



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Participación en la elaboración  
del estudio geológico-geotécnico  
de un talud carretero ubicado en  
el Estado de México**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Geóloga**

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

Jesica Salas Lagunas

**ASESOR DEL INFORME**

Dr. Moisés Dávila Serrano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

## *Dedicatoria y Agradecimientos*

*Este trabajo se lo dedico especialmente a Dios, por ser mi apoyo y fortaleza en este caminar y sé que, sin él, este logro no se habría realizado. Agradezco a mis papás Sandra Luz Lagunas y Juan Salas por ser siempre mi guía esencial y por su inmenso amor, cariño y apoyo. A mi hermano Juan por ser mi ejemplo de profesionista y por siempre tener una palabra de aliento en mis momentos de debilidad, a mi hermana Sandra, porque siempre será mi cómplice, mi mejor amiga y unos de mis principales motores, a mi cuñado Omar y a mi hermosa sobrina Regina. Finalmente, a mi novio Francisco, por su inmenso amor, cariño, apoyo y paciencia que siempre ha tenido hacia mí y por ser mi compañero de vida en estos cuatro años.*

*Agradezco al Ing. Rolando de la Llata Romero, a la empresa Geo Mecánica S.C, a mis compañeros de trabajo, por creer en mí y por apoyarme en mi comienzo como profesionista. A mi asesor el Dr. Moisés Dávila Serrano y a mi jurado M.I. Isabel Domínguez Trejo, al Ing. José Luis Arcos Hernández, al M.C. Emiliano Campos Hernández y al Ing. Javier Mancera Alejándrez, por ser de los mejores profesores que tiene la Facultad de Ingeniería, así como por su guía, disposición y apoyo para realizar este informe y por ser pilares en mi formación académica y profesional.*



<i>INDICE</i>	<i>Página</i>
1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO .....	1
1.1 Objetivo .....	1
1.2. Breve descripción de la empresa GEO MECANICA S.C.....	1
1.3 Descripción de las actividades realizadas dentro de GEO MECANICA S.C.....	3
2. ANTECEDENTES .....	4
3. METODOLOGIA.....	5
3.1 Recopilación y análisis de la información existente.....	5
3.2. Análisis fotogeológico .....	5
3.3. Levantamiento de campo y procesamiento de la información geológica .....	5
3.4. Procesamiento e integración de la información geológica – estructural .....	6
3.5. Análisis e interpretación geológica-geotécnica.....	6
4. GEOLOGIA Y GEOTECNIA DEL TALUD .....	7
4.1. Marco geológico regional.....	7
4.2 Geología del sitio .....	12
4.2 Morfoestructura del sitio.....	34
4.3. Geología estructural.....	35
4.4. Análisis e integración de las exploraciones realizadas .....	43
4.4.1. Sondeos exploratorios.....	43
4.4.2. Pruebas de laboratorio .....	50
4.4.3 Exploración geofísica .....	52
5. RESULTADOS.....	59
5.1. TALUD IZQUIERDO .....	60
5.2. TALUD DERECHO .....	67
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA .....	70



## 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

En este informe se explica cómo ha sido la experiencia profesional de la sustentante en la empresa GEO MECANICA S.C. bajo la gerencia y supervisión del Ing. Rolando de la Llata Romero, a partir del término de los estudios de la carrera de Ingeniera Geológica, en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. La experiencia adquirida como parte de la empresa ha sido muy gratificante, ya que ha sido de gran apoyo para los proyectos ingenieriles que se han realizado, los cuales han ayudado a incrementar las habilidades obtenidas durante los años en el aula.

Cabe destacar que, para la utilización de la información manejada en este informe, se han liberado los permisos pertinentes con cada una de las empresas que proporcionaron la información, sin embargo, se solicitó omitir las referencias específicas del lugar donde se encuentra el sitio de estudio.

Este informe se ha estructurado de la siguiente manera: en el primer capítulo se describe la experiencia laboral dentro de la empresa GEO MECANICA S.C, describiendo las actividades realizadas dentro de la misma. En el segundo capítulo se redacta la importancia de la geología dentro del área de la ingeniería en el sector constructivo, esencialmente en estabilidad de taludes. Para el cuarto capítulo, se hace una descripción de la zona de estudio que incluye geología regional y geología del sitio, así como la metodología utilizada para el análisis del talud y la información del sitio adquirida mediante la ejecución de sondeos, geofísica, pruebas de laboratorio y levantamientos de campo. Posteriormente, para el quinto capítulo, se mencionan los resultados obtenidos en el estudio geológico-geotécnico; y finalmente, en el sexto capítulo, se señalan las conclusiones y recomendaciones más relevantes del sitio y de la experiencia laboral adquirida.

### 1.1 Objetivo

Demostrar el dominio de las capacidades y competencias profesionales adquiridas durante la carrera de Ingeniería Geológica, para obtener el título de Ingeniera Geóloga, mediante la modalidad de experiencia laboral dentro de la empresa GEO MECANICA S.C en la elaboración del estudio geológico-geotécnico de un talud carretero, ubicado en el Estado de México.

### 1.2. Breve descripción de la empresa GEO MECANICA S.C.

GEO MECANICA S.C. es una empresa mexicana dedicada a realizar estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos para proyectos de infraestructura en obras de ingeniería civil. Con el compromiso de trabajar de manera eficiente, productiva, innovadora y sustentable, con equipos de primer nivel ofreciendo valor agregado a sus estudios.

Creada en 2011, la compone un grupo multidisciplinario de profesionistas, con el respaldo de más de 40 años de experiencia en el ámbito profesional del director general el Ing. Rolando de la Llata Romero, quien fuera Gerente Técnico y Director de Geología en la empresa EXYCO, S.A., donde dirigió un gran número de proyectos de geología aplicada a la ingeniería civil durante el periodo



de 1980 a 1994. Además, se desarrolló como académico en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, como jefe de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra y Coordinador de Posgrado y Proyectos Escuela-Industria. Fue presidente de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, A. C., durante el periodo 1985 a 1987 y presidente de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Geológica de la Academia de Ingeniería en los periodos 2006 a 2008 y 2008 a 2010.

