



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA**

**CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL**

**INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE EXPLORACIÓN PARA  
EL DISEÑO DE UNA PRESA**

**T E S I N A**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**ESPECIALISTA EN GEOTECNIA**

**P R E S E N T A :**

**Ing. Berenice Andrea Neri Moreno**

**DIRECTOR DE TESINA: M. I. REGINALDO JOSÉ HERNÁNDEZ ROMERO**

**MÉXICO, D.F.**

**MAYO 2018**



---

## Agradecimientos

A mi MADRE, por todo el apoyo que me has brindado, por estar siempre conmigo y no dejarme caer en los momentos más difíciles. Gracias a ti he logrado superar los peores años de mi vida, simplemente sin tu ayuda no habría logrado culminar esta nueva etapa, jamás tendré las palabras, ni la manera de demostrar cuan agradecida estoy por todo. Gracias a ti, soy lo que soy, todos mis logros son tuyos y nunca me cansare de demostrarte mi amor y admiración, eres mi ejemplo a seguir y una mujer admirable en todos los aspectos, es un orgullo tenerte como madre. Te amo.

A Álvaro Becerra Córdova, por el tiempo y la paciencia que me has brindado, has sido una parte fundamental en esta etapa de mi vida, mi gran apoyo. Gracias a ti he logrado ser mejor persona y he aprendido mucho; en ti he encontrado la motivación para conquistar mis metas, gracias por impulsarme en mi vida profesional. Sé que aún nos falta mucho por compartir, pero sé que juntos podremos lograr todo lo que nos hemos propuesto. Te amo amor.

A Semiramise Valle Martinez, porque sin tu apoyo no estaría culminando mis estudios de especialidad, gracias por alentarme a realizarlos y estar a mi lado en este proceso. Eres mi gran amiga, compañera y hermana; espero que esta gran amistad que hemos tenido por 15 años siga creciendo, sabes que cuentas conmigo y que siempre me tendrás a tu lado.

A la Universidad Autónoma de México por la oportunidad brindada y poder realizar mis estudios de especialidad, recibirme y acogerme, he aprendido muchísimo de esta gran casa de estudios, gracias.

Al M. I. Reginaldo José Hernández Romero por el apoyo al realizar esta tesina, por la paciencia y comprensión, le brindo mi admiración y respeto; he aprendido mucho de usted y siempre le estaré agradecida.



## Índice

Índice de Figuras .....	II
Índice de Tablas .....	II
Índice de Planos .....	II
1. Introducción .....	1
2. Aspectos Geológicos del área de estudio.....	2
2.1. Geología regional .....	3
2.2. Geología local .....	4
2.1. Sismicidad.....	9
3. Exploración geológica – geotécnica .....	11
3.1. Geología Estructural.....	11
3.2. Sondeos .....	18
3.2.1. Eje de la Cortina (Sección A – A').....	22
3.2.2. Ataguía Aguas Arriba (Sección B – B') .....	25
3.2.3. Ataguía Aguas Abajo (Sección C – C') .....	26
3.2.4. Obra de Desvío 1 (D – D').....	28
3.2.5. Obra de Desvío 2 (Sección E – E') .....	30
3.2.6. Margen Derecha (Sección F – F') .....	33
3.2.7. Eje perpendicular a la cortina (G – G').....	35
3.3. Pruebas de permeabilidad.....	37
3.3.1. Eje de la Cortina (Sección A – A').....	38
3.3.2. Ataguía Aguas Arriba (Sección B – B') .....	40
3.3.3. Ataguía Aguas Abajo (Sección C – C') .....	40
3.3.4. Obra de Desvío 1 (D – D').....	41
3.3.5. Obra de Desvío 2 (Sección E – E') .....	42
3.3.6. Margen Derecha (Sección F – F') .....	44
3.3.7. Eje perpendicular a la Cortina (Sección G – G').....	45
3.4. Pruebas mecánicas .....	46
3.4.1. Eje de la cortina .....	47
3.4.2. Eje de obras de desvío.....	47
3.5. Estudios geofísicos .....	48
4. Clasificación geomecánica .....	57



4.1. Margen Derecha .....	59
4.2. Margen izquierda .....	63
5. Permeabilidad en el eje de la cortina .....	68
6. Conclusiones y recomendaciones .....	72
7. Anexos .....	74
8. Bibliografía .....	75

## Índice de Figuras

Figura 1, Provincia fisiográfica .....	2
Figura 2, Contacto entre tobas riolíticas y basaltos .....	5
Figura 3, Tobas riolíticas masivas con pseudoestratificación incipiente .....	5
Figura 4, Eje de la cortina proyectado en ignimbritas y tobas riolíticas liticas con pseudoestratificación masiva y buzando hacia aguas abajo.....	6
Figura 5, Secuencia de rocas vulcanosedimentarias con estratificación y su contacto concordante con las ignimbritas que la subyacen.....	6
Figura 6, Placas Tectónicas.....	9
Figura 7, Espectro de respuesta asociado a la zona del proyecto.....	10
Figura 8, Estereograma general de estructuras presentes en la zona del proyecto .....	12
Figura 9, Erosión superficial sobre un plano de pseudoestratificación .....	12
Figura 10, Plano de falla con fracturamiento intenso, roca triturada y una delgada capa de sílice recristalizada.....	15
Figura 11, Plano con estrías verticales de falla.....	15
Figura 12, Sistemas de falla F1 y F2, el primero paralelo a la pseudoestratificación (línea negra) que es cortado y desplazado por el sistema de fallas F3 de rumbo N – S (línea roja) .....	16
Figura 13, Estereograma de fallas .....	16
Figura 14, Fracturamiento intenso a moderado representativo del sistema de fracturas f1 17	
Figura 15, Fracturamiento escaso pero mayor del sistema f3 .....	17
Figura 16, Estereograma de fracturas .....	18
Figura 17, Simbología secciones geológicas .....	21
Figura 18, Sección geológica A - A' sobre el eje de la cortina .....	22
Figura 19, Sección geológica B - B' sobre el eje de la Atagüía Aguas Arriba .....	25



Figura 20, Sección geológica C - C' sobre el Eje de la Ataguía Aguas Abajo .....	27
Figura 21, Sección geológica D - D' sobre el eje del túnel de desvío 1 .....	28
Figura 22, Sección geológica E - E' sobre el eje del túnel de Desvío 2.....	31
Figura 23, Sección geológica F - F' sobre la ladera derecha.....	33
Figura 24, Sección geológica G - G' sobre el cauce del río, perpendicular al eje de la cortina .....	35
Figura 25, Ensayo Lugeon con obturador simple .....	37
Figura 26, Línea LE – 1 .....	50
Figura 27, Línea LE – 2 .....	50
Figura 28, Línea LE - 3.....	51
Figura 29, Línea LE – 5 .....	51
Figura 30, Línea LE - 6.....	52
Figura 31, Línea LE – 7 .....	52
Figura 32, Línea LE – 8 .....	53
Figura 33, Línea LS – 1 .....	54
Figura 34, Línea LS - 2.....	54
Figura 35, Línea LS – 3 .....	55
Figura 36, Línea LS - 4.....	55
Figura 37, Línea LS - 5.....	56
Figura 38, Línea LS - 6.....	56
Figura 39, RMR, secuencia vulcanosedimentaria MD .....	60
Figura 40, RMR, secuencia ignimbrítica MD .....	61
Figura 41, RMR, secuencia ignimbrítica sobreyaciendo a una toba riolítica MD .....	63
Figura 42, RMR, secuencia ignimbrítica MI .....	63
Figura 43, RMR, secuencia ignimbrítica sobreyaciendo a las tobas riolíticas MI.....	66
Figura 44, RMR, secuencia de tobas y brechas riolíticas, MI .....	66
Figura 45, Sección hidrogeológica del eje de la cortina con la profundidad de los NAF's ..	68
Figura 46, Sección geotécnica del eje de la cortina .....	70

**Índice de Tablas**

Tabla 1, Discontinuidades generales.....	11
Tabla 2, Discontinuidades por margen .....	11



Tabla 3, Sondeos realizados en la zona de obras .....	19
Tabla 4, Índice de calidad de roca RQD .....	21
Tabla 5, Variaciones de presión en pruebas Lugeon .....	37
Tabla 6, Clasificación en función de la permeabilidad .....	37
Tabla 7, Resumen de las propiedades índice y mecánicas de la roca intacta .....	47
Tabla 8, Resumen de propiedades índice y mecánicas de la roca intacta .....	47
Tabla 9, Métodos Geofísicos de Exploración y cantidades.....	48
Tabla 10, Parámetros de clasificación (RMR).....	57
Tabla 11, Corrección por la orientación de las discontinuidades .....	58
Tabla 12, Clasificación (RMR) .....	58
Tabla 13, Características geotécnicas (RMR).....	58
Tabla 14, Orientación de las discontinuidades en el túnel (RMR).....	58
Tabla 15, Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR .....	58

## Índice de Planos

Plano 1. Geología del área de estudio .....	8
Plano 2, Geología Estructural .....	14
Plano 3, Localización de barrenos en la zona de obras.....	20
Plano 4, Líneas de estudios geofísicos en la zona de obra .....	49



### 1. Introducción

Las presas son barreras fabricadas de concreto o materiales no consolidados construidas en el paso de un río o arroyo, son estructuras de gran importancia para el desarrollo económico y productivo de un país, diseñadas para prevenir inundaciones, generar energía eléctrica, almacenar agua para consumo humano o como parte de la infraestructura hidroagrícola; sea cual sea su finalidad, el diseño de estas estructuras involucra la integración de diferentes disciplinas, como lo son la Ingeniería Civil, Geológica, Mecánica y Eléctrica que son parte fundamental para definir la factibilidad de un proyecto de esta índole.

La viabilidad de una presa en primera instancia depende de la apropiada integración de la información obtenida del estudio de la zona; esto incluye la identificación del tipo de material que se tiene, sus características físicas y mecánicas, la realización de diferentes pruebas en campo y laboratorio, además de la localización de estructuras geológicas. Es necesario involucrar la información geológica y geotécnica para la realización del diseño de estas y otras estructuras civiles; tener en cuenta las características del suelo o rocas en las cuales serán desplantadas influye mucho en el procedimiento constructivo que se llevará a cabo, además de que puede reducir los costos de operación y aumentar la seguridad.

En esta tesina se explican las principales pruebas de campo que se realizan en la fase de los estudios básicos complementarios y del proyecto ejecutivo de una presa de almacenamiento; se integran los resultados obtenidos en el levantamiento geológico, estudios geofísicos, de permeabilidad, mecánica de rocas, pruebas de campo y laboratorio, tanto superficial como en el subsuelo; con las cuales se permitirá conocer las características del sitio y realizar el modelo geológico – geotécnico.

Es fundamental que la integración de la información de estas ciencias y entre otras, sea adecuada y que se le dé la importancia que se merece cada una, solo así se puede asegurar que el diseño estructural de cada una de las partes que involucra una presa sea confiable y cumpla con su objetivo.



## 2. Aspectos Geológicos del área de estudio

La zona donde se realizan los estudios básicos complementarios y el proyecto ejecutivo de la presa pertenece a la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental (Figura 1), y a la subprovincia gran meseta y cañadas del sur.

La Sierra Madre Occidental es una de las provincias con mayor relevancia del país, la conforman principalmente rocas ígneas extrusivas y su orientación es noroeste – sureste, en las partes más elevadas predominan rocas como tobas, ignimbritas, volcanoclásticas y algunos derrames riolíticos. Tiene una longitud aproximada de 1400 km y un ancho promedio de 250 km, se limita al norte con la frontera de los Estados Unidos de América, al sur con la provincia Eje Neovolcánico, al oeste se encuentran las provincias Llanura Sonorense y Llanura Costera del Pacifico; hacia el oriente tenemos las provincias Sierras y Llanuras del Norte y Mesa

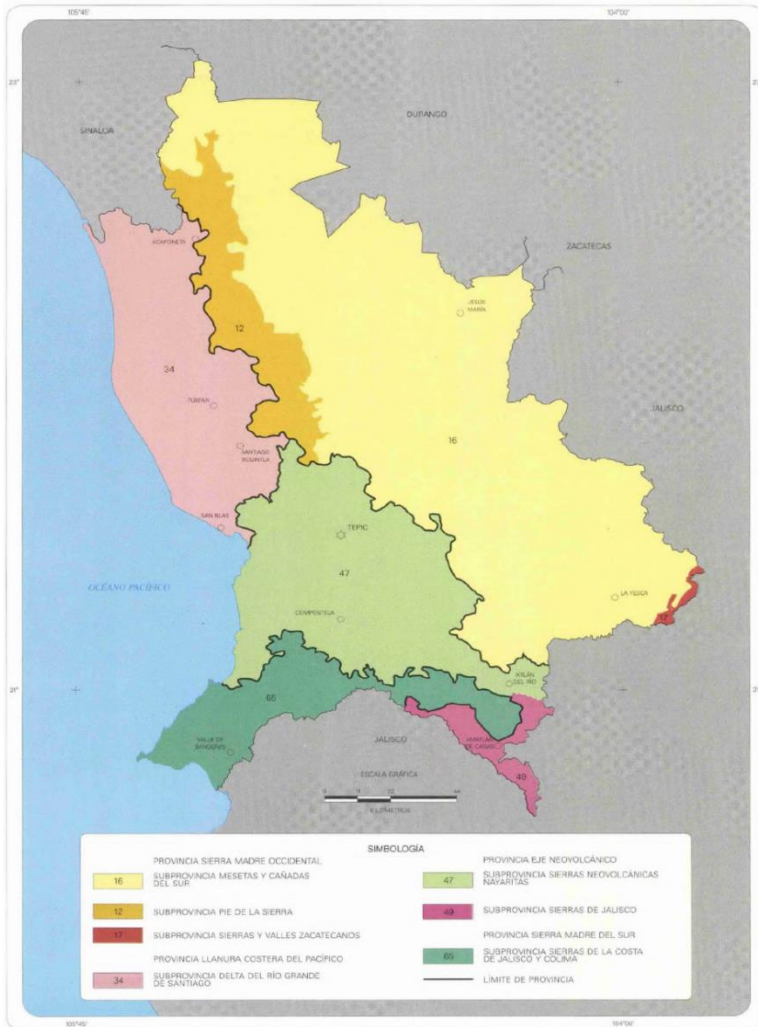


Figura 1, Provincia fisiográfica

del Centro; abarca parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco y Nayarit.

La subprovincia Mesetas y Cañadas del sur tiene dirección general noroeste – sureste, está limitada al norte con la zona sur de los estados de Sinaloa y Durango, continua hasta la región sureste donde se encuentra el cañón formado por el Río Grande de Santiago; su flanco occidental limita con la subprovincia Pie de la Sierra y Sierras Neovolcánicas Nayaritas y el sureste colinda con la subprovincia Sierra y Valles Zacatecanos.





Esta subprovincia está conformada por altas mesetas interrumpidas de manera abrupta por profundos cañones y cañadas, resultado del tectonismo y de la erosión fluvial. Se presentan superficies de meseta más altas que el resto de la provincia, cañones paralelos y alternos a las superficies de meseta, interrumpidos en ocasiones por valles de laderas tendidas que río abajo vuelven a encañonarse y está drenada por corrientes fluviales que corren hacia el sur y desembocan en la llanura costera del pacífico (INEGI, Fisiografía , 2018).

### 2.1. Geología regional

La zona de estudio se encuentra sobre rocas ígneas y metamórficas, de las cuales se hace la descripción de las unidades, a nivel regional, de la más antigua a la más reciente.

Se tiene una secuencia volcánica; que se considera del Cretácico inferior por su similitud litológica con una parte de la secuencia del terreno Guerrero; está compuesta por derrames de andesita e intercalaciones piroclásticas de tobas y brechas de composición andesítica, en algunas zonas se tiene metamorfismo regional de bajo grado y zonas donde es afectado por cuerpos intrusivos presenta metamorfismo de contacto y alteración hidrotermal.

A finales del Mesozoico e inicios del Cenozoico, del Cretácico Superior al Oligoceno se emplazaron cuerpos plutónicos e hipabisales de granodioritas y tonalitas, granitos, y diques aplíticos<sup>1</sup>, se designan también con el nombre de rocas graníticas sintectónicas<sup>2</sup> a aquellas emplazadas durante un periodo de deformación regional, en un rango de edad de 85 a 96 Ma y postectónicas a aquellas con un rango de edad de  $\pm 60$  a  $\pm 40$  Ma y hasta 20 Ma. (Henry, D. C., 1975 en Consejo de Recursos Minerales, 2003 y Servicio Geológico Mexicano, 2005)

Durante el Oligoceno y principios del Mioceno Inferior se tiene un volcanismo de tipo efusivo compuesto por tobas riolíticas y riolitas (Tom TR-R), con algunos horizontes de dacitas y riodacitas, que se correlacionan con el Complejo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental (Mc Dowell y Clabaugh, 1979). A todo este conjunto de unidades le sobreyace discordantemente el sistema Mioceno, representado por dos secuencias

---

<sup>1</sup> Dique de apariencia blanca - clara; con predominancia de cuarzo y plagioclasa casi sin minerales máficos.

<sup>2</sup> Deformación producida coetáneamente con el proceso tectónico. Emplazamiento de una masa rocosa durante el orogenismo.



isócronas<sup>3</sup>, una volcánica y una sedimentaria. La primera de tobas riolíticas y riolitas con algunos horizontes de riolitas (Tm TR-R), con intercalaciones de andesitas y basaltos (Tm A-B) y la segunda compuesta por areniscas, lutitas, limolitas, tobas (Tm Ar-Lu) y conglomerados polimícticos<sup>4</sup> (Tm Ar-Cgp). Estas secuencias depositadas en fosas limitadas por fallamientos normales, incluyen el emplazamiento de pequeños cuerpos de naturaleza hipabisal, integrados por pórfidos riolíticos (Tm PR) y algunos diques de composición riolítica, aplítica de edades del Mioceno. Estas secuencias litológicamente son similares a los depósitos de la Formación “Báucarit” de Sonora, (Mc Dowell, Roldan y Amaya, 1997), donde las relacionan con la extensión de la provincia de “Cuencas y Sierras”, considerada en un periodo de 20 a 27 Ma.

Finalmente durante el Plioceno y el Pleistoceno se tiene una sedimentación clástica constituida por depósitos de conglomerados polimícticos, compuestos por fragmentos de tobas riolíticas, andesitas, basaltos y algunas granodioritas, granitos y tonalitas, dentro de una matriz arenosa (Tm Qpt Cgp). Estos materiales presentan escasa compactación y finalmente son cubiertos por depósitos recientes de aluviones y suelos residuales (Qho al).

## 2.2. Geología local

La zona de estudio está constituida por una secuencia de rocas volcánicas líticas piroclásticas, ignimbríticas, tobáceas y brechoides, con composición que varía de riolitas a dacitas y basaltos. Las márgenes donde se desplantará la cortina están compuestas por ignimbritas vítreas con alto grado de compactación y por tobas líticas riolíticas, en la parte norte se tiene una secuencia volcánica de derrames, tobas y brechas de composición basáltica, hacia aguas abajo se tienen otra secuencia de rocas vulcanosedimentarias, representada por tobas y brechas andesíticas con alternancia de areniscas, limolitas, lutitas y escasos derrames de basalto. Toda esta secuencia de rocas volcánicas piroclásticas y de derrames presentan una pseudoestratificación con rumbo preferencial NW 50° SE y buzamiento promedio de 50° al SW.

La columna estratigráfica está conformada por las siguientes unidades estratigráficas, descritas de la más antigua a la más reciente:

---

<sup>3</sup> Término que indica 2 o más sucesos, procesos o seres vivientes que se han producido, formado o desarrollado en un mismo periodo de tiempo.

<sup>4</sup> Son conglomerados o brechas cuya composición de clastos es muy variada, es decir, de diferentes rocas.

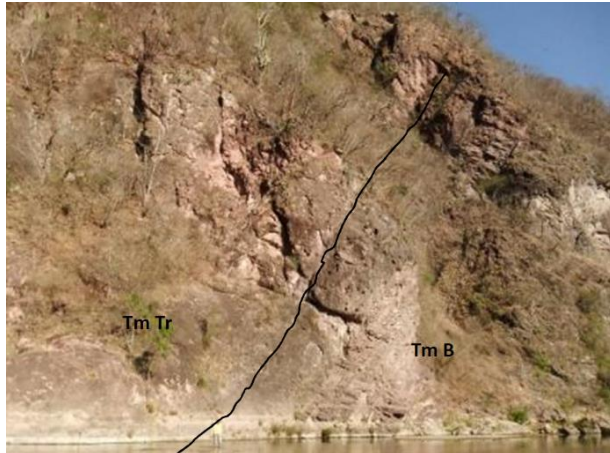


Figura 2, Contacto entre tobas riolíticas y basaltos

En la zona aguas arriba aflora una secuencia de rocas basálticas (Figura 2) de coloración pardo rojizo, pardo grisáceo y negro verdoso, en partes con tonalidades blancas y verde por la alteración argílica<sup>5</sup> y propilítica<sup>6</sup> de sus minerales máficos; presentan pseudoestratificación de incipiente y marcada, en capas masivas con espesores de 1 a 3 cm para las tobáceas y hasta espesores mayores de 5 m para las brechoides y de derrame. Esta unidad es la base de los depósitos volcánicos, debido a la posición y paralelismo en la pseudoestratificación que presentan con relación a las rocas riolíticas de la boquilla. Su ambiente de depósito inició con derrames andesíticos directamente en el intrusivo, siguiendo etapas efusivas piroclásticas con cambios en la composición de los materiales hasta culminar con tobas y derrames basálticos. Generalmente estas rocas se presentan muy afectadas por fracturamiento y fallamiento, que asociado con su composición, alteración hidrotermal e intemperismo, determinan la facilidad o dificultad a su erosión.

La unidad de tobas y brechas riolíticas abarca gran parte de la zona, presentan una pseudoestratificación incipiente con capas masivas con un contacto bien marcado por una pseudoestratificación de capas delgadas (Figura 3); presentan un contacto concordante con la secuencia de rocas basálticas que le subyacen y con las tobas e ignimbritas riolíticas que le sobreyacen. Presentan una estructura masiva, con texturas porfídicas, microlíticas y tobácea a brechoide. El fracturamiento en estas rocas es de escaso a moderado, excepto en algunas partes donde se tienen 2 sistemas de fracturamiento intenso



Figura 3, Tobas riolíticas masivas con pseudoestratificación incipiente

<sup>5</sup> Alteración hidrotermal caracterizada por la presencia de **caolinita y/o montmorillonita**.

<sup>6</sup> Alteración hidrotermal caracterizada por la presencia de clorita, epidota y/o calcita, y plagioclasa albitizada. Generada por soluciones casi neutras en un rango variable de temperaturas.



y ortogonales, el mayor con rumbo preferencial NE 20° SW y el NW 50°SE paralelo a la pseudoestratificación.

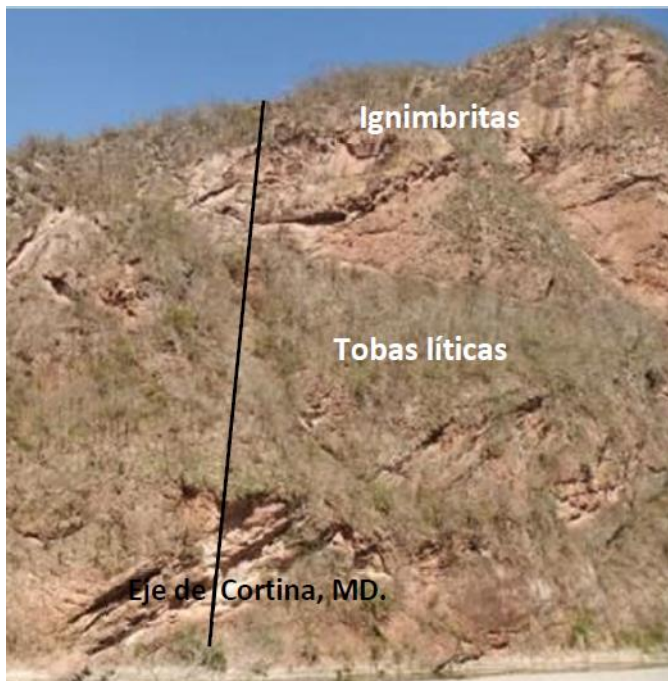


Figura 4, Eje de la cortina proyectado en ignimbritas y tobas riolíticas líticas con pseudoestratificación masiva y buzando hacia aguas abajo

Se tienen una unidad conformada por ignimbritas vítreas y tobas líticas de composición riolítica (Figura 4), soldadas y una pseudoestratificación masiva bien marcada en las ignimbritas e incipiente en las tobas. El fracturamiento en las ignimbritas vítreas es persistente y notable en sus diferentes sistemas, mientras que en las tobas líticas solo se expresan los sistemas mayores, el espesor se aproxima a 200 m y tienen rumbo preferencial NW – SE e inclinadas 50° en promedio hacia el SW.

