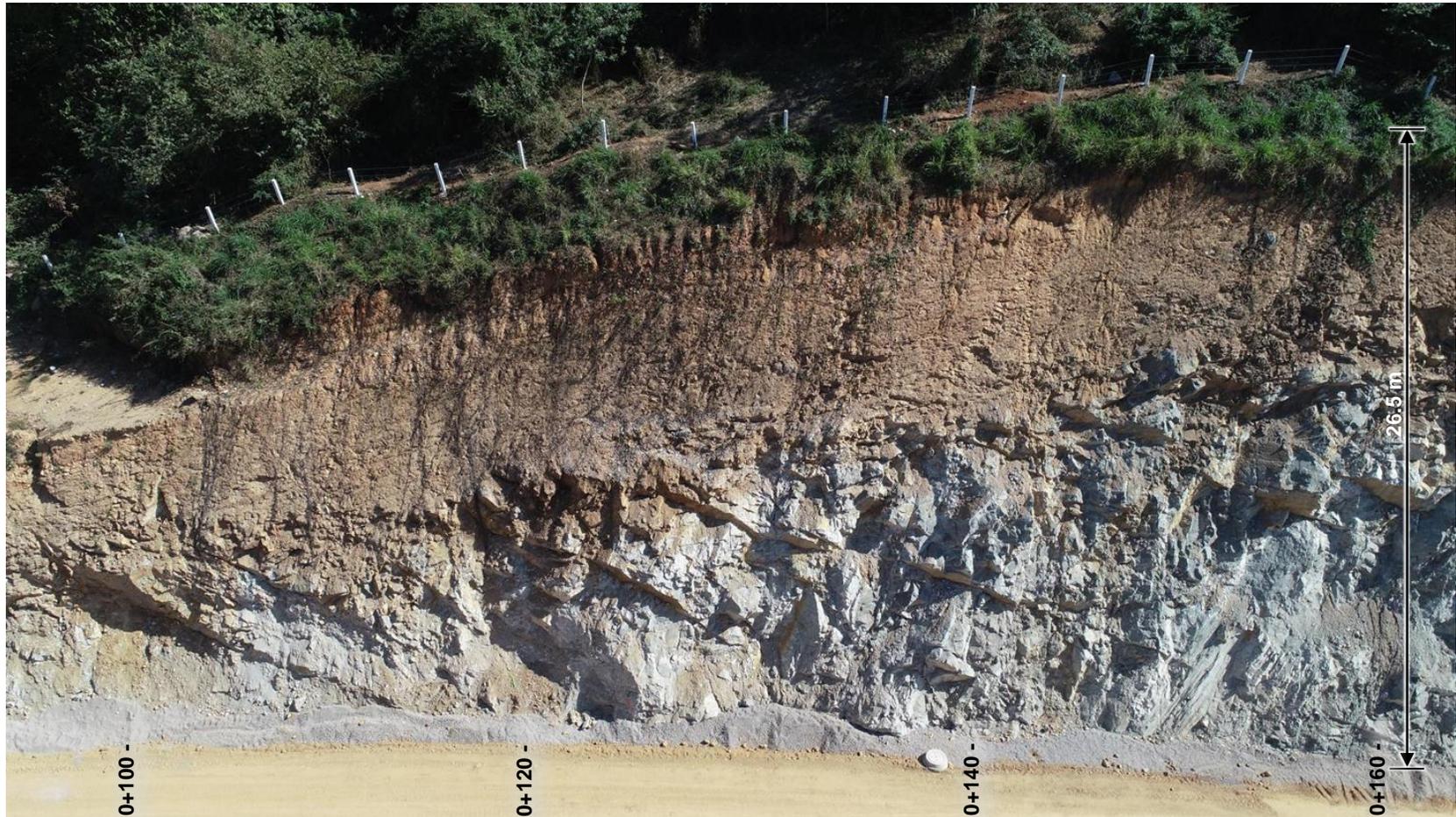


Ilustración V. Fotografía con VANT km 0+100 al km 0+160 aproximadamente.

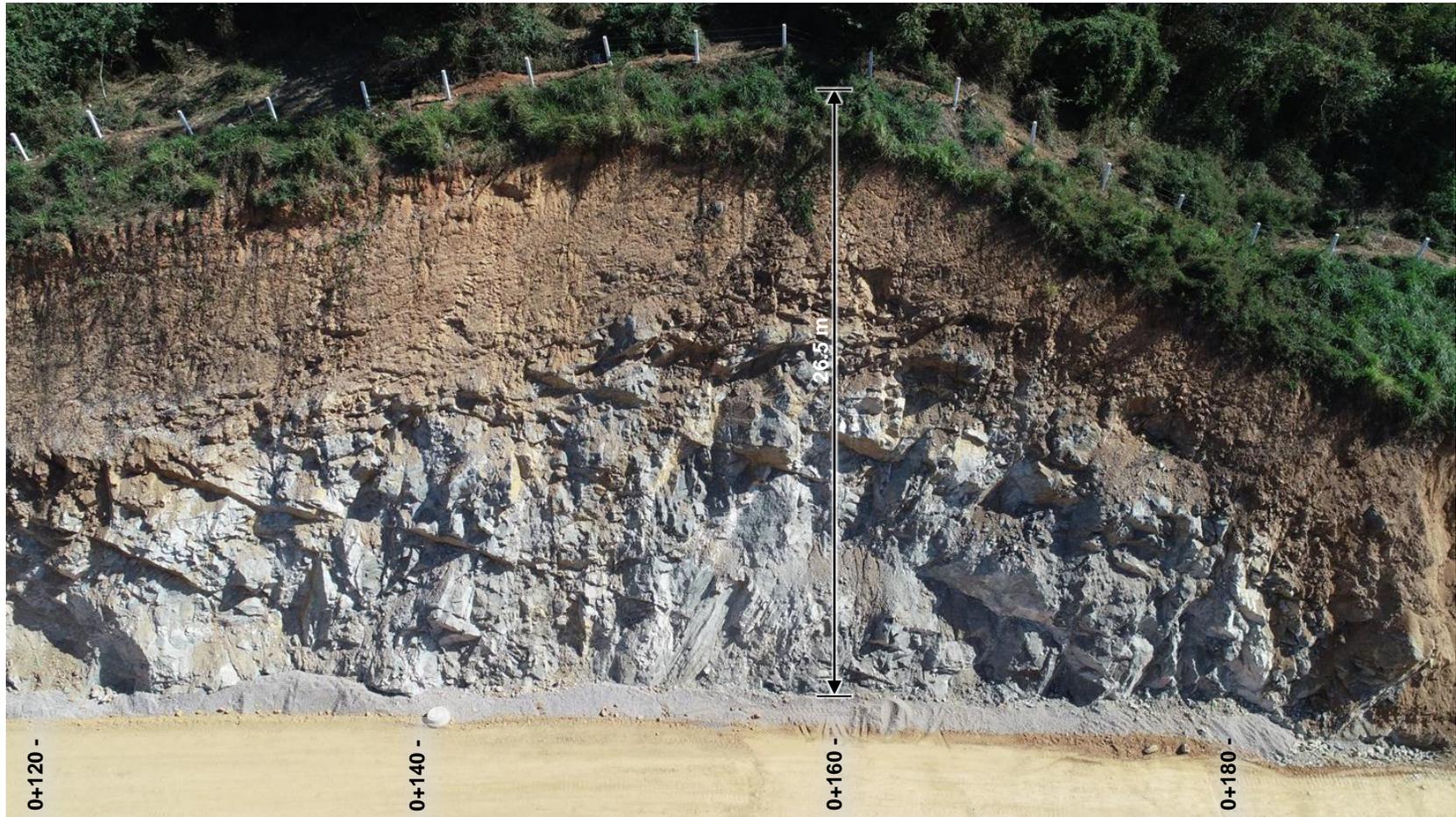


Ilustración VI. Fotografía con VANT km 0+120 al km 0+180 aproximadamente.



Ilustración VII. Fotografía con VANT km 0+150 al km 0+210 aproximadamente.

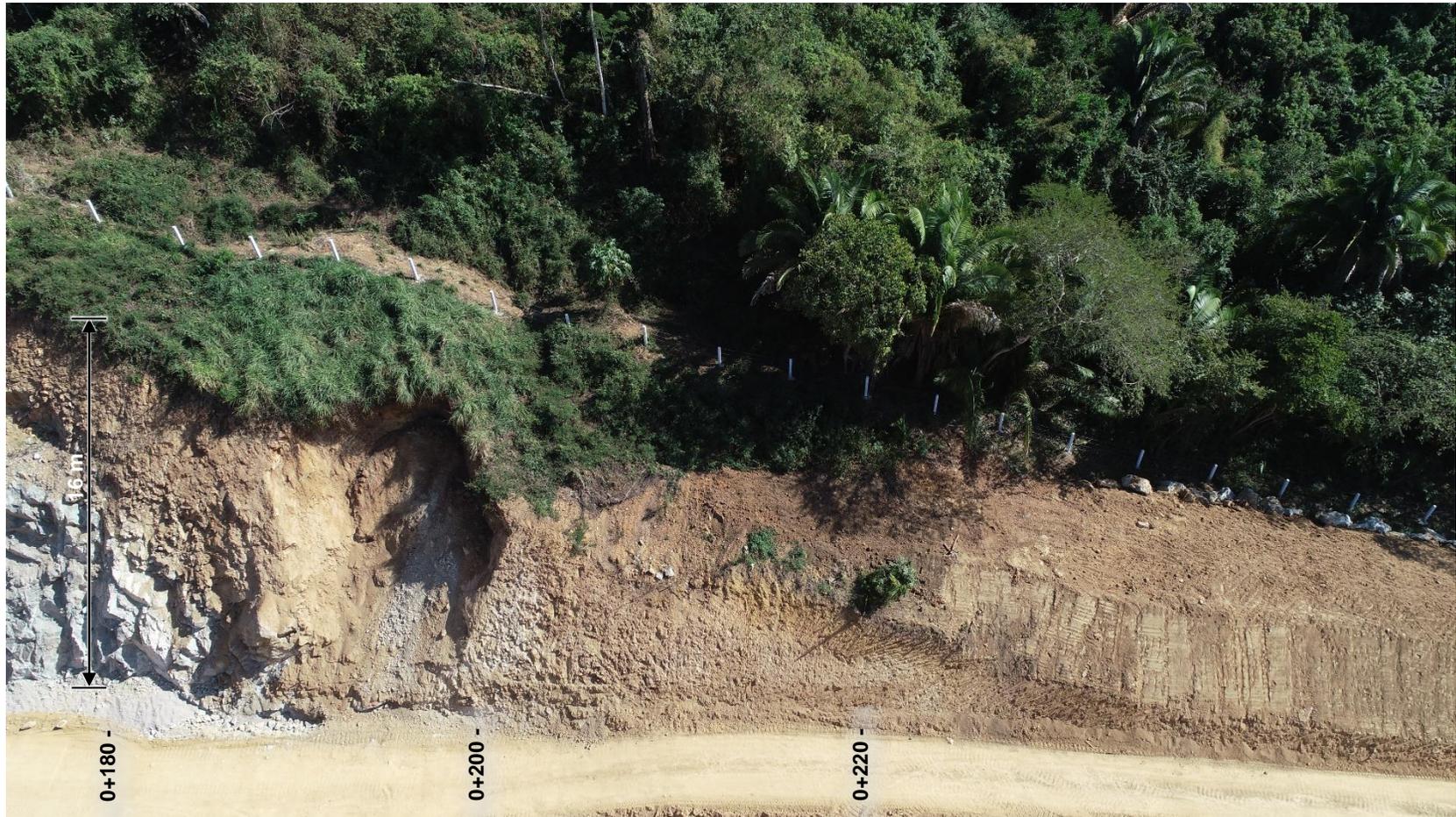


Ilustración VIII. Fotografía con VANT km 0+180 al km 0+250 aproximadamente.

8.2 ESTUDIO GEOFÍSICO

SISMOGRAMAS

Los sismogramas presentados a continuación, son los sismogramas adquiridos en campo (datos crudos), los cuales en gabinete se suavizan, filtran, aumentan y disminuyen su amplitud con el programa PICWIN.