Los servicios especializados que ofrece GEO MECANICA S.C en las diferentes áreas de ingeniería son:

- GEOLOGIA SUPERFICIAL Y DEL SUBSUELO
  - Cartografía geológica (Regional, semi detalle y detalle)
  - Fotointerpretación
  - Levantamientos geológicos estructurales a detalle
  - Supervisión de perforaciones
  - Evaluación de bancos de materiales
  
- EXPLORACION GEOFISICA
  - Refracción sísmica
  - Sondeos Eléctricos Verticales (SEV`S)
  - Método de Autocorrelación Espacial (SPAC)
  - Cross Hole, Up y Down Hole
  - Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM`S)
  - Análisis Multicanal de Onda Superficial (MASW)
  - Tomografía de Resistividad Eléctrica
  - Georadar
  
- GEOTECNIA
  - Caracterización del macizo rocoso
  - Clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso
  - Ensayes de laboratorio y campo para determinación de parámetros geomecánicos
  - Análisis de estabilidad y tratamientos para obras superficiales y subterráneas.
  - Modelos geológicos-geofísicos- geotécnicos.
  - Proyectos ejecutivos para túneles y obras subterráneas.
  - Asesoría, supervisión técnica y monitoreo de instrumentación, en obras geotécnicas.
  - Pruebas de laboratorio PLT y Tensión Indirecta (brasileña).



Geo Mecánica es de las pocas empresas en México que ofrece servicio de televisamiento óptico de pozos. Definido como la adquisición de las imágenes orientadas de las paredes del sondeo en alta resolución. El levantamiento Televisivo se realiza con un equipo marca ALT (Advanced Logic Technology) modelo QL 40 OBI -2G. Se trata de un dispositivo de última generación que posee un sistema óptico y electrónico completamente rediseñado. Incorpora una nueva generación de sensores de imagen CMOS de alta resolución en combinación con un conjunto óptico de tipo ojo de pez. La cámara digital genera una imagen nítida de extraordinaria claridad en aire y agua clara, de forma continua y orientada, a lo largo de los 360° de las paredes del pozo (figura 1.1).

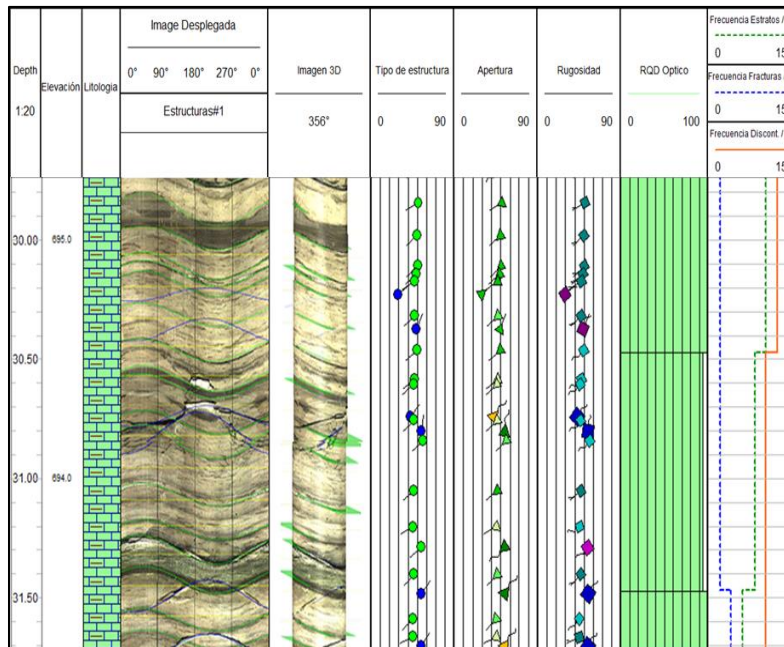


Figura 1.1. Imagen muestra del resultado e información adquirida a través del televisamiento óptico.

### 1.3 Descripción de las actividades realizadas dentro de GEO MECANICA S.C

Las labores encomendadas dentro de GEO MECANICA S.C comenzaron en octubre del 2018 y fueron como Ingeniera Geóloga de campo e Ingeniera de apoyo en diversos proyectos. La función dentro de la empresa consistió en realizar las diversas actividades:

- ✚ Obtención de datos estructurales de fallas y fracturas observadas en el sitio, así como de superficies de estratificación y pseudoestratificación.
- ✚ Ubicación mediante el uso del receptor GPS del talud en cartas geológicas del INEGI y SGM.



- ✚ Análisis fotogeológico del área de estudio e interpretación de las unidades litológicas presentes.
- ✚ Elaboración de secciones y plantas geológicas mediante la verificación de los contactos geológicos previamente identificados mediante fotogeología.
- ✚ Análisis e interpretación de secciones geológicas.
- ✚ Caracterización de unidades litológicas
- ✚ Descripción e interpretación de sondeos
- ✚ Descripción de muestras de mano
- ✚ Elaboración de informes geológicos-geotécnicos

## 2. ANTECEDENTES

La Ingeniería Geológica es la ciencia aplicada al estudio y solución de los problemas de la ingeniería y del medio ambiente, producidos como consecuencia de la interacción entre las actividades humanas y el medio geológico. El fin de la Ingeniería Geológica es asegurar que los factores geológicos condicionantes de las obras de ingeniería sean tenidos en cuenta e interpretados adecuadamente, así como evitar o mitigar las consecuencias de los riesgos geológicos.

La importancia de la Ingeniería Geológica se manifiesta en dos grandes campos. El primero corresponde a los proyectos y obras de ingeniería donde el terreno constituye el soporte, el material de excavación, de almacenamiento o de construcción. Dentro de este ámbito se incluyen las principales obras de infraestructura, edificación, obras hidráulicas, marítimas, plantas industriales, explotaciones mineras, centrales de energía, etc. El segundo campo se refiere a la prevención, mitigación y control de los riesgos geológicos, así como de los impactos ambientales de las obras públicas, actividades industriales, mineras o urbanas (González de Vallejo, 2002).

Las obras de infraestructura lineal (carreteras y ferrocarriles), canales, conducciones, explotaciones mineras, y en general cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente, o alcanzar una profundidad determinada por debajo de la superficie, precisan la excavación de taludes. Los taludes se construyen con la pendiente más elevada que permite la resistencia del terreno, manteniendo las condiciones aceptables de estabilidad. El diseño de taludes es uno de los aspectos más importantes de la Ingeniería Geológica, pues está presente en la mayoría de las actividades constructivas o extractivas.