La secuencia de rocas vulcanosedimentarias está constituida en

la base por una serie de materiales volcánicos de composición andesítica y basáltica, alternando con capas de materiales tobáceos gruesos y finos con fragmentos observables de andesitas porfídicas, andesitas y dacitas; se encuentran en contacto concordante con la ignimbrita riolítica (Figura 5). Conforme asciende la secuencia se observa un ambiente sedimentario pasando de capas brechoideas a areniscas, limolitas y lutitas con espesores de capa de 0.5 a 0.005 m para las capas de material grueso y fino, respectivamente. Estas rocas se presentan con una estratificación bien definida, paralela a todas las secuencias volcánicas anteriores, de rumbo NW – SE y buzando al SW, inclusive entre



Figura 5, Secuencia de rocas vulcanosedimentarias con estratificación y su contacto concordante con las ignimbritas que la subyacen

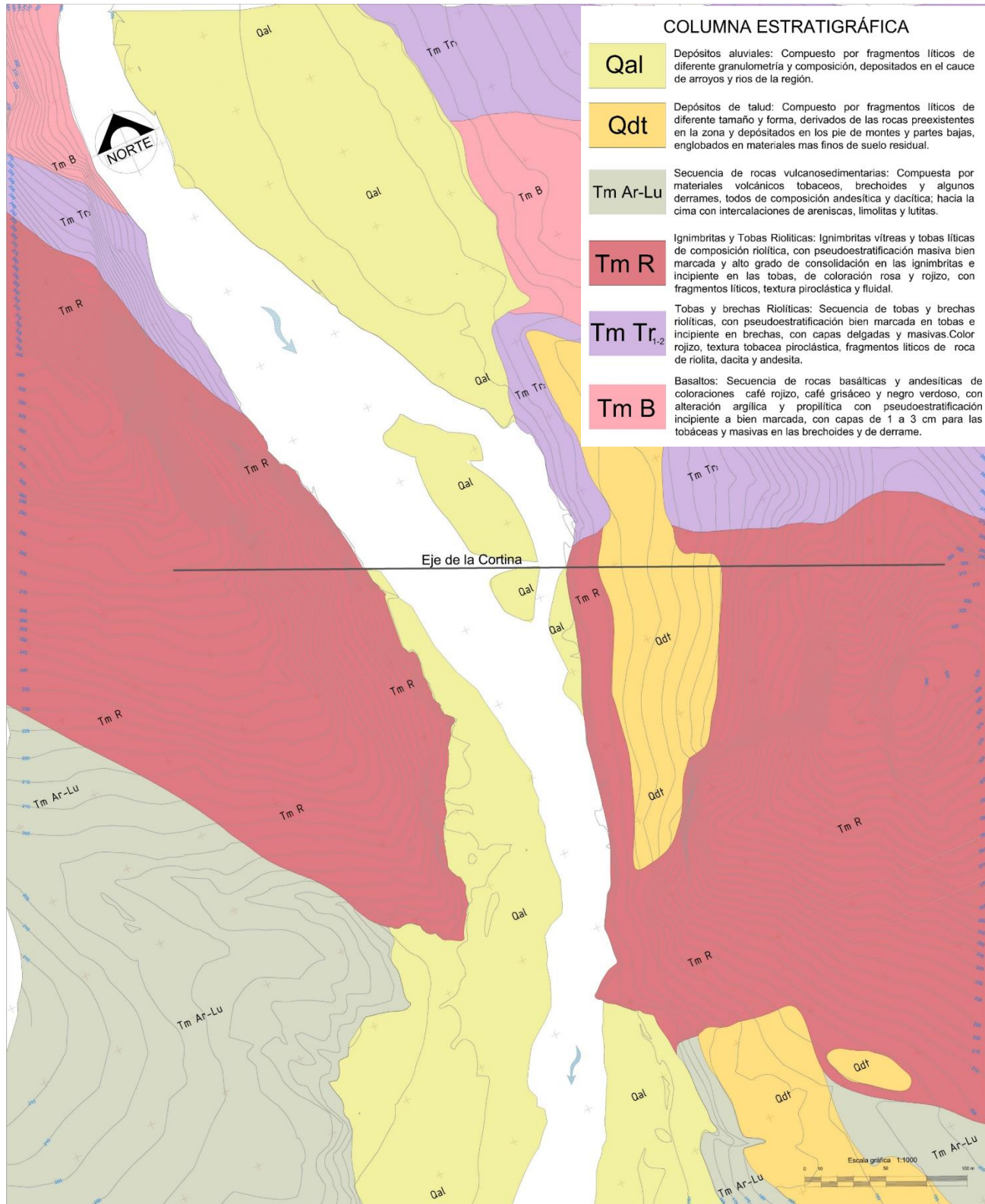


algunas capas se tiene estratificación cruzada.

Cubriendo de forma discordante a las unidades volcánicas se observan depósitos recientes sin consolidar, producto del intemperismo, erosión, transporte y/o acumulación en las partes planas o bajas. Dentro de estos se diferencian materiales aluviales en las orillas del río, depósitos de talud y suelos residuales ubicados en los pies del talud. Los depósitos aluviales se originaron por el aporte continuo de los sedimentos de ríos y arroyos, tienen amplia distribución en el cauce y forman terrazas aluviales; su espesor en la parte media del cauce en promedio alcanza poco más de 20 m.

Por ultimo tenemos los depósitos de talud que se componen por fragmentos líticos de diferentes tamaños y formas, derivados de las rocas preexistentes en la zona y pueden estar englobados en material de suelo residual más fino con tamaño de la arcilla a arena.

En el Plano 1 de la página 8, observamos las litologías presentes en la zona, la distribución y los contactos localizados durante el levantamiento geológico que se realizó y en la parte superior derecha del mismo, la descripción simplificada junto con sus abreviaciones y colores para su representación gráfica.



Plano 1. Geología del área de estudio





### 2.1. Sismicidad

La zona del proyecto está localizada cerca de la región comprendida por la interacción de la placa continental Norteamericana con las oceánicas de Rivera y Cocos; las últimas se mueven hacia el noreste y una parte se encuentra subduciendo a la placa Norteamericana, por lo que la actividad sísmica registrada se ha asociado a estos movimientos y es de gran importancia tomar en cuenta para el diseño de las estructuras.

Para determinar el riesgo sísmico en la cortina se realizó la investigación de diferentes instituciones nacionales, como el Servicio



Figura 6, Placas Tectónicas

Sismológico Nacional (SSN) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE); de las cuales se puede decir que en lo que corresponde a la distribución de epicentros en la región, la actividad sísmica de mayor magnitud se localizó en la costa de Jalisco-Nayarit, debido al movimiento de las placas mencionadas. La costa se considera generadora de sismos de magnitud moderada; sin embargo, se encuentra lejana a la zona del proyecto.

También es importante mencionar que con la observación sismológica realizada no se tienen evidencias de movimientos sísmicos relacionados con fallas geológicas locales, sin embargo se recomienda continuar con el monitoreo local.

Para obtener el espectro de diseño del sitio se tomaron en consideración los datos adquiridos históricamente e instrumental, conseguida de artículos y de los diversos catálogos nacionales, se utilizaron parámetros conservadores y sismos relacionados a la interfaz Pacífico – Rivera.



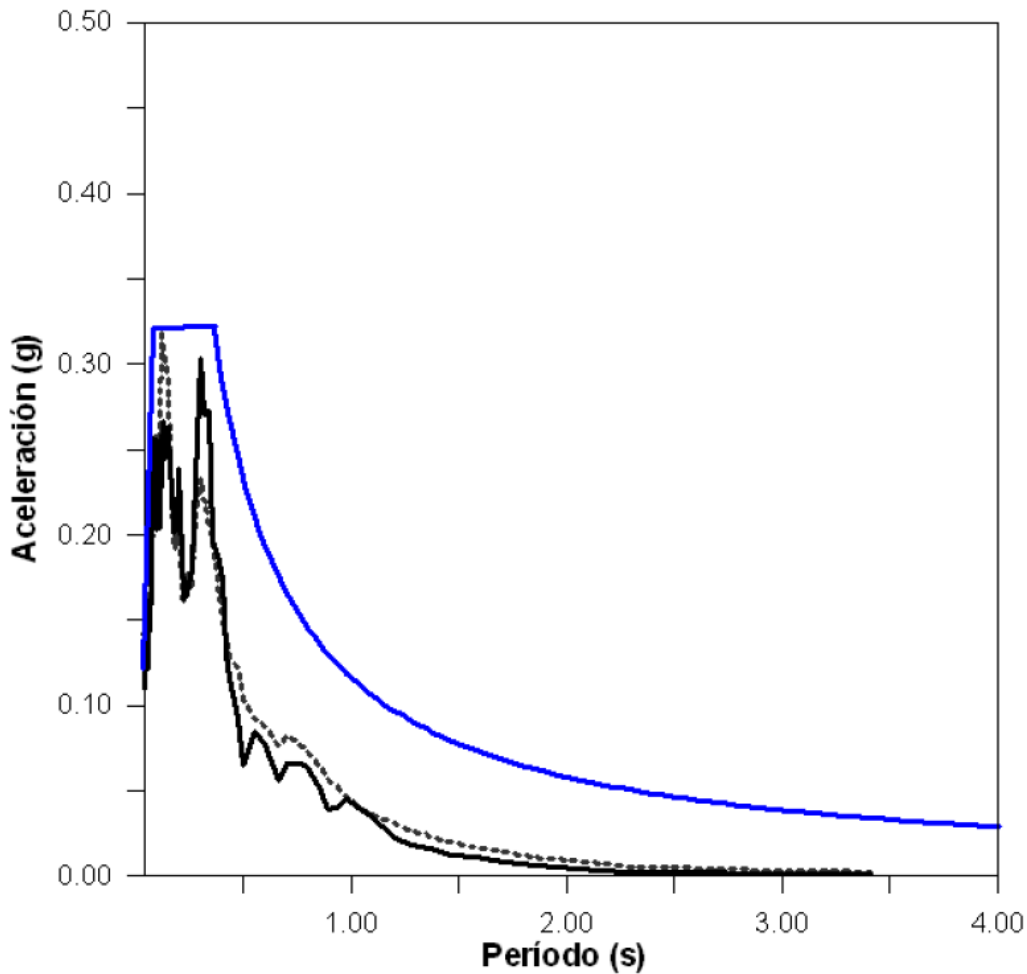


Figura 7, Espectro de respuesta asociado a la zona del proyecto

El espectro de respuesta obtenido se muestra en la Figura 7, donde podemos ver que la aceleración del terreno es de 0.12 g y conserva una meseta espectral de 0.32 g.

Se puede concluir que debido a la distancia y magnitud de la actividad presentada entre las placas mencionadas, no se consideran importantes los efectos en la zona del proyecto, sin embargo es importante realizar el monitoreo sismológico para identificar los posibles cambios en el régimen de esfuerzos, tal como lo recomienda la normatividad internacional; dichos cambios están ligados a factores como estructuras geológicas, estratigrafía local, condiciones topográficas del sitio, entre otras.



### 3. Exploración geológica – geotécnica

La exploración geológica – geotécnica incluye el levantamiento superficial de la zona donde se desplantará la boquilla, se hace la descripción de las estructuras geológicas, la exploración en subsuelo con sondeos y recuperación de núcleos, pruebas de permeabilidad tipo Lugeon, pruebas mecánicas y estudios geofísicos; cada uno de los cuales se describen en este capítulo.

#### 3.1. Geología Estructural

Las márgenes pertenecen al mismo marco tectónico de la zona; sin embargo, respondieron de diferente manera a los esfuerzos y deformaciones; por lo cual el análisis fue realizado por separado y posteriormente se hizo la comparación de las estructuras o discontinuidades presentes. De la serie de datos estructurales obtenidos definimos su concentración del análisis estadístico, representándose con los siguientes datos:

Tabla 1, Discontinuidades generales

Discontinuidad	Orientación	
Pseudoestratificación	So	311° / 51° SW
Fallas	F1	307° / 56° SW
	F2	355° a 005° / 67° NE a 81° SE
	F3	051° / 81° NW
Fracturas	f1	022° / 83° SE a Vertical
	f2	302° a 312° / 33° NE y 46° SW

Tabla 2, Discontinuidades por margen

Discontinuidad	Orientación			
	Margen Derecha		Margen Izquierda	
Fallas	F3	052° / 81° NW	F1	308° / 55° SW
	F1	312° / 67° SW a Vertical	F2	355° a 018° / 81° SE a 70° NE
Fracturas	f1	022° / 83° SE a Vertical	f1	020° / 81° SE a Vertical
	f2	297° / 34° NE	f2	313° / 47° SW
	f3	N - S / 37° E		

La Tabla 1 muestra los datos estructurales de manera general para la zona del proyecto, durante el levantamiento geológico se identificaron 3 tipos de estructuras principales; pseudoestratificación, fallas y fracturas.

El estereograma correspondiente lo vemos a continuación (Pág. 12) y el programa que se utilizó para su elaboración fue “Dips, Versión 5.103”.

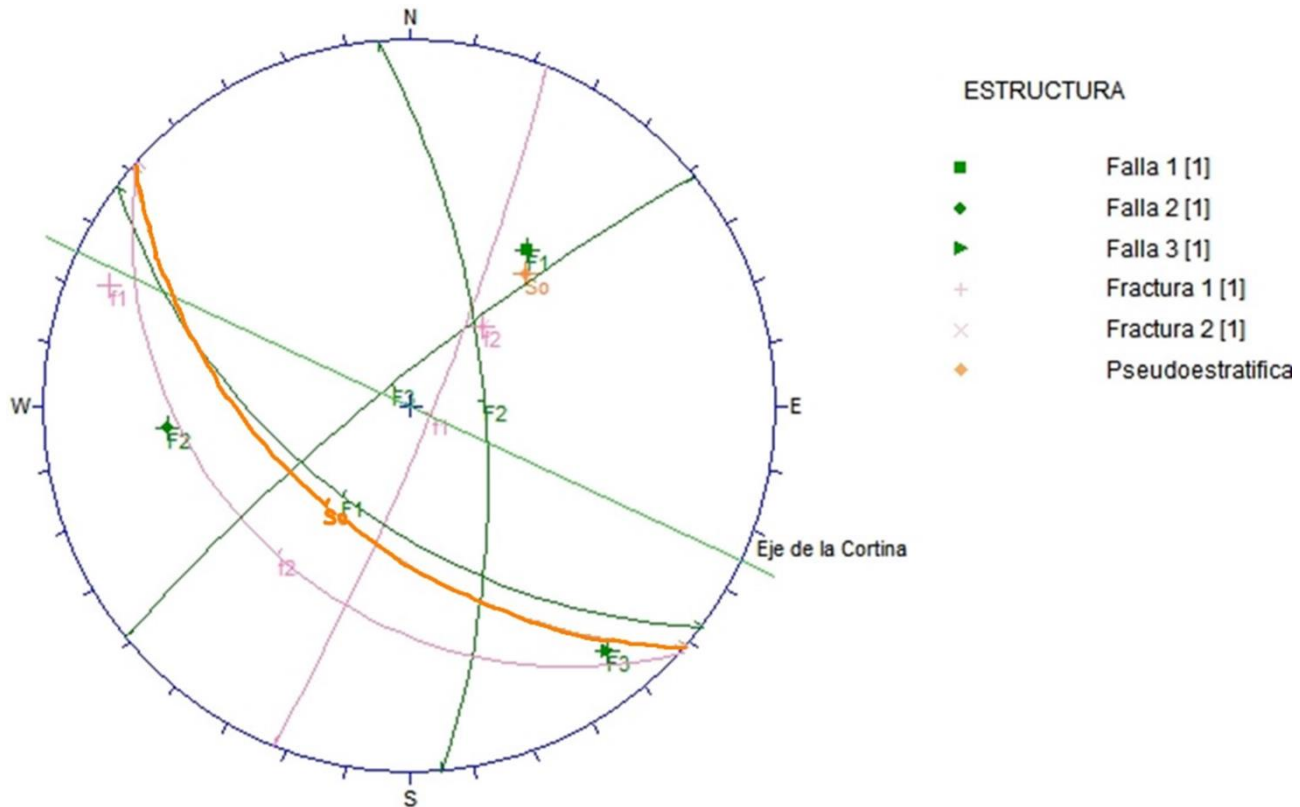


Figura 8, Estereograma general de estructuras presentes en la zona del proyecto

La pseudoestratificación (Figura 9) se presenta de escasa a moderada en las ignimbritas y tobas líticas; la observamos en esporádicas partes de manera abundante donde las tobas están en capas más delgadas; aguas abajo la secuencia vulcanosedimentaria la muestran con gran abundancia; su dirección preferencial en ambos márgenes es NW 49° con una inclinación de 51° hacia el SW, esto en base al análisis



Figura 9, Erosión superficial sobre un plano de pseudoestratificación

estadístico de 69 datos estructurales de campo. La continuidad que presenta va del orden de decenas de metros en planos ásperos a rugosos, cerrados y sellados tanto en superficie como a profundidad, excepto cuando se tiene fallamiento paralelo. La Figura 8 muestra esta estructura en color naranja.

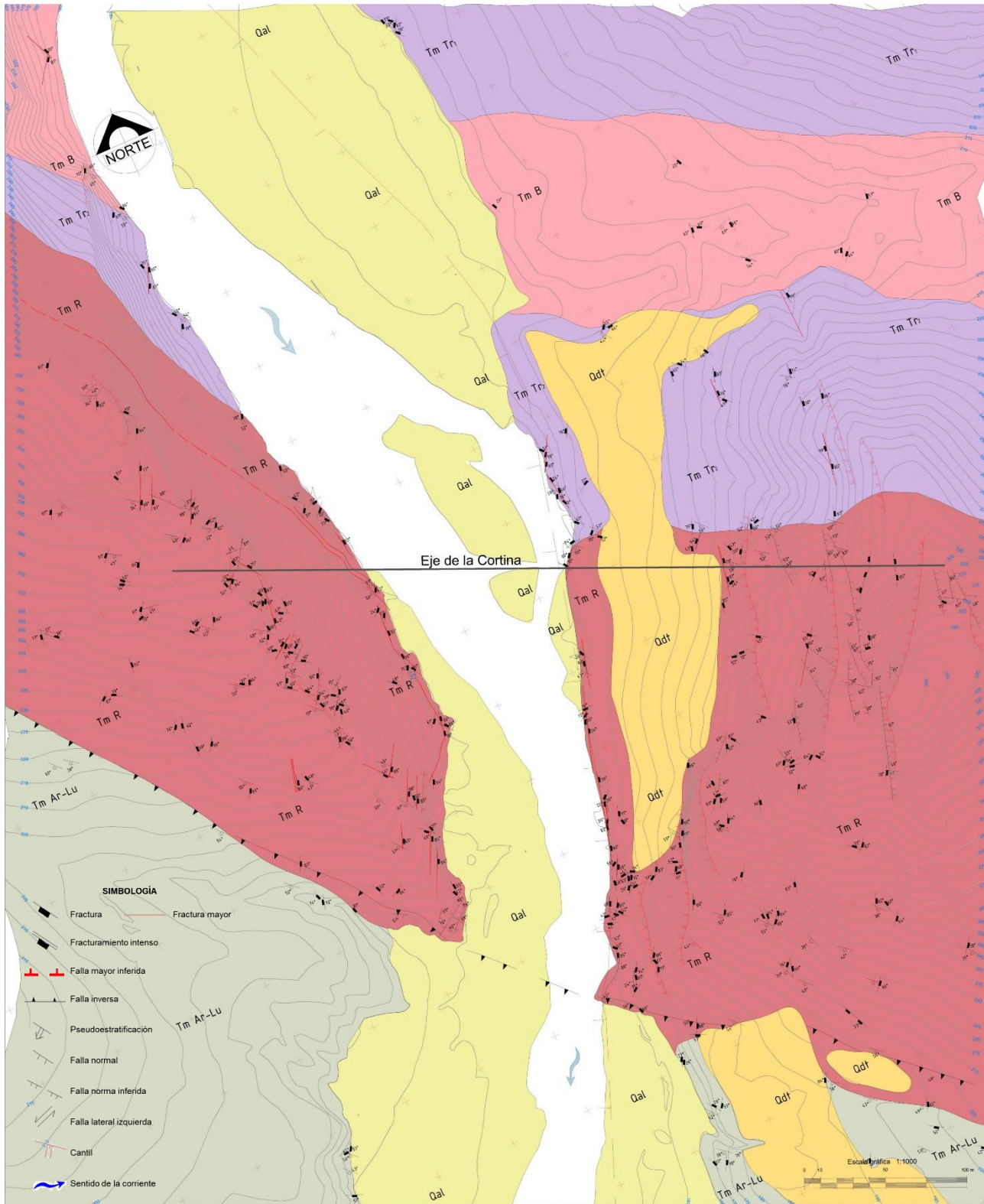


En la Tabla 2 (Pág.11) podemos observar las orientaciones de las discontinuidades encontradas en cada margen, se identificaron 3 familias de fallas y 3 familias de fracturas; de las cuales podemos decir que las familias de fallas persisten en ambas márgenes, a diferencia de las fracturas donde solo encontramos la familia 1 y 2 en la margen izquierda.

El sistema de fallas 3, F3, es el más antiguo ya que es cortado por el sistema F1, que a su vez es intermedio debido a que es cortado por el sistema F2, siendo así este último el más reciente; no hay relación de desplazamiento entre el sistema F2 y F3. La frecuencia de sistemas entre márgenes es diferente, en la margen derecha predomina el sistema F3 sobre el F1 mientras que el F2 es escaso; pero en la margen izquierda predomina el sistema F1 sobre el sistema F2 y el sistema F3 es escaso.

Las fracturas presentes también tienen 3 sistemas preferenciales, siendo el primero, f1, el más frecuente, mientras que los otros dos se presentan de forma moderada, el f2 y escasa el f3; sin embargo, este último presenta estructuras de mayor tamaño.

En el Plano 2 de la página 14, podemos observar la localización de los datos estructurales obtenidos. Tomando en cuenta el sentido del cauce del río, la margen derecha está del lado izquierdo del plano y la margen izquierda del lado derecho del plano; se pueden observar además las estructuras mayores localizadas, como lo son las fallas presentes.



Plano 2, Geología Estructural





Figura 10, Plano de falla con fracturamiento intenso, roca triturada y una delgada capa de sílice recrystalizada

Los sistemas de fallas se presentan de tipo normal, la familia uno, con dirección NW 53° y buzamiento 56° SW, la cual coincide y es paralela a la pseudoestratificación, indicando que durante los esfuerzos tectónicos que sufrieron estas rocas hubo movimientos capa – capa. La diferencia entre estos tipos de discontinuidades radica en que las fallas presentan zona de cizalla en

sus planos, la cual está representada por fracturamiento intenso o roca triturada, además de que en algunos planos también se puede encontrar recrystalización de calcita, sílice, óxidos o estrías y escalones de falla (Figura 10).

El segundo sistema de fallas presenta una dirección que varía entre 355° y 025° con buzamientos de 81° SE a 67° NE, se considera el más reciente ya que corta y desplaza al sistema de la familia 1, presenta planos de falla o fractura mayores y casi verticales con dimensiones de 3 a más de 10 m de altura y de 5 a 30 m o más de longitud, se asocia a grandes cantiles escalonados con rumbo promedio NE 10 – 25° en



Figura 11, Plano con estrías verticales de falla

ambos márgenes. En los planos de estas estructuras se observó zona de cizalla con fracturamiento intenso y roca triturada de espesor variable mayor a 5 cm, y en algunos casos también se observan estrías verticales o inclinadas, sus paredes se presentan planas y lisas o ligeramente onduladas (Figura 11), pueden estar cerradas o abiertas con relleno de suelo o arcilla, a profundidad se encuentren con brecha de falla o rellenas de calcita o arcilla.



Figura 12, Sistemas de falla F1 y F2, el primero paralelo a la pseudoestratificación (línea negra) que es cortado y desplazado por el sistema de fallas F3 de rumbo N – S (línea roja)

El sistema F3 es el más escaso y se considera el más antiguo, sus planos de falla son casi verticales con dimensiones de 3 a 15 m de longitud y de 2 a 5 m de altura principalmente en la margen derecha, en algunos planos se presentan estrías inclinadas, que indican una componente lateral izquierda; en una de ellas el relleno alcanza los 25 cm con material tobáceo y brechoide rojizo (Figura 12). Como se mencionó en el apartado 3.1, no hay relación

entre el sistema de fallas F2y F3 por lo cual no se realiza el análisis por cuña, el estereograma de la Figura 13 es representativo de ambas márgenes y al hacer el análisis por margen solo te presentan dos familias de fallas por margen (Tabla 2).

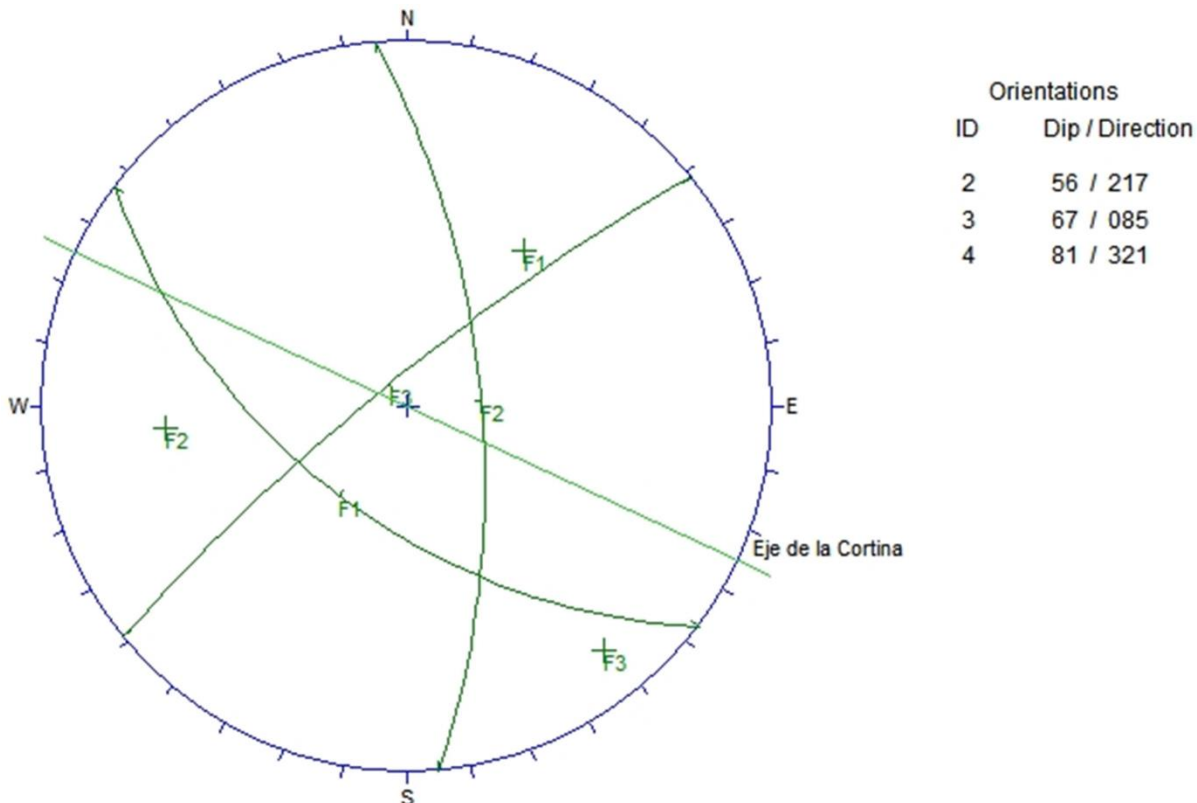


Figura 13, Estereograma de fallas





Figura 14, Fracturamiento intenso a moderado representativo del sistema de fracturas f1

Las fracturas afectan por igual a las diferentes secuencias de rocas volcánicas, se presentan de forma moderada a intensa sobre las ignimbritas riolíticas, generando bloques prismáticos de diferentes tamaños con caras planas y lisas, con dimensión variable de decímetros hasta 5 m; mientras en las tobas y brechas riolíticas y basaltos se presentan de forma moderada a escasa y generan

bloques de mayores dimensiones, sus planos se presentan abiertas o cerradas y rellenas de suelo, arcilla o calcita.

La frecuencia del sistema f1 es similar en ambos márgenes, pero el sistema f2 se comporta de forma diferente en cada margen; el sistema f3 sobresale en la margen derecha con dirección N – S con buzamiento de 37° al E.



Figura 15, Fracturamiento escaso pero mayor del sistema f3

Al hacer la comparación de las direcciones preferenciales de los sistemas de fallas y fracturas se observa que se corresponden unos con otros;

el sistema de fracturas f2 corresponde con el sistema de fallas F1, mientras que el sistemas de fracturas f1 corresponde con el sistema de fallas F2.