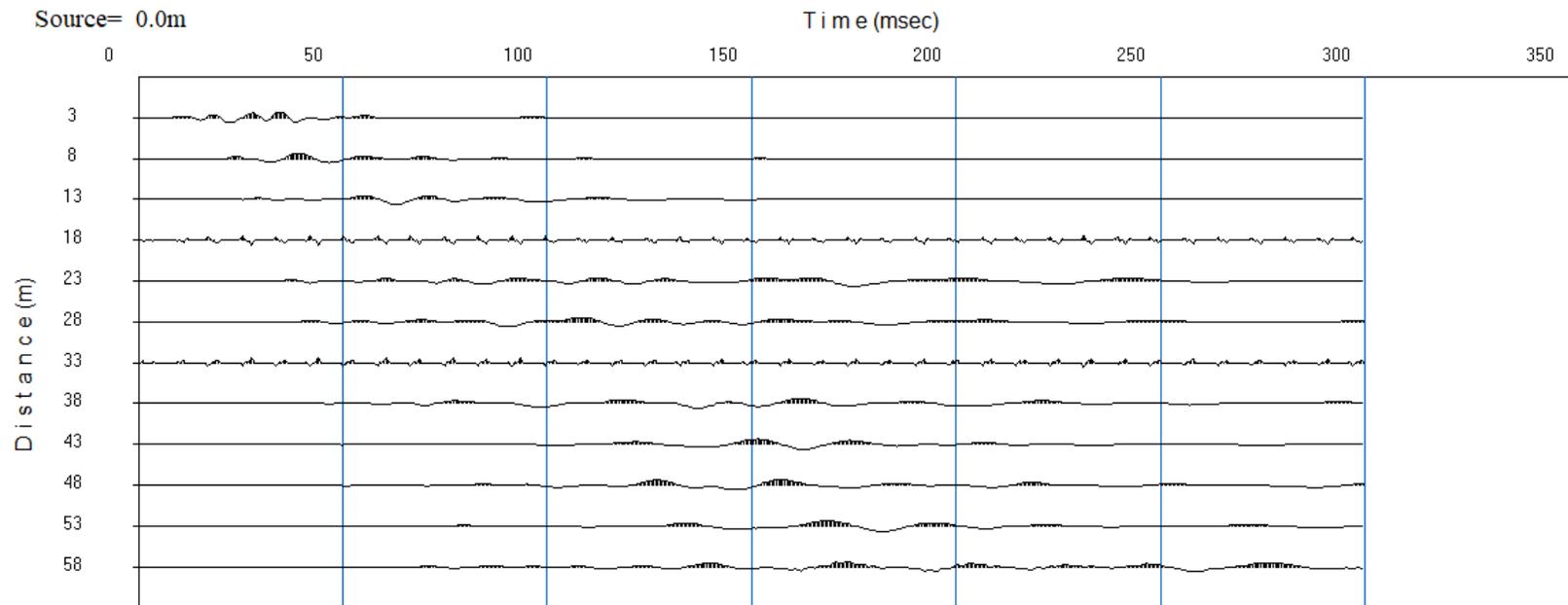


Ilustración IX. Sismograma TRS-1. PT-1

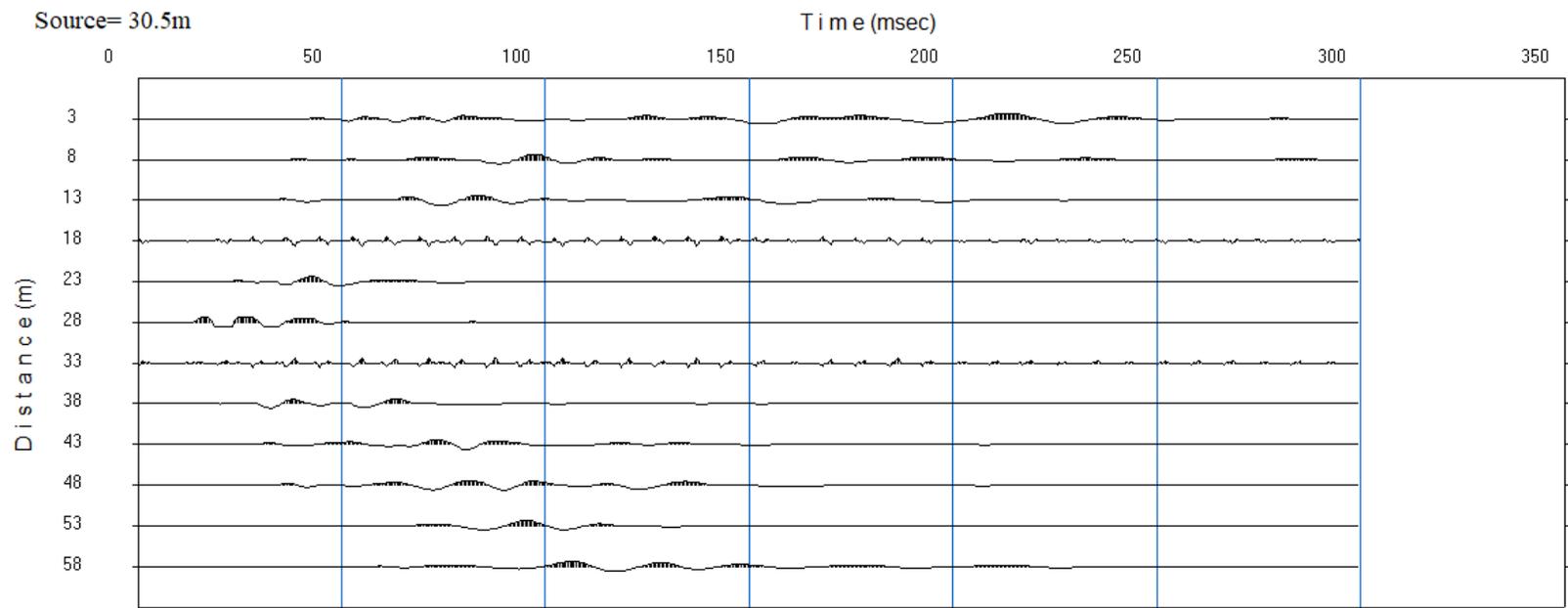


Ilustración X. Sismograma TRS-1. PT-2

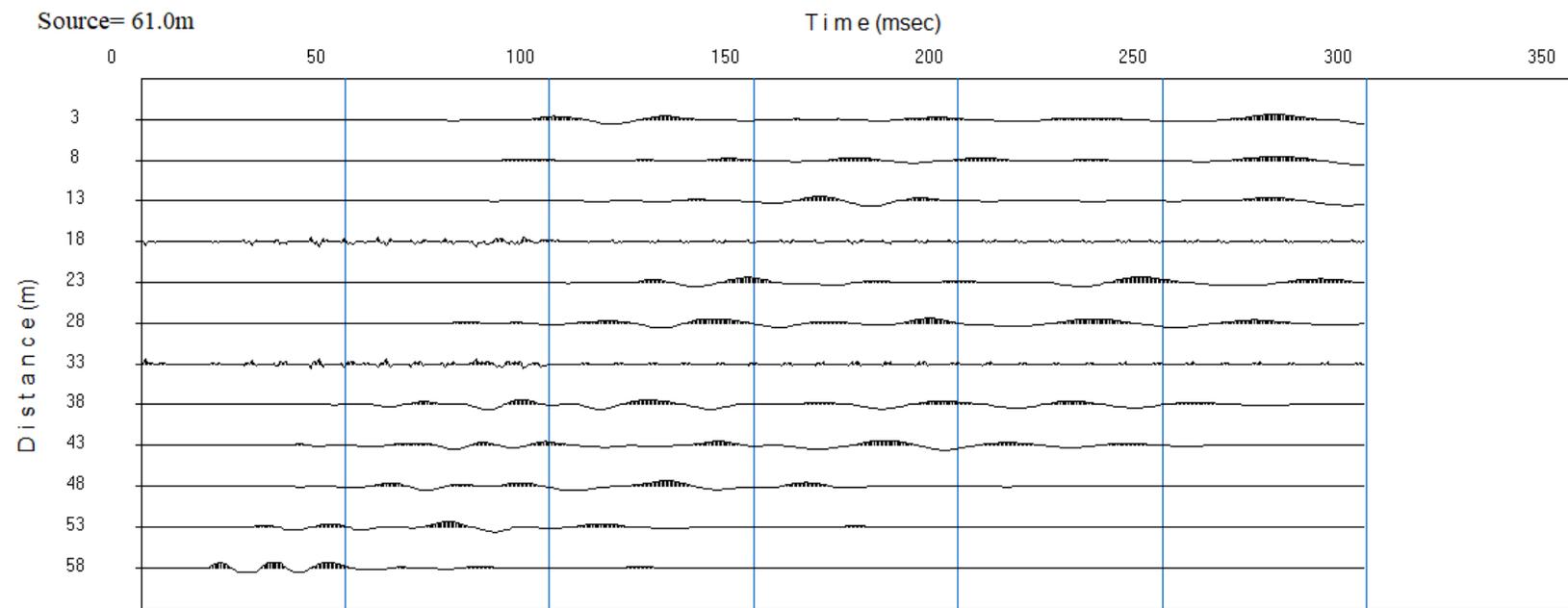


Ilustración XI. Sismograma TRS-1. PT-3

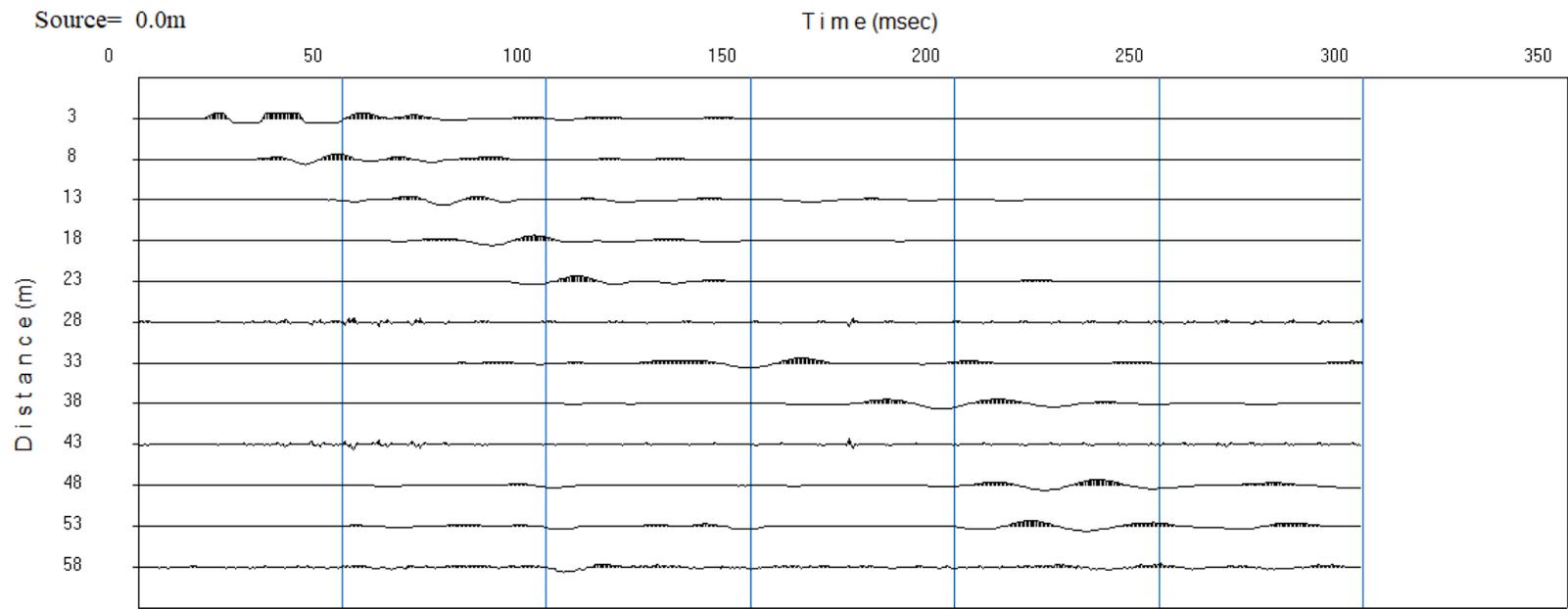


Ilustración XII. Sismograma TRS-2. PT-1

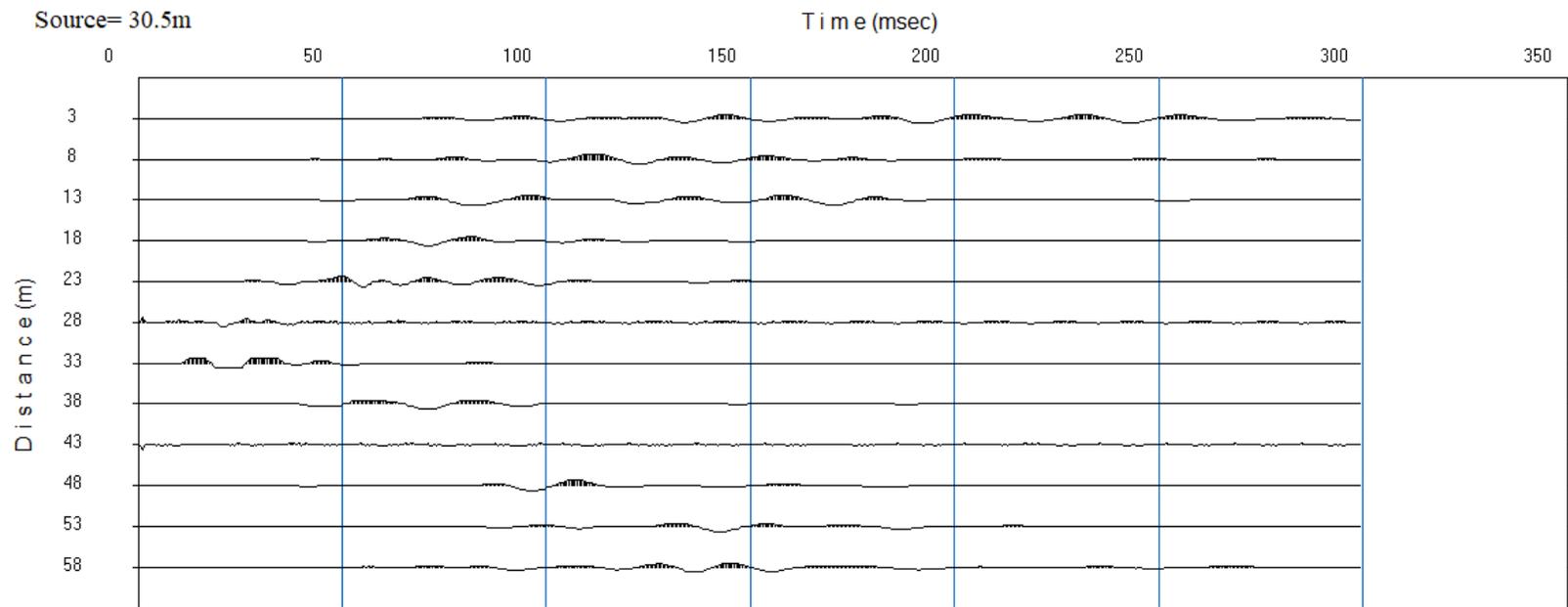


Ilustración XIII. Sismograma TRS-2. PT-2.