Los taludes permanentes para la construcción de infraestructuras o con fines de edificación se diseñan para ser estables a largo plazo, precisando medidas de estabilización complementarias cuando no sea posible realizar las excavaciones con las alturas y ángulos requeridos, por motivos económicos o de otro tipo.



Actualmente, se planea la construcción de un talud carretero en el Estado de México. Con ese motivo, se solicitó a GEO MECANICA S.C., efectuar un estudio geológico-geotécnico de las inmediaciones donde se planea construir dicho corte, con el objetivo de definir la estratigrafía local y las condiciones estructurales tales como fallas, fracturas y lineamientos que tengan una incidencia directa para la obra. Esto se lograría mediante levantamientos geológicos, análisis e interpretación de sondeos e información geofísica del sitio. Se emitirán las conclusiones y recomendaciones pertinentes con base en el modelo geológico-geotécnico elaborado a partir de la fotointerpretación de imágenes satelitales, la geología regional y del sitio.

### 3. METODOLOGIA

El procedimiento para llevar a cabo el estudio geológico – estructural del talud carretero se detalla a continuación:

#### **3.1 Recopilación y análisis de la información existente.**

Se llevó a cabo una recopilación, integración y análisis de la información, que permitió conocer previamente las características geológicas generales del sitio a través de planos, informes y publicaciones existentes. Esto permitió dar sustento al modelo geológico definido a partir del levantamiento de campo. Al final se presenta una relación de la bibliografía consultada.

#### **3.2. Análisis fotogeológico**

Con el fin de conocer las características generales del sitio, se realizó una fotointerpretación previa por medio de fotografías satelitales de Digital Globe (2017), disponibles en la plataforma de “Google Earth” y “GeoInfoMex” del Servicio Geológico Mexicano, donde se pudieron identificar lineamientos estructurales, geformas, contactos geológicos y otros rasgos de interés geológico que pudieran incidir en la obra.

#### **3.3. Levantamiento de campo y procesamiento de la información geológica**

Se realizó un levantamiento geológico - estructural a detalle en la zona del corte donde se realizaron los siguientes trabajos:

- Levantamiento geológico del sitio definiendo las unidades litológicas.
- Descripción de las características físicas de las rocas (textura, estructura, así como los grados de intemperismo, consistencia y fracturamiento).





- Se buscó identificar y medir estructuras geológicas además de la secuencia estratigráfica, orientación de la pseudoestratificación de las unidades volcánicas, discordancias, fracturas, fallas, entre otros.

### **3.4. Procesamiento e integración de la información geológica – estructural**

La información geológica – estructural recabada del levantamiento de campo se integró, procesó y evaluó junto con la información previamente recopilada y las exploraciones directas e indirectas realizadas en el sitio, lo que permitió elaborar los siguientes documentos:

- Mapa geológico a detalle del sitio en el que se llevará a cabo la construcción del talud carretero.
- Secciones geológicas – estructurales transversales y longitudinales del sitio.
- Conclusiones y recomendaciones de posibles problemas geológico–geotécnicos.

### **3.5. Análisis e interpretación geológica-geotécnica**

Con la información topográfica, geológica y geofísica recabada, se elaboró un Modelo Geológico en el cual se incluye:

- Distribución geométrica de las diferentes unidades litológicas encontradas, tanto en planta como en perfiles longitudinales y en secciones transversales, apoyándose con las perforaciones y la exploración sísmica.
- Determinación de las características geológicas-estructurales de los diferentes miembros identificados en el sitio.
- Distribución de las discontinuidades en el sitio.



## 4. GEOLOGIA Y GEOTECNIA DEL TALUD

### 4.1. Marco geológico regional

#### *Fisiografía*

De acuerdo a la clasificación de Provincias fisiográficas de Raisz (1964), la zona de estudio pertenece en su totalidad al Eje Neovolcánico (figura 4.1) y a la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac.

La zona de estudio se localiza dentro de la parte norte de la Sierra de Las Cruces, cuyo sistema de topoformas está conformado por una sierra volcánica de estratovolcanes, así como lomeríos de tobas y zonas lacustres regidas por un patrón de drenaje dendrítico (INEGI, 2009).



Figura 4.1 Provincias Fisiográficas de México (INEGI, 2009).

#### *Geología regional*

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), se define como un arco magmático continental constituido por más de 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos. Tiene una longitud aproximada de 1000 km y una amplitud variable entre 80 y 230 km. Su extensión abarca



desde las costas del Pacífico, en San Blas, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Demant, 1978).

La historia geológica de la FVTM se divide en cuatro episodios principales (Gómez-Tuena *et al.*, 2005): (1) la instauración de un arco volcánico de composición intermedia en el Mioceno Medio y Tardío, (2) un episodio de vulcanismo máfico del Mioceno Tardío, (3) un episodio de vulcanismo silíceo de finales del Mioceno que llega a ser bimodal en el Plioceno Temprano, y (4) la reinstauración de un arco volcánico con gran variabilidad composicional a partir del Plioceno Tardío.

Con base en la geología y tectónica del área, la FVTM se divide en tres sectores o porciones (Demant, 1978; Pasquaré *et al.*, 1988): una porción occidental que va desde las costas del Pacífico hasta el Graben de Colima, una porción central que se extiende desde la zona volcánica de Michoacán hasta la Sierra Nevada en la cuenca de México y un sector oriental que va desde la Sierra Nevada hasta el Golfo de México.

En el extremo occidental de la parte oriental de la FVTM se ubica la Sierra de las Cruces, la cual cuenta con una extensión longitudinal de 110 km y amplitud variable entre los 27 y 47 km. La sierra se encuentra alineada en dirección NW-SE (figura 4.2).