El estereograma representativo de estos sistemas de fracturas lo podemos ver en la Figura 16 junto con la dirección que tendrá la cortina.

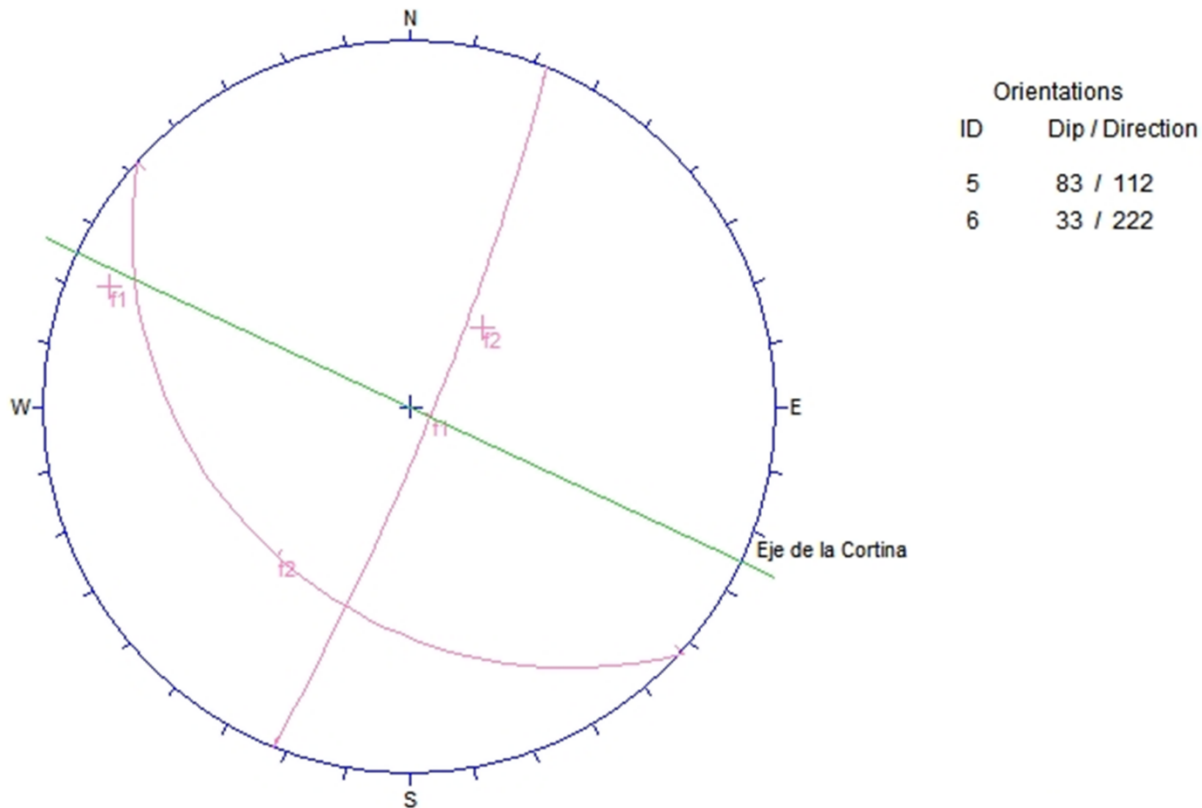


Figura 16, Estereograma de fracturas

### 3.2. Sondeos

Para la exploración subterránea se realizaron 36 sondeos exploratorios con recuperación de núcleo; 8 de los cuales se encuentran en la margen derecha, 16 en la margen izquierda y 12 sobre en el cauce del río.

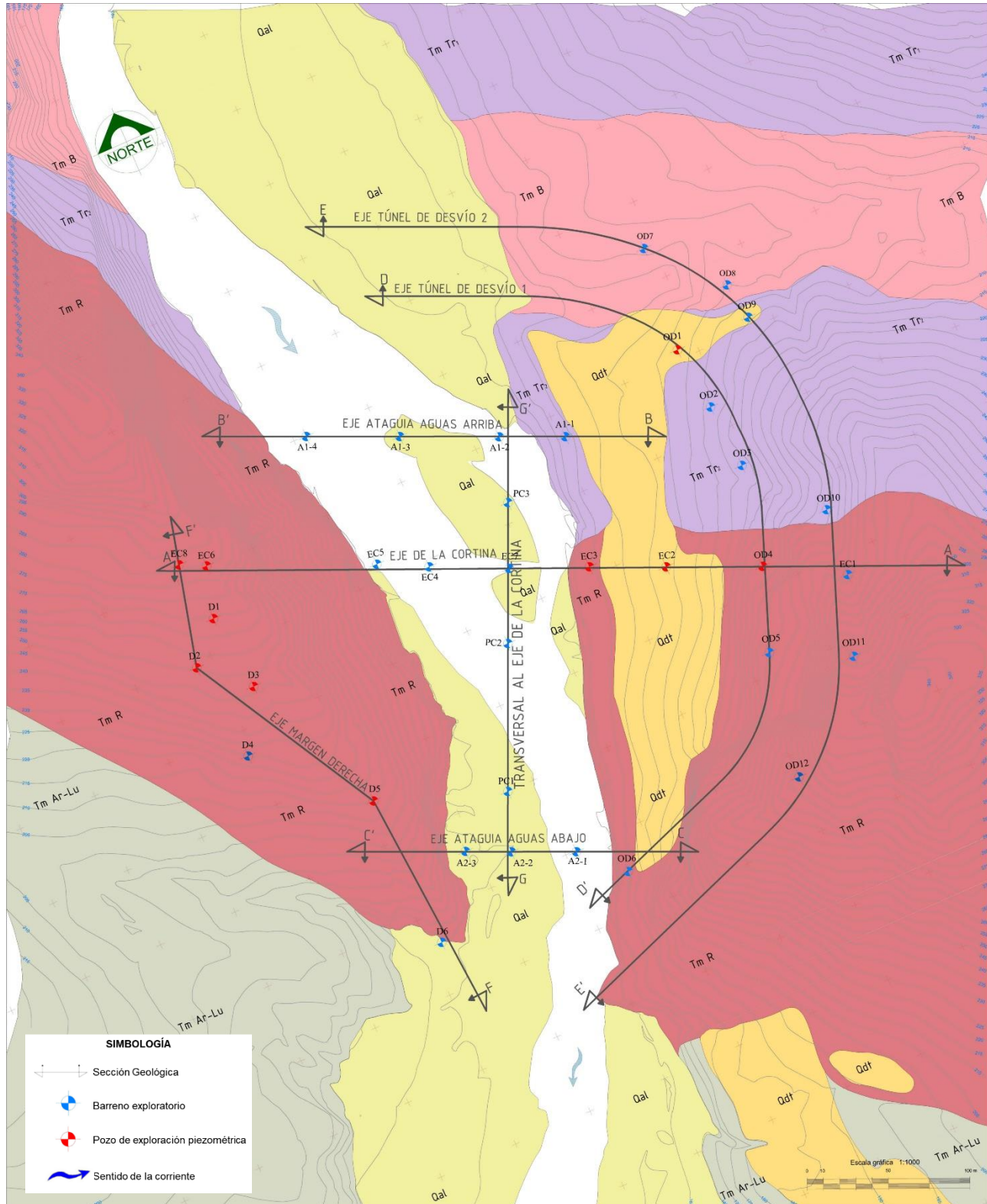
El objetivo de dichos sondeos es comprobar la existencia de las estructuras geológicas identificadas con el levantamiento superficial, ver algunas de sus características, obtener el índice de calidad de roca, la permeabilidad del macizo rocoso, y realizar pruebas de laboratorio que comprueben la resistencia del material en el cual se construirán las estructuras de la presa.

En la Tabla 3 de la página 19 observamos las cantidades de perforación realizadas en cada sondeo así como la proyección de la estructura a la cual pertenecen; por otro lado en el Plano 3 de la página 20 tenemos su localización gráfica.



Tabla 3, Sondeos realizados en la zona de obras

Obra	No.	Nombre	Prof. Perforada (m)	
			Acarreo	Roca
Eje de la Cortina	1	EC1	0.00	110.93
	2	EC2	0.00	96.00
	3	EC3	0.00	110.00
	4	EC4	15.50	94.50
	5	EC5	4.17	64.33
	6	EC6	0.00	145.40
	7	EC7	18.50	91.55
	8	EC8	0.00	130.35
Margen Derecha	9	D1	0.00	110.15
	10	D2	0.00	81.20
	11	D3	0.00	125.45
	12	D4	0.00	80.50
	13	D5	0.00	100.20
	14	D6	0.00	60.40
Perpendicular a la Cortina	15	PC1	18.00	22.00
	16	PC2	20.20	20.00
	17	PC3	16.00	24.00
Ataguía Aguas Arriba	18	A1 - 1	0.00	35.00
	19	A1 - 2	12.20	22.80
	20	A1 - 3	22.00	13.00
	21	A1 - 4	12.00	23.00
Ataguía Aguas Abajo	22	A2 - 1	19.26	16.50
	23	A2 - 2	19.10	16.40
	24	A2 - 3	9.00	26.00
Obra de Desvío 1	25	OD1	0.00	45.00
	26	OD2	0.00	60.00
	27	OD3	0.00	70.00
	28	OD4	0.00	101.35
	29	OD5	0.00	97.55
	30	OD6	0.00	45.10
Obra de Desvío 2	31	OD7	0.00	45.25
	32	OD8	0.00	70.30
	33	OD9	0.00	90.05
	34	OD10	0.00	105.10
	35	OD11	0.00	140.26
	36	OD12	0.00	140.27



Plano 3, Localización de barrenos en la zona de obras





La descripción de los sondeos se agrupo por obra civil para generar e interpretar las secciones geológicas correspondientes, teniendo así 8 sondeos sobre el eje de la cortina, 6 en la margen derecha, 3 sobre el cauce en el eje perpendicular a la cortina, 4 sobre la ataguía aguas arriba, 3 sobre la ataguía aguas abajo, 6 sobre la obra de desvío 1 y 6 más sobre la obra de desvío 2 (Tabla 3); cabe mencionar que en algunas secciones, debido a su ubicación y alineación, algunos de los sondeos se incluyen en dos secciones, pero su descripción principal se hace en sobre el eje al cual pertenecen; así mismo podemos ver gráficamente la representación de índice de calidad de roca y los resultados de las pruebas de permeabilidad; para fines prácticos dentro de las descripciones de cada sondeo se toma solo el RQD (Rock Quality Designation) promedio de cada tramo. La simbología utilizada en las secciones geológicas es la siguiente:

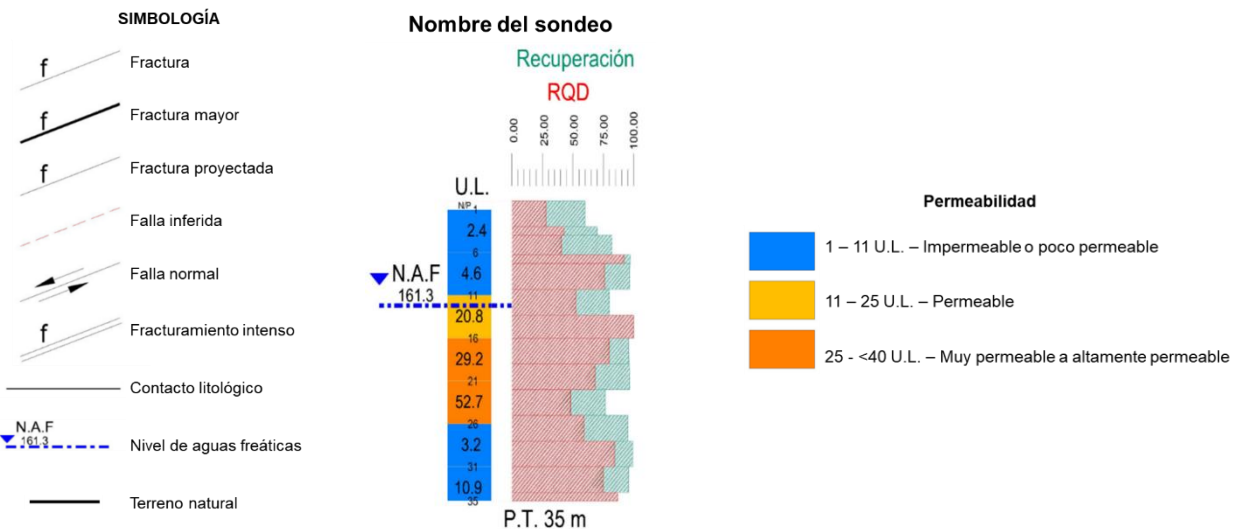


Figura 17, Simbología secciones geológicas

Para el cálculo del índice de calidad de roca, RQD, que es la relación entre la suma de las longitudes de los fragmentos mayores de 10 cm y la longitud total del tramo considerado:

Tabla 4, Índice de calidad de roca RQD

RQD %	Calidad
<25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Media
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy buena

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud de los trozos de testigo} > 10 \text{ cm}}{\text{longitud total}} \times 100$$

Se consideraron los fragmentos de material fresco, excluyendo los que presentan un grado de alteración importante; el diámetro de los testigos fue NQ (47.6 mm) y la medida de la longitud se realizó sobre el eje central del mismo; la calidad de la roca con esta relación se consideró con los rangos de la Tabla 4.

Con el propósito de conocer el comportamiento del acuífero en la zona de obras, además algunos barrenos se adaptaron como pozos de observación para definir la profundidad del nivel de agua en el subsuelo mediante el empleo de una sonda eléctrica.

### 3.2.1. Eje de la Cortina (Sección A – A')

Sobre este eje se realizaron 8 sondeos con profundidades que van de 64 a 130 m de profundidad, tenemos 3 en la margen izquierda, que cortaron ignimbritas riolíticas en sus primeros tramos y tobas riolíticas a mayor profundidad; 3 sobre el cauce los cuales obtuvieron muestras de rellenos aluviales, ignimbritas y tobas y brechas riolíticas; los 2 últimos en la margen derecha cortaron únicamente ignimbritas riolíticas.

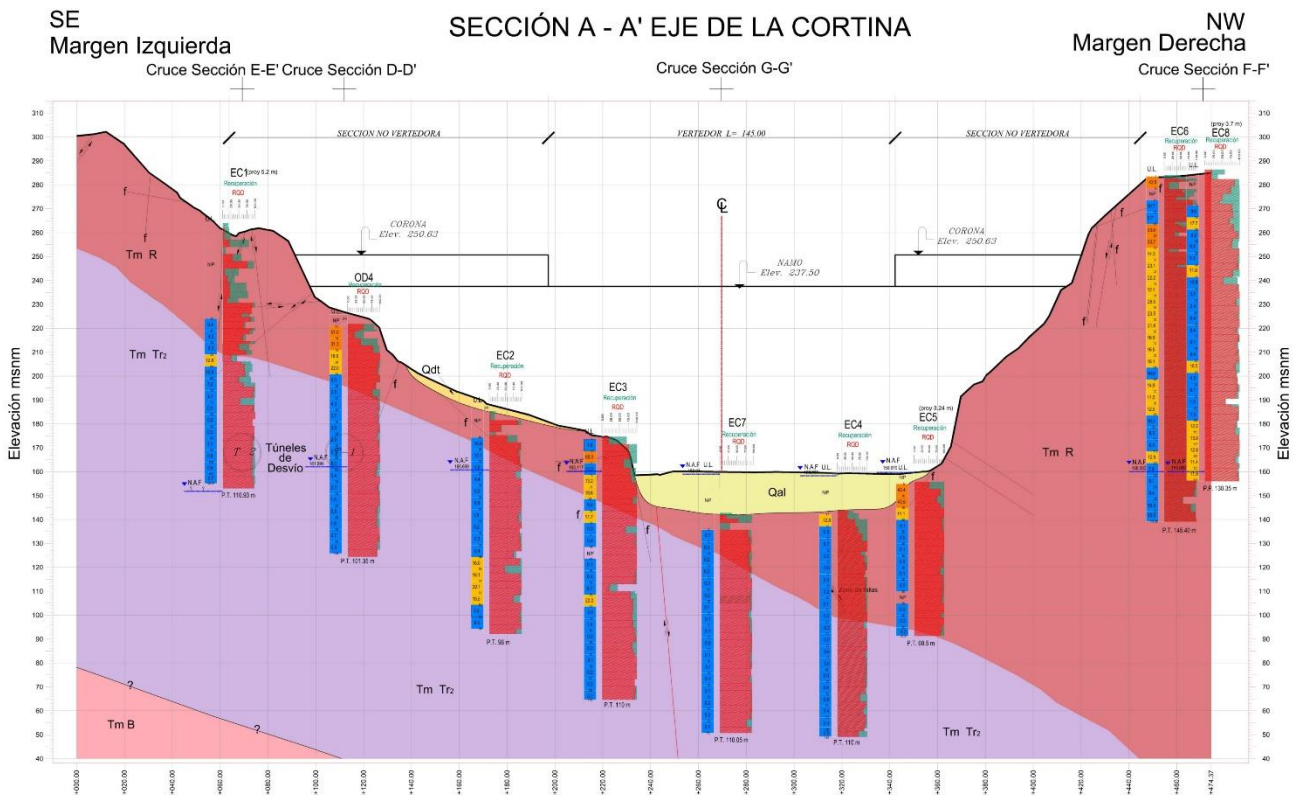


Figura 18, Sección geológica A - A' sobre el eje de la cortina

En la Figura 18 observamos de manera gráfica a lo largo de los sondeos, el índice de calidad de roca (RQD) obtenidos y en cada sondeo descrito a continuación se muestra la tabla correspondiente a sus valores numéricos separándolos por sus tramos respectivos.

Sondeo EC1: se ubica en el extremo oriental de la margen izquierda, cerca del cruce con el eje del túnel de desvío 2; a los 50.5 m encontramos el contacto entre las ignimbritas riolíticas y las tobas y brechas riolíticas.

### 3. Exploración geológica – geotécnica



RQD 1, Sondeo EC1

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
EC1	0 - 33.4	50	18	Muy mala
	33.4 - 68.5	86	69	Regular
	68.5 - 110.93	98	92	Muy buena

Sondeo EC2: Se localiza sobre la margen izquierda en la parte media de la ladera, se perforó a 96.0 m de profundidad y cortó ignimbritas riolíticas los primeros 18 m, que están en contacto transicional sobreyaciendo a las tobas y brechas riolíticas hasta el fondo del barreno.

RQD 2, Sondeo EC2

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
EC2	0 - 13	32	21	Muy mala
	13 - 31	95	86	Buena
	31 - 96	99	91	Muy buena

Sondeo EC3: Este sondeo se ubica en la margen izquierda a 12 m del cauce sobre el eje de la cortina, a una profundidad total de 110.0 m. Los primeros 27 m se perforaron en ignimbritas riolíticas, el resto del sondeo cortó la unidad de tobas y brechas riolíticas.

RQD 3, Sondeo EC3

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
EC3	0 - 3.1	70	19	Muy mala
	3.1 - 19.1	96	74	Regular
	19.1 - 110	98	92	Muy buena

Sondeo EC4: Localizado en el cauce del río, cortó un espesor de materiales aluviales de 15.50 m que cubren a la unidad de ignimbritas riolíticas que va de 15.5 a 60.0 m de profundidad, posteriormente cortó tobas y brechas riolíticas hasta su profundidad total (110.0 m).

RQD 4, Sondeo EC4

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
EC4	0 - 15.5		Relleno Aluvial	
	15.5 - 19.1	63	36	Mala
	19.1 - 28.2	100	71	Regular
	28.2 - 94.5	100	95	Muy buena



Sondeo EC5: Se encuentra sobre el eje de la cortina, en el extremo derecho del cauce del río, se perforó hasta 68.5 m de profundidad. Cortó un espesor de material aluvial de 4.17 m, posteriormente y hasta los 64.0 m se tienen ignimbritas riolíticas. De los 64.0 m al fondo se tiene una alternancia de tobas y brechas riolíticas.

RQD 5, Sondeo EC5

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
EC5	0 - 4.17	Relleno Aluvial		
	4.17 - 15	100	76	Buena
	15 - 68.5	100	96	Muy buena

Sondeo EC6: Se localiza en la parte alta del cantil de la margen derecha, alcanzó una profundidad total de 145.4 m y en todo el tramo se cortaron ignimbritas riolíticas. Cabe mencionar que el brocal está casi 30 m por arriba de la elevación de la corona (252 msnm) debido a que el acceso al trazo del eje de la cortina es inaccesible para el equipo de perforación. La roca cortada se observa intemperizada y alterada en los primeros 10 m y esta disminuye conforme aumenta la profundidad, hacia el final del sondeo se puede ver una roca en general sana y resistente.

RQD 6, Sondeo EC6

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
EC6	0 - 6.4	62	26	Mala
	6.4 - 26	88	69	Regular
	26 - 145.4	96	92	Muy buena

Sondeo EC7: Está sobre el eje de la cortina, en la parte central del cauce del río, a 110.05 m de profundidad. Cortó un espesor de material aluvial de 18.5 m, posteriormente 16.5 m de ignimbritas riolíticas (hasta 35.0 m) y para finalizar con 75.0 m de tobas y brechas riolíticas.

RQD 7, Sondeo EC7

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
EC7	0 - 18.5	Relleno Aluvial		
	18.5 - 25.1	43	11	Muy mala
	25.1 - 110.05	98	96	Muy buena



Sondeo EC8: También se localiza en la parte alta del cantil de la margen derecha, se llevó a una profundidad total de 130.35 m y en todo el tramo se cortaron ignimbritas riolíticas.

RQD 8, Sondeo EC8

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
EC8	0 - 4	47	20	Muy mala
	4 - 26	99	72	Regular
	26 - 130.35	97	91	Muy buena

**3.2.2. Ataguía Aguas Arriba (Sección B – B')**

Sobre el eje de esta ataguía se realizaron 4 sondeos exploratorios a la profundidad de 35.0 m y cortaron un total de 140 m. Estos barrenos están ubicados 3 en el cauce del río y 1 en la margen izquierda, cortaron 46.2 m de materiales aluviales y 93.8 m de tobas y brechas riolíticas (Figura 19). A continuación se hace una breve descripción de cada barreno:

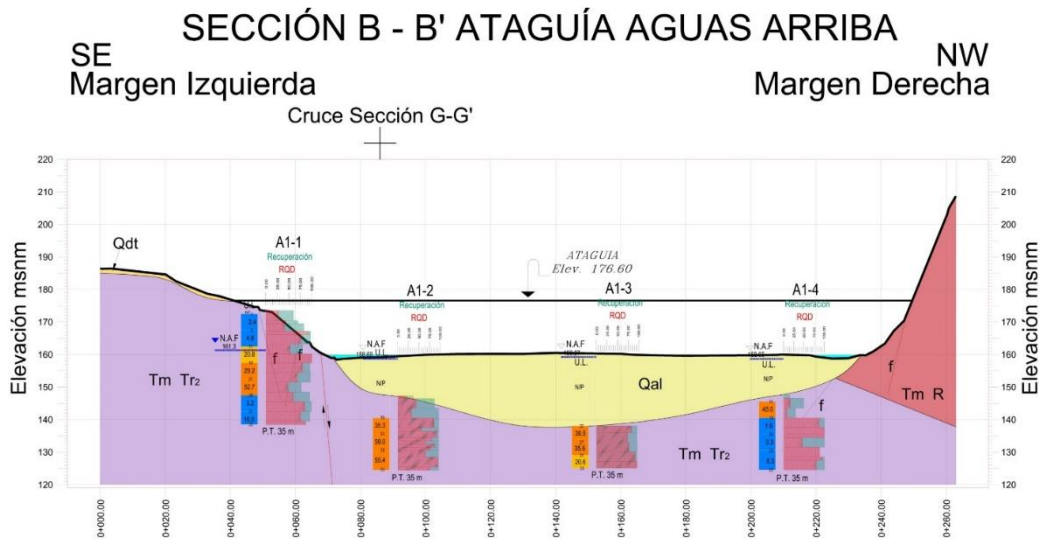


Figura 19, Sección geológica B - B' sobre el eje de la Ataguía Aguas Arriba

Sondeo A1-1: Se ubica sobre el eje del Ataguía Aguas Arriba en la margen izquierda a 19 m del cauce, perforó en su totalidad tobas y brechas riolíticas.

RQD 9, Sondeo A1-1

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
A1-1	0 - 6.3	71	37	Mala
	6.3 - 28	92	72	Regular
	28 - 35	94	82	Buena

Sondeo A1-2: Ubicado en el cauce del río sobre su lado izquierdo y cortó 12.2 m de material de relleno aluvial y 22.8 m de roca tobácea riolítica de coloración rojizo claro.

RQD 10, Sondeo A1-2

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
A1-2	0 - 12.2	Relleno Aluvial		
	12.2 - 19	57	26	Mala
	19 - 35	100	81	Buena

Sondeo A1-3: Localizado en la parte central del cauce del río, cortó 22.0 m de material de relleno aluvial y 13.0 m de roca riolítica tobácea de coloración rojizo claro.

RQD 11, Sondeo A1-3

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
A1-3	0 - 22	Relleno Aluvial		
	22 - 30	100	81	Buena
	30 - 35	100	98	Muy buena

Sondeo A1-4: Ubicado al lado derecho del cauce sobre el eje del Ataguía Aguas Arriba, cortó 12.0 m de material de relleno aluvial y 23.0 m de roca toba riolítica color rojizo claro.

RQD 12, Sondeo A1-4

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
A1-4	0 - 12	Relleno Aluvial		
	12 - 19	32	8	Muy mala
	19 - 25	91	85	Buena
	25 - 28	100	46	Mala
	28 - 35	91	85	Buena

### 3.2.3. Ataguía Aguas Abajo (Sección C – C')

Sobre el eje de esta ataguía se realizaron 3 sondeos exploratorios a una profundidad promedio de 35.5 m y cortaron un total de 106.26 m. Estos barrenos están ubicados en el cauce del río, cortaron un total de 47.36 m de materiales aluviales y 58.9 m de ignimbritas riolíticas.