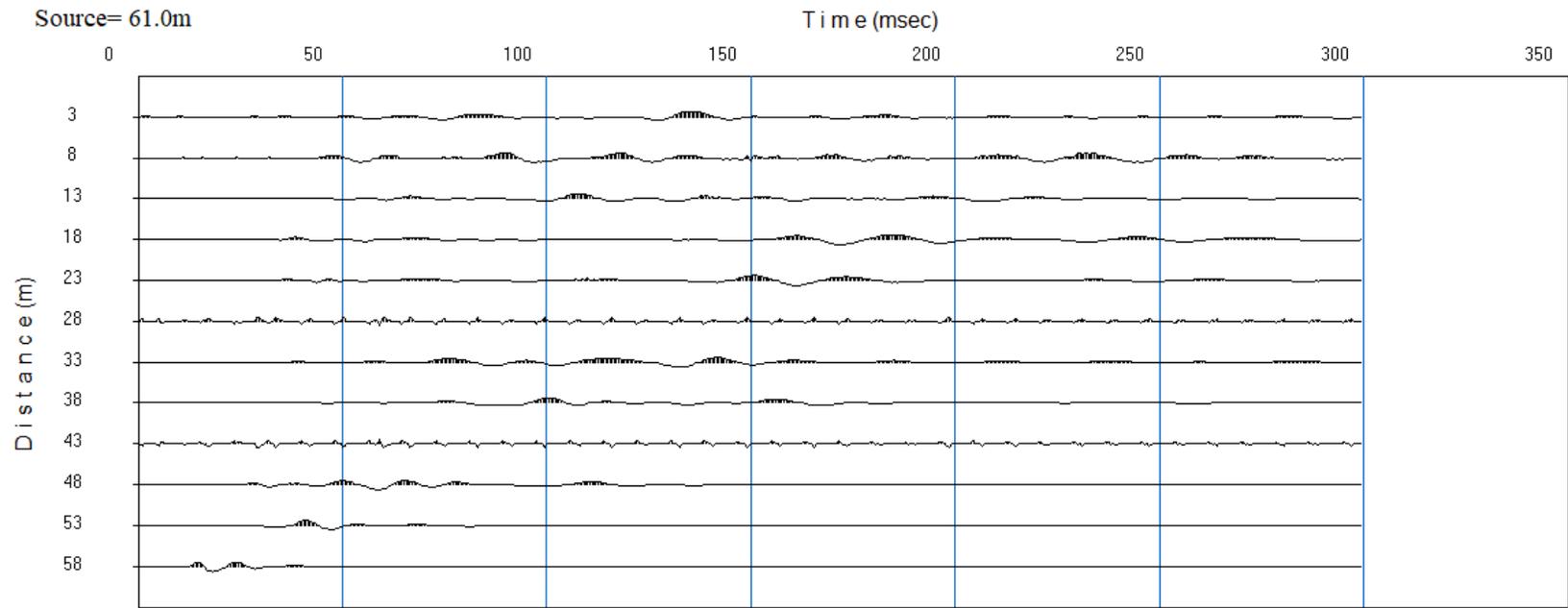


Ilustración XIV. Sismograma TRS-2. PT-3.

DROMOCRÓNICAS

Dromocrónicas y procesado TRS-1.

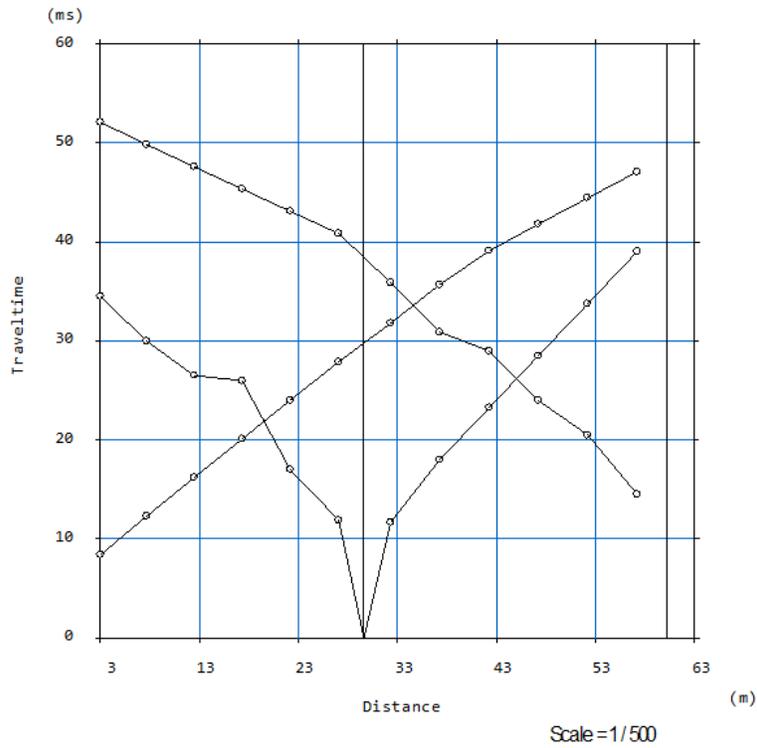


Ilustración XV. Dromocrónicas TRS-1.

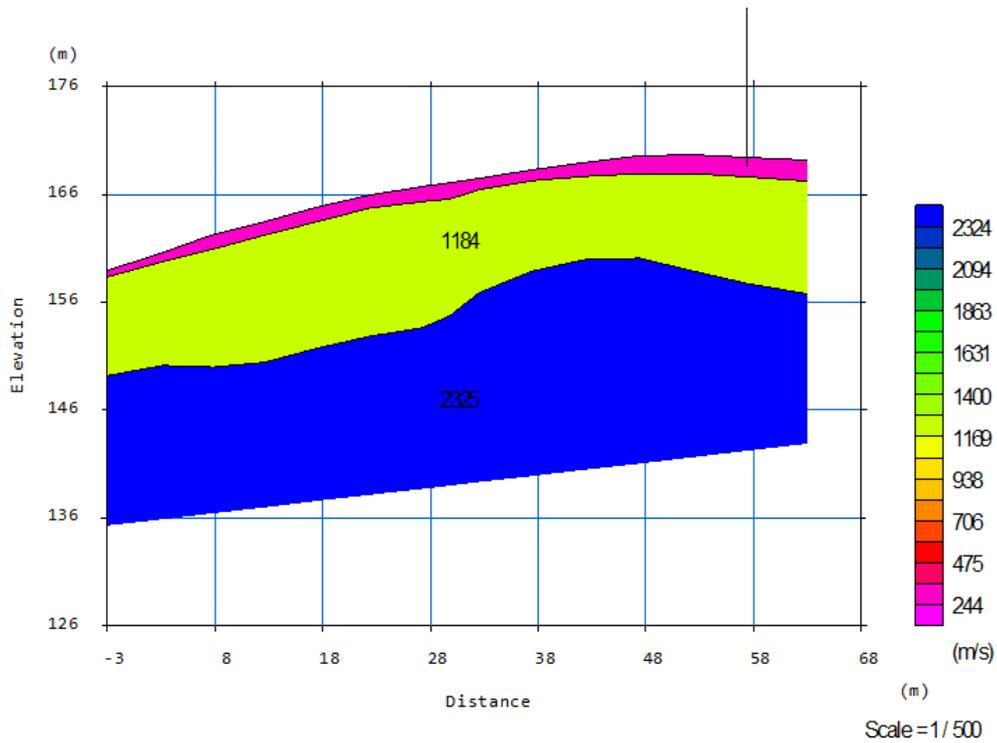


Ilustración XVI. Procesado dromocrónicas TRS-1.

Dromocrónicas digitalizadas	
Profundidad	Tiempo
(m)	(ms)
0	PT1
2.7	8.444817
7.37	12.343118
12.2	16.241421
17.03	20.139721
21.89	24.038023
26.8	27.936325
32.04	31.834627
36.98	35.732929
41.95	39.137943
46.94	41.804607
51.93	44.471272
56.9	47.137936
29.33	PT2
2.7	34.500004
7.37	30.000004
12.2	26.500004
17.03	26.000004
21.89	17.000002
26.8	11.921756
32.04	11.726951
36.98	18.024765
41.95	23.28117
46.94	28.537575
51.93	33.79398
56.9	39.050388
59.99	PT3
2.7	52.115894
7.37	49.870998
12.2	47.626102
17.03	45.381207
21.89	43.136311
26.8	40.875019
32.04	35.90205
36.98	30.929083
41.95	29.000004
46.94	24.000004
51.93	20.500002
56.9	14.500002

Ilustración XVII. Dromocrónicas digitalizadas TRS-1.

Dromocrónicas y procesado TRS-2.

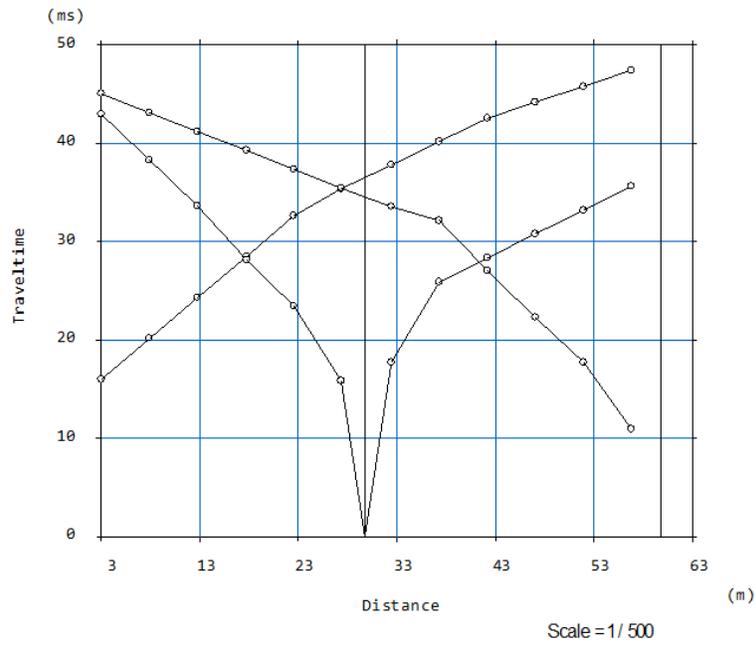


Ilustración XVIII. Dromocrónicas TRS-2.

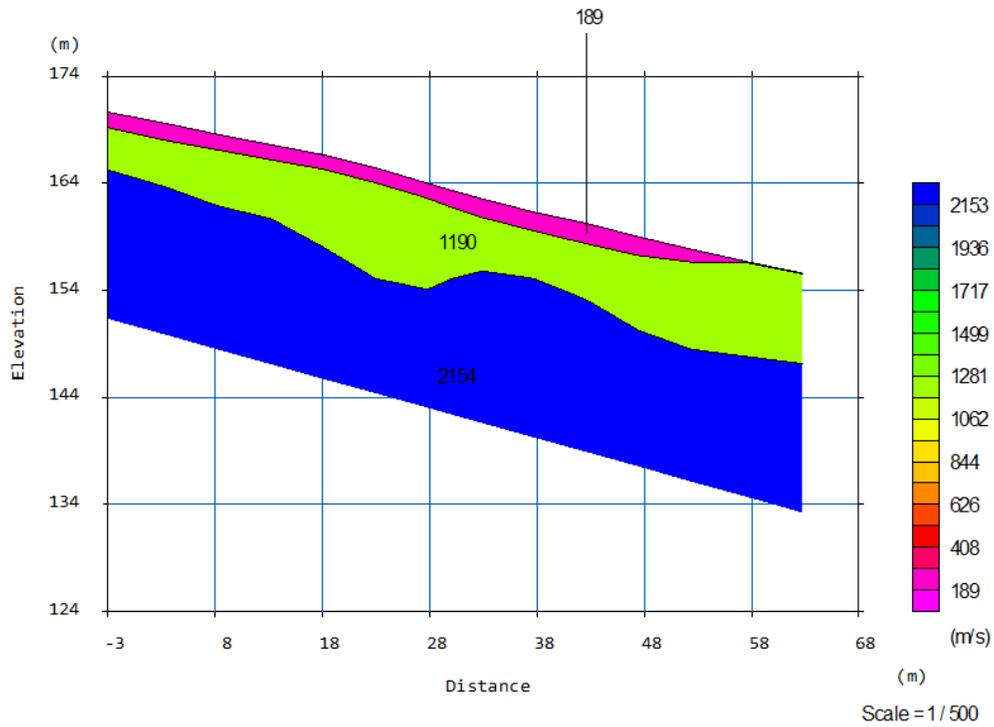


Ilustración XIX. Procesado dromocrónicas TRS-2.

Dromocrónicas digitalizadas	
Profundidad	Tiempo
(m)	(ms)
0	PT1
2.93	16.034109
7.87	20.190355
12.72	24.346601
17.69	28.502848
22.49	32.659092
27.31	35.411266
32.4	37.817902
37.27	40.224541
42.17	42.590981
47.01	44.213619
51.88	45.836258
56.78	47.4589
29.73	PT2
2.93	42.99741
7.87	38.343323
12.72	33.689236
17.69	28.177216
22.49	23.478563
27.31	15.880242
32.4	17.774977
37.27	25.939428
42.17	28.371859
47.01	30.804289
51.88	33.236721
56.78	35.669151
59.77	PT3
2.93	45.058678
7.87	43.141861
12.72	41.225044
17.69	39.308231
22.49	37.391415
27.31	35.474598
32.4	33.557785
37.27	32.169498
42.17	27.097038
47.01	22.323397
51.88	17.753162
56.78	10.986559

Ilustración XX. Dromocrónicas digitalizadas TRS-2.