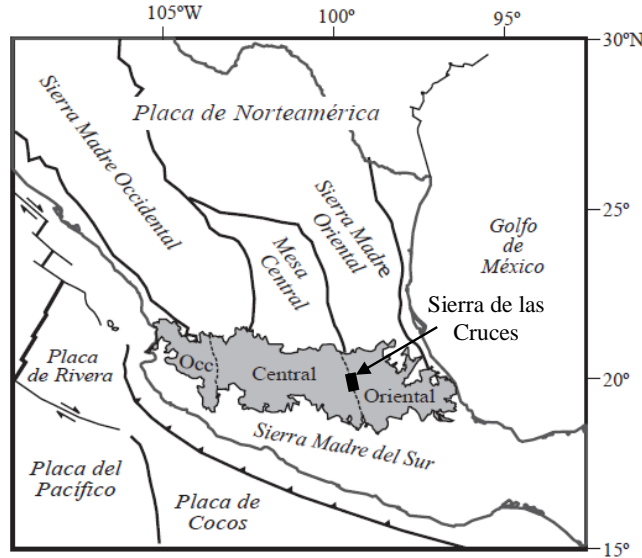


Figura 4.2. La FVTM se divide en tres sectores: occidental, central y oriental (color gris). Ubicación de las principales provincias geológicas de México y las placas tectónicas actuales. Localización de la SC dentro de la FVTM (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).



La Sierra de las Cruces se formó durante el Plioceno y Pleistoceno, está conformada por una serie de volcanes poligenéticos y se caracteriza por la emisión de derrames de lava, extrusión de domos, emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de detritos y lodo, y depósitos de avalanchas de escombros (García-Palomo et al., 2008) (figura 4.3).

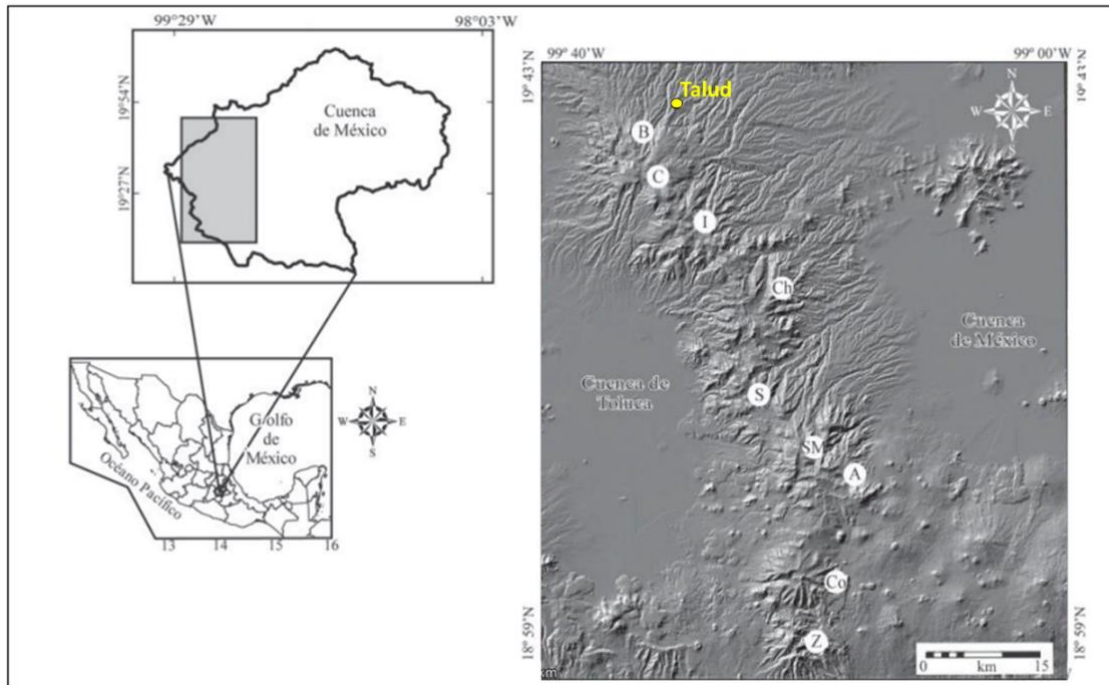


Figura 4.3. Ubicación de la zona de estudio dentro de la Sierra de las Cruces. Distribución de los volcanes que componen la SC, se indica la localización de los volcanes A: Ajusco, B: La Bufa, C: La Catedral, Ch: Chimalpa, Co: La Corona, I: Iturbide, SM: San Miguel, S: Salazar, y Z: Zempoala (García-Palomo et al., 2008).

De acuerdo a las características geológico-volcánicas, estructurales y morfodinámicas, la Sierra de las Cruces (SC) se ha dividido en tres grandes bloques: norte, centro y sur. El límite entre el bloque norte y centro está definido por una amplia zona de falla. En primer lugar, se encuentra la falla Ixtlahuaca con orientación E-W, longitud de 30 km y 6 km de ancho. Su prolongación hacia la SC es con la Falla Otomí y hacia el oriente con la fosa Barrientos. Así mismo, el límite entre el bloque central y sur, es por medio de una zona compleja de fallas con la misma orientación, E-W (García-Palomo et al., 2008).

De acuerdo a la diferenciación de estos tres bloques, el área de estudio se ubica dentro del bloque norte, sobre el piedemonte del volcán La Bufa (figura 4.3) y dentro de la zona de fallas La Catedral la cual, García-Palomo (2008) menciona que define zonas de más de 40 km de longitud con dirección NNE-SSW y echado al NW, escalonándose en esta misma dirección, y formando una

geometría de semifosa. En la figura 4.4 se puede observar que el sitio donde se ubica el Talud, es una zona de bloques escalonados con dirección NE-SW, como menciona García-Palomo (2008).