## SECCIÓN C - C' ATAGUÍA AGUAS ABAJO

SE Margen Izquierda NW Margen Derecha

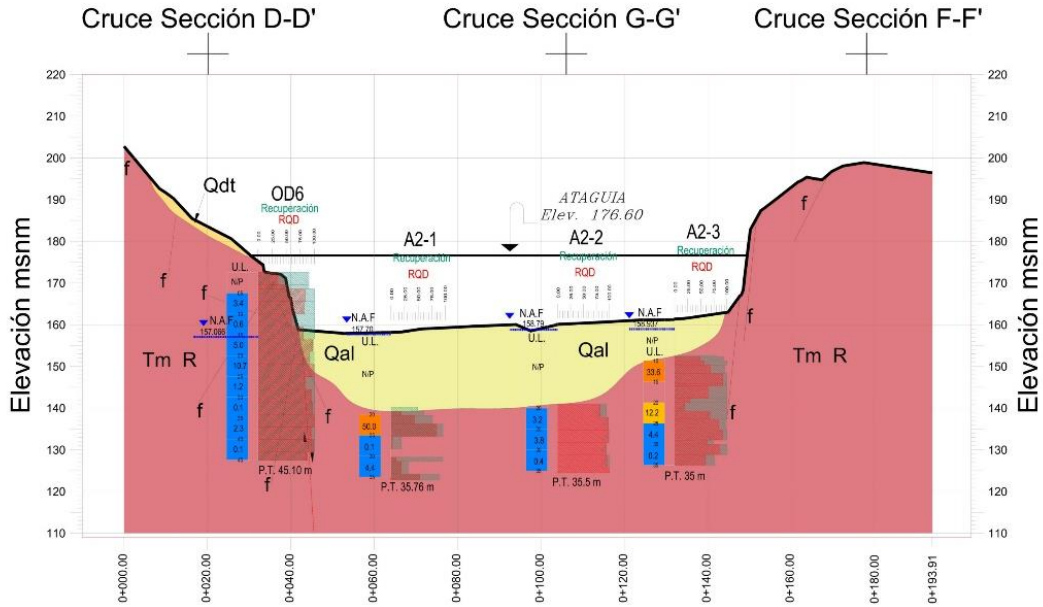


Figura 20, Sección geológica C - C' sobre el Eje de la Ataguía Aguas Abajo

Sondeo A2-1: Ubicado en el cauce del río sobre su margen izquierda y cortó 19.26 m de material de relleno aluvial y 16.5 m de ignimbritas riolíticas.

RQD 13, Sondeo A2-1

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
A2-1	0 - 19.26		Relleno Aluvial	
	19.26 - 34.26	57	27	Mala
	34.26 - 35.76	93	55	Regular

Sondeo A2-2: Localizado en la parte central del cauce, cortó 19.1 m de material de relleno aluvial y 16.4 m de ignimbritas riolíticas.

RQD 14, Sondeo A2-2

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
A2-2	0 - 19.1		Relleno Aluvial	
	19.1 - 22.2	94	82	Buena
	22.2 - 35.5	98	94	Muy buena

Sondeo A2-3: Sobre la orilla derecha del cauce del río, cortó 9.0 m de material de relleno aluvial y 26.0 m de ignimbritas riolíticas.

RQD 15, Sondeo A2-3

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
A2-3	0 - 9		Relleno Aluvial	
	9 - 10	95	49	Mala
	10 - 19	99	75	Buena
	19 - 22	100	25	Mala
	22 - 35	92	75	Buena

### 3.2.4. Obra de Desvío 1 (D – D')

La obra de desvío que conforma este proyecto consiste de 2 túneles paralelos en la margen izquierda, con diámetro de 15 m y una separación aproximada 42.5 m. Sobre el eje de túnel 1 se realizaron 6 sondeos exploratorios a una profundidad entre 45.0 y 101.5 m y cortaron un total de 419.0 m de roca que de acuerdo con su ubicación, corresponde a las diferentes secuencias volcánicas de la zona de obras.

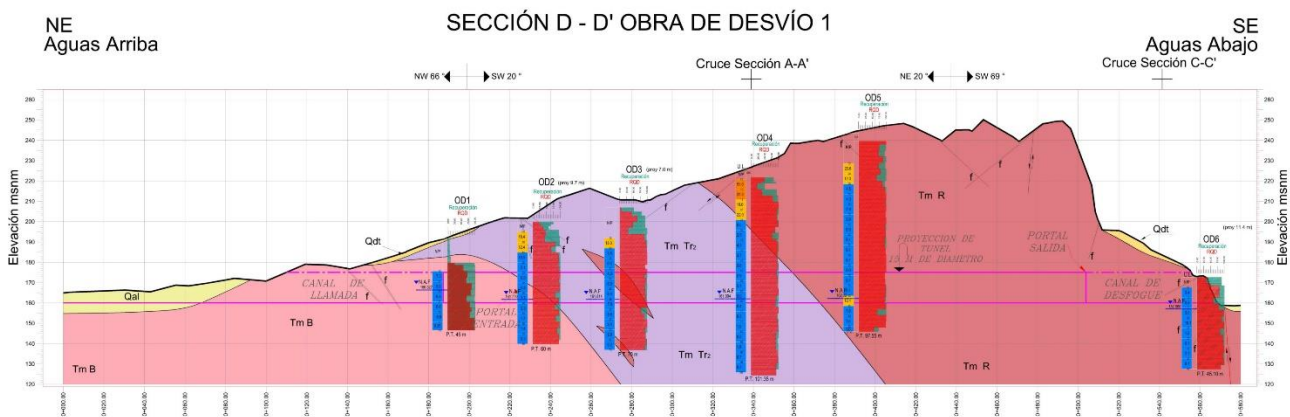


Figura 21, Sección geológica D - D' sobre el eje del túnel de desvío 1

En la Figura 21 podemos ver, además de los sondeos con sus respectivos valores de RQD y permeabilidad, la proyección del túnel de desvío 1, indicando la entrada y salida del agua y los cruces de las secciones A – A' (eje de la cortina) y C – C' (ataguía aguas abajo).

Sondeo OD1: Realizado sobre el eje del canal túnel 1 en su portal de entrada. Cortó 1.0 m de material de talud y 7.0 m de tobas y brechas riolíticas, posteriormente de 8.0 a 45.0 m se tienen rocas basálticas de derrame principalmente.



Sobre este sondeo, en el tramo de 16.0 a 31.0 m de profundidad quedará emplazado el túnel de conducción y corresponde a roca basáltica con una recuperación y RQD promedio de 99% y 76%, clasificando el tramo de una calidad que varía de regular a buena.

RQD 16, Sondeo OD1

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD1	0 - 13	27	5	Muy mala
	13 - 31	99	73	Regular
	31 - 45	100	92	Muy buena

Sondeo OD2: Cortó 31.0 m de tobas y brechas riolíticas, posteriormente de 31.0 a 60.0 m de profundidad cortó rocas basálticas de derrame y brechas. En este sondeo, el claro del túnel se ubica entre 25.0 y 40.0 m de profundidad, donde la roca compuesta por tobas y brechas riolíticas y basaltos, se presenta de excelente a buena calidad.

RQD 17, Sondeo OD2

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD2	0 - 10	78	36	Mala
	10 - 15	91	75	Buena
	15 - 60	100	93	Muy buena

Sondeos OD3: Cortó en su totalidad 70.0 m de tobas y brechas riolíticas y 2 lentes de ignimbritas tobáceas. El claro del túnel se ubica entre 32.0 y 47.0 m de profundidad, donde la roca compuesta por tobas y brechas riolíticas se presenta de excelente calidad.

RQD 18, Sondeo OD3

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD3	0 - 13.05	83	38	Mala
	13.05 - 70	99	95	Muy buena

Sondeo OD4: Localizado casi en el cruce con el eje de la cortina, con una profundidad de 101.35 m, de los cuales 30.0 m fueron en ignimbritas riolíticas y 71.35 m en tobas y brechas riolíticas. Sobre este sondeo el techo y piso del túnel se ubica a 51.0 y 66.0 m de profundidad respectivamente, donde la roca compuesta por tobas y brechas riolíticas se presenta de excelente calidad.

RQD 19, Sondeo OD4

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD4	0 - 13	63	30	Mala
	13 - 101.35	99	94	Muy buena

Sondeo OD5: Perforado a la profundidad de 97.55 m y cortó en su totalidad ignimbritas riolíticas. El trazo de techo y piso del túnel en este sondeo se ubica a las profundidades de 68.5 y 83.5 m respectivamente, donde la ignimbrita riolítica se presenta de excelente calidad.

RQD 20, Sondeo OD5

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD5	0 - 4		Sin recuperación	
	4 - 23.55	99	80	Buena
	23.55 - 97.55	97	95	Muy buena

Sondeo OD6: Este sondeo se perforó sobre el eje de túnel 1 en el portal de salida y casi en su desembocadura al río. Se llegó a la profundidad de 45.1 m y cortó en su totalidad ignimbritas riolíticas. El trazo del túnel (piso) en este sondeo se ubica a la profundidad de 12.5 m, donde la ignimbrita riolítica se presenta de regular a buena calidad.

RQD 21, Sondeo OD6

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD6	0 - 4	90	43	Mala
	4 - 16	100	77	Buena
	16 - 45.1	98	94	Muy buena

### 3.2.5. Obra de Desvío 2 (Sección E – E')

Sobre este túnel 2 se realizaron 6 sondeos exploratorios a una profundidad entre 45.5 y 140.27 m y cortaron un total de 591.23 m de roca que de acuerdo con su ubicación, corresponde a las diferentes secuencias volcánicas de la zona de obras.



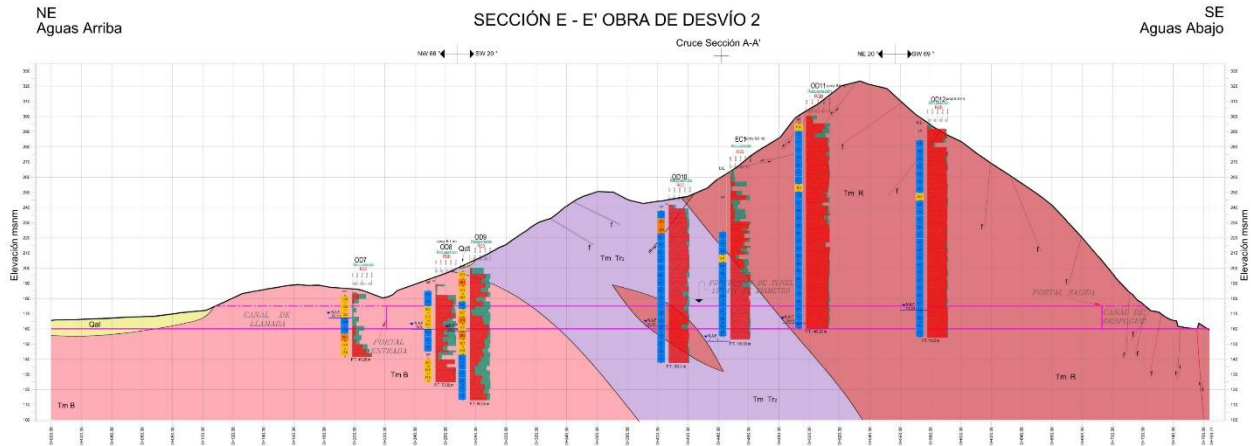


Figura 22, Sección geológica E - E' sobre el eje del túnel de Desvío 2

Sondeo OD7: Cortó en su totalidad (45.25 m) rocas de la secuencia basáltica. Sobre este sondeo se hará corte en cajón para el canal de llamada hasta los 27.0 m de profundidad (piso del canal) donde la roca basáltica presenta una recuperación y RQD promedio de 25% y 3%, clasificando este tramo de una calidad muy mala.

RQD 22, Sondeo OD7

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD7	0 - 37.1	31	8	Muy mala
	37.1 - 43.2	83	61	Regular
	43.2 - 45.25	100	98	Muy buena

Sondeo OD8: Se localiza sobre el eje del túnel 2 en su portal de entrada. Cortó en su totalidad 70.3 m de rocas de la secuencia basáltica. En el eje del túnel 2 a la altura de este sondeo, el claro de la obra (techo y piso) quedara entre las profundidades 20.0 y 35.0 m, donde la roca basáltica presenta una recuperación y RQD promedio de 94% y 69%, clasificando este tramo de una calidad buena.

RQD 23, Sondeo OD8

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD8	0 - 13	15	4	Muy mala
	13 - 28	98	80	Buena
	28 - 55.4	86	44	Mala
	55.4 - 70.3	92	88	Buena

Sondeo OD9: Se ubica sobre el eje del túnel 2 con una profundidad de 90.05 m; cortó 2.0 m de material de talud, 5.8 m de rocas tobáceas y brechoides riolíticas y 82.25 m de rocas basálticas. El eje del túnel 2 a la altura de este sondeo se ubica entre las

profundidades 28.0 y 43.0 m (techo y piso respectivamente) donde la roca basáltica presenta una recuperación y RQD promedio de 98% y 43%, clasificando este intervalo de mala a regular calidad.

RQD 24, Sondeo OD9

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD9	0 - 7	46	6	Muy mala
	7 - 28.1	94	64	Regular
	28.1 - 34.5	97	14	Muy mala
	34.5 - 64.6	98	72	Regular
	64.6 - 73.6	92	29	Mala
	73.6 - 64.6	97	69	Regular

Sondeo OD10: Se perforó a la profundidad de 105.1 m y cortó en su totalidad rocas riolíticas de aspecto tobáceo, brechoides e ignimbríticas. En este sondeo, el eje del túnel T-2 pasará entre las profundidades de 67.5 y 82.5 m (techo y piso respectivamente) donde la roca tobácea e ignimbrítica presenta una recuperación y RQD promedio de 97% y 83%, clasificando este intervalo de buena calidad.

RQD 25, Sondeo OD10

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD10	0 - 3.4	17	10	Muy mala
	3.4 - 105.1	98	90	Muy buena

Sondeo OD11: Con una profundidad de 140,26 m y cortó en su totalidad ignimbritas riolíticas. La intersección de este sondeo y el eje del túnel 2 se ubica entre las profundidades de 125.0 y 140.0 m (techo y piso respectivamente) donde la roca ignimbrítica presenta una recuperación y RQD promedio de 97% y 93%, clasificando este intervalo de excelente calidad.

RQD 26, Sondeo OD11

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD11	0 - 5	38	24	Muy mala
	5 - 14.5	94	65	Regular
	14.5 - 140.26	95	91	Muy buena

Sondeo OD12: Llegó a la profundidad de 140.27 m y cortó en su totalidad ignimbritas riolíticas. La intersección de este sondeo con el eje del túnel 2 se ubica entre las



profundidades de 120.0 y 135.0 m (techo y piso respectivamente) donde la roca ignimbrítica presenta una recuperación y RQD promedio de 100% y 98%, clasificando este intervalo de excelente calidad.

RQD 27, Sondeo OD12

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
OD12	0 - 2.7	22	5	Muy mala
	2.7 - 14.8	79	71	Regular
	14.8 - 140.27	98	95	Muy buena

3.2.6. Margen Derecha (Sección F – F')

Para el estudio de la margen derecha se realizaron un total de 8 sondeos, 2 de los cuales pertenecen al eje de la cortina y ya han sido descritos; los otros 6 se localizan sobre la sección F – F', con un total de 557.90 m de perforación y se describirán a continuación comenzando de aguas abajo hacia aguas arriba (izquierda a derecha en la Figura 23).

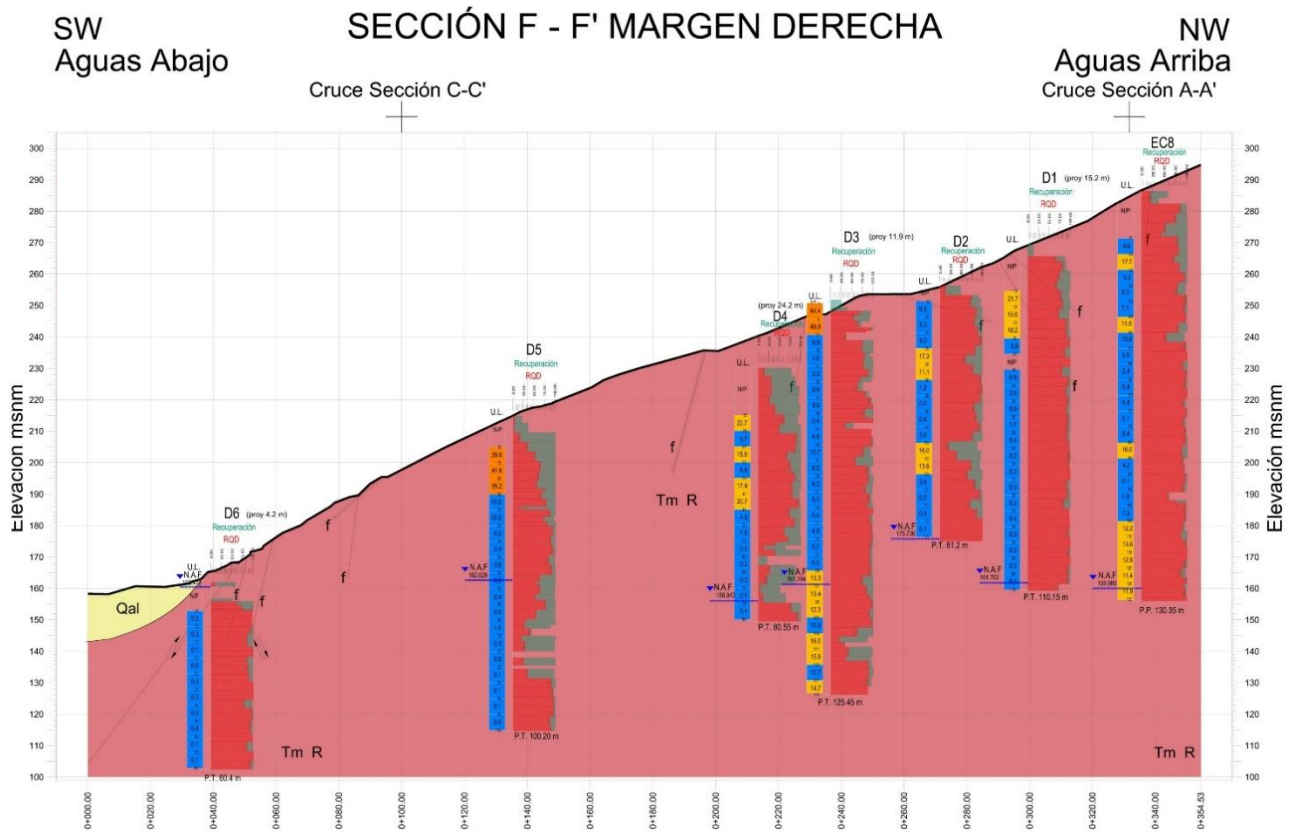


Figura 23, Sección geológica F - F' sobre la ladera derecha



Sondeo D6: Se perforó a 60.4 m de profundidad y cortó al inicio un tramo de 1.0 m de material de relleno aluvial, posteriormente cortó 59.4 m de ignimbritas riolíticas.

RQD 28, Sondeo D6

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
D6	0 - 7	28	3	Muy mala
	7 - 60.4	99	90	Muy buena

Sondeo D5: Llego a los 100.2 m de profundidad y cortó en su totalidad ignimbritas riolíticas.

RQD 29, Sondeo D5

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
D5	0 - 11.45	64	15	Muy mala
	11.45 - 23.2	100	59	Regular
	23.2 - 64.75	100	72	Regular
	64.75 - 83.5	70	23	Muy mala
	83.5 - 100.2	99	93	Muy buena

Sondeo D4: Con 80.55 m de profundidad y cortó en su totalidad ignimbritas riolíticas.

RQD 30, Sondeo D4

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
D4	0 - 20.8	93	37	Mala
	20.8 - 55.3	99	79	Buena
	55.3 - 74.7	72	20	Muy mala
	74.7 - 80.55	100	86	Buena

Sondeo D3: Tiene 125.45 m de profundidad y cortó en su totalidad ignimbritas riolíticas.

RQD 31, Sondeo D3

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
D3	0 - 3.5	33	0	Muy mala
	3.5 - 8.7	86	63	Regular
	8.7 - 61.55	92	81	Buena
	61.55 - 107.05	98	90	Muy buena
	107.05 - 114.75	79	33	Mala
	114.75 - 125.45	98	90	Muy buena

Sondeo D2: Cuenta con 81.2 m de profundidad y cortó en su totalidad ignimbritas riolíticas.



RQD 32, Sondeo D2

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
D2	0 - 3	50	14	Muy mala
	3 - 49.5	99	85	Buena
	49.5 - 55.6	93	31	Mala
	55.6 - 81.2	99	85	Buena

Sondeo D1: Cuenta con 110.15 m de profundidad y cortó en su totalidad ignimbritas riolíticas.

RQD 33, Sondeo D1

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
D3	0 - 5.55	37	22	Muy mala
	5.55 - 11.65	99	91	Muy buena
	11.65 - 14.7	98	70	Regular
	14.7 - 20.8	99	91	Muy buena
	20.8 - 23.85	98	70	Regular
	23.85 - 110.15	99	91	Muy buena

3.2.7. Eje perpendicular a la cortina (G – G')

En la parte central del cauce del río y alineados de forma perpendicular al eje de la cortina se hicieron 3 barrenos exploratorios a una profundidad promedio de 40 m, con el objeto de conocer el espesor real de los materiales de relleno aluvial y las características físicas, mecánicas y de permeabilidad de las rocas subyacentes a estos materiales de relleno. Con los resultados de estas exploraciones se interpretó la sección geológica G - G', adicionando otros sondeos cercanos ya mencionados en secciones anteriores.

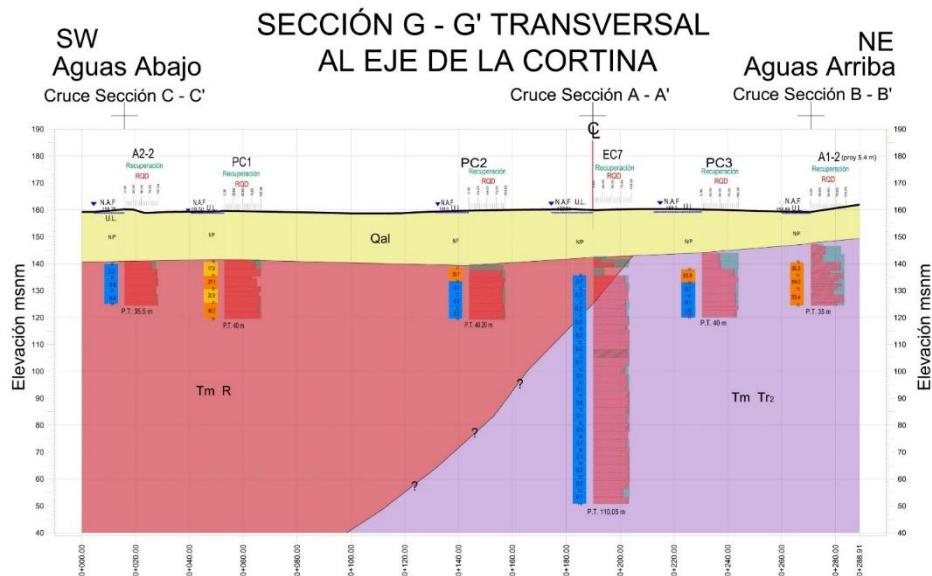


Figura 24, Sección geológica G - G' sobre el cauce del río, perpendicular al eje de la cortina





Sondeo PC1: Localizado en la parte central del cauce del río con 40.0 m de profundidad, cortó 18.0 m de rellenos aluviales y 22.0 m de ignimbritas riolíticas.

RQD 34, Sondeo PC1

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
PC1	0 - 18		Relleno Aluvial	
	18 - 40	96	91	Muy buena

Sondeo PC2: Ubicado en la parte media del cauce del río, se perforó a la profundidad de 40.2 m y cortó 20.2 m de rellenos aluviales y 20.0 m de ignimbritas riolíticas.

RQD 35, Sondeo PC2

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
PC2	0 - 20.2		Relleno Aluvial	
	20.2 - 22	46	0	Muy buena
	22 - 40.2	99	95	Muy mala

Sondeo PC3: Se localiza en la parte media del cauce del río, entre el Eje de la Cortina y el Eje del Ataguía Aguas Arriba; llegó a 40.0 m de profundidad y cortó 16.0 m de rellenos aluviales y 24.0 m de tobas riolíticas.

RQD 36, Sondeo PC3

Sondeo	Tramo [m]	Recuperación [%] (Promedio)	RQD (Promedio)	
			%	RQD
PC3	0 - 16		Relleno Aluvial	
	16 - 22	43	13	Muy buena
	22 - 40	99	95	Muy buena



### 3.3. Pruebas de permeabilidad

La permeabilidad de los macizos rocosos en los cuales se realizará la obra fue obtenida mediante la realización de pruebas de permeabilidad tipo Lugeon con obturador simple, el cual es un ensayo de inyección de agua bajo presión constante y mide el volumen de agua (V) que se inyecta durante un tiempo (t = 10 min), es decir, el caudal  $Q = V/t$  en un tramo de 5 m de longitud (L) a una presión de hasta 10 (kg/cm<sup>2</sup>).

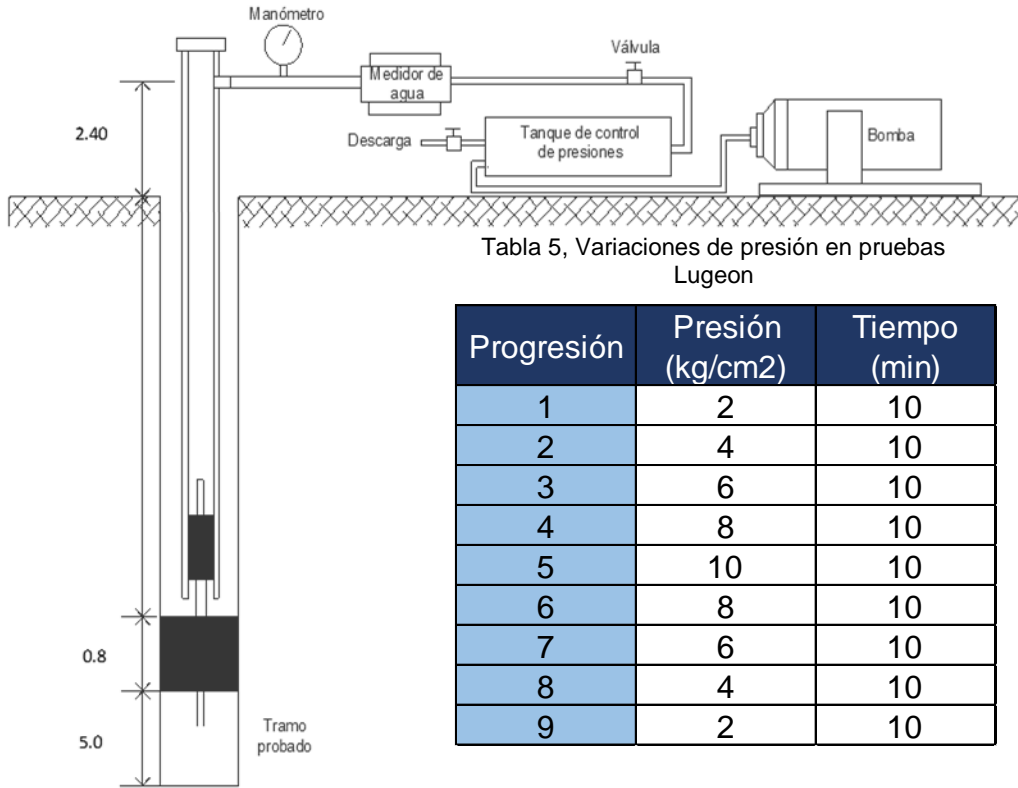


Tabla 5, Variaciones de presión en pruebas Lugeon

Progresión	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Tiempo (min)
1	2	10
2	4	10
3	6	10
4	8	10
5	10	10
6	8	10
7	6	10
8	4	10
9	2	10

Figura 25, Ensayo Lugeon con obturador simple

Su unidad de medida es el lugeon que se refiere a una absorción de agua de 1 litro por metro de sondeo y por minuto, realizando el ensayo a 10 atmósferas de presión durante 10 minutos. Una unidad lugeon equivale a un coeficiente de permeabilidad de  $10^{-5}$  cm/s (Luis I. González de Vallejo, 2002). La clasificación del macizo en función de la permeabilidad tomando como muestra la Tabla 6.