8.3 TRABAJOS DE CAMPO Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS

ENSAYO DE MARTILLO SCHMIDT

El Martillo Schmidt es un ensayo del que se obtiene una estimación de la resistencia a la compresión simple del material a partir de correlaciones. Para realizarlo, se limpia la zona y se aplica el martillo presionando hasta que salta el muelle. En función de la dureza o resistencia de la roca, e indica un valor de rebote. Se realizan 10 percusiones con el martillo, los 5 valores más bajos se eliminan y se toma el valor promedio de los restantes, este se correlaciona mediante un ábaco con la resistencia a compresión simple, la densidad de la roca, inclinación del martillo y plano ensayado (González de Vallejo et al., 2002). Presento los resultados del ensayo de Martillo Schmidt que realicé en campo.

Litología		Pórfido Andesítico Intensamente Meteorizado (PA int)		Pórfido Andesítico Meteorizado (PA met)		Pórfido Andesítico (PA)	
Densidad relativa [KN/m ³]		25.49		24.32		25.59	
Orientación							
Valores de rebote del martillo	1	15	22	15	39	32	50
	2	12	26	18	42	38	42
	3	10	26	21	37	28	47
	4	14	19	16	38	40	49
	5	12	19	22	44	34	30
	6	13	20	21	42	35	42
	7	14	25	16	44	33	48
	8	14	15	11	44	38	32
	9	13	29	23	30	35	42
	10	15	20	22	30	32	43
Promedio (5 valores más altos)		14.4	25.6	21.8	43.2	37.2	47.4
Resistencia uniaxial [MPa]		17	35.5	25	65.5	60	111

Ilustración XXI. Ensayo de Martillo Schmidt

ESTIMACIÓN ÁNGULO DE FRICCIÓN

Con el Software RocData3.0 realicé el cálculo del ángulo de fricción interna basada en el criterio empírico de Barton y Bandis implementando los parámetros obtenidos y observaciones de campo.

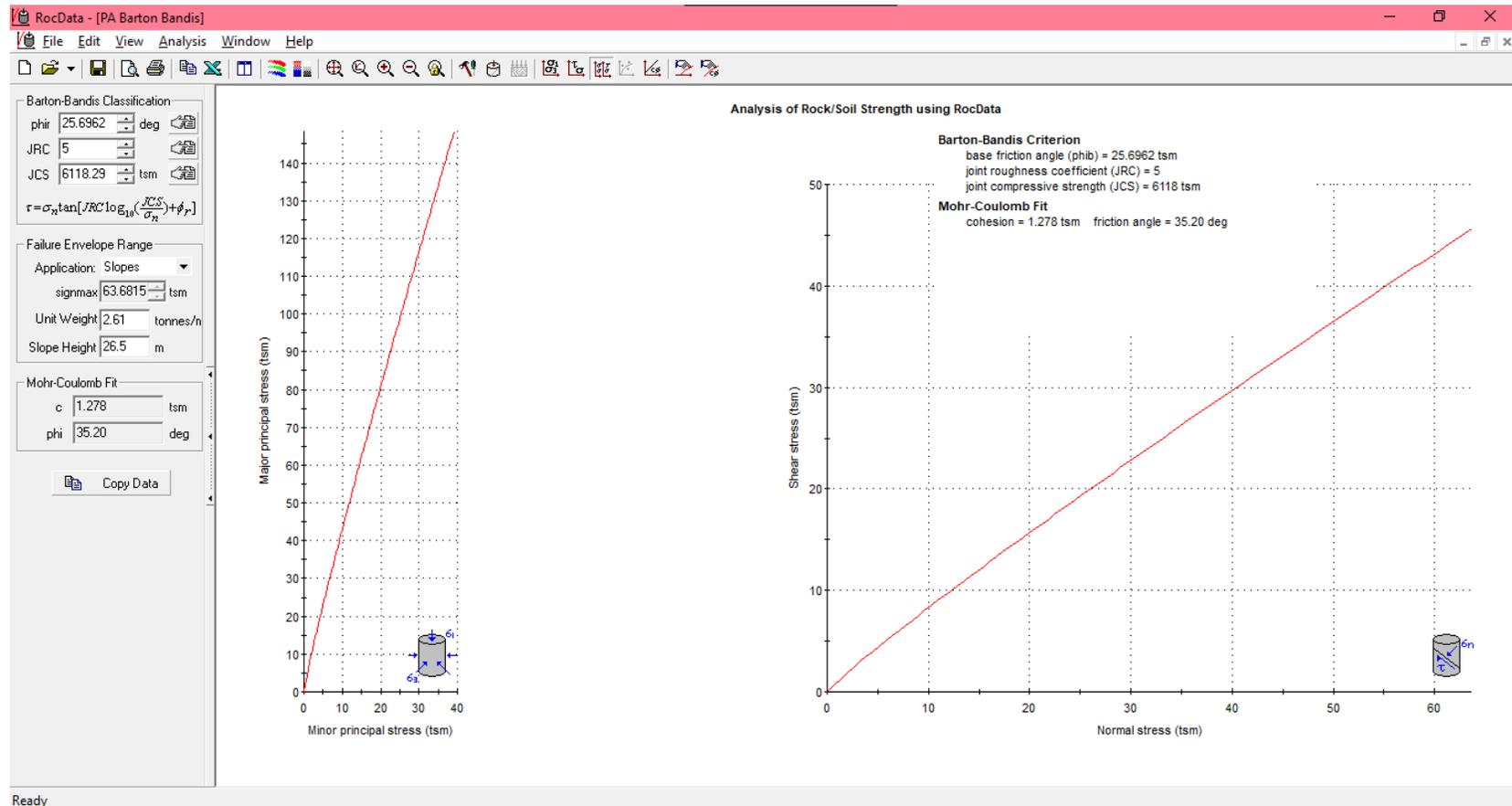


Ilustración XXII. Pórfido andesítico (PA). Criterio de Barton-Bandis.

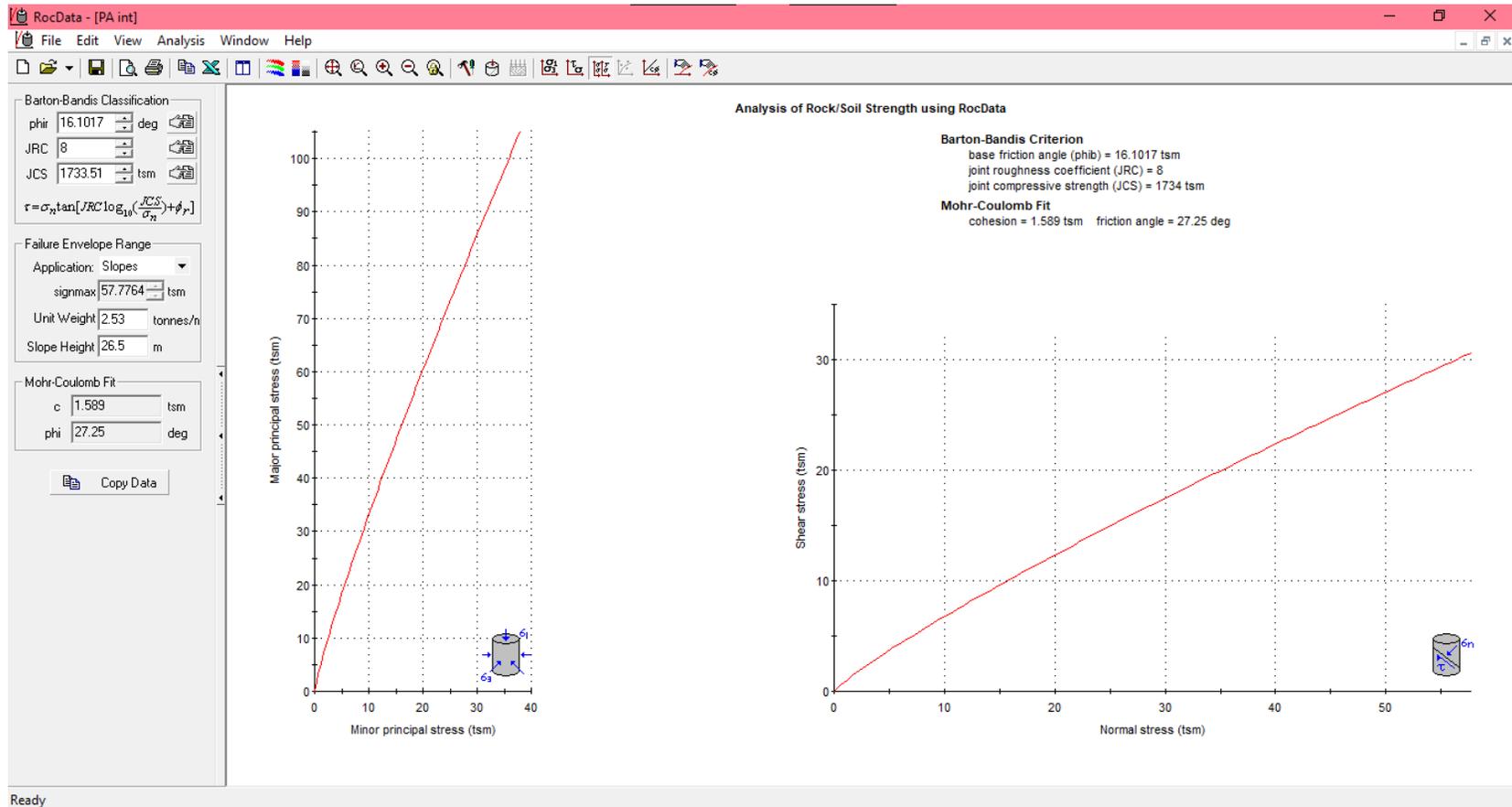


Ilustración XXIII. Pórfido andesítico meteorizado (PA met). Criterio de Barton-Bandis.

De igual manera se empleó el método generalizado de Hoek y Brown con el que es posible determinar los parámetros de resistencia de macizos rocosos fracturados, dichos parámetros serán los utilizados en los análisis por falla rotacional.

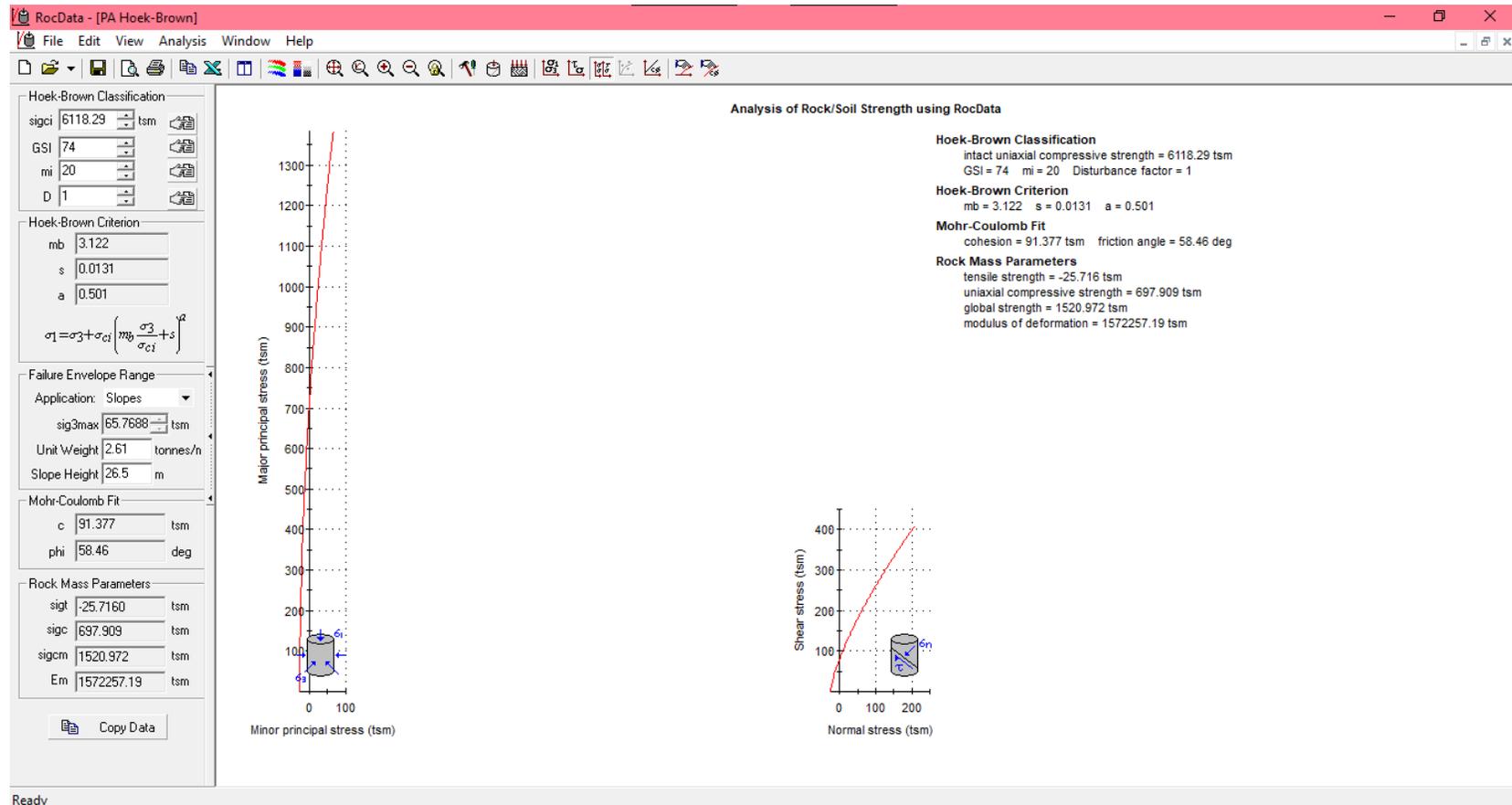


Ilustración XXIV. Pórfido andesítico (PA). Criterio de generalizado de Hoek-Brown.