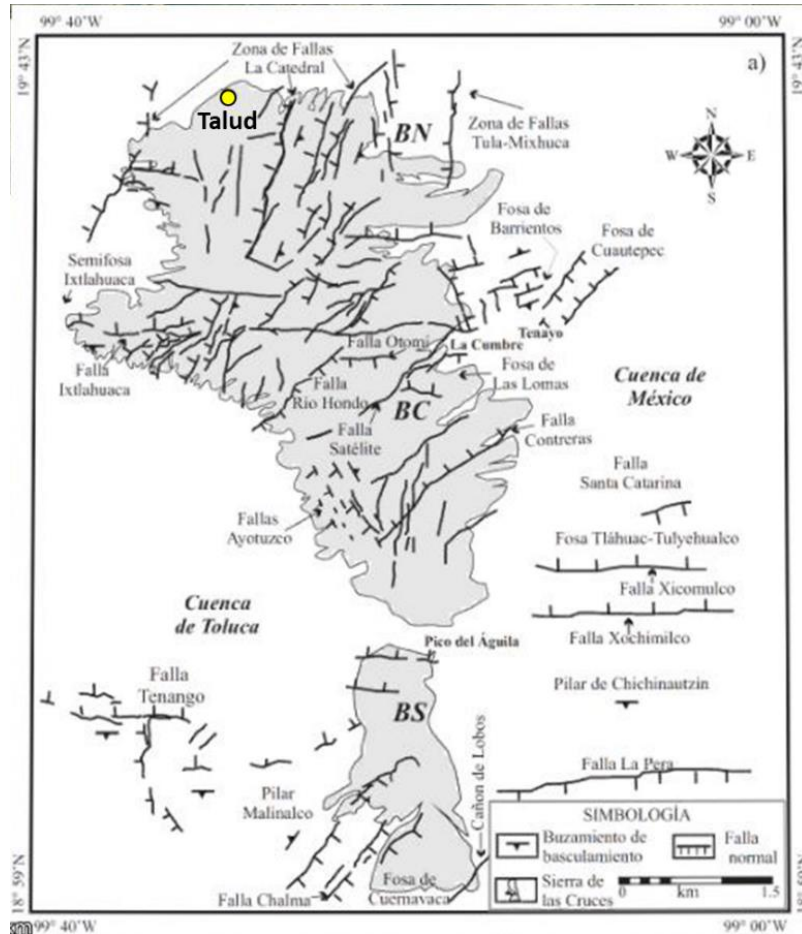


Figura 4.4 Distribución de las fallas que delimitan a los bloques de fosas y pilares dentro de la Sierra de las Cruces (Tomado de García-Palomo 2008).

El contexto estratigráfico de la zona de estudio de acuerdo a la información geológica – minera de la carta E14-2 (2002), escala 1:250 000, del Servicio Geológico Mexicano (figura 4.5), se define por la Sierra de las Cruces que se edificó sobre una secuencia andesítica-dacítica constituida por tobas, brechas y complejos volcánicos descrita como Formación Xochitepec (TmA-Da), esta unidad está parcialmente cubierta por dos unidades: 1) la Formación Las Cruces (TPIA-DA2) descrita como depósitos piroclásticos consistentes de pómez pliniana y ceniza, y 2) por derrames de composición andesítica-dacítica con variación de hasta riocacitas. Esta secuencia se encuentra cubierta por lahares y tobas andesíticas de la Formación Zempoala (TPIh-TA2) y por derrames de andesitas basálticas de la Formación Ajusco (QpTA-B3), en la parte sur de la Sierra de las



Participación en la elaboración del estudio geológico-geotécnico de un talud carretero ubicado en el Estado de México

Cruces, cubren a la Formación Las Cruces del Plioceno Tardío. Los aparatos volcánicos que presentan un vulcanismo de tipo andesítico-basáltico, fueron definidos como Formación Jumento (QhoA-B2), con edades de 4,000 a 1,000 años. Por último, existe aluvión (Qhoal) rellenando los bajos topográficos del área, compuesto de gravas, arenas, ceniza y arcillas.

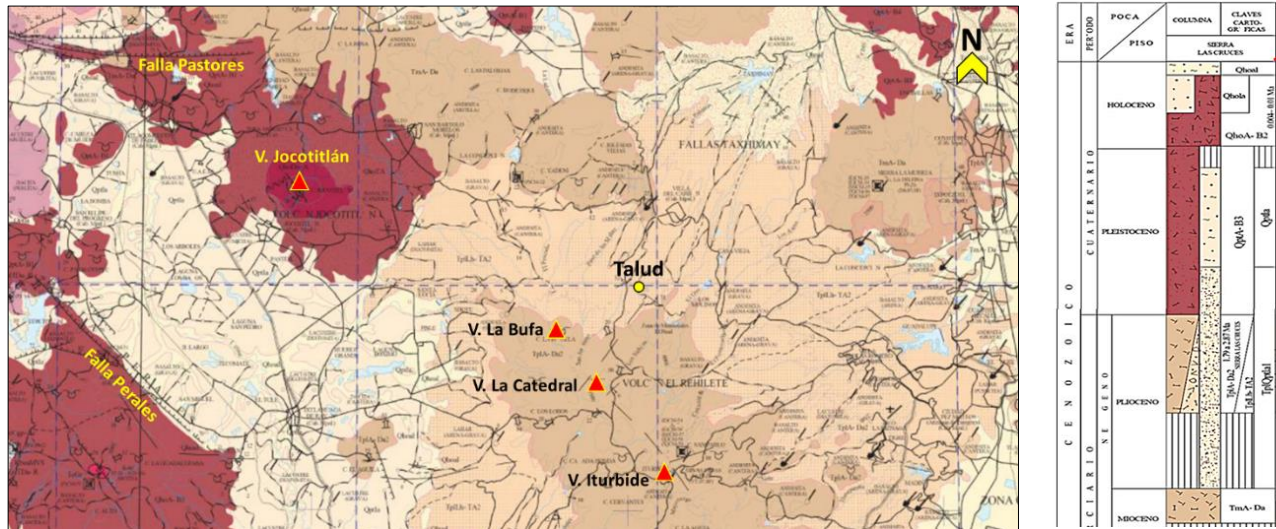


Figura 4.5. Geología regional asociada al Talud (Tomado de Carta geológica del SGM, escala 1:250 000).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ha realizado una carta geológica 1:50 000 en la cual se pueden apreciar con mayor detalle los rasgos estructurales de la zona de estudio, como fallas y fracturas. En la carta se observa que las rocas volcánicas y sedimentarias son predominantes en las inmediaciones de la zona de estudio (figura 4.6).