Tabla 6, Clasificación en función de la permeabilidad

Unidad Lugeon	Tipo de Macizo
0 - 11	Impermeable o Poco Permeable
11 - 25	Permeable
25 - 40	Muy Permeable a altamente permeable

La interpretación de las pruebas de permeabilidad fue de igual manera que la interpretación de los sondeos en el apartado 3.2, por lo cual la descripción realizada fue en función de los perfiles sobre los ejes de las obras. En la Figura 18



podemos observar también los valores pertenecientes a las U.L. en el tramo correspondiente del sondeo de manera gráfica.

### **3.3.1. Eje de la Cortina (Sección A – A')**

Sobre el eje de la cortina, en el sondeo EC1, se realizaron 14 pruebas a partir de los 40 m de profundidad; el tramo de 0 a 40 m de profundidad no se probó por problemas de sellado del obturador, además y debido a que la roca cortada y recuperada fue de muy mala calidad, por lo que se puede considerar este tramo como altamente permeable; de 40 a 70 m la roca varía de impermeable a poco permeable con valores mayores de 7.2 UL, además de un tramo permeable entre 55 y 65 m de profundidad con valores de 10 a 12.8 UL; y de los 70 m hasta el fondo del barreno la roca es impermeable.

Sondeo EC2: en este sondeo se realizaron 16 pruebas a partir de los 14.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 14.0 m de profundidad no fue probado debido a que la roca recuperada fue de muy mala a mala calidad, inclusive el tramo de 0.0 a 3.0 m corresponde a suelo residual y material de talud. El tramo de 14.0 a 64.0 m se considera poco permeable a impermeable, con valores obtenidos menores de 8 UL. El tramo de 64.0 a 84.0 m de profundidad resultó permeable con valores de 16 a 22 UL. Por debajo de los 84.0 m y hasta el fondo del barreno la roca es impermeable.

Sondeo EC3: tiene 21 pruebas de permeabilidad que iniciaron a 1.0 m de profundidad. El tramo no probado (0.0 a 1.0 m) por ser de muy mala calidad se considera muy permeable. En el tramo de 1.0 a 6.0 m se obtuvo 1 UL por lo que se considera impermeable, pero el tramo de 6.0 a 11.0 resultó altamente permeable con un valor de 65 UL. En el tramo de 11.0 a 36.0 m se encontraron valores de permeabilidad de 9.5 a 19.7 UL por lo que se considerará todo el tramo como permeable, aunque tiene 2 tramos poco permeables. El paquete de 36.0 a 110.0 m de profundidad se considera impermeable, con valores menores de 6.7 UL aunque tiene un tramo permeable entre 66.0 a 71.0 m con 22 UL.

Sondeo EC4: cuenta con 19 pruebas, que iniciaron a los 17.0 m de profundidad. El tramo no probado (hasta 17.0 m) corresponde a materiales aluviales y roca muy fracturada, consideradas de muy mala calidad y muy permeables. El tramo de 17.0 a 22.0 m resultó poco permeable, con valor de 8.8 UL. El paquete de 22.0 a 110.0 m (profundidad total) es impermeable debido a que el valor obtenido es menor de 1 UL.



Sondeo EC5: con 12 pruebas; tenemos al tramo de 0.0 a 5.0 m que corresponde a material de relleno aluvial principalmente e ignimbritas muy fracturadas, mismas que son altamente permeables. El tramo de 5.0 a 15.0 m es muy permeable ya que se obtuvieron valores promedio de 43 UL. El tramo de 15.0 a 25.0 m tiene valores de 11.1 a 10.2 UL por lo que se considera poco permeable a permeable. El paquete que va de 25.0 a 68.5 m la roca se presenta impermeable, con valores por debajo de 1 UL.

Sondeo CE6: hay 28 pruebas Lugeón en este barreno, los resultados muestran un gran espesor de roca que va de permeable a altamente permeable mismos que no coinciden con la recuperación y RQD obtenidos en este mismo tramo, por lo que se infiere que durante la prueba no selló bien el obturador y el agua se fugó entre este y la pared del barreno. Por lo anterior los resultados se tomaron con reserva, ya que a un lado se realizó otro sondeo y los resultados obtenidos para ese mismo espesor de roca son más congruentes con su respectiva recuperación y RQD. El Tramo de 0.0 a 31.0 m varía de 34 a 50 UL considerado de muy permeable a altamente permeable con un tramo intercalado poco permeable de 11.0 a 21.0 m de profundidad y con valores de 5.7 y 10.7 UL. El tramo de 31.0 a 101.0 m se define permeable, con un valor promedio de 17.4 UL. De los 101.0 a 145.4 m la roca es poco permeable, con un valor promedio de 9.9 UL.

Sondeo EC7: se realizaron 17 pruebas, que también se iniciaron a partir de los 25.0 m de profundidad. El primer tramo de 0.0 a 18.5 m corresponde a material aluvial y de 18.5 a 25.0 m roca muy alterada y fracturada por lo que no se probó. El paquete de 25.0 a 110.0 m (profundidad total) se clasifico como impermeable debido a que el valor obtenido es menor de 0.8 UL.

Sondeo EC8: cuenta con 23 pruebas tipo Lugeón. El primer tramo que va de 0.0 a 15.0 m no fue probado debido a que la roca cortada y recuperada se observa fracturada, por lo que se puede considerar como altamente permeable; además este tramo se encuentra por arriba de la elevación de la corona (250.6 msnm). El paquete rocoso de 15.0 a 50.0 m de profundidad se clasifica de poco permeable a permeable, con valores que van de 8.0 a 19.3 UL. El tramo de 50.0 a 100.0 m se considera impermeable con valores por debajo de 2.7 UL aunque tiene un tramo permeable de 80.0 a 85.0 m con valor de 18.8 UL. Por debajo de los 100.0 y hasta 130.35 m de profundidad la roca se presenta permeable con valores que van de 7.3 a 13.8 UL.



### **3.3.2. Ataguía Aguas Arriba (Sección B – B')**

Sondeo A1-1: Para determinar la permeabilidad en este barreno se realizaron 7 pruebas tipo Lugeón a partir de 1.0 m de profundidad. El primer tramo de 1.0 a 11.0 m corresponde a roca impermeable a poco permeable con valores de 2.4 a 4.6 UL. El paquete de 11.0 a 26.0 m la roca varía de permeable a muy permeable debido a que los valores obtenidos son de 20.8 a 35.2 UL. De 26.0 a 35.0 m (profundidad total) clasificada como poco permeable debido a que el valor obtenido va de 4.1 a 10.9 UL.

Sondeo A1-2: con 2 pruebas tipo Lugeón a partir de los 19.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 12.2 m corresponde a material aluvial y de 12.2 a 19.0 m se cortó toba riolítica muy fracturada e intemperizada que puede definirse como roca muy permeable, similar al tramo probado de 19.0 a 35.0 m de profundidad donde se encontraron valores de 35.3 m a 57.6 UL, clasificando a la roca como de muy permeable a altamente permeable.

Sondeo A1-3: Realizadas 3 pruebas tipo Lugeón a partir de los 22.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 22.2 m corresponde a material aluvial. Posteriormente, de 22.0 a 35.0 m se tiene una roca fracturada con valores de 20.0 a 39.3 UL y clasificada como de permeable a muy permeable.

Sondeo A1-4: 5 pruebas tipo Lugeón a partir de los 14.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 12.0 m corresponde a material aluvial y de 12.0 a 14.0 es roca tobácea riolítica de muy mala calidad considerada como muy permeable al igual que el tramo de 14.0 a 19.0 m. Posteriormente, en el tramo de 19.0 a 35.0 m se tiene una roca poco fracturada con valores de hasta 8.3 UL y clasificada como de impermeable a poco permeable.

### **3.3.3. Ataguía Aguas Abajo (Sección C – C')**

Sondeo A2-1: 3 pruebas tipo Lugeón a partir de los 20.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 20.0 m corresponde principalmente a material aluvial y se considera altamente permeable y similar al tramo probado de 20.0 a 25.0 m de profundidad donde se encontró un valor de 50 UL. En el tramo de 25.0 a 35.76 m se obtuvo un valor de permeabilidad entre 0.1 y 4.4 UL clasificando a la roca como de impermeable a poco permeable.

Sondeo A2-2: 3 pruebas tipo Lugeón a partir de los 20.0 m de profundidad. El paquete de 0.0 a 20.0 m corresponde a material aluvial principalmente y 1.9 m de roca con fracturamiento escaso a moderado y considerada como muy permeable. Posteriormente, en





el tramo de 20.0 a 30.0 m se tiene una roca con valores de 3.2 y 3.8 UL y clasificada como poco permeable. Por debajo de los 30.0 m de profundidad se tienen ignimbritas con valor de 0,4 UL y considerada como impermeable.

Sondeo A2-3: 4 pruebas tipo Lugeón a partir de los 10.0 m de profundidad. El paquete de 0.0 a 10.0 m corresponde a material aluvial (9.0 m) y 1.0 m de roca con fracturamiento moderado y considerados como muy permeable. Posteriormente, en el tramo de 10.0 a 25.0 m se tiene una roca con valores de 33.6 y 12.2 UL y clasificada como permeable a muy permeable, excepto el tramo de 15.0 a 20.0 m que no fue probado. Por debajo de los 25.0 m de profundidad se tienen ignimbritas con valor de 4.4 y 0,2 UL y considerada como poco permeable a impermeable.

#### **3.3.4. Obra de Desvío 1 (D – D')**

Sondeo OD1: 6 pruebas tipo Lugeón a partir de los 16.0 m de profundidad. El paquete no probado, de 0.0 a 16.0 m corresponde a 1.0 m de material de talud y 15.0 m de roca con fracturamiento intenso, considerado como muy permeable. Posteriormente de 16.0 a 41.0 m de profundidad se tiene una roca con fracturamiento moderado y valores de 5.5 a 8.1 UL y clasificada como poco permeable. El último tramo probado de 41.0 a 45.0 m se encontró impermeable, con un valor de 0.3 UL.

Sondeo OD2: 11 pruebas tipo Lugeón a partir de los 5.0 m de profundidad. El paquete no probado de 0.0 a 7.0 m corresponde a roca riolítica tobácea alterada con fracturamiento de moderado a intenso. Posteriormente de 5.0 a 20.0 m de profundidad se tiene una roca con fracturamiento moderado y valores entre 10.5 y 18.4 UL y clasificada como poco permeable. El último paquete probado que va de 20.0 a 60.0 m presenta valores predominantes menores de 2 UL y clasificado como impermeable, excepto el tramo de 35.0 a 40.0 m que es poco permeable con 7.3 UL.

Sondeo OD3: 11 pruebas tipo Lugeón a partir de los 15.0 m de profundidad. El paquete no probado de 0.0 a 15.0 m corresponde a roca riolítica tobácea alterada con fracturamiento de moderado a intenso. Posteriormente de 15.0 a 20.0 m de profundidad se tiene una roca con fracturamiento escaso y un valor de 13.0 UL y clasificada como permeable. El siguiente paquete probado que va de 20.0 a 70.0 m presenta valores predominantes menores de 3.2 UL y clasificado como impermeable, excepto el tramo de 45.0 a 50.0 m donde se tiene un valor de 6.1 UL que lo define como poco permeable.



Sondeo OD4: 20 pruebas de permeabilidad a partir de los 5.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 5.0 m de profundidad no se probó debido a que la roca cortada y recuperada fue de muy mala calidad. Los tramos de 5.0-10.0 y 10.0-15.0 m son altamente permeable y muy permeable respectivamente, ya que dieron valores de 51 y 31 UL. El tramo de 15.0 a 30.0 m de profundidad se considera permeable con valores entre 9 y 22 UL. Por debajo de los 30.0 m hasta el fondo del barreno la roca es impermeable, con 2 tramos poco permeables entre 45.0 a 50.0 m y 55.0 a 65.0 m de profundidad.

Sondeo OD5: 17 pruebas de permeabilidad tipo Lugeón a partir de los 15.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 15.0 m de profundidad no se probó pero la roca cortada fue de muy mala a buena calidad. El tramo de 15.0 a 25.0 m es permeable, con valores de 23.6 y 12 UL. El intervalo de 25.0 a 45.0 m se considera poco permeable ya que se obtuvieron valores de 2.8 a 12.1 UL. Para el tramo impermeable de 45.0 a 97.55 m de profundidad se tienen valores menores de 1.5 UL, excepto entre los 80.0 y 90.0 m de profundidad donde se tienen valores de 7.8 a 12.1 UL y considerado poco permeable.

Sondeo OD6: 8 pruebas de permeabilidad tipo Lugeón a partir de los 5.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 5.0 m, no se probó pero la roca cortada fue de mala a regular calidad. Casi todo el tramo probado es impermeable y con valores menores de 2.3 UL, excepto los tramos 5.0 a 10.0 y 15.0 a 25.0 m que se tienen valores menores de 10.7 UL y clasificados como poco permeables.

### **3.3.5. Obra de Desvío 2 (Sección E – E')**

Sondeo OD7: 8 pruebas tipo Lugeón a partir de los 5.0 m de profundidad. El paquete no probado, de 0.0 a 5.0 m corresponde a roca intemperizada, alterada y con fracturamiento intenso, considerada como muy permeable. En el tramo probado de 5.0 a 20.0 m de profundidad se tiene una roca con fracturamiento moderado y valores de 12.5 a 13.6 UL y clasificada como permeable. El siguiente tramo probado de 20.0 a 30.0 m se encontró poco permeable y con valor de 10.7 UL. Por último se tiene en tramo de 30.0 a 45.0 m, encontrando valores de 14.0 a 26.1 UL y clasificando este tramo rocoso como permeable a muy permeable.

Sondeo OD8: 11 pruebas tipo Lugeón después de los 10.0 m de profundidad. El tramo no probado que va de 0.0 a 10.0 m corresponde a roca intemperizada, alterada y con fracturamiento intenso, considerada como muy permeable. El paquete probado de 10.0 a



20.0 m de profundidad es una roca con fracturamiento moderado a intenso y valor de 9.2 UL y clasificada como poco permeable. El siguiente tramo probado que va de 20.0 a 35.0 m fue permeable y con valor de 11.3 a 15.3 UL. El otro tramo va de impermeable a poco permeable entre 35.0 y 50.0 m de profundidad, con valores de 0.8 a 10.4 UL. Por último, el tramo de 50.0 a 70.0 m presenta valores de 17.9 a 20.1 UL y clasificando este tramo rocoso como permeable.

Sondeo OD9: 17 pruebas tipo Lugeón después de los 5.0 m de profundidad. El tramo no probado corresponde a material de talud y roca intemperizada, alterada y con fracturamiento intenso, considerada como muy permeable. El paquete probado de 5.0 a 35.0 m de profundidad es una roca con fracturamiento moderado a intenso, con valores de 9.8 a 26.3 UL y clasificado como permeable. El siguiente tramo probado que va de 35.0 a 60.0 m varía de permeable a muy permeable, con valores de 11.9 a 28.6 UL. El último tramo de 60.0 a 90.0 m presenta valores menores de 6.1 a 0.2 UL y clasificando la roca como impermeable.

Sondeo OD10: 20 pruebas tipo Lugeón, que iniciaron después de los 5.0 m de profundidad. El tramo no probado corresponde a roca intemperizada, alterada y con fracturamiento intenso, considerada como muy permeable. De los 5.0 a 10.0 m de profundidad se encontró una roca con fracturamiento moderado e impermeable, con un valor de 2.9 UL y clasificado como impermeable. El tramo probado que va de 10.0 a 25.0 m se considera permeable a muy permeable, con valores de 9.1 a 32.3 UL. El último tramo de 25.0 a 105.1 m varía de impermeable a poco permeable, con valores menores de 6.5 UL.

Sondeo OD11: 20 pruebas tipo Lugeón, que iniciaron después de los 5.0 m de profundidad. El tramo no probado corresponde a roca intemperizada, alterada y con fracturamiento intenso, considerada como muy permeable. Los tramos probados de 5.0 a 10.0 y de 45.0 a 50.0 m de profundidad resultaron permeables, con valores de 11.1 y 12.5 UL respectivamente. En los demás tramos probados se encontraron valores que varían de 0.4 a 9.2 UL y considerados de impermeables a poco permeables.

Sondeo OD12: 26 pruebas tipo Lugeón, que iniciaron después de los 10.0 m de profundidad. Con base en los resultados obtenidos durante las pruebas de permeabilidad, se considera que la roca presente en esta zona es impermeable, excepto en escasos tramos probados siguientes. Los tramos probados de 10.0 a 20.0 y de 45.0 a 50.0 m de profundidad,



resultaron poco permeables y permeables, con valores de 10.8, 4.5 y 24.3 UL respectivamente. En todos los demás tramos probados se encontraron valores menores de 0.2 UL y considerados impermeables.

### **3.3.6. Margen Derecha (Sección F – F')**

Sondeo D6: 10 pruebas tipo Lugeón a partir de los 10.0 m de profundidad. Se encontró que toda la roca de este sondeo se comporta impermeable, con valores menores de 0.8 UL.

Sondeo D5: 18 pruebas tipo Lugeón a partir de los 10.0 m de profundidad, en los tres primeros tramos probados (10.0 a 25.0 m) la roca va de muy permeable a altamente permeable y con valores que varían de 28.6 a 41.6 UL. Posteriormente entre 25.0 a 50.0 m de profundidad se comporta como poco permeable y con valores que varían de 3.4 a 10.9 UL. Por debajo de los 50.0 m y hasta los 100.2 m de profundidad toda la roca es impermeable, con valores menores de 2.1 UL.

Sondeo D4: 13 pruebas tipo Lugeón a partir de los 15.0 m de profundidad. El primer tramo de 0.0 a 15.0 m son rocas ignimbríticas intemperizadas y muy fracturadas, no fueron probadas pero se consideran muy permeables. En el siguiente paquete probado que va de 15.0 a 55.0 m de profundidad la roca varía de poco permeable a permeable y con valores que varían de 4.5 a 22.7 UL. Por debajo de los 55.0 m y hasta la profundidad total (80.55 m) toda la roca es impermeable, con valores menores de 0.2 UL.

Sondeo D3: 18 pruebas tipo Lugeón, en los primeros 11.0 m probados, la roca se presenta altamente permeable y con valores que varían de 44.4 a 49.0 UL. Posteriormente el paquete rocoso que va de 11.0 a 86.0 m de profundidad es impermeable a poco permeable y con valores de 0.0 a 10.7 UL. Por debajo de los 86.0 m y hasta los 125.45 m de profundidad toda la roca se comporta de permeable a poco permeable, con valores que van de 10.7 a de 16.0 UL.

Sondeo D2: 15 pruebas tipo Lugeón a partir de los 5.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 5.0 m no fue probado, consiste de rocas ignimbríticas intemperizadas y muy fracturadas que se consideran muy permeables. El primer paquete probado que va de 5.0 a 20.0 m de profundidad corresponde a una roca ignimbrítica poco permeable con valores que varían de 4.0 a 6.5 UL. El siguiente paquete que va de 20.0 a 30.0 m de profundidad son rocas permeables con valores de 11.1 a 17.3 UL; Le sigue un paquete de rocas



impermeables a poco permeables que se encuentra entre 30.0 y 50.0 m de profundidad con valores de 0.0 a 5.6 UL. Posteriormente un tramo permeable con 13.6 y 16.0 UL entre las profundidades de 50.0 a 60.0 m. Para terminar el barreno, de 60,0 a 81.2 m se tienen rocas impermeables con valores menores de 2.4 UL.

Sondeo D1: 18 pruebas tipo Lugeón a partir de los 15.0 m de profundidad. El tramo de 0.0 a 15.0 m no fue probado, consiste de rocas ignimbríticas intemperizadas y muy fracturadas que se consideran muy permeables. El primer paquete probado de 15.0 a 30.0 m de profundidad y corresponde a una roca ignimbrítica permeable, con valores que varían de 15.0 a 21.7 UL. El siguiente paquete que va de 30.0 a 110.15 m de profundidad consiste de rocas ignimbríticas poco fracturadas, que varían de impermeables a poco permeables, con valores de 0.2 a 8.8 UL.

#### **3.3.7. Eje perpendicular a la Cortina (Sección G – G')**

Sondeo PC1: 4 pruebas tipo Lugeón a partir de los 19.0 m de profundidad. El paquete no probado va de 0.0 a 19.0 m y corresponde principalmente a material aluvial. Posteriormente, se tienen 4 tramos de roca con características de permeable a altamente permeable, con valores de 17.8 a 48.3 UL.

Sondeo PC2: 4 pruebas tipo Lugeón a partir de los 21.0 m de profundidad. El paquete no probado va de 0.0 a 21.0 m corresponde principalmente a material aluvial, mismo que se considera muy permeable. Posteriormente, se tienen 4 tramos probados en roca con características de muy permeable y con valor de 35.7 UL para el que va de 21.0 a 26.0 m de profundidad. Los tramos restantes que van de 26.0 a 40.2 m conforman un paquete impermeable con valores menores de 0.4 UL.

Sondeo PC3: 4 pruebas tipo Lugeón a partir de los 22.0 m de profundidad. El paquete no probado va de 0.0 a 21.0 m corresponde a material aluvial y rocas muy fracturadas, considerado muy permeable. Posteriormente se encontró el tramo de 22.0 a 27.0 m de profundidad altamente permeable, con valor de 53.8 UL. Los últimos 3 tramos probados presentan valores entre 4.1 y 7.3 UL que los definen como poco permeables.





### 3.4. Pruebas mecánicas

Para determinar las propiedades y características importantes se realizaron pruebas de laboratorio de los núcleos obtenidos, en muestras debidamente seleccionadas.

Ensayo compresión simple y determinación del módulo de elasticidad: permite determinar la resistencia uniaxial no confinada de la roca; sirve para la clasificación de la roca por su resistencia y para la determinación de su deformabilidad, se obtuvieron las probetas para el ensayo de 4.7 cm de diámetro con una relación altura / diámetro de 2.5 aproximadamente, se montan en la prensa, se instrumentan y se empieza la prueba llevando un control de carga, se mide la deformación con micrómetros apoyados en el cuerpo de la probeta. El módulo de elasticidad se definió como la tangente de la curva esfuerzo – deformación al 50% de la carga de ruptura.

Resistencia a la tensión indirecta: Este ensayo consiste en someter a compresión diametral la muestra de núcleo, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura.

Peso volumétrico saturado: obtenido de las probetas labradas para compresión simple, se tomó el peso seco de la muestra y el volumen de la muestra, medido directamente o por el volumen de agua desalojado; se determinó el peso volumétrico con contenido de agua, ambiente y saturado.

Contenido de agua: se realizó pesando el recipiente que contendrá la muestra, se vuelve a pesar con la muestra y después se introdujo al horno de 12 a 24 horas a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , se dejó enfriar y se volvió a pesar.

Índice de alteración y absorción: se define el estado físico de la muestra y la litología, se coloca en el horno a  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , se determina el peso seco y se sumerge en agua y se determina el peso húmedo haciéndose el cálculo.

Los resultados se muestran a continuación de acuerdo a los ejes en los cuales se aplicaron.



### 3.4.1. Eje de la cortina

Tomando en cuenta la localización del eje de la cortina se consideró la información de los sondeos descritos en el apartado 3.2.1, los sondeos EC1 a EC8; los resultados promedio de dichos ensayos son los mostrados en la Tabla 7, de donde podemos decir que la roca se clasifica como materiales de alta resistencia y módulo de deformabilidad alto, son densas, compactas y difícilmente alterables en los componentes de su matriz por condiciones ambientales.

Tabla 7, Resumen de las propiedades índice y mecánicas de la roca intacta

Propiedades	Tipo de roca	
	Ignimbritas y Tobas Riolíticas	Tobas y Brechas Riolíticas
Resistencia a la compresión simple (MPa)	43.77	64.78
Resistencia a la tensión indirecta (MPa)	8.88	12.38
Módulo de deformabilidad $E_{t50}$ (MPa)	40035	43117
Peso volumetrico saturado ( $kN/m^3$ )	26.56	26.12
Pérdida de materiales (%)	0.14	0.01
Índice de alteración (&)	0.33	0.58

### 3.4.2. Eje de obras de desvío

En este eje los resultados obtenidos fueron de los sondeos correspondientes, OD1 a OD12, en muestras debidamente seleccionadas, los resultados promedio son los mostrados en la Tabla 8, con los cuales podemos decir que los materiales en esta zona son difícilmente alterables, son de alta resistencia y módulo de deformabilidad alto.