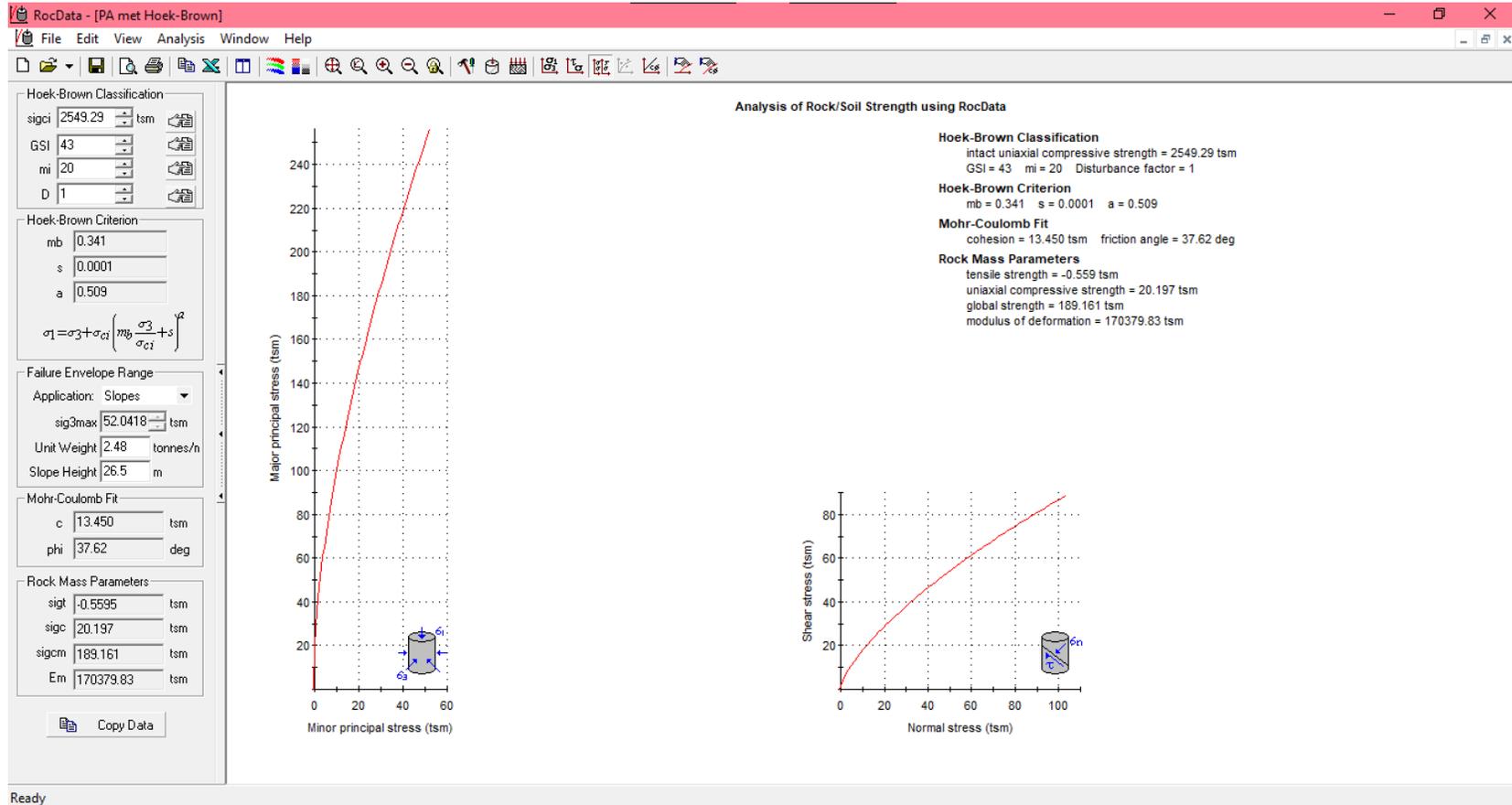


Ilustración XXV. Pórfido andesítico meteorizado (PA met). Criterio de generalizado de Hoek-Brown.

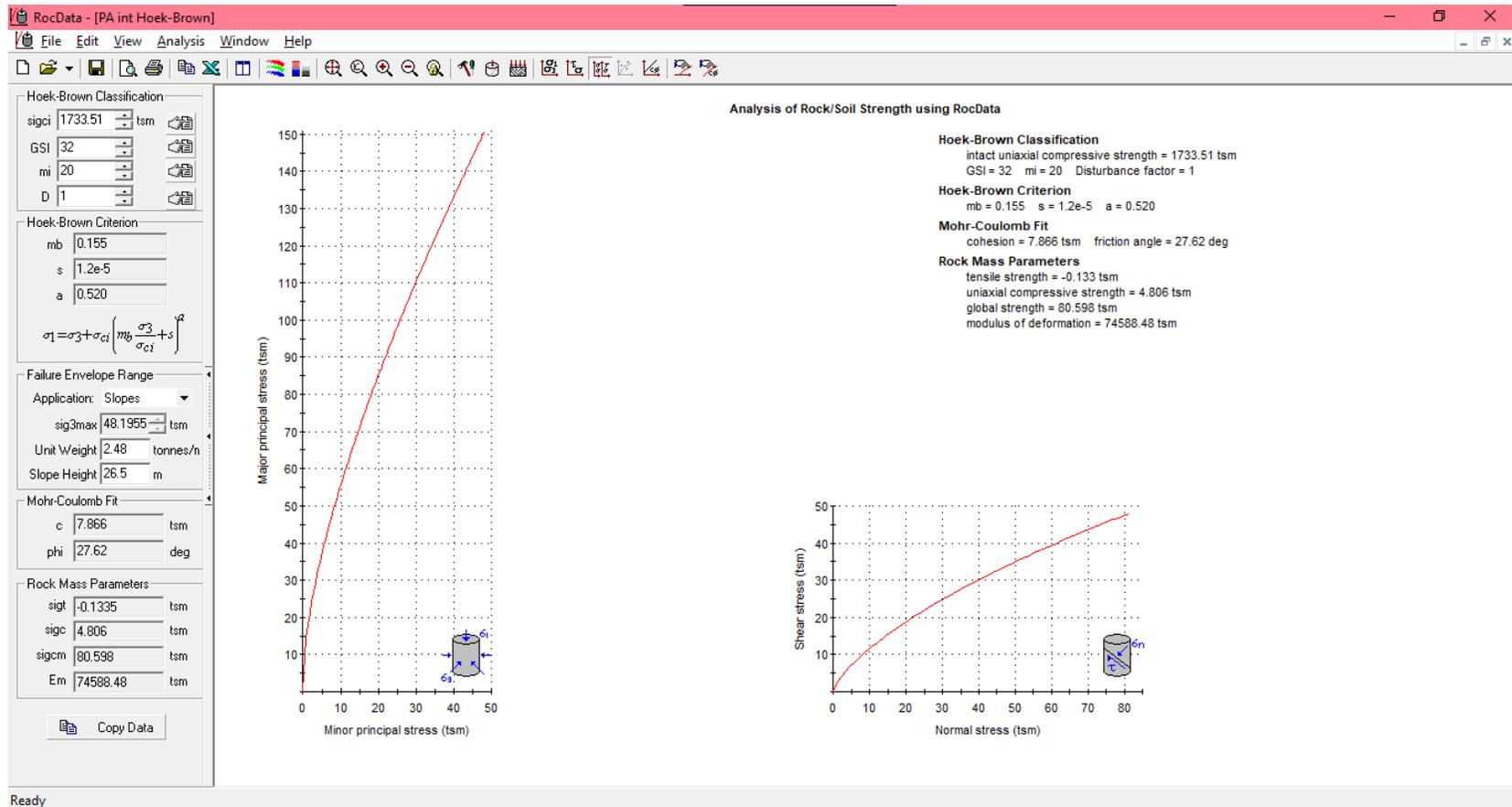


Ilustración XXVI. Pórfido andesítico intensamente meteorizado (PA int). Criterio de generalizado de Hoek-Brown.

ANÁLISIS CINÉMÁTICO

Este análisis lo realicé por estereografía, que es una técnica gráfica que permite evaluar de manera preliminar la estabilidad de los taludes a través de sus debilidades estructurales, ya sean fracturas, planos de estratificación y fallas, si existen.

Para realizar este análisis utilicé el ángulo de fricción, los datos de los vectores de la máxima pendiente de los planos de las familias de discontinuidades y la inclinación del talud.

A continuación, se encuentran los datos estructurales del echado y dirección del echado (Dip/ Dip Direction) de las discontinuidades tomadas en sitio.

ID	Dip	Dip Direction	Set	ID	Dip	Dip Direction	Set
1	53	1	7	34	45	25	7
2	79	345	6	35	77	165	2
3	55	320	5	36	64	270	3
4	35	315	5	37	75	250	3
5	71	140	2	38	70	30	
6	45	300	5	39	65	0	
7	70	90	1	40	33	30	7
8	59	155	2	41	75	160	2
9	65	20		42	47	65	1
10	40	270		43	65	270	3
11	75	330		44	45	310	5
12	66	150	2	45	45	20	7
13	55	340		46	60	310	5
14	85	110		47	40	40	7
15	60	90	1	48	60	310	5
16	65	180		49	60	80	1
17	55	70	1	50	79	0	6
18	60	220		51	47	270	3
19	76	0	6	52	54	250	3
20	82	140	2	53	40	30	7
21	79	280	4	54	50	0	7
22	72	345	6	55	50	10	7
23	79	255	3	56	80	290	4
24	80	160	2	57	72	290	4
25	70	255	3	58	45	289	5
26	80	350	6	59	86	285	4
27	79	349	6	60	50	303	5
28	82	0	6	61	80	150	2
29	79	255	3	62	90	168	
30	73	340	6	63	78	97	
31	84	350	6	64	89	90	
32	76	75	1	65	55	164	
33	80	170	2	66	64	94	

Ilustración XXVII. Datos estructurales.

- Ángulo de fricción
 - **PA: 35°**
 - **PA met: 27°**
- Talud (Dip/Dip Direction)
 - Talud: **53°/324°**
- Principales familias (Dip/Dip Direction)
 - F1: 63°/077°
 - F2: 74°/153°
 - F3: 67°/259°
 - F4: 80°/287°
 - F5: 51°/303°
 - F6: 77°/350°
 - F7: 45°/016°

El corte es inestable a falla plana con un ángulo de actual de 53° por la familia F5.

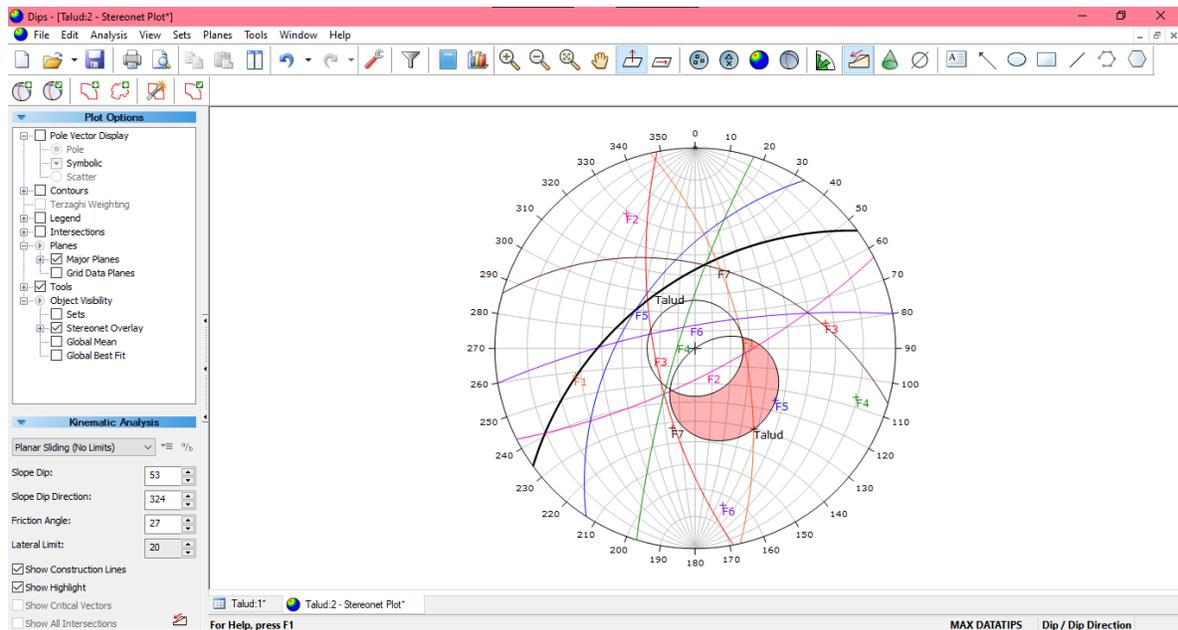


Ilustración XXVIII. Falla plana.

El corte es inestable a falla en cuña por las siguientes intersecciones de las familias: F1-F4, F1-F5, F3-F5, F3-F7, F4-F5, F4-F7 y F5-F7.