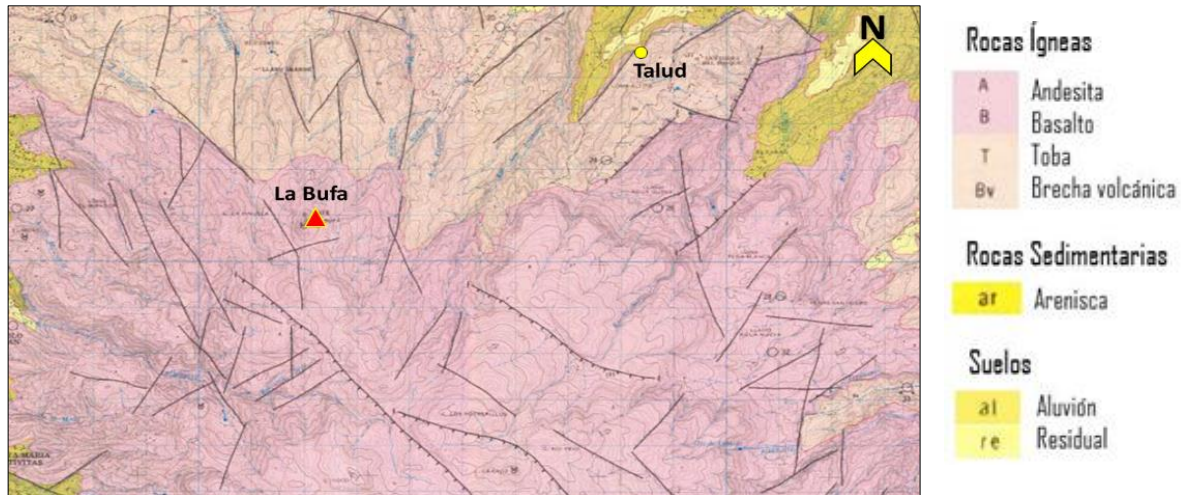


Figura 4.6. Geología regional asociada al Talud, de acuerdo a estudios del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (Tomado de la carta geológica E14A-28, escala 1:50 000 del INEGI).

## 4.2 Geología del sitio

El talud carretero se encuentra dentro de la Formación Las Cruces, y forma parte del miembro inferior formado por depósitos piroclásticos del Plioceno. El sitio está compuesto por una secuencia de tobas (Ttb), con distintas características litológicas cada una. Así como la erosión y depósitos aluviales antiguos y horizontes arcillosos. Esta secuencia litológica se encuentra en el límite de la zona de la Sierra de las Cruces y se identificó y delimitó gracias a levantamientos superficiales, así como por sondeos efectuados y estudios geofísicos en el área del corte.

Para fines geológicos-geotécnicos dado que se identificó un grupo de tobas con diferentes características litológicas se le denominó a cada cambio litológico como subunidad de toba.

La descripción de las características de los afloramientos observados durante el levantamiento de campo se realizó con base en los datos de la tabla 4.1 (González de Vallejo, 2002; ISRM, 1972-1980).



Tabla 4.1. Descripción de las características de los macizos rocosos observados en campo (González de Vallejo, 2002; ISRM, 1972-1980).

Características	Descripción						
Litología	Naturaleza						
Textura	Descripción Textural						
Estructura	Pliegues, Fallas, Estratos, Pseudoestratos, Derrames, etc.						
Fracturamiento (ISRM, 1978)	F1 (Masivo)	F2 (Poco Fracturado)	F3 (Fracturado)	F4 (Muy fracturado)	F5 (Triturado)		
Resistencia de la Matriz Rocosa	Extrem. blanda (Se puede marcar con la Uña)	Muy Blanda (Se raya con la navaja)	Blanda (Se raya con la punta del martillo)	Media (Se fractura con 1 golpe de martillo)	Dura (Se fractura con más de 1 golpe de martillo)	Muy dura (Se fractura con varios golpes de martillo)	Extrem. dura (El martillo solo logra rayarlo)
Grados de Meteorización (ISRM, 1980)	M1 (Fresca, sana)	M2 (Ligeramente meteorizada)	M3 Moderadamente meteorizada	M4 (Intensamente meteorizada)	M5 (Completamente meteorizada)		
Hidrogeología	Sin presencia de agua	Seco (con escurrimiento superficial)	Húmedo	Goteos	Flujo		

### Estratigrafía

Las rocas estratigráficamente más antiguas se encuentran en la porción más baja de la ladera, corresponde a un paquete de tobas ligeramente alteradas con líticos angulosos a subangulosos (Toba lítica<sub>0</sub>) embebidos en una matriz limo arenosa, posteriormente se presentan depósitos de Tobas intercaladas con paleocanales formados por una intercalación de depósitos aluviales con horizontes arcillosos y limo-arenosos.

Sobreyaciendo a la unidad de paleocanales, se encuentra un segundo depósito de toba lítica<sub>1</sub> con bloques de hasta 1 m de diámetro, dentro del cual se identificó una zona alterada con un alto contenido de líticos de 2 a 10 cm de diámetro y una matriz amarillenta limo arenosa. En la porción inferior de esta unidad, justo en el contacto, se identificó un alto grado de alteración que genera materiales arcillosos de color pardo claro y que presentan un comportamiento plástico.





Por encima de la Toba lítica<sub>1</sub>, se distingue un tercer paquete de Toba-lítica<sub>2</sub> poco fracturado, conformado por una matriz arenosa y bajo contenido líticos de tamaños de 3 a 15 cm de diámetro. Sobreyaciendo a estas unidades se encuentra la unidad Toba limo-arenosa con escasa presencia de líticos y matriz limo-arenosa y, por último, una capa de suelo residual con espesor menor a 1.5 m, así como depósitos aluviales en las porciones bajas del sitio.