Tabla 8, Resumen de propiedades índice y mecánicas de la roca intacta

Ensaye	No. de Muestras	Promedio
Compresión simple (MPa)	31	54.16
Módulo tangente (MPa)	15	46832
Resistencia a la tensión indirecta (MPa)	26	10.84
Peso volumetrico saturado ( $kN/m^3$ )	34	26.42
Contenido de agua (%)	34	0.25

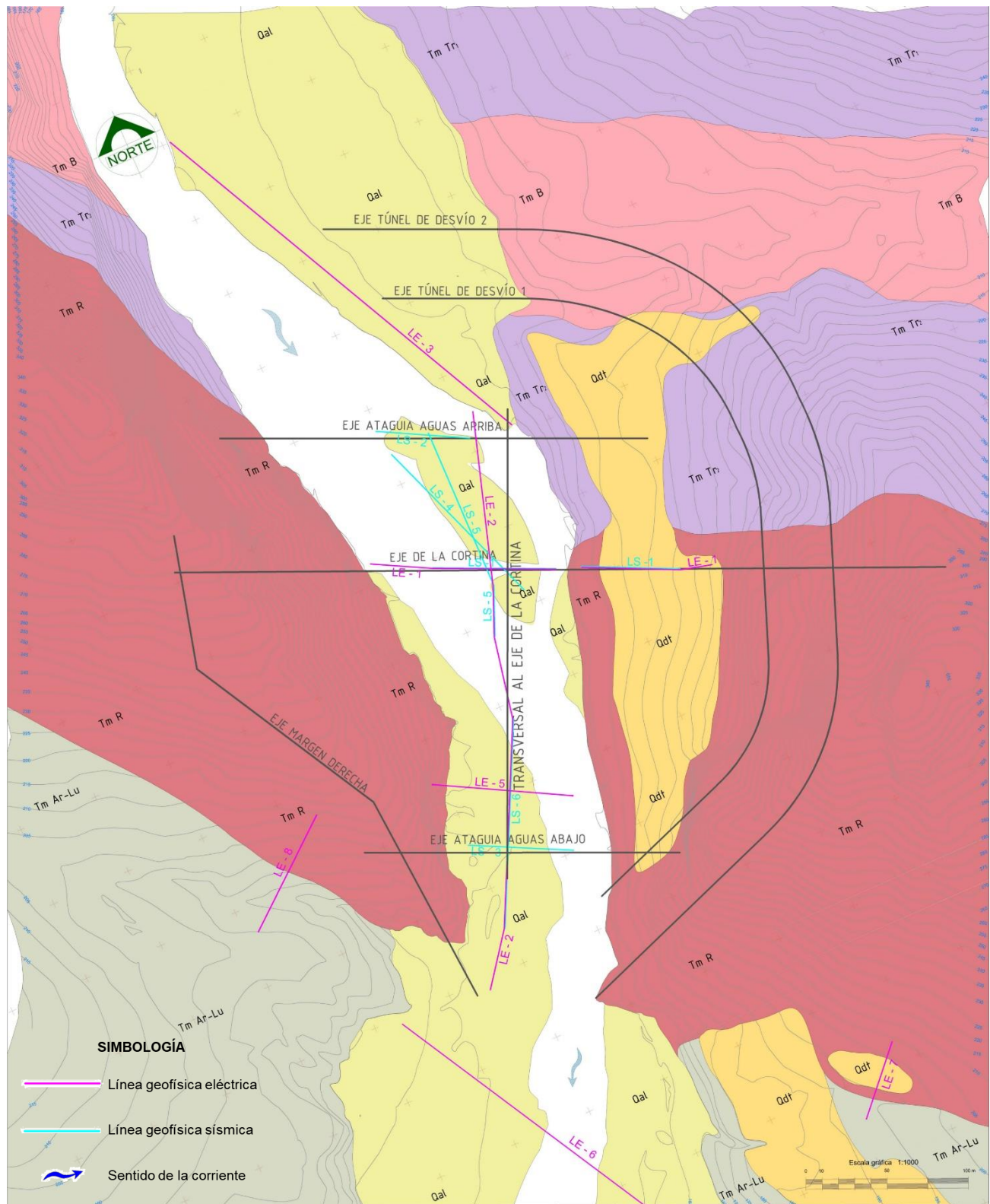
### 3.5. Estudios geofísicos

Dentro de los estudios geofísicos realizados se encuentran los métodos de resistividad de alta densidad o tomografía eléctrica utilizando el arreglo electródico polo – dipolo y el método de refracción sísmica, con estos métodos se interpretaron dos modelos del subsuelo, uno de resistividades y el otro de velocidades de onda que muestran las principales características físicas del macizo rocoso en el sitio de obras. En el Plano 4 podemos observar la localización de los estudios geofísicos realizados, en color rosa las líneas geofísicas eléctricas y en color azul las líneas geofísicas sísmicas, y en la Tabla 9 las cantidades de cada una de ellas además de la localización.

Tabla 9, Métodos Geofísicos de Exploración y cantidades

Resistividad Eléctrica			Sísmica de Refracción		
Línea	Localización	Longitud	Línea	Localización	Longitud
LE - 1	Eje de la cortina M. I.	204	LS - 1	Eje de la Cortina y M. I.	130
LE - 2	Perpendicular al eje de la cortina	356	LS - 2	Ataguía Aguas Arriba	65
LE - 3	Playón M. I.	276	LS - 3	Ataguía Aguas Abajo	76
LE - 5	Playón M. D.	76	LS - 4	Cauce, Diag. Eje Cortina	130
LE - 6	Playón Aguas Abajo	300	LS - 5	Playón M. I. Aguas Arriba	130
LE - 7	M. I. Aguas Abajo	50	LS - 6	Playón M. D. Aguas Abajo	130
LE - 8	M. D. Aguas Abajo	80			

Para el proceso e interpretación de los datos de campo se modelaron con el programa “Rockworks 14” y “Surfer”.



Los resultados de resistividad en la línea LE – 1, observamos la presencia de un escalón en los valores de resistividad en la zona donde se inicia el talud, así como la presencia de dos capas casi horizontales y que buzan en la dirección final de la sección, además de un aumento en el espesor aproximado de 26 m en las gravas de la zona del playón, por debajo de este los resistividades son mayores. Los primeros 8 metros son un cuerpo tabular casi horizontal de alta a muy alta resistividad, se consideras como una capa de gravas empacadas; además observamos una estructura subvertical al final de la sección 2 y otra a los 29 m del origen de la línea 1, se estima que se encuentran poco compactados y plantea una falla de tipo normal en el escalón observado.

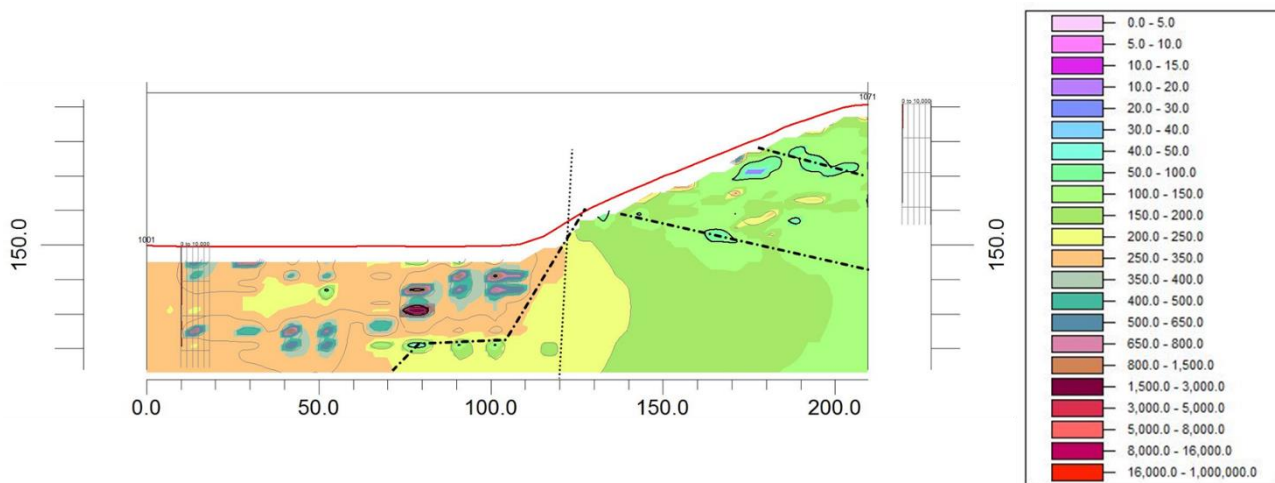


Figura 26, Línea LE – 1

En la línea LE – 2, detecta una estructura a los 75 m del origen, otra a los 175 m y otra más a los 206 m, y no muy evidente una a los 265 m; los rellenos observados presentan la forma de una cuenca que termina a una distancia del origen de los 200 m, la resistividad profunda es del orden de los 200 a 250ohm – m.

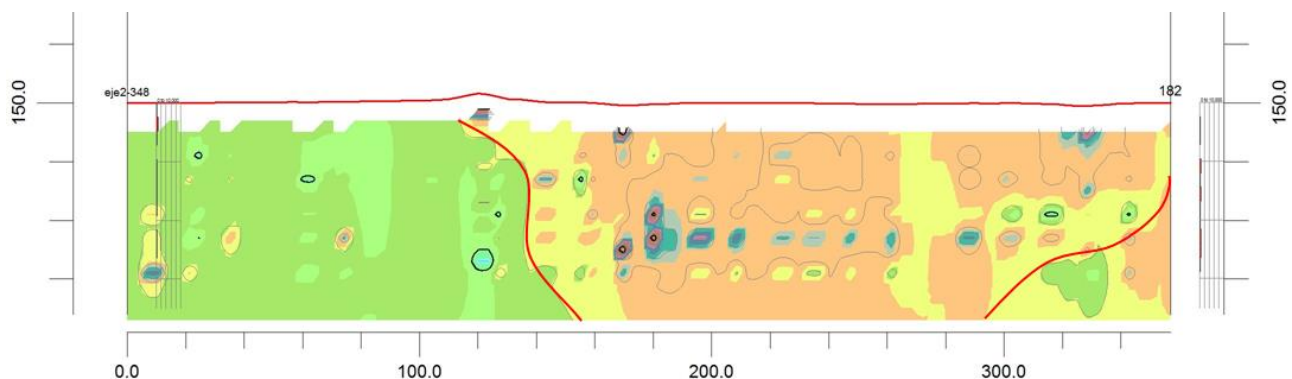


Figura 27, Línea LE – 2





La línea LE – 3 muestra 3 estructuras subverticales, una a los 152 m, otra a los 208 m y la última a los 250 m, además de que podemos ver un contacto entre las rocas con resistividades del orden de 200 ohm – m y con resistividades de 300 ohm – m, no presentan un fuerte espesor y son cubiertas por gravas y arenas, en la zona final se obtiene una caída abrupta de las rocas y predominan los valores de material de relleno, indicador de una falla normal en dicha zona.

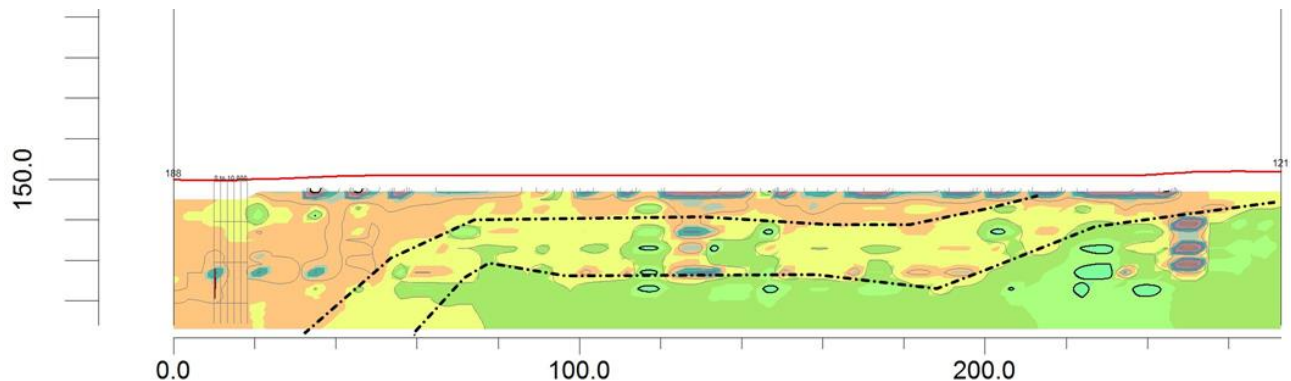


Figura 28, Línea LE - 3

En la línea LE – 5 observamos un salto a los 48 m del origen, posiblemente una falla normal y el espesor de los aluviones se estima de 17 a 20 m al inicio de la sección y resistividades de 300 ohm – m hasta una profundidad de 10 a 12 m.

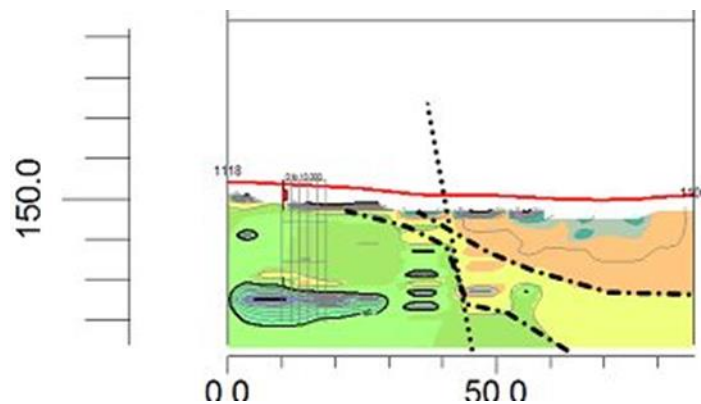


Figura 29, Línea LE - 5

La línea LE – 6 tiene una profundidad de investigación de 100 m, en esta se pueden distinguir 3 capas de rocas, la primera de ellas se trata de una capa de baja resistividad que se asocia con tobas y depósitos lacustres, la intermedia de rocas andesíticas y la última secuencia de ignimbritas; podemos observar además la presencia de 5 estructuras disruptivas, de la cual la más importante es la localizada a los 150 m del origen, la segunda es una detectada a 215 m.

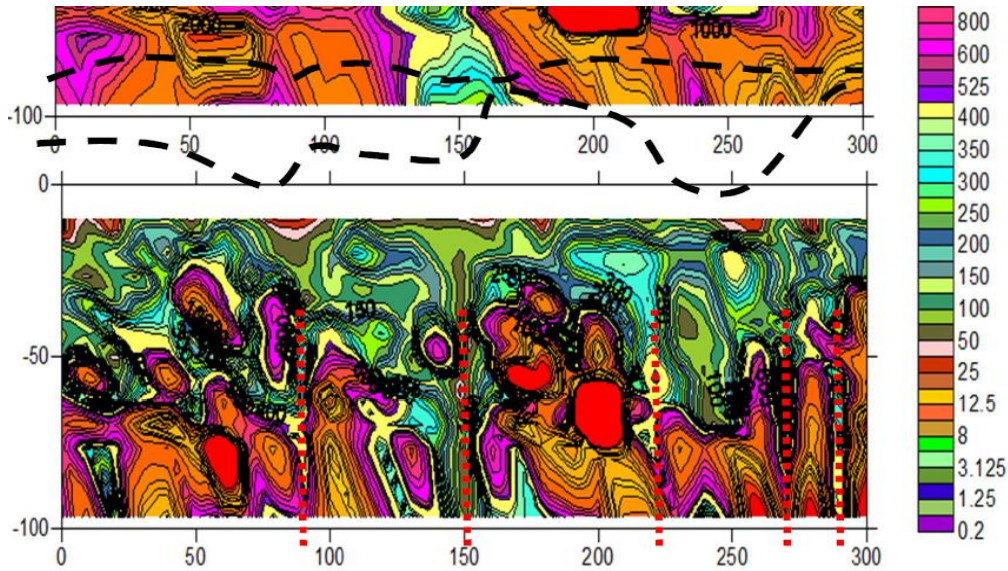


Figura 30, Línea LE - 6

La línea LE – 7 detecta 2 estructuras disruptivas, la más notoria localizada a 10 m del origen y la segunda a los 30 m y de menores proporciones; se detectan 3 capas, la primera alrededor de 20 m de materiales conductores posiblemente tobas y depósitos lacustres, la segunda se identifica por tener resistividades intermedias, entre 100 y 400 ohm – m, con un espesor de alrededor de 30 m en la zona, y por último se detecta a las ignimbritas de alta resistividad. Al hacer la correlación geológica – geofísica, la primera estructura corresponde con el contacto de las rocas vulcanosedimentarias con las ignimbritas riolíticas y la segunda a la falla localizada del lado sureste del Plano 2.

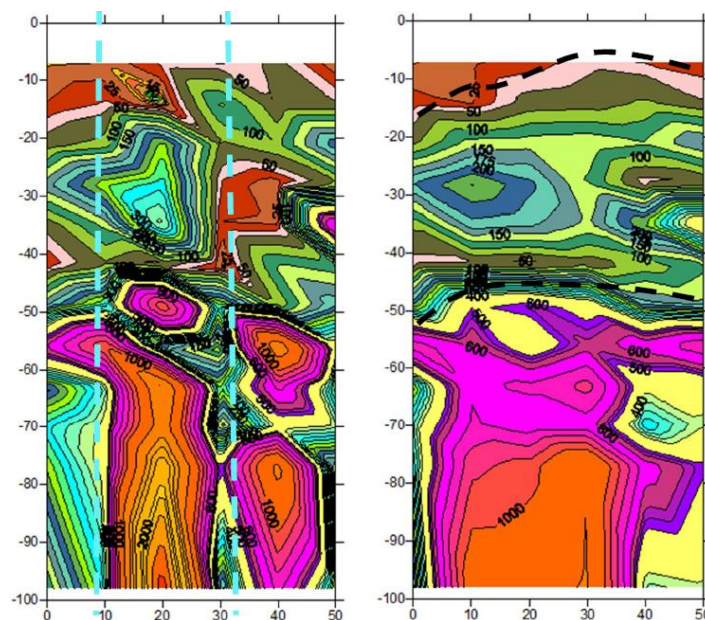


Figura 31, Línea LE – 7



La línea LE – 8 detecta dos fracturas o fallas, la primera a los 10 m y la segunda a los 62 m del origen; estratigráficamente se estima la presencia de entre 20 y 40 m de espesor de tobas y depósitos lacustres y por debajo de ellos se detecta un espesor indeterminado de andesitas terciarias, en contacto casi vertical con las ignimbritas del cañón.

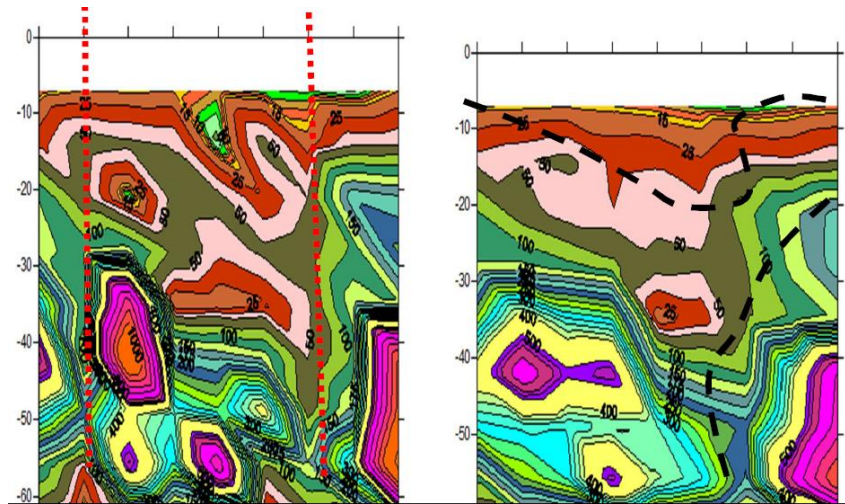


Figura 32, Línea LE – 8

Para la sísmica de refracción, debemos mencionar que los tendidos cortos tienen tres puntos de generación de ondas sísmicas y los tendidos largos tienen 5 puntos de generación de ondas sísmicas lo cual permitió obtener información de las variaciones de velocidad a una mayor profundidad.

En la línea LS – 1 observamos dos litologías diferentes, en la parte final de la línea se observa un espesor medio de 2 m de roca muy alterada con velocidad baja de 300 a 400 m/s, le subyace roca muy fracturada con velocidad de 1400 m/s y un espesor inferido variable de 3 m en la parte superior a 10 m en la parte inferior, le subyace una capa de roca fracturada con velocidad de 2300 m/s y un espesor inferido de 10 m en promedio, finalmente abajo de esta se infiere la velocidad de la roca sana de 4300 m/s. En la parte inicial correspondiente al playón, presenta un espesor de material de acarreo, limos, arenas y gravas de 20 a 25 m, la zona superficial no saturada presenta un espesor medio de 1.5 m con velocidad de 300 a 800 m/s, la zona saturada de mayor espesor tiene velocidad de 1500 a 1800 m/s, a este espesor de material de acarreo le subyace roca compacta con velocidad de 4300 m/s.



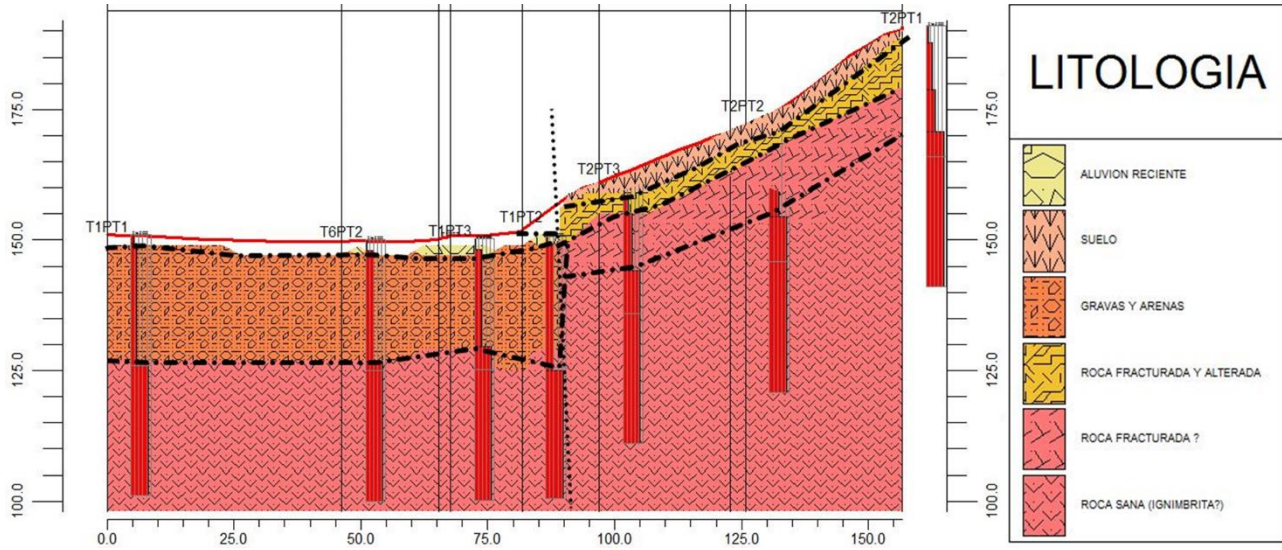


Figura 33, Línea LS – 1

En la línea LS – 2 se encuentra sobre la ataguía aguas arriba, los resultados presentan un espesor inferido variable de 12 a 33 m de material de acarreo compuesto principalmente por limos, arenas y gravas, con el mayor espesor hacia el cauce; la zona no saturada tiene velocidad de 300 a 1000 m/s y espesor de 1.5 m, y la saturada, de 1700 a 2300 m/s con espesor de 10 a 31 m, le subyace la roca con velocidad de 4300 m/s.

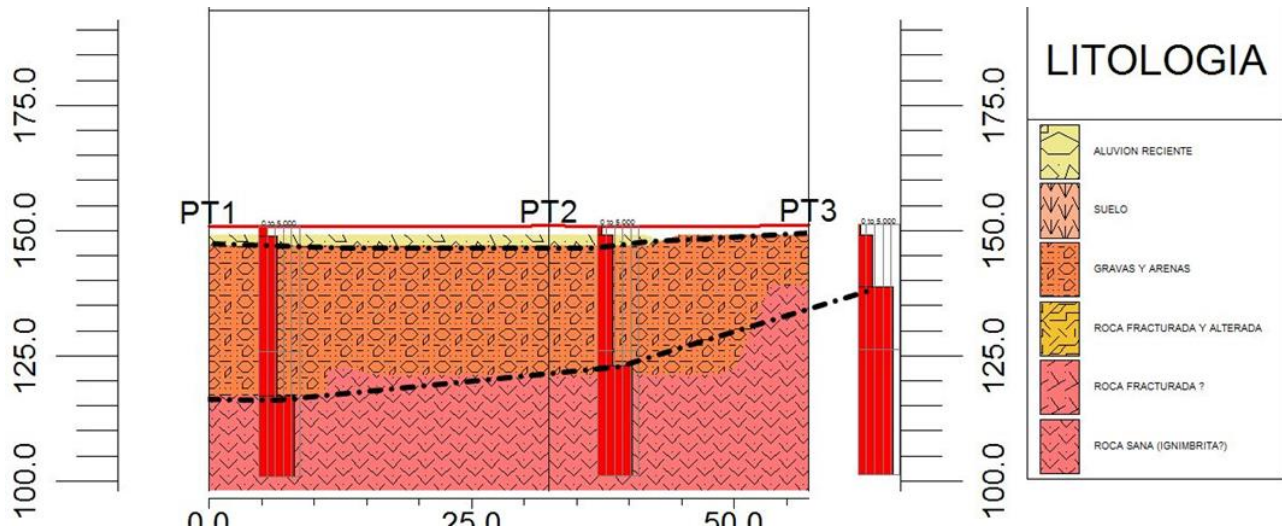


Figura 34, Línea LS - 2

### 3. Exploración geológica – geotécnica



La línea LS – 3 realizada sobre la ataguía aguas abajo se infiere un espesor de material de acarreo, formado por limos, arenas y gravas de 7 a 14 m; la zona superficial no saturada tiene velocidad de 300 a 1100 m/s con espesor de 1.5 m, y la saturada de 1700 a 2400 m/s, a este material de acarreo le subyace una capa de roca fracturada con velocidad de 2900 m/s y espesor inferido de 2 a 13 m, por debajo de esta capa se infiere la roca compacta con velocidad de 4300 m/s.

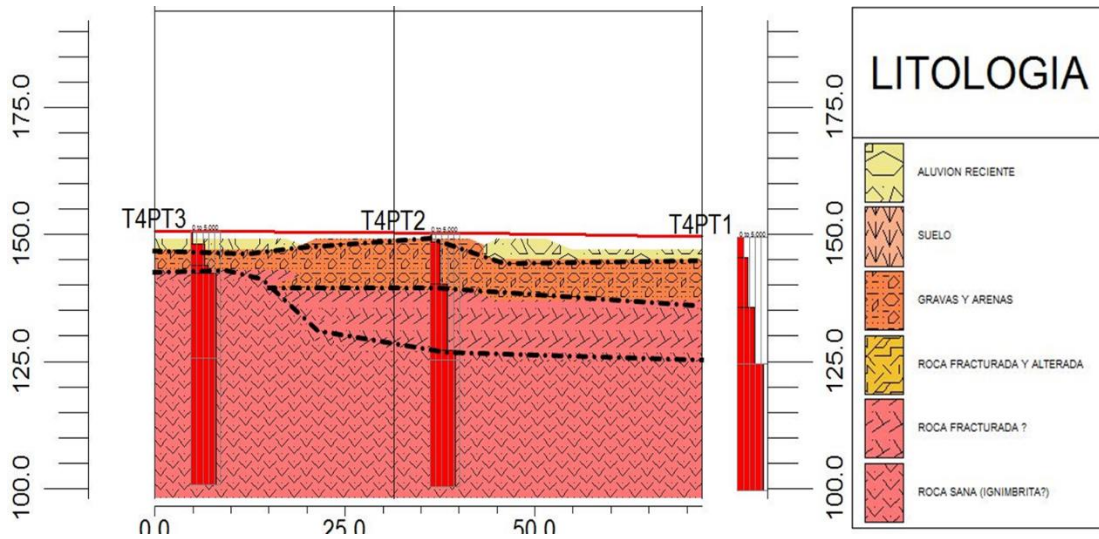


Figura 35, Línea LS – 3

La línea LS – 4 está compuesta por 5 puntos de generación de ondas sísmicas, es diagonal al eje de la cortina y se detectó un espesor de material de acarreo compuesto principalmente por limos, arenas y gravas de 22 a 28 m, la zona superficial no saturada con velocidad de 300 a 500 m/s tiene un espesor medio de 1.5 m; la saturada con velocidad de 1800 a 1900 m/s, de 20 a 26 m; le subyace la roca compacta con velocidad de 4300 m/s.