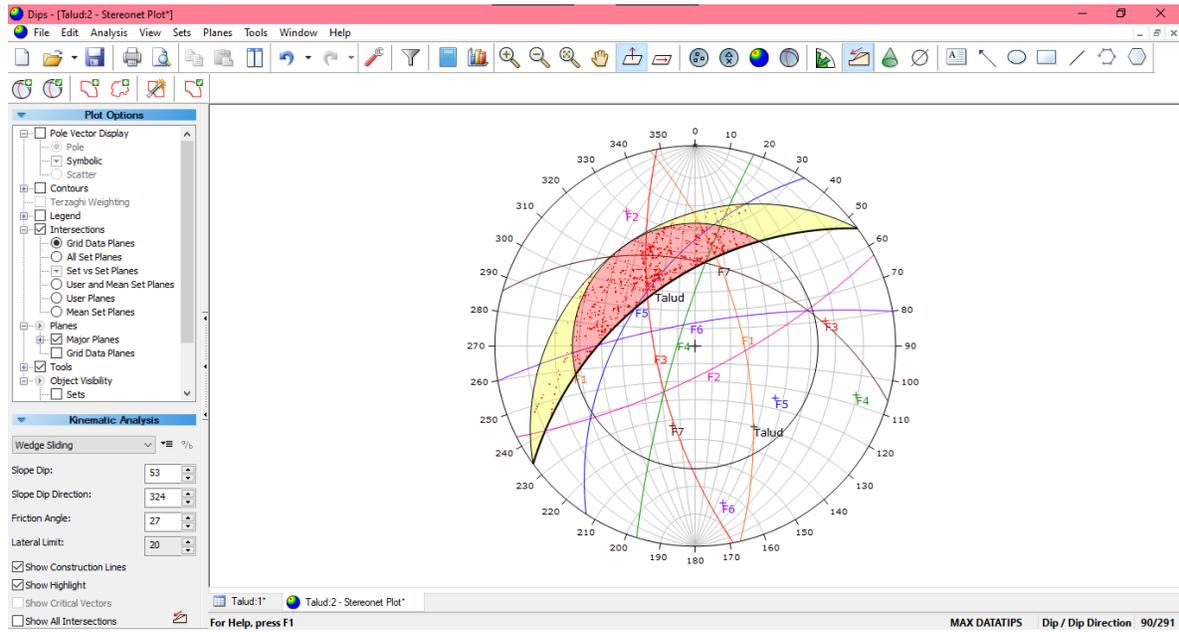


Ilustración XXIX. Falla en cuña.

El corte es inestable por falla por volteo con respecto a la F2. De acuerdo con las condiciones observadas en campo, el corte es susceptible a presentar caída de bloques, por volteo de manera marginal, en la parte inicial del talud.

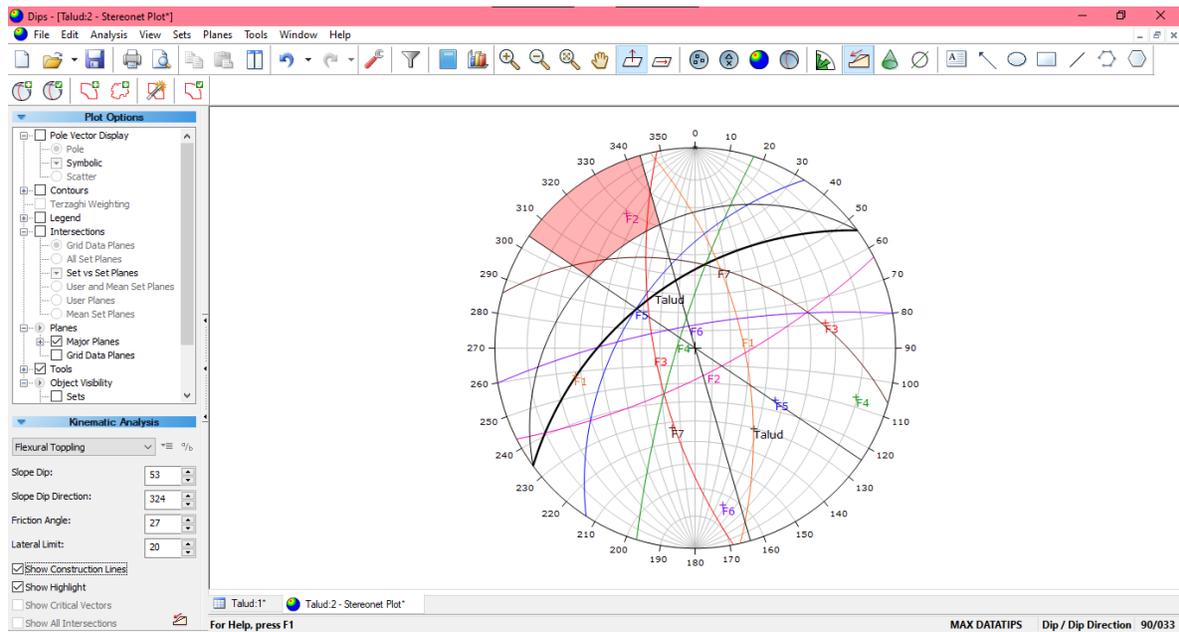


Ilustración XXX. Falla por volteo.

8.4 GEOTECNIA

RMR

El Rock Mass Rating (**RMR**) constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite establecer diferentes grados de calidad del macizo en función de las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades, proporcionan valores estimativos de sus propiedades resistentes globales (González de Vallejo et al., 2002).

Litología		Pórfido Andesítico Intensamente Meteorizado (PA int)		Pórfido Andesítico Meteorizado (PA met)		Pórfido Andesítico Meteorizado (PA met)		Pórfido Andesítico (PA)	
		Clasificación	Puntuación	Clasificación	Puntuación	Clasificación	Puntuación	Clasificación	Puntuación
Parámetros de clasificación									
Resistencia a la compresión esclerómetro [MPa]		< 25	2	25 - 50	4	25 - 50	4	50 - 100	7
Índice RQD [%]		< 25	3	25 - 50	8	25 - 50	8	90 - 100	20
Separación entre diaclasas		0.06 - 0.2 m	8	< 0.06 m	5	< 0.06 m	5	> 2 m	20
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	6	< 1 m	6	< 1 m	6	1 - 3 m	4
	Abertura	1 - 5 mm	1	1 - 5 mm	1	< 0.1 mm	5	< 0.1 mm	5
	Rugosidad	Rugosa	5	Rugosa	5	Rugosa	5	Ligeramente rugosa	3
	Relleno	Blando < 5 mm	1	Blando < 5 mm	1	Blando < 5 mm	1	Duro < 5 mm	2
	Alteración	Muy alterada	2	Muy alterada	2	Muy alterada	2	Inalterada	6
Agua		Ligeramente húmedo	10	Seco	15	Seco	15	Seco	15
Puntuación		38		47		51		82	
Clase		IV		III		III		I	
Calidad		Mala		Media		Media		Muy buena	

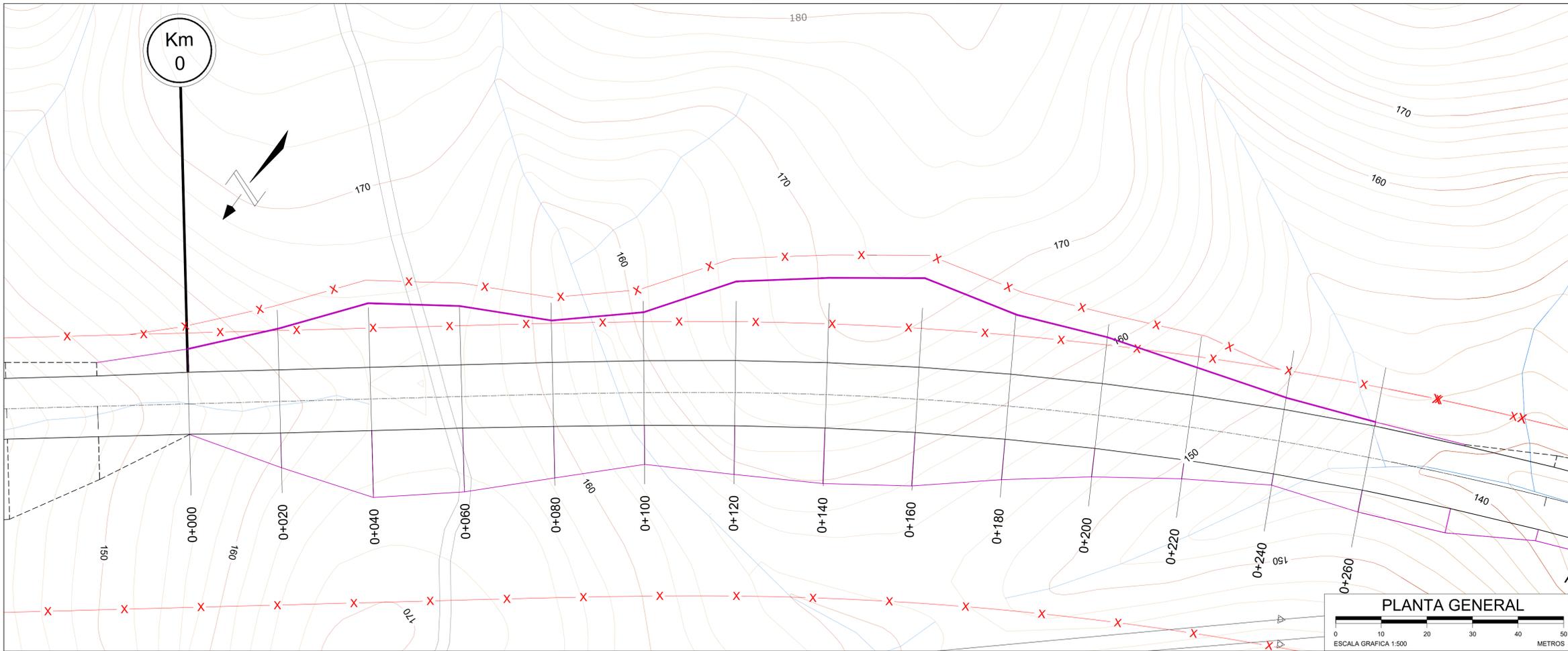
Ilustración XXXI. RMR.

GSI

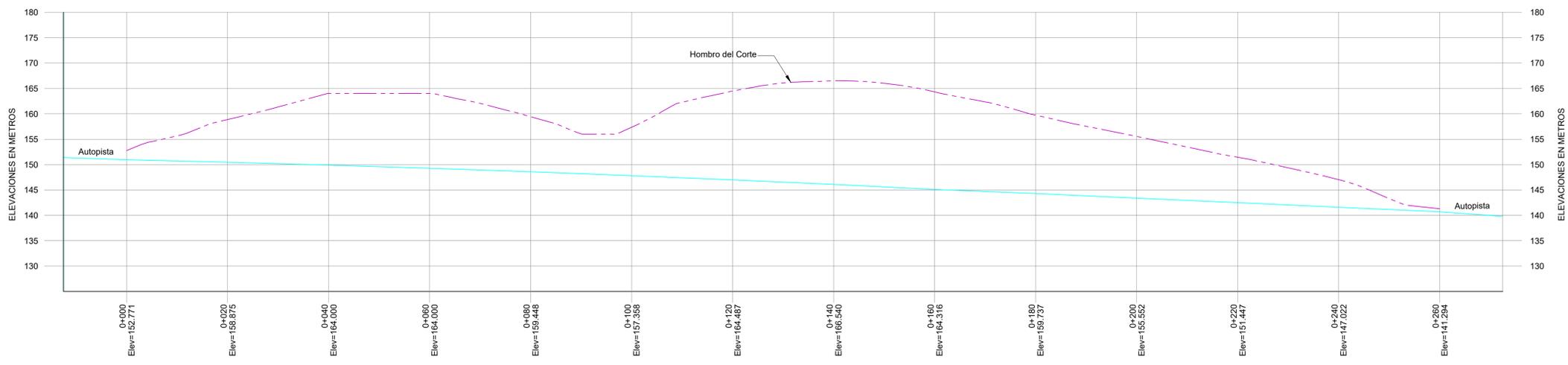
El Índice Geológico de Resistencia o Geological Strength Index por sus siglas en inglés (**GSI**) se basa en estimaciones cualitativas de las propiedades básicas de la roca con base en descripciones geológicas y en modelos simples dependiendo su grado de fracturamiento. (González de Vallejo et al., 2002).

Rock Type: General		SURFACE CONDITIONS				
GSI Selection: 50 OK		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY ➔				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	74 <i>(PA)</i>	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70	60		
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50	39 <i>(PA met)</i>	
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity		50	40	32 <i>(PA int)</i>	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces		40	30	20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Ilustración XXXII. GSI.