En la figura 4.7 y tabla 4.2 se muestra la columna estratigráfica local del sitio identificada a partir de levantamientos geológicos de campo. En la figura 4.8 se muestra la distribución de las unidades del sitio

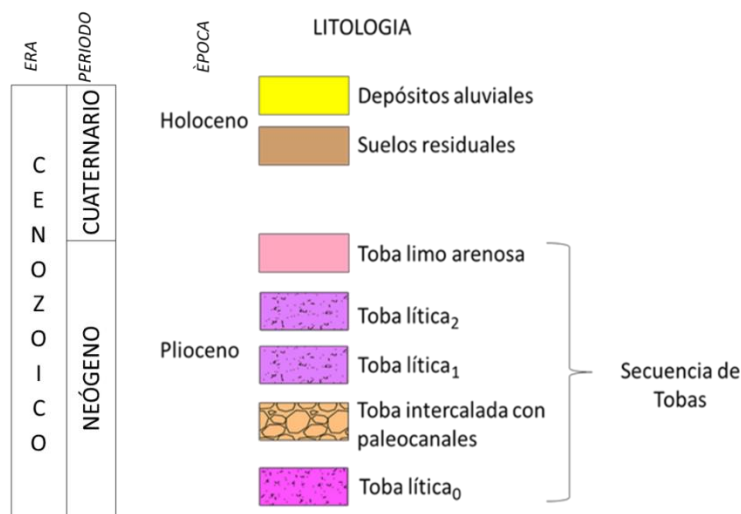


Figura 4.7. Columna litológica del Talud.

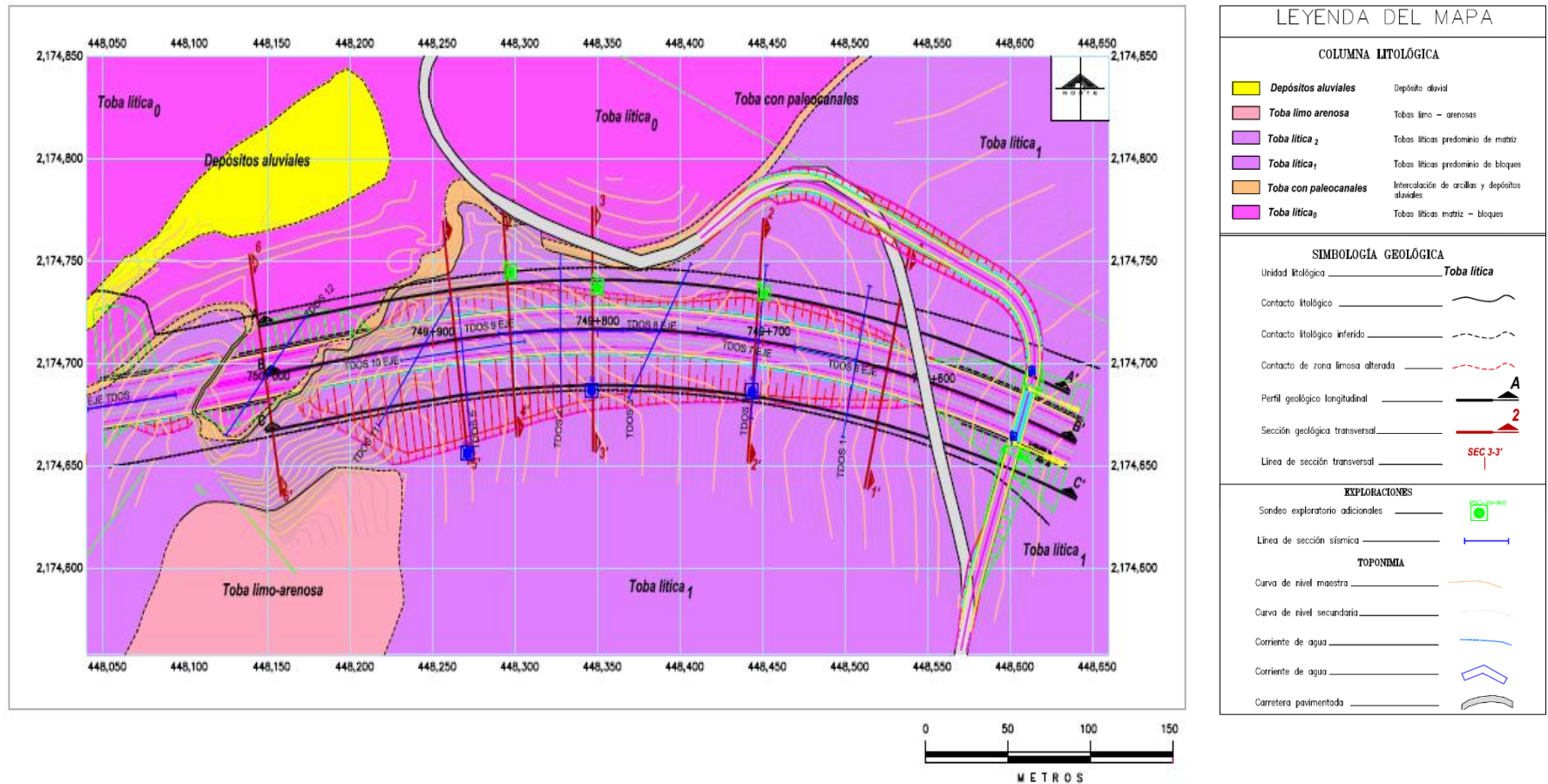


Figura 4.8. Planta geológica de la zona del Talud.



Tabla 4.2. Unidades litológicas identificadas en la zona del Talud.

Unidad		Observaciones
Depósitos Aluviales		Horizontes de material aluvial resultado del arrastre de sedimentos a lo largo de arroyos
Suelos residuales		Horizontes de material producto de la alteración y meteorización de roca superficial.
Secuencia de Tobas	Toba limo-arenosa	Subunidad de Tobas con matriz limo-arenosa de color parda clara a grisácea con escaso contenido de líticos.
	Toba lítica <sub>2</sub>	Subunidad de Tobas con matriz limo-arenosa con contenido de líticos angulosos a subangulosos, de tamaños del orden de 3 a 15 cm de diámetro. Presenta abundante contenido de matriz
	Toba lítica <sub>1</sub>	Subunidad tobácea, con matriz limo-arenosa y abundante líticos de tamaños mayores a 1m de diámetro y en menor proporción líticos con tamaños de 3 a 30 cm de diámetro. Presenta zonas alteradas amarillentas y pardas, así como material arcilloso a la base.
	Tobas intercaladas con depósitos aluviales	Horizontes tobáceos limo-arenosos y arcillosos intercalados con depósitos aluviales con clastos redondeados a subredondeados.
	Toba lítica <sub>0</sub>	Subunidad tobácea matriz arenosa con resistencia de blanda a media y líticos angulosos a subangulosos, con tamaños del orden de 3 a 40 cm de diámetro.