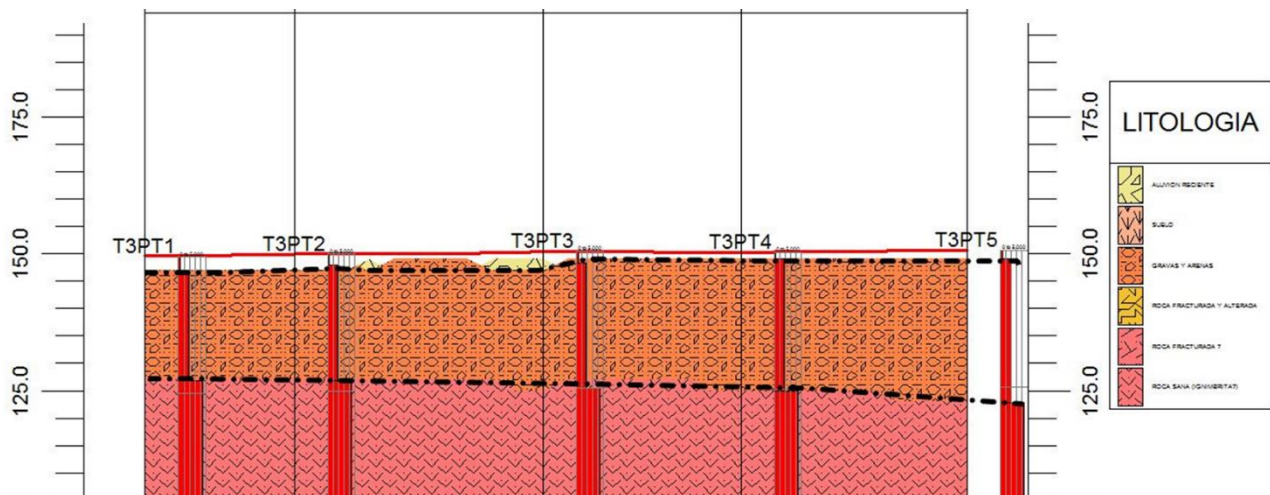


Figura 36, Línea LS - 4



La línea LS – 5 tiene 5 puntos de generación de ondas sísmicas y podemos observar que el espesor del material de acarreo es de 21 a 29 m, la zona superficial no saturada es de aproximadamente de 1.5 m, con velocidad de 300 a 500 m/s, y la saturada, de 19 de 27 m, con velocidad de 1800 a 2200 m/s, le subyace la roca compacta con velocidad de 4200 m/s.

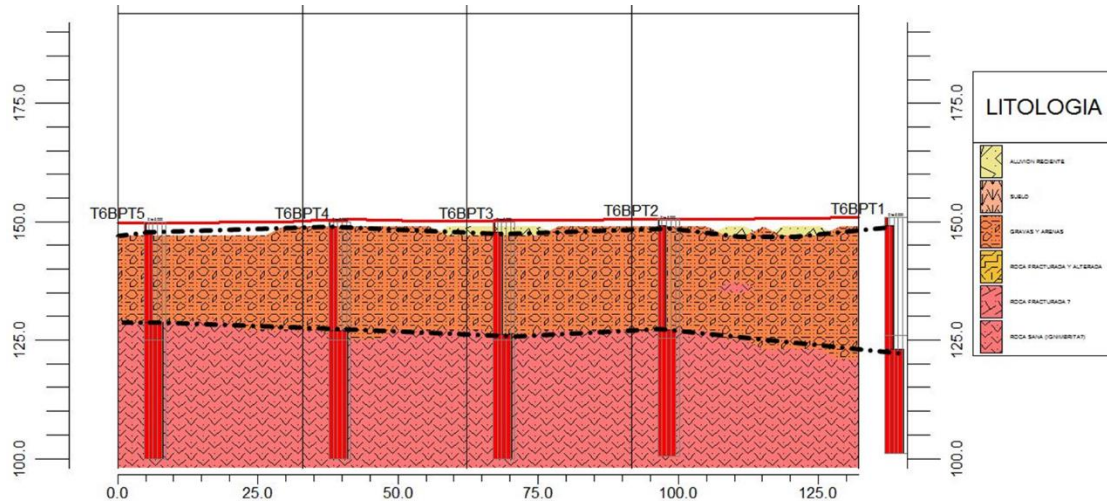


Figura 37, Línea LS - 5

Por último la línea LS – 6 determinó el espesor de material de acarreo de 8 a 19 m, la zona superficial no saturada es de 1.5 m con velocidad de 300 a 1200 m/s, la saturada de 6 a 18 m de espesor y velocidad de 1700 a 2100 m/s, por debajo de este material de acarreo se detectó una capa con velocidad de 2900 m/s que se atribuye a una zona de roca fracturada con espesor promedio de 14 m, y debajo esta la roca compacta con velocidad de 4300 m/s.

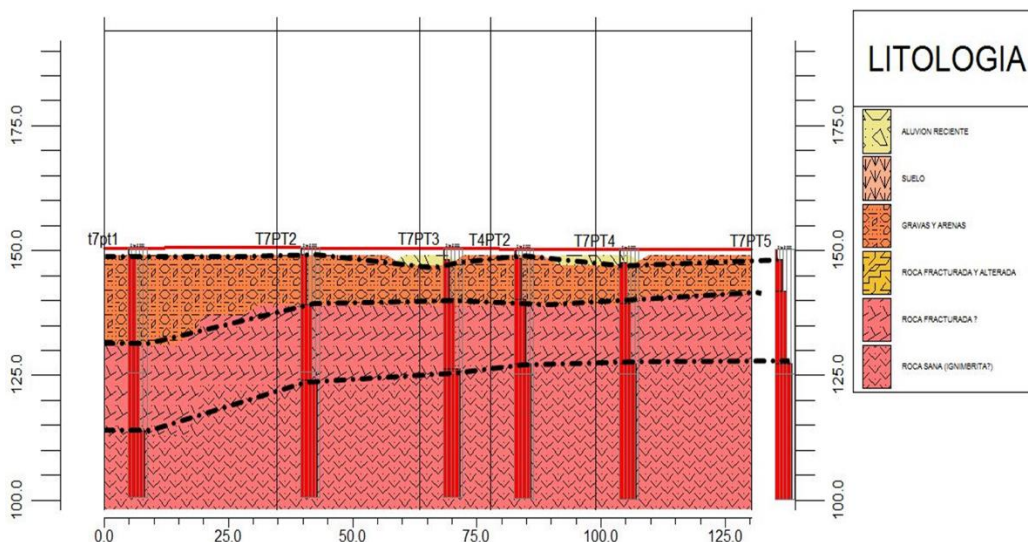


Figura 38, Línea LS - 6



4. Clasificación geomecánica

Para realizar la clasificación geomecánica de los macizos rocosos en los cuales se desplantará la cortina se utilizó la desarrollada por Bieniawski, clasificación RMR (Rock Mass Rating), que relaciona los índices de calidad con parámetros geotécnicos. Los parámetros geomecánicos que tiene en cuenta son la resistencia uniaxial de la matriz rocosa, grado de fracturación en términos de RQD, espaciado, condiciones y orientación de las discontinuidades además de las condiciones hidrogeológicas; se aplica el siguiente cuadro:

Tabla 10, Parámetros de clasificación (RMR)

1	Resistencia de la roca inalterada (MPa)	Ensaye de carga puntual	>10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresión simple (MPa)		
		Resistencia a compresión uniaxial	>250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	<1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Espaciamiento de las discontinuidades		> 2m	0.6 - 2m	0.2 - 0.6m	0.06 - 0.2m	<0.06m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1m	1 - 3m	3 - 10m	10 - 20m	> 20m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 - 1mm	1 - 5mm	> 5mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguna	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua subterránea	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10 - 25 litros/min	25 - 125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua / Esfuerzo principal mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación		15	10	7	4	0	

Posteriormente aplicamos las clasificaciones correspondientes, guiándonos con los siguientes cuadros:

Tabla 11, Corrección por la orientación de las discontinuidades

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Regular	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-15	-60

Tabla 12, Clasificación (RMR)

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20

Tabla 13, Características geotécnicas (RMR)

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de sostenimiento y longitud	10 años con 15m de claro	6 meses con 8m de claro	1 semana con 5m de claro	10 horas con 2.5m de claro	30min con 1m de claro
Cohesión	> 4 kg/cm <sup>2</sup>	3-4 kg/cm <sup>2</sup>	2-3 kg/cm <sup>2</sup>	1-2 kg/cm <sup>2</sup>	<1 kg/cm <sup>2</sup>
Angulo de fricción	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

Tabla 14, Orientación de las discontinuidades en el túnel (RMR)

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0° - 20° Cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buz. 45 - 90	Buz. 20 - 45	Buz. 20 - 45	Buz. 20 - 45	Buz. 45 - 90	Buz. 20 - 45	Desfavorable
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy favorable	Media	

Finalmente, se hace la sumatoria de todas las puntuaciones y el valor obtenido lo comparamos con la siguiente tabla para darle su calidad del macizo rocoso y sus características geotécnicas.

Tabla 15, Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR

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

Los resultados obtenidos de la clasificación se muestran a continuación, fueron separados por margen, solo se colocan los más representativos y de los cuales se obtienen un panorama más general del macizo rocoso.

## 4. Clasificación geomecánica



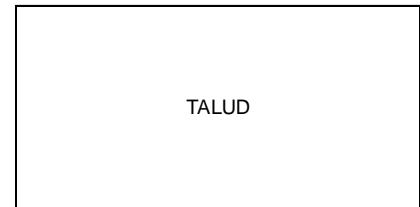
### 4.1. Margen Derecha

En la secuencia vulcanosedimentaria el talud se encuentra afectado por 3 familias de discontinuidades por lo que se encuentra moderadamente fracturado.

RCS (Kg./cm <sup>2</sup> )							VALOR
>2500	2500-1000	1000-500	500-250	250-50	50-10	<10	
15	12	7	4	2	1	0	<b>4</b>

RQD (%)					VALOR
90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	
20	17	13	6	3	<b>3</b>

Separación (m)					VALOR
>2.00	0.6-2.0	0.2-0.6	0.06-0.20	<0.06	
20	15	10	8	5	<b>8</b>



Estado de las discontinuidades (familia principal)						
Persistencia (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	VALOR
	6	4	2	1	0	<b>2</b>
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>3</b>
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>3</b>
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		VALOR
	6	< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm	<b>4</b>
Alteración	Inalterado	Ligerament e alterado	Moderada- mente alterado	Muy alterado	Descompuest o	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>6</b>

FAM	RE	E
1	228°	62°
2	118°	78°
3	51°	36°
4		

FALLAS	RE	E
1		
2		

Presencia de agua					VALOR
Seco	Algo húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo	
15	10	7	4	0	<b>15</b>

Orientación
N/S

Corrección por orientación de discontinuidades							VALOR
Dirección perpendicular al talud				Dirección paralela al túnel		Subhorizontal	
Excavación hacia echado		Excavación contra echado					
45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	< 20°	
0	-5	-25	-50	-60	-25	-50	

RESULTADO	
RMR	CLASE
<b>48</b>	<b>Regular</b>

Tabla que corresponde a la estabilidad de la roca					
CLASE	V	IV	III	II	I
RMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
DESCRIPCIÓN	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena
ESTADO	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable

De acuerdo a la evaluación geológica-geotécnica se determina que la calidad de la roca es regular.

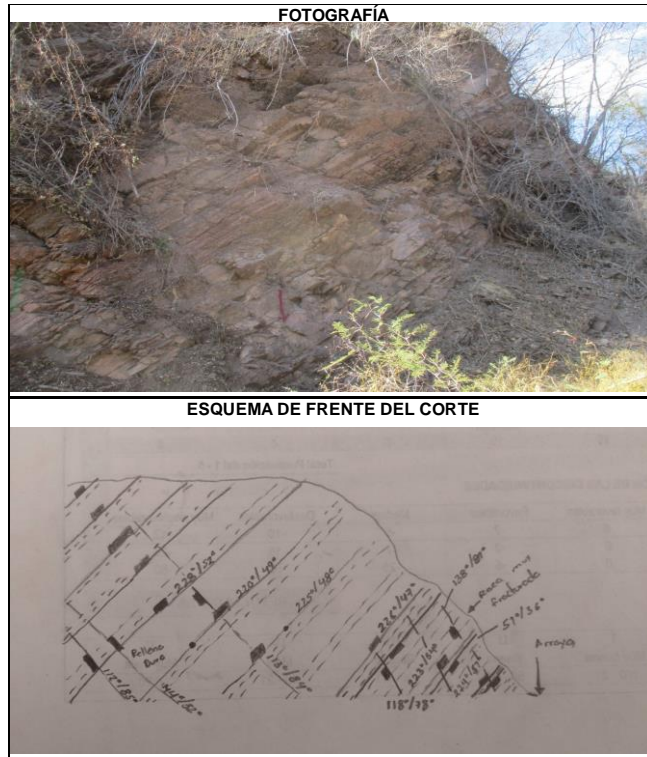


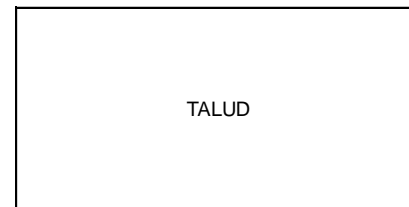
Figura 39, RMR, secuencia vulcanosedimentaria MD

En la segunda secuencia el talud está compuesto por una roca Igimbrítica, se encuentra afectado por 2 familias de discontinuidades y un plano de falla, por lo que presenta un fracturamiento ligero.

RCS (Kg./cm <sup>2</sup> )							VALOR
>2500	2500-1000	1000-500	500-250	250-50	50-10	<10	
15	12	7	4	2	1	0	<b>7</b>

RQD (%)					VALOR
90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	
20	17	13	6	3	<b>13</b>

Separación (m)					VALOR
>2.00	0.6-2.0	0.2-0.6	0.06-0.20	<0.06	
20	15	10	8	5	<b>10</b>



Estado de las discontinuidades (familia principal)						VALOR
Persistencia (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
		6	4	2	1	0
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>3</b>

FAM	RE	E
1	323°	84°
2	73°	32°
3		
4		



## 4. Clasificación geomecánica



Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>3</b>
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		VALOR
		< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm	
	6	4	2	2	0	<b>4</b>
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>5</b>

FALLAS	RE	E
1	316°	80°
2		

Presencia de agua					
Seco	Algo húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo	VALOR
15	10	7	4	0	<b>15</b>

Orientación
N/S

Corrección por orientación de discontinuidades							
Dirección perpendicular al talud				Dirección paralela al túnel		Subhorizontal	VALOR
Excavación hacia echado		Excavación contra echado					
45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	< 20°	
0	-5	-25	-50	-60	-25	-50	

RESULTADO	
RMR	CLASE
<b>62</b>	<b>Buena</b>

Tabla que corresponde a la estabilidad de la roca					
CLASE	V	IV	III	II	I
RMR	0-20	21-40	41-60	<b>61-80</b>	81-100
DESCRIPCIÓN	Muy mala	Mala	Regular	<b>Buena</b>	Muy buena
ESTADO	Totalmente Inestable	Inestable	Parcialmente estable	<b>Estable</b>	Totalmente estable

De acuerdo a la evaluación geológica-geotécnica se determina que la calidad de la roca es buena.

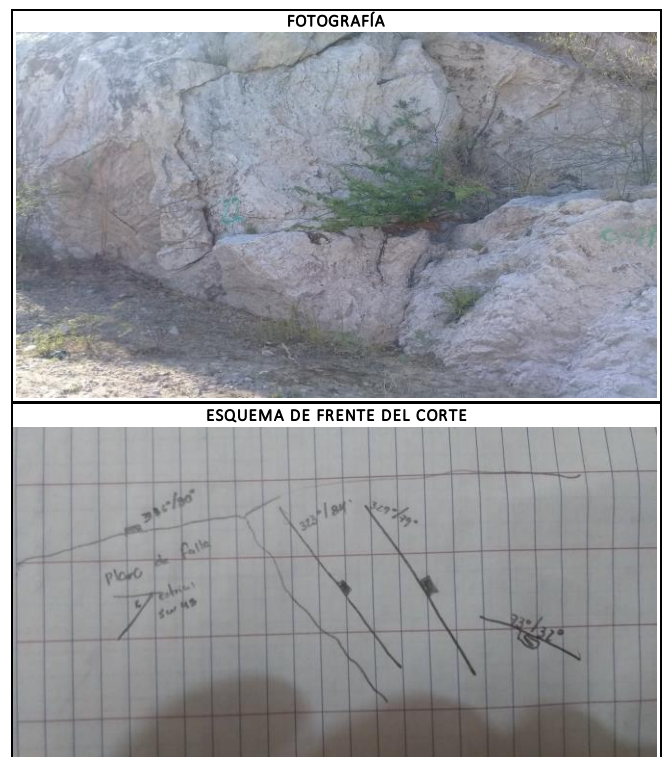


Figura 40, RMR, secuencia ignimbrítica MD

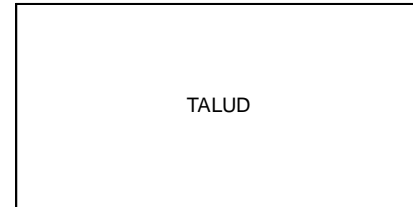


El talud está compuesto por una roca Ignimbrítica sobreyaciendo a una toba riolítica, se encuentra afectado por 2 familias de discontinuidades por lo que presenta un fracturamiento ligero.

RCS (Kg./cm <sup>2</sup> )							VALOR
>2500	2500-1000	1000-500	500-250	250-50	50-10	<10	
15	12	7	4	2	1	0	<b>4</b>

RQD (%)						VALOR
90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
20	17	13	6	3		<b>13</b>

Separación (m)						VALOR
>2.00	0.6-2.0	0.2-0.6	0.06-0.20	<0.06		
20	15	10	8	5		<b>15</b>



Estado de las discontinuidades (familia principal)							VALOR
Persistencia (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20		
	6	4	2	1	0		<b>2</b>
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5		
	6	5	3	1	0		<b>5</b>
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo		
	6	5	3	1	0		<b>3</b>
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando			
		< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm		
	6	4	2	2	0		<b>4</b>
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto		
	6	5	3	1	0		<b>5</b>

FAM	RE	E
1	116°	39°
2	230	52°
3	04°	56°
4		

FALLAS	RE	E
1		
2		

Presencia de agua						VALOR
Seco	Algo húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		<b>15</b>

Orientación
N/S

Corrección por orientación de discontinuidades							VALOR
Dirección perpendicular al talud				Dirección paralela al túnel		Subhorizontal	
Excavación hacia echado		Excavación contra echado					
45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	< 20°	
0	-5	-25	-50	-60	-25	-50	

RESULTADO	
RMR	CLASE
<b>66</b>	<b>Buena</b>

Tabla que corresponde a la estabilidad de la roca					
CLASE	V	IV	III	II	I
RMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
DESCRIPCIÓN	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena
ESTADO	Totalmente Inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable

De acuerdo a la evaluación geológica-geotécnica se determina que la calidad de la roca es buena.

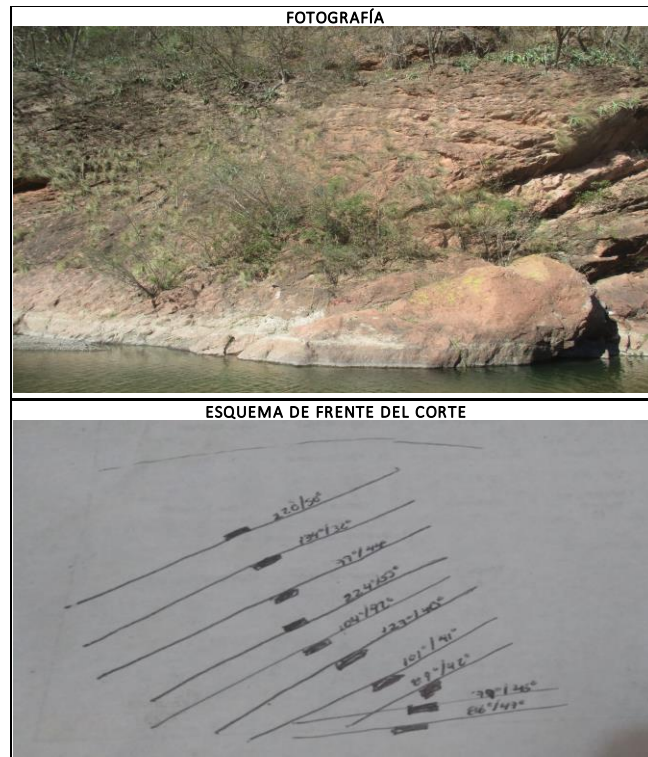


Figura 41, RMR, secuencia ignimbrítica sobreyaciendo a una toba riolitica MD

#### 4.2. Margen izquierda

En la primera descripción el talud está compuesto por roca Ignimbrítica de color blanco, presenta una alteración conocida como silicificación y estructuralmente se define por dos familias de fracturamiento con superficies ligeramente rugosas y sin rellenos, no se observa plano de falla, no se aprecia humedad.

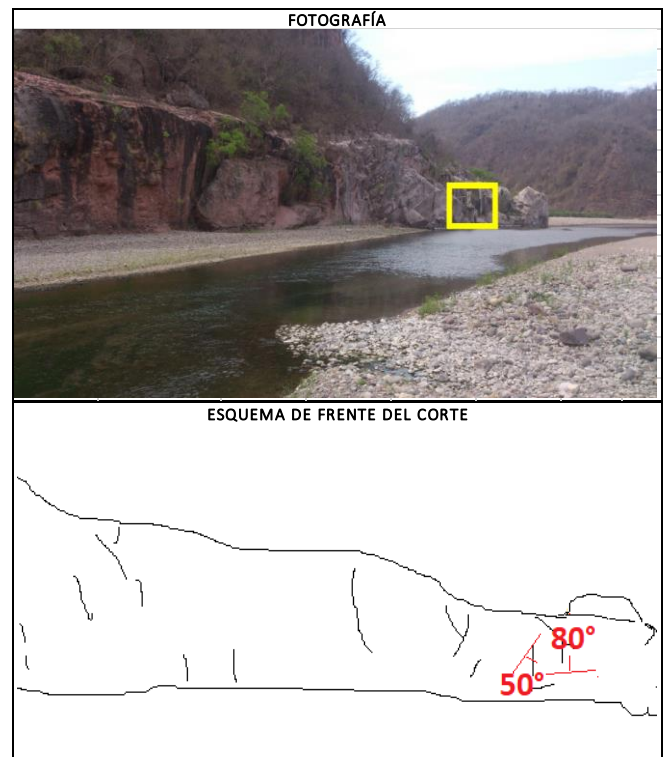


Figura 42, RMR, secuencia ignimbrítica MI



RCS (Kg./cm <sup>2</sup> )							
>2500	2500-1000	1000-500	500-250	250-50	50-10	<10	VALOR
15	12	7	4	2	1	0	<b>12</b>

RQD (%)					
90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	VALOR
20	17	13	6	3	<b>13</b>

Separación (m)					
>2.00	0.6-2.0	0.2-0.6	0.06-0.20	<0.06	VALOR
20	15	10	8	5	<b>8</b>

Estado de las discontinuidades (familia principal)						
Persistencia (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	VALOR
	6	4	2	1	0	<b>4</b>
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>5</b>
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>3</b>
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		VALOR
		< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm	
	6	4	2	2	0	<b>6</b>
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>5</b>

TALUD

FAM	RE	E
1	222	50
2	110	80
3		
4		

FALLAS	RE	E
1		
2		

Orientación  
NE/SW

Presencia de agua					
Seco	Algo húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo	VALOR
15	10	7	4	0	<b>15</b>

Corrección por orientación de discontinuidades							
Dirección perpendicular al talud				Dirección paralela al túnel		Subhorizontal	VALOR
Excavación hacia echado	Excavación contra echado			45° a 90°	20° a 45°	< 20°	
45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	< 20°	
0	-5	-25	-50	-60	-25	-50	

RESULTADO	
RMR	CLASE
<b>71</b>	<b>II BUENA</b>

Tabla que corresponde a la estabilidad de la roca					
CLASE	V	IV	III	II	I
RMR	0-20	21-40	41-60	<b>61-80</b>	81-100
DESCRIPCIÓN	Muy mala	Mala	Regular	<b>Buena</b>	Muy buena
ESTADO	Totalmente Inestable	Inestable	Parcialmente estable	<b>Estable</b>	Totalmente estable

De acuerdo con la evaluación geológica - geotécnica el macizo rocoso se clasifica de buena calidad.

#### 4. Clasificación geomecánica

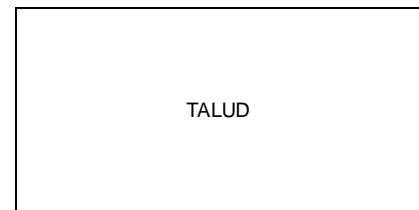


En el segundo punto el talud está compuesto por una sola unidad litológica denominada como roca Ignimbrítica de color rosado en roca sana que sobreyace a las tobas riolíticas, con tonalidades oscuras a grises en roca intemperizada, y estructuralmente se define por un sistema de fracturamiento, se observa una superficie ligeramente rugosa y sin relleno, no se aprecia humedad.

RCS (Kg/cm <sup>2</sup> )							VALOR
>2500	2500-1000	1000-500	500-250	250-50	50-10	<10	
15	12	7	4	2	1	0	<b>7</b>

RQD (%)					VALOR
90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	
20	17	13	6	3	<b>13</b>

Separación (m)					VALOR
>2.00	0.6-2.0	0.2-0.6	0.06-0.20	<0.06	
20	15	10	8	5	<b>5</b>



Estado de las discontinuidades (familia principal)						VALOR
Persistencia (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	<b>4</b>
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	<b>5</b>
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	<b>3</b>
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
		< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm	
	6	4	2	2	0	<b>6</b>
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	<b>5</b>

FAM	RE	E
1	277°	80°
2		
3		
4		

FALLAS	RE	E
1		
2		

Orientación
NE/SW

Presencia de agua					VALOR
Seco	Algo húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo	
15	10	7	4	0	<b>15</b>

Corrección por orientación de discontinuidades							VALOR
Dirección perpendicular al talud				Dirección paralela al túnel		Subhorizontal	
Excavación hacia echado		Excavación contra echado		45° a 90°	20° a 45°	< 20°	
45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	< 20°	
0	-5	-25	-50	-60	-25	-50	

RESULTADO	
RMR	CLASE
<b>63</b>	<b>II BUENA</b>

Tabla que corresponde a la estabilidad de la roca					
CLASE	V	IV	III	II	I
RMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
DESCRIPCIÓN	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena
ESTADO	Totalmente Inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable

De acuerdo con la evaluación geológica - geotécnica el macizo rocoso se clasifica de calidad Buena.