PLANTA GENERAL
 ESCALA GRAFICA 1:500
 METROS



PERFIL POR TALUD LADO IZQUIERDO
 ESCALA HORIZONTAL 1 : 500
 ESCALA VERTICAL 1 : 500

LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

TOPOGRAFÍA

- Paleta Kilométrica
- Curva Maestra
- Curva Secundaria
- Línea de Ceros
- DDV (Derecho de Vía)
- Hombro del Corte (Vista Frontal)
- Flujo del Arroyo
- Brecha



ESTUDIANTE: **ANTÚNEZ VALENZUELA YOALI ARISBEI**

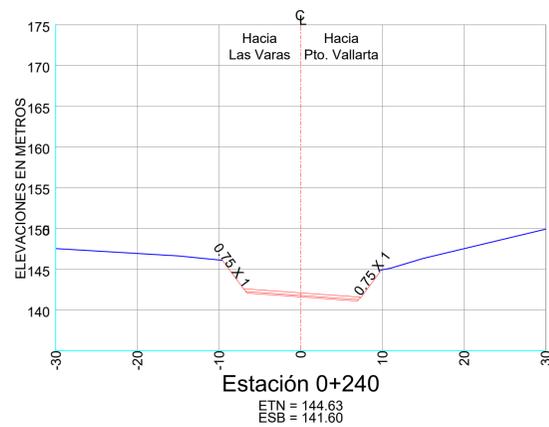
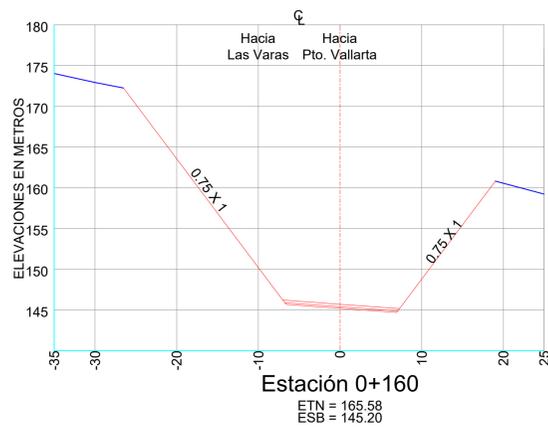
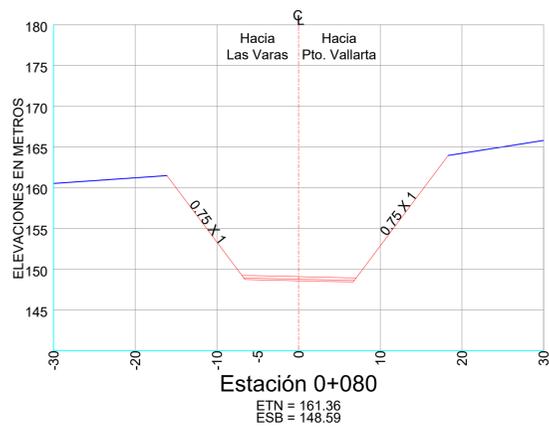
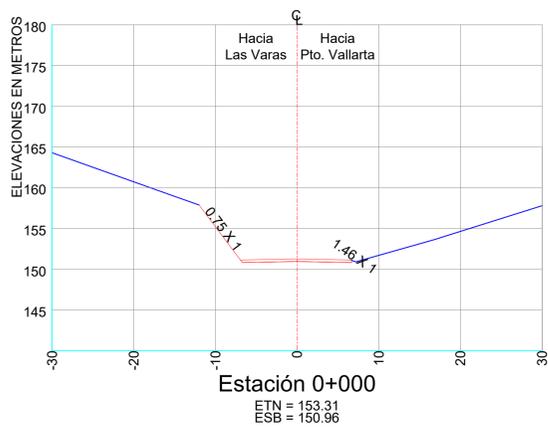
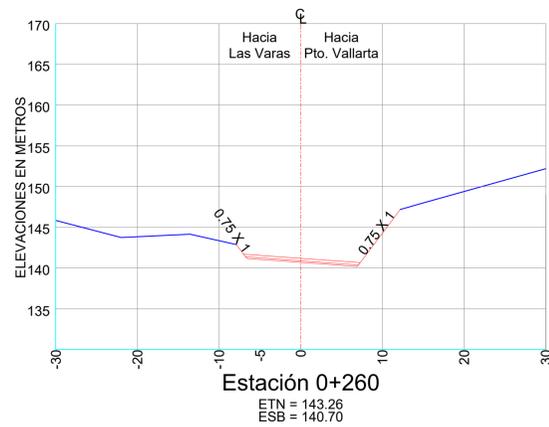
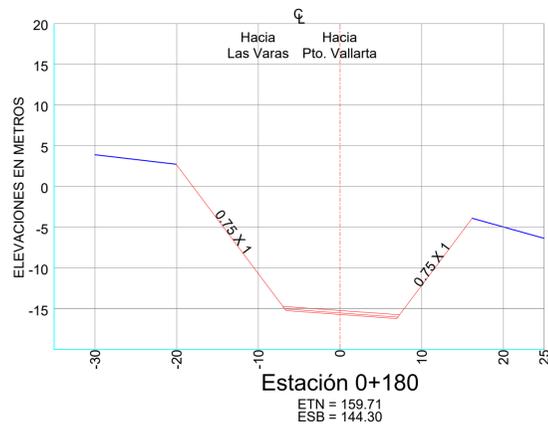
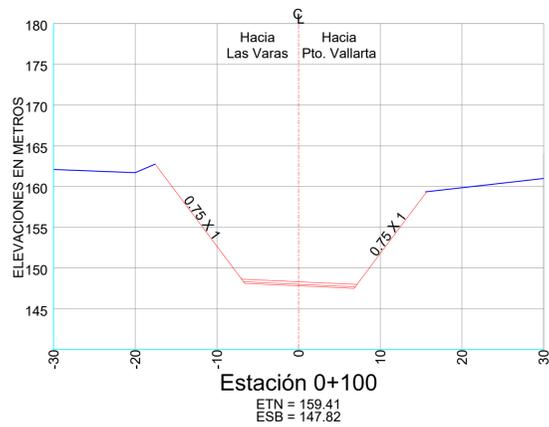
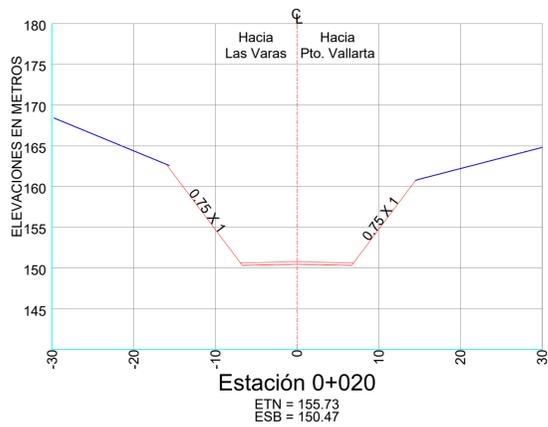
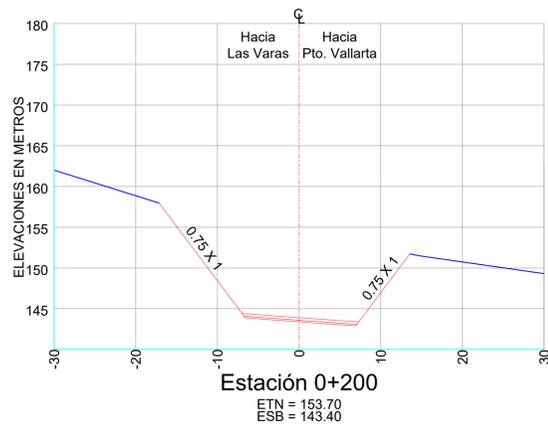
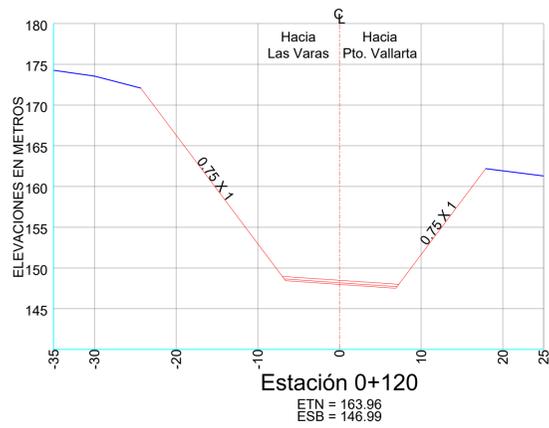
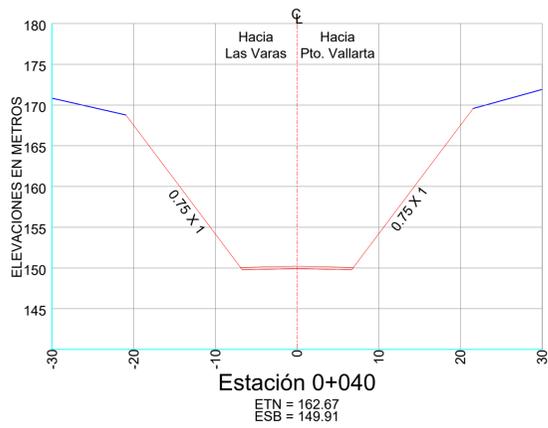
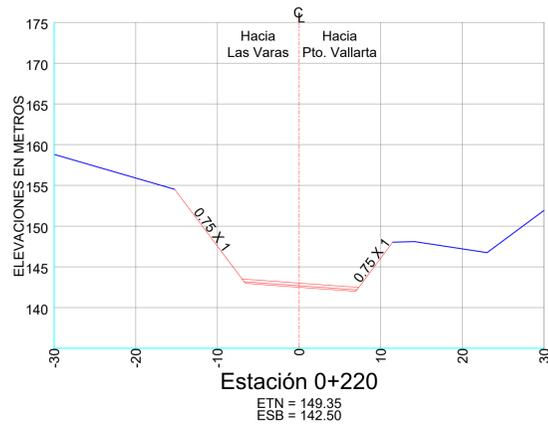
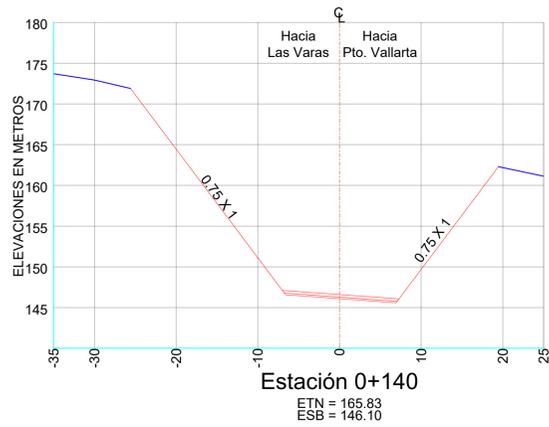
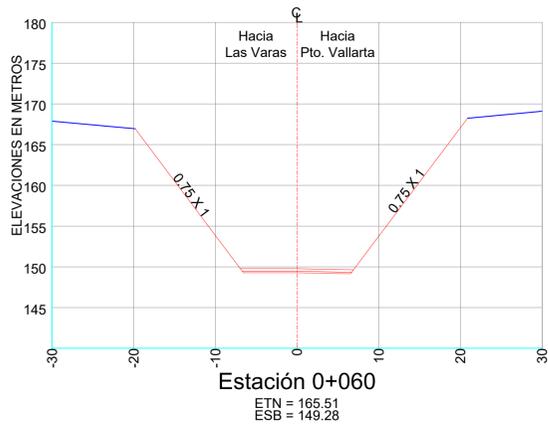
"ESTUDIO Y PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DE UN TALUD CARRETERO EN ROCAS ÍGNEAS EN EL OCCIDENTE DE MÉXICO"

**TALUD KM 0+000 AL KM 0+260
 LADO IZQUIERDO**

DESCRIPCIÓN DEL PLANO: **PLANO TOPOGRÁFICO 1/2**

ESCALA: **1 : 500** TRAMO: **KM 0+000 AL KM 0+260**

FECHA: **ENERO 2023** PLANO: **TP-1**



SIMBOLOGÍA

TOPOGRAFÍA

- Terreno Natural (Blue line)
- Sección de Proyecto (Red line)



ESTUDIANTE: **ANTÚNEZ VALENZUELA YOALI ARISBEI**

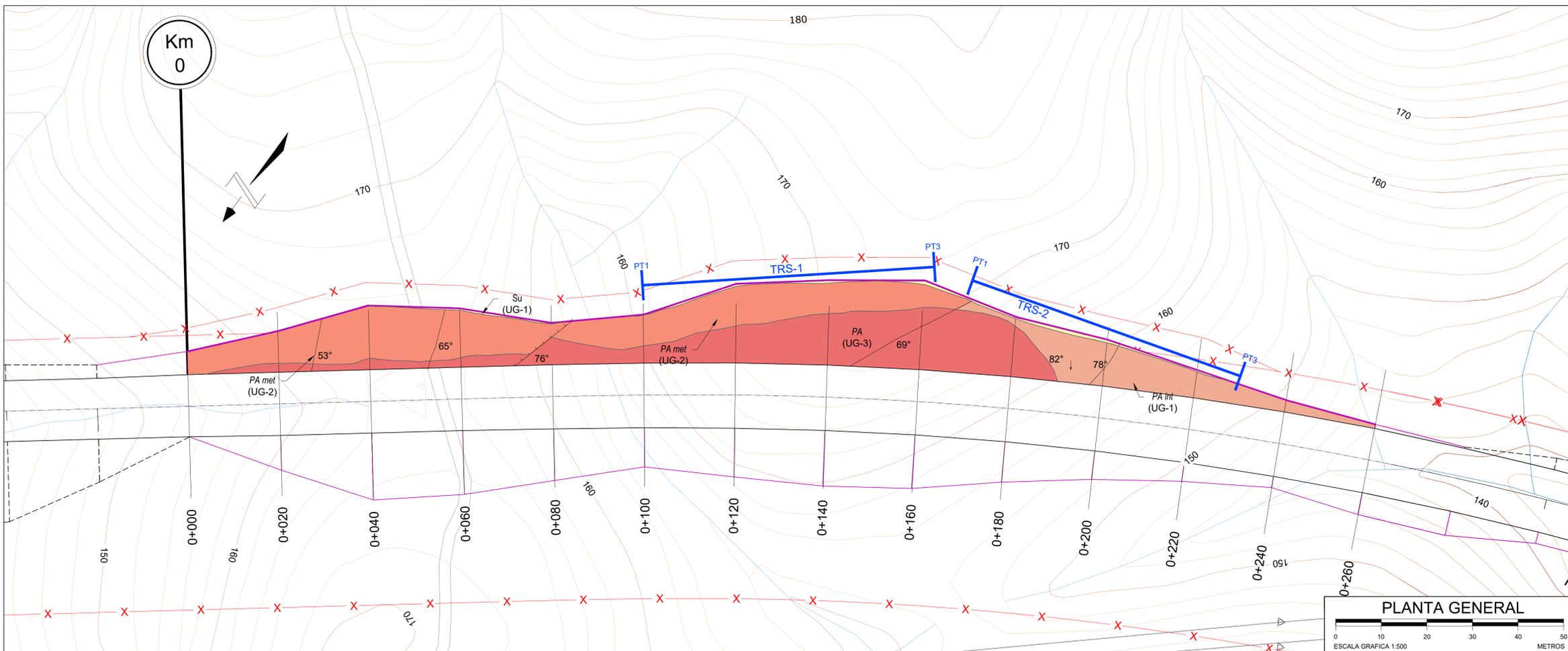
"ESTUDIO Y PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DE UN TALUD CARRETERO EN ROCAS ÍGNEAS EN EL OCCIDENTE DE MÉXICO"