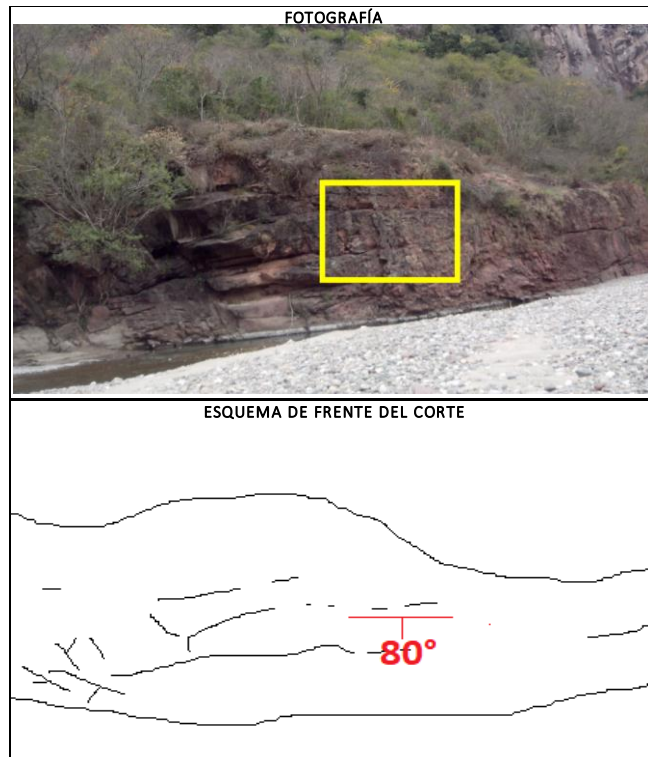


Figura 43, RMR, secuencia ignimbrítica sobreyaciendo a las tobas riolíticas MI

El último tramo está representado por un talud compuesto por una sola unidad litológica denominada como toba y brechas riolíticas de color rojizo en roca sana con tonalidades oscuras a grises en roca intemperizada, se observan fragmentos líticos de riolita, dacita y andesita, estructuralmente se define por un sistema de fracturamiento y pseudoestratificación, no se aprecia humedad.

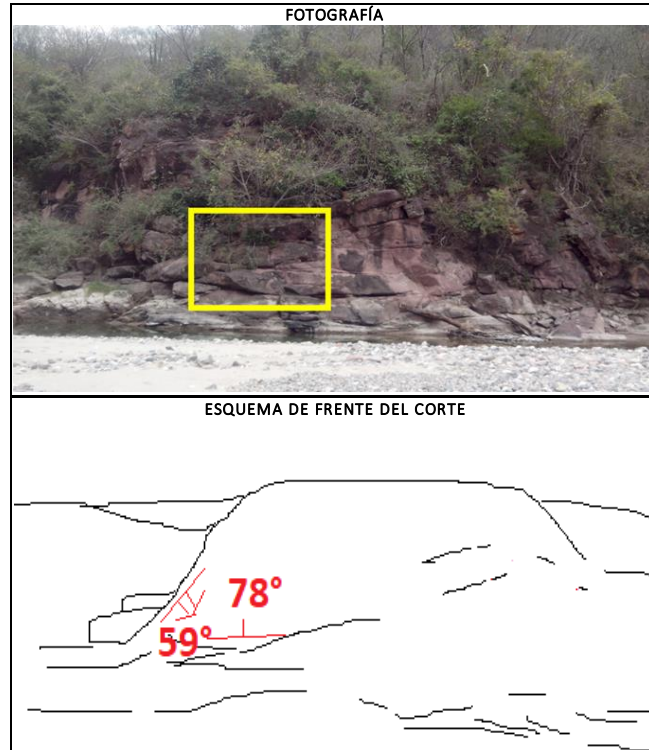


Figura 44, RMR, secuencia de tobas y brechas riolíticas, MI

#### 4. Clasificación geomecánica



RCS (Kg./cm <sup>2</sup> )							
>2500	2500-1000	1000-500	500-250	250-50	50-10	<10	VALOR
15	12	7	4	2	1	0	<b>7</b>

RQD (%)					
90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	VALOR
20	17	13	6	3	<b>13</b>

Separación (m)					
>2.00	0.6-2.0	0.2-0.6	0.06-0.20	<0.06	VALOR
20	15	10	8	5	<b>8</b>

TALUD

Estado de las discontinuidades (familia principal)						
Persistencia (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	VALOR
	6	4	2	1	0	<b>2</b>
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>5</b>
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>3</b>
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		VALOR
	6	< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm	<b>6</b>
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	VALOR
	6	5	3	1	0	<b>5</b>

FAM	RE	E
1	110°	78°
2	225°	59°
3		
4		

FALLAS	RE	E
1		
2		

Presencia de agua					
Seco	Algo húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo	VALOR
15	10	7	4	0	<b>15</b>

Orientación  
NE/SW

Corrección por orientación de discontinuidades							
Dirección perpendicular al talud				Dirección paralela al túnel		Subhorizontal	VALOR
Excavación hacia echado		Excavación contra echado		45° a 90°	20° a 45°	< 20°	
45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	< 20°	
0	-5	-25	-50	-60	-25	-50	

RESULTADO	
RMR	CLASE
<b>64</b>	<b>II BUENA</b>

Tabla que corresponde a la estabilidad de la roca					
CLASE	V	IV	III	II	I
RMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
DESCRIPCIÓN	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena
ESTADO	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable

De acuerdo con la evaluación geológica - geotécnica el macizo rocoso se clasifica de calidad buena.

## 5. Permeabilidad en el eje de la cortina

Al analizar la información de los datos de niveles freáticos en los pozos de observación de la boquilla, casi todos presentan un nivel freático similar al nivel del río, excepto en el sondeo EC1 de la margen izquierda donde este nivel se encuentra por debajo del espejo del río. Si tomamos esta información lineal sobre la boquilla, se puede inferir que el agua se infiltra en el macizo rocoso y fluye a través de los sistemas de fallamiento y fracturamiento hasta estabilizarse con el nivel del río.

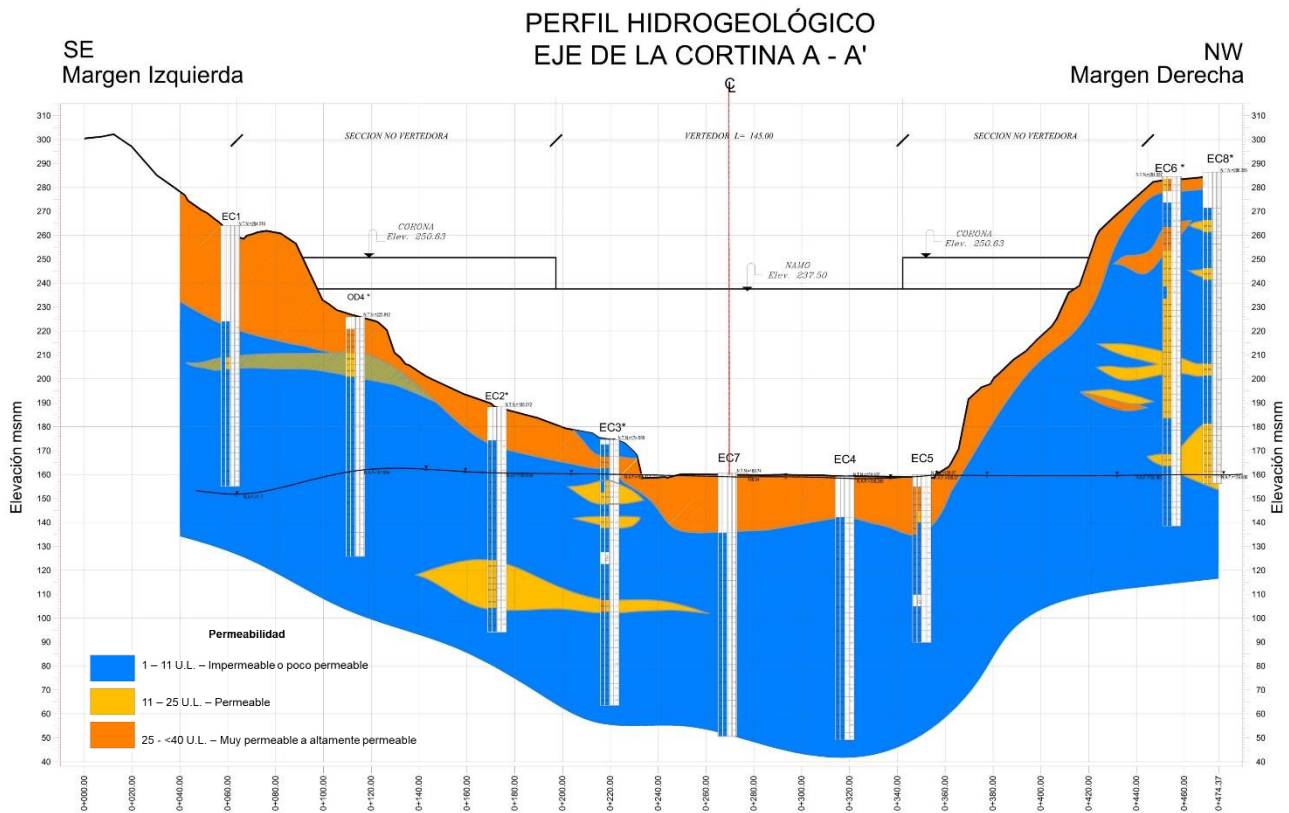


Figura 45, Sección hidrogeológica del eje de la cortina con la profundidad de los NAF's

Pero si analizamos la información de todos los pozos de observación en conjunto se observa que en algunas zonas se presentan como en bloques alineados casi N-S pero aislados y con diferente elevación. La interpretación que se infiere para esta alineación de los niveles de agua, es que en los bloques donde el nivel es bajo, a profundidad los barrenos cortan o coinciden con alguna traza de las fallas mayores del sistema F2 que son las discontinuidades que se alinean en dirección promedio NE15°SW y casi verticales, y tal vez estas se cruzan con los otros sistemas de fallas o fracturas



semihorizontales incluida la pseudoestratificación, por donde fluye el agua hasta que se estabiliza al nivel del río.

Por otro lado se interpreta que en general todo el macizo rocoso se comporta como de impermeable a poco permeable, esto con base en los bajos valores de absorción encontrados durante las pruebas de permeabilidad en esos barrenos y correlacionable también con los altos valores promedio de recuperación y RQD obtenidos que nos indican que el macizo rocoso es de buena a excelente calidad, excepto en puntos aislados como en el EC1. Lo impermeable del macizo rocoso se corrobora al analizar el caso del sondeo EC1 ubicado en el extremo SE de la cortina, donde no se tiene nivel freático o éste se encuentra por debajo de su fondo (profundidad total) que está a la elevación de 153 msnm, 7 m por debajo del espejo de agua del río (elevación 160 msnm). Para el sondeo EC1 y los demás que se encuentran a su alrededor OD10 (al N), OD11 (al SSW), OD4 (al WNW) y OD5 (al SW), y separados entre 42 y 65 m de distancia, se interpreta que no hay comunicación de agua entre ellos, ya que en estos 4 sondeos el agua se encuentra entre 2 y 4 m por arriba del nivel del río, mientras que en el sondeo EC1 no se tiene NAF.

Con la interpretación de todos los datos obtenidos podemos decir que el desplante de la cortina se debe realizar en roca sana y de buena a excelente calidad o roca fracturada de regular calidad pero debidamente tratada. Para ello se necesita el despalme que consiste en retirar el material superficial sin compactación que puede ser suelo residual, depósitos de talud y aluviales, además de la roca superficial intemperizada, alterada, y con fracturamiento intenso, definida como de muy mala a mala calidad.

Para definir el espesor de despalme se toma como base la información obtenida de los sondeos exploratorios realizados sobre el eje de la cortina y cuerpo, en particular la recuperación, el índice de calidad de roca (RQD) y la permeabilidad; con estos datos se generó la sección geotécnica que muestra los espesores de roca de mala y muy mala calidad que se tienen que remover (Figura 46), así como el espesor de roca de regular y parte de buena calidad que se debe tratar para obtener el cierre hidráulico de esta obra. Cabe señalar que estos datos son puntuales y se correlacionan entre cada sondeo, por lo que estos espesores se deben tomar con cierto límite, los definitivos se debe obtener al momento del despalme. En el eje de la cortina margen derecha el espesor de despalme es del orden de 6.5 m de espesor, para el cauce es entre 5 y 25 m en las orillas y centro,

respectivamente, en la margen izquierda va de 5 a 34 m en la orilla del río, EC3, a su extremo SE en el barreno EC1, respectivamente.

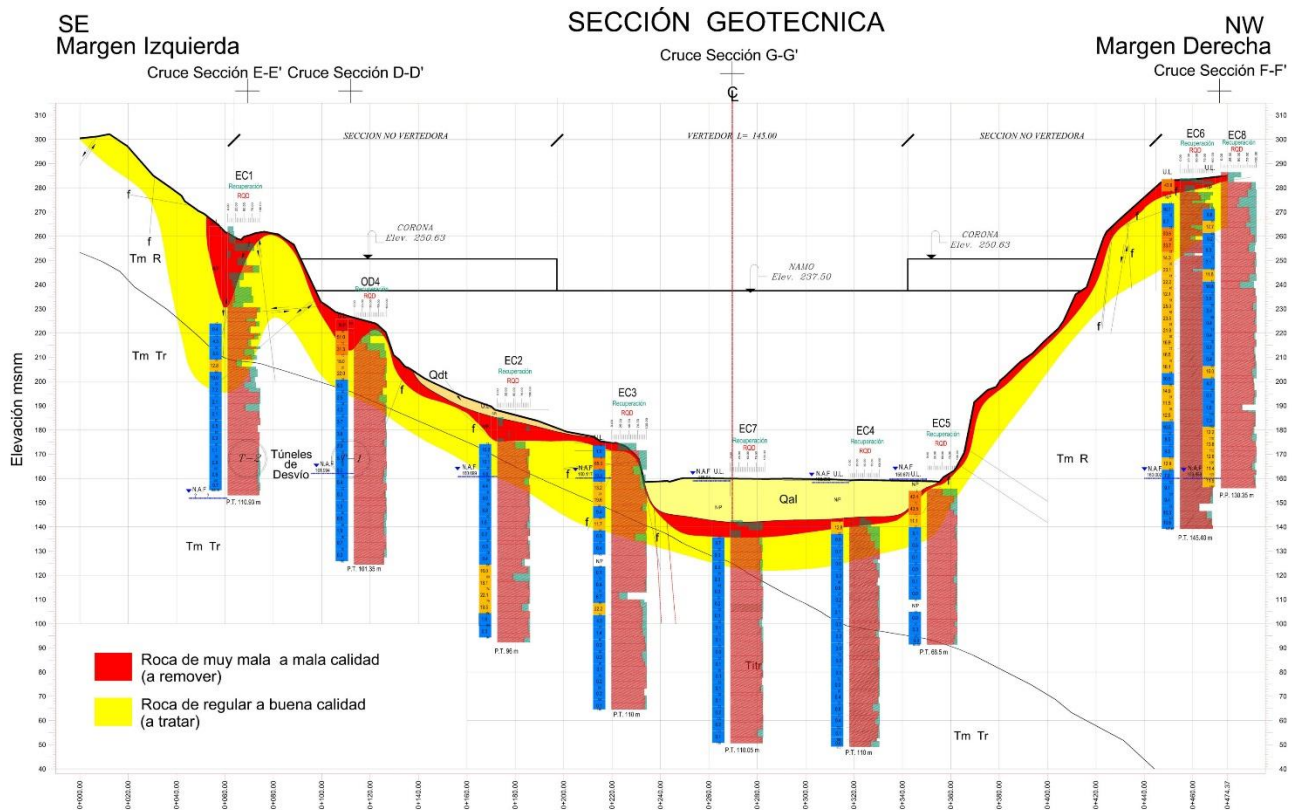


Figura 46, Sección geotécnica del eje de la cortina

El tratamiento tiene como objetivo principal mejorar las propiedades geomecánicas de la roca que subyace donde se cimentará la futura presa, al reducir las deformaciones producidas por los esfuerzos transmitidos por las sobrepresiones, mejorar la permeabilidad del macizo rocoso al sellar las fracturas y reducir las posibles filtraciones a través de sus discontinuidades.

La pantalla impermeable se forma por perforaciones e inyección de una serie de barrenos dispuestos en una o más líneas paralelas, por debajo del cuerpo de la cortina desde el cauce hasta las laderas de apoyo o empotramiento. Se debe realizar en varias etapas y la inyección será en todo el barreno en tramos de 5 m, con el objeto de lograr la consolidación progresiva de las fracturas en el terreno. En la primera etapa se debe tener bien definido el o los sistemas de discontinuidades existentes para con ello seleccionar la separación más adecuada entre barrenos, esta separación por lo general es entre 10 y hasta





20 m. La segunda etapa quedará intercalada a la mitad de la primera, en caso necesario se hará una tercera etapa al centro de la segunda etapa.

Además de lo anterior también se deben definir otras características, como:

- **Número de Líneas:** Que dependerá de la resistencia mecánica, fracturamiento y permeabilidad del terreno.
- **Profundidad.** Depende de las condiciones y características geológicas del terreno, como la calidad de roca y la permeabilidad, definida por la información de los barrenos exploratorios ya realizados y los de inyección que también funcionan como exploratorios con pruebas de permeabilidad antes de ser inyectados. Con la información que se tiene, se llegó a una profundidad mínima de 5 en los barrenos EC2, OD4 y EC7 y máxima de 35 m en el barreno EC1, con promedio de 20 m.
- **Inclinación:** La superficie que forma el conjunto de perforaciones de inyección es el plano o cuerpo de la pantalla, debe ser vertical o ligeramente inclinado hasta  $10^\circ$  hacia aguas arriba para contrarrestar el empuje hidrostático sobre ella.
- **Separación de barrenos:** Se establece en función de la penetrabilidad de la mezcla y de la resistencia mecánica del macizo rocoso. En rocas fracturadas la separación se reduce, ya que no es posible aplicar presiones de inyección altas sin correr riesgo de provocar hidrofracturamiento.
- **Dirección e Inclinación de perforaciones:** Depende de la densidad, rumbo y echado de las discontinuidades principales, de tal manera que crucen el mayor número de ellas y de forma normal (perpendicular) para que la mezcla de inyección penetre en los huecos con mayor facilidad. En este caso y tomando como base la información geológica estructural, donde se definieron los principales y más persistentes sistemas de discontinuidades en cada margen de la zona de obras, se proponen las direcciones e inclinaciones de perforación. En la margen derecha se deben realizar barrenos con una dirección SE  $88^\circ$  con  $45^\circ$  a  $50^\circ$  de inclinación. Para la margen izquierda los barrenos se deben realizar con una dirección NW  $17^\circ$  con  $45^\circ$  a  $50^\circ$  de inclinación. Debido a que esta información es producto de la cartografía de toda la zona de obras, se debe confirmar con la información definitiva que se obtenga cuando ya se haya realizado la limpieza y despalme en la traza del eje de la cortina.



## 6. Conclusiones y recomendaciones

- Sobre la zona de obras afloran 4 secuencias volcánicas; en orden estratigráfico de base a cima son: derrames y brechas de basalto, tobas y brechas riolíticas, Ignimbritas y tobas líticas riolíticas y una secuencia vulcanosedimentaria; son cubiertas parcialmente por depósitos recientes y sin consolidar de materiales aluviales y de talud.
- Existen 3 tipos de discontinuidades: pseudoestratificación, fallas y fracturas. La pseudoestratificación tiene una dirección NW 49° SE con buzamiento de 51° al SW. Las fallas se presentan en 3 sistemas principales (F1 a F3), que en orden de abundancia sus direcciones y buzamiento son: F1-NW 53° SE / 56° SW, F2-NE 25° a NW 05° / 81° SE a 67° NE y F3-NE 51° SW / 81° NW. Las fracturas presentan 2 sistemas principales, f1: NE 22° / 83° SE a Vertical y f2: NW48°- 58° / 33°NE y 46°SW.
- La secuencia de deformación y generación de estos sistemas de fallas es: el sistema F3 es el más antiguo debido a que es cortado por el sistema F1. El sistema F1 es intermedio debido a que corta al sistema F3 pero es cortado por el sistema F2. El sistema F2 es el más reciente ya que corta al sistema F1. No se encontró relación de desplazamiento de los sistemas F2 y F3.
- El sistema de fallas F2 se presenta en la margen izquierda como principal causa de filtraciones y por lo cual se tiene un nivel de aguas freáticas por debajo del espejo del río en el sondeo EC1.
- Con la sísmica de refracción en el cauce se infiere que la roca de buena calidad se ubica por debajo de los 35 m de profundidad, con velocidades de 4300 m/s. Con la resistividad eléctrica se infiere una falla regional de tipo normal en el límite del cauce es su margen izquierda, con orientación casi N-S.
- En general todo el macizo rocoso se comporta como de impermeable a poco permeable, esto en base a los bajos valores de absorción obtenidos en la mayoría de pruebas de permeabilidad; se correlaciona también con los altos valores promedio de recuperación y RQD obtenidos, que nos indican que el macizo rocoso es de buena a excelente calidad, excepto en puntos aislados como en el EC1 donde se tiene una zona de fallamiento intenso o fallas mayores.
- Aunque los datos obtenidos de recuperación, índice de calidad de roca y permeabilidad son puntuales, con ellos se generó una sección geotécnica y se definió un espesor de despalme preliminar en el eje de la cortina. En la margen derecha el espesor de



despalme es del orden de 6.5 m de espesor, para el cauce es entre 5 y 25 m en las orillas y centro, respectivamente, en la margen izquierda va de 5 a 34 m en la orilla del río y extremo SE en el barreno EC1, respectivamente.

- Como parte de las recomendaciones, se tiene la propuesta de verificar a detalle los sistemas de fallas que se encuentran en la zona donde se pretende desplantar la cortina, verificar si se encuentran activas, colocando instrumentación así como detallar los estudios de campo; se recomienda que se coloquen inclinómetros en los sondeos EC3 y OD6 los cuales se encuentra cercano al sistema de fallas mayores en la margen izquierda.
- Debido a lo anterior se debe tomar en cuenta la construcción de una cortina de materiales graduados, esto con el fin de que se tenga cierto grado de deformación debido a las discontinuidades presentes.
- Al considerar una cortina de materiales graduados, los estudios de bancos de materiales deben tener detalle en cuanto a cantidad y calidad, además de la proximidad a la zona de obras.
- Los espesores propuestos de roca por remover y tratar son aproximados, ya que fueron definidos con los datos puntuales de los sondeos exploratorios realizados y con los recorridos superficiales de campo. Estos espesores deben ser confirmados y afinados al momento de realizar la limpia y despalme.
- Para la pantalla impermeable, los barrenos de inyección deben cortar lo más perpendicular los principales planos de discontinuidades, en la margen derecha se deben realizar barrenos con una dirección SE  $88^\circ$  con  $45^\circ$  a  $50^\circ$  de inclinación. Para la margen izquierda los barrenos se deben realizar con una dirección NW  $17^\circ$  con  $45^\circ$  a  $50^\circ$  de inclinación. Esta información también se debe considerar preliminar, misma que se debe confirmar con la información que se obtenga cuando ya se haya realizado la limpieza del despalme.



### 7. Anexos

Se tiene de forma representativa el siguiente registro del sondeo A2 – 1, el cual contiene toda la información necesaria para su interpretación.

Profundidad explorada:		35.76 m		Elevación del brocal: 158.50 m. s. n. m.		Espesor de Acarreo (m): 19.26		Profundidad del N.A.F.: 0.80		Sondeo A2-1				
						Espesor de roca (m): 16.00		Inclinación: 90°						
Profundidad (m) De - A	Avance (m)	Ademe (m)	RQD			SUELO / ROCA	Fracturas Por Metro					Permeabilidad		
			Agua	Recuperación (%)			2	4	6	8	10	Coefficiente de K(cm/s)	Unidades Lugeon	
			0	50	100									
			0	50	100									
0.00		2) 0.60				Qal								
100														
2.00						TmR						50		
3.00														
4.00														
5.00														
6.00														
7.00														
8.00														
9.00														
10.00														
11.00														
12.00														
13.00														
14.00														
15.00														
16.00														
17.00														
18.00														
19.00														
20.00														
21.00														
22.00														
23.00														
24.00														
25.00														
26.00														
27.00														
28.00														
29.00														
30.00														
31.00														
32.00														
33.00														
34.00														
35.00														

RQD %	Calidad
<25	Muy Mala
25-50	Mala
50-75	Regular
75-90	Buena
90-100	Muy Buena

Litologías	
Qal	Aluviación
Qdt	Deposito de Talud
TmR	Ignimbrita
TmTr	Toba Riolitica
TmB	Basalto

Unidades Lugeon	
1-3	Impermeable
3-11	Poco Permeable
11-25	Permeable
25-40	Muy Permeable
>40	Altamente Permeable

Fracturamiento	
=	Horizontal >70°
<	Inclinado
	Vertical <20°

\*Respecto al eje vertical del núcleo de roca

Fracturas por metro		
10	>20	Roca alterada
8	15 - 20	Roca muy fracturada
6	10 - 15	Roca fracturada
4	5 - 10	Fracturas aisladas
2	0 - 5	Roca sana



### 8. Bibliografía

Aguirre, Y. B. (2007). *Pruebas de la campaña de exploración 2003 para caracterizar el maciso rocoso de la P. H. La Parota, Guerrero*. Ciudad de México: Tesis UNAM.

Burga, J. D. (2011). *Diccionario geológico*. Perú: Ingemmet.

CFE. (s.f.). *Reconsideración Sismotectónica para el P.H. Las Cruces Rev 4*. México.

INEGI. (2000). *Síntesis de información geográfica*. INEGI.

INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico*. Sinaloa: INEGI.

INEGI. (2018). *Fisiografía*. Obtenido de Geología : <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/>

Luis I. González de Vallejo, M. F. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

Navarrete, I. E. (2005). *Apuntes de Geología General*. Ecuador: Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

Salinas, D. A. (2008). • *Análisis de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en presas de enrocamiento con cara de concreto por medio del método del elemento finitos*. Ciudad de México: Tesis UNAM.

Secretaría de Programación y Presupuesto, I. (1984). *Geología de la República Mexicana*. Ciudad de México: INEGI.