**TALUD KM 0+000 AL KM 0+260
LADO IZQUIERDO**

DESCRIPCIÓN DEL PLANO: **PLANO TOPOGRÁFICO 2/2**

ESCALA: **1 : 400** TRAMO: **KM 0+000 AL KM 0+260**

FECHA: **ENERO 2023** PLANO: **TP-2**



SIMBOLOGÍA

TOPOGRAFÍA

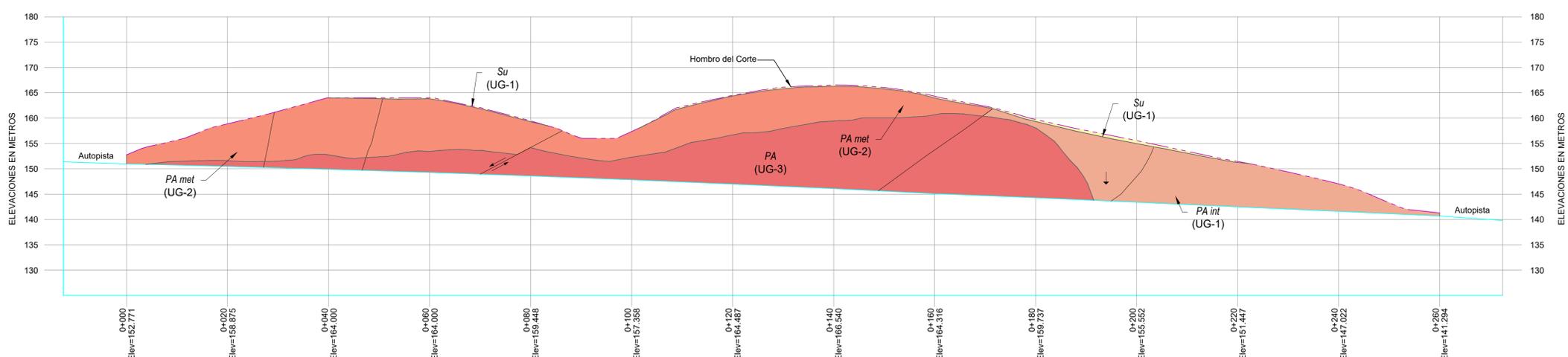
- Paleta Kilométrica
- Curva Maestra
- Curva Secundaria
- Línea de Ceros
- DDV (Derecho de Vía)
- Hombro del Corte (Vista Frontal)
- Flujo del Arroyo
- Brecha

ELEMENTOS ESTRUCTURALES

- Contacto litológico
- Litología
- Fractura
- Falla Normal

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

- Tendido sísmico
- Tendido sísmico (Sección)
- Contacto geosísmico (Vista Frontal)
- Punto de tiro
- Geófono
- Unidad geosísmica
- Velocidad sísmica, (m/s)



PERFIL POR TALUD LADO IZQUIERDO
 ESCALA HORIZONTAL 1 : 500
 ESCALA VERTICAL 1 : 500

ERA	PERIODO	ÉPOCA	LITOLÓGÍA	CARACTERÍSTICAS	PESO VOLUMÉTRICO [t/m ³]	RESISTENCIA MARTILLO SCHMIDT [MPa]	RMR	GSi	Vp [m/s]	UNIDADES GEOTÉCNICAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Su	Suelo Residual	Capa de suelos residuales limo-arenosos con gravas angulosas distribuidas de forma caótica, con regular consolidación, unidad que se presentan a lo largo del terreno natural, presenta color café claro a oscuro y tiene un espesor de 1 a 2 m	-	N/A	N/A	244 189	UG-1
		PLIOCENO	PA int	Pórfido Andesítico intensamente meteorizado	Cuerpo pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo, de color café claro y ocre, altamente meteorizada, con alto grado de oxidación, se rompe fácilmente al golpe de martillo.	2.53-2.6	17-35	38	32	1184 1190
	PA met		Pórfido Andesítico meteorizado	Cuerpo pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo, de café claro a ocre, se encuentra afectado por un grado medio de oxidación.	2.48	25-65.5	47 - 51	39-43	1184 1190	UG-2
	PA	Pórfido Andesítico	Cuerpo pórfido andesítico, roca ígnea de origen intrusivo, de color gris a verde claro, su textura es porfídica, se caracteriza por fenocristales de plagioclasas embebidos en una matriz microcristalina compacta de minerales ferromagnesianos, presenta diversos grados de alteración hidrotermal, con presencia abundante de sulfuros diseminados de pirita, así como abundante sílice en forma de vetas o en la estructura de la roca como silicificación.	2.61	60-111	82	74	2325 2154	UG-3	

ESTUDIANTE: **ANTÚNEZ VALENZUELA YOALI ARISBEI**

"ESTUDIO Y PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DE UN TALUD CARRETERO EN ROCAS ÍGNEAS EN EL OCCIDENTE DE MÉXICO"

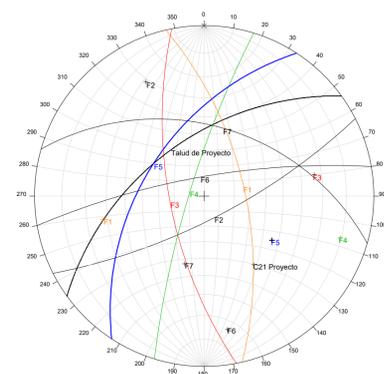
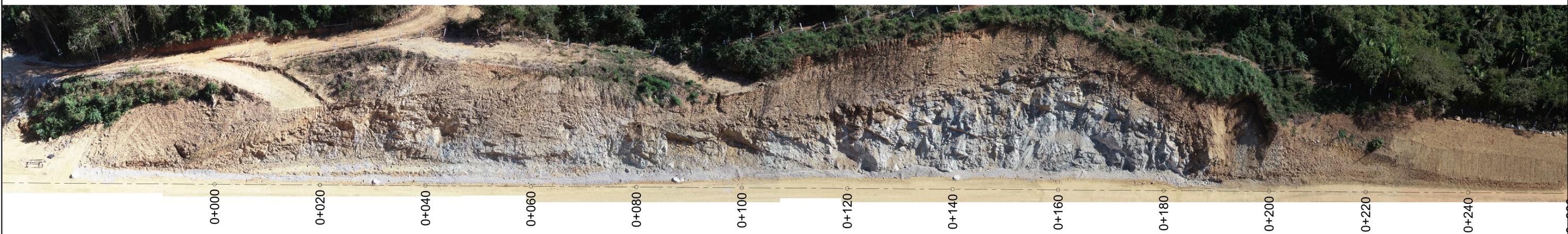
TALUD KM 0+000 AL KM 0+260 LADO IZQUIERDO

DESCRIPCIÓN DEL PLANO: **PLANO GEOTÉCNICO 1/2**

ESCALA: 1 : 500 TRAMO: KM 0+000 AL KM 0+260

FECHA: ENERO 2023 PLANO: GT-1

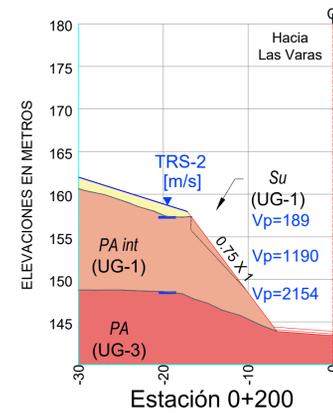
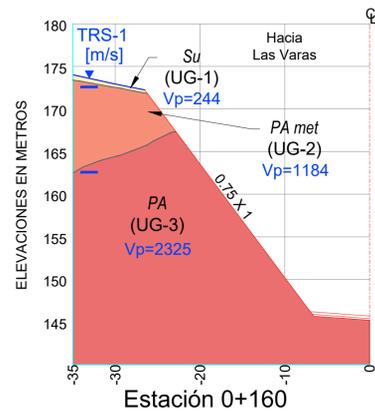
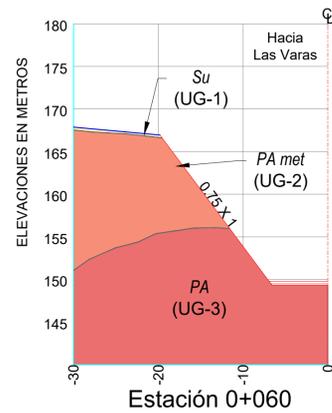




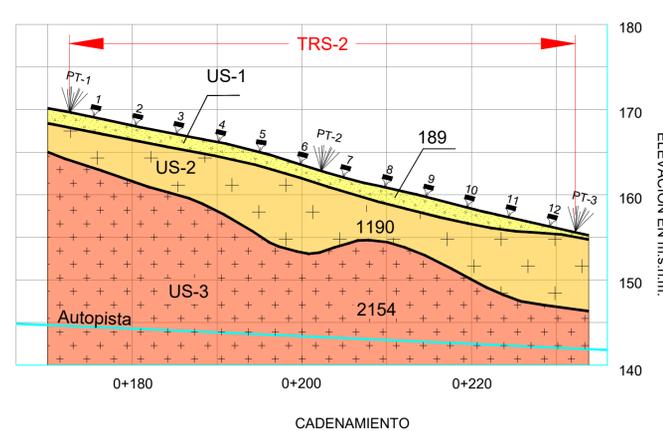
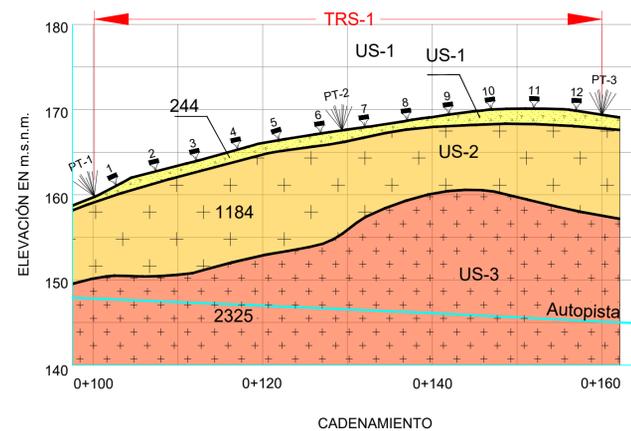
ESTEREOGRAMA DEL CORTE
CON INCLINACIÓN DE
PROYECTO DE 53°

Dirección del Echado (Dip Direction)	Echado (Dip)	Color
324°	53°	Negro

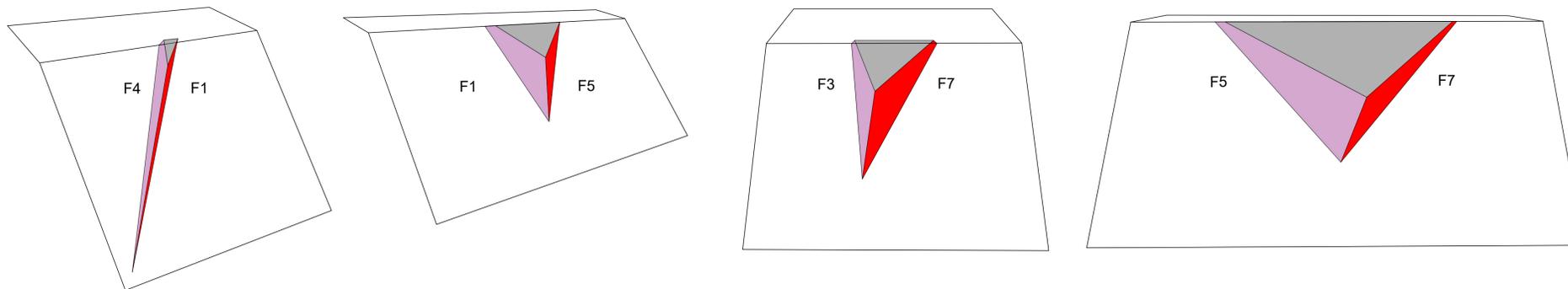
Familias de fracturas	Dirección del Echado (Dip Direction)	Echado (Dip)	Color
F1	77°	63°	Anaranjado
F2	153°	74°	Magenta
F3	259°	67°	Rojo
F4	287°	80°	Verde
F5	303°	51°	Azul
F6	350	77°	Morado
F7	016°	45°	Café



SECCIONES GEOLÓGICAS



SECCIONES GEOFÍSICAS



SIMBOLOGÍA

TOPOGRAFÍA

- Terreno Natural
- Sección de Proyecto
- Eje de la carretera

ELEMENTOS ESTRUCTURALES

- Contacto litológico
- Litología
- Zona inestable
- Grieta de tensión
- Caído

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

- Tendido sísmico
- Velocidad sísmica, (m/s)



DIVISIÓN DE
INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA
TIERRA

ESTUDIANTE: ANTÚNEZ VALENZUELA YOALI ARISBEI

"ESTUDIO Y PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DE UN TALUD CARRETERO EN ROCAS ÍGNEAS EN EL OCCIDENTE DE MÉXICO"

TALUD KM 0+000 AL KM 0+260
LADO IZQUIERDO

DESCRIPCIÓN DEL PLANO: PLANO GEOTÉCNICO 2/2

ESCALA: 1 : 400 TRAMO: KM 0+000 AL KM 0+260

FECHA: ENERO 2023 PLANO: GT-2