Para la elaboración del modelo geológico se integró la información obtenida en el levantamiento de campo, en conjunto con la información geofísica y a partir de la revisión, análisis y visitas a los sondeos exploratorios.

En la figura 4.9 se muestran las secciones longitudinales a lo largo de donde se excavarán ambos taludes y por el eje del talud, en la que se indican las diferentes subunidades del sitio, así como las zonas alteradas y de materiales susceptibles a desprendimientos, identificados a partir de los sondeos ejecutados y en la figura 4.10a y 4.10 b, se muestran las secciones transversales realizadas en el sitio. En las secciones, se observa que el sitio estratigráficamente está constituido por una secuencia tobácea en la que se diferenciaron subunidades de acuerdo a sus características texturales, formadas por Toba lítica<sub>0</sub>, Toba lítica<sub>1</sub>, Toba lítica<sub>2</sub>, Tobas limo arcillosas intercaladas con depósitos aluviales, y Tobas limo-arenosa.



COLUMNA LITOLÓGICA		SIMBOLOGÍA GEOLÓGICA		EXPLORACIONES	
	Depósitos aluviales	Unidad litológica	Toba litica	Fractura	
	Toba limo arenosa	Contacto litológico		Sondeo exploratorio adicionales	
	Toba litica <sub>2</sub>	Contacto litológico inferido		Línea de sección sísmica	
	Toba litica <sub>1</sub>	Contacto de zona limosa alterada			
	Toba con paleocanales	Perfil geológico longitudinal			
	Toba litica <sub>0</sub>	Sección geológica transversal			
		Línea de sección transversal			

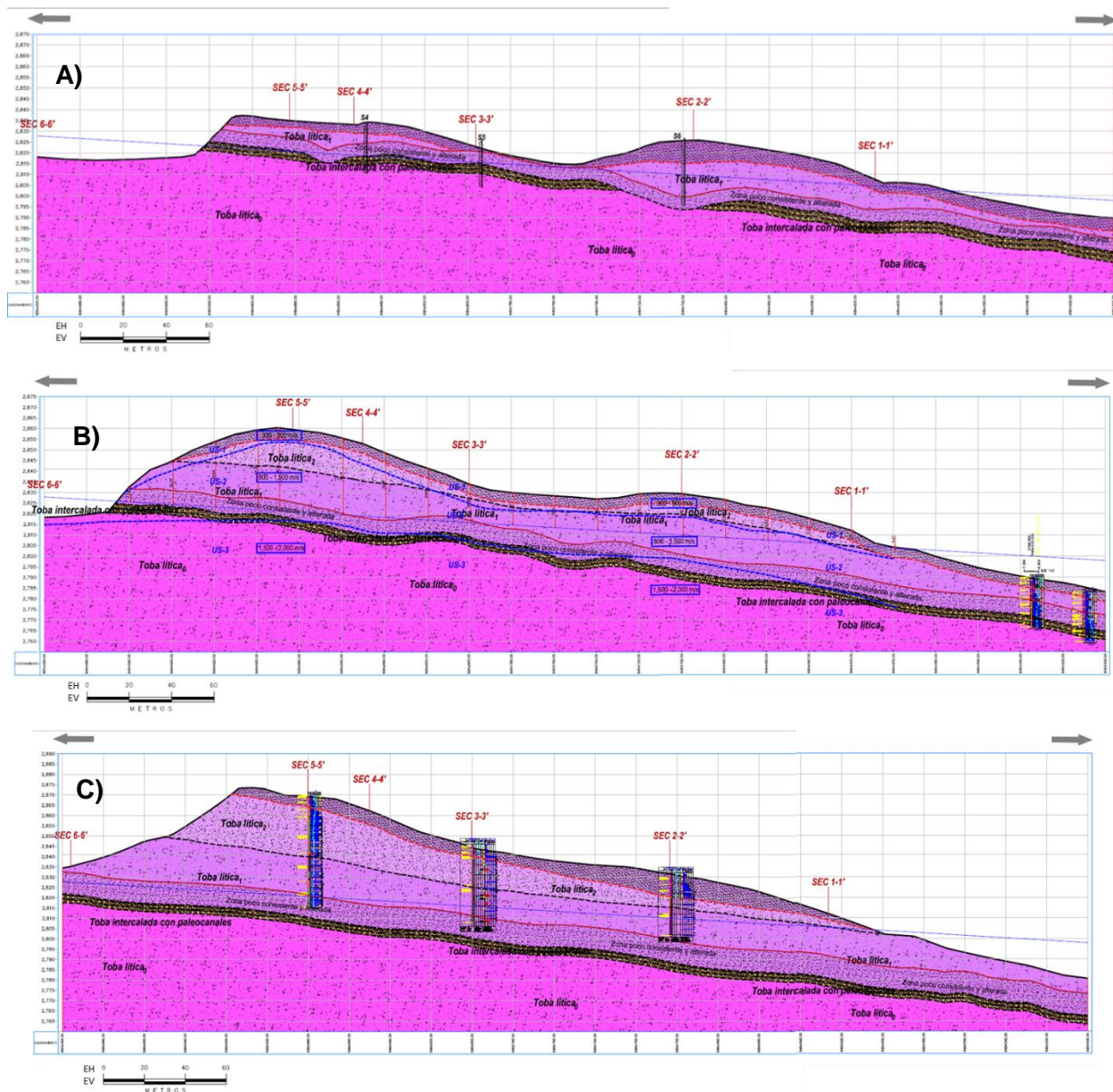


Figura 4.9. Secciones longitudinales, a) Talud Derecho; b) Eje de la autopista; c) Talud izquierdo.



COLUMNA LITOLÓGICA		SIMBOLOGÍA GEOLÓGICA		EXPLORACIONES	
	Depósitos aluviales	Unidad litológica	Toba lítica	Fractura	
	Toba limo arenosa	Contacto litológico		Sondeo exploratorio adicionales	
	Toba lítica <sub>2</sub>	Contacto litológico inferior		Línea de sección sísmica	
	Toba lítica <sub>1</sub>	Contacto de zona limosa alterada			
	Toba con paleocanales	Perfil geológico longitudinal			
	Toba lítica <sub>0</sub>	Sección geológica transversal			
		Línea de sección transversal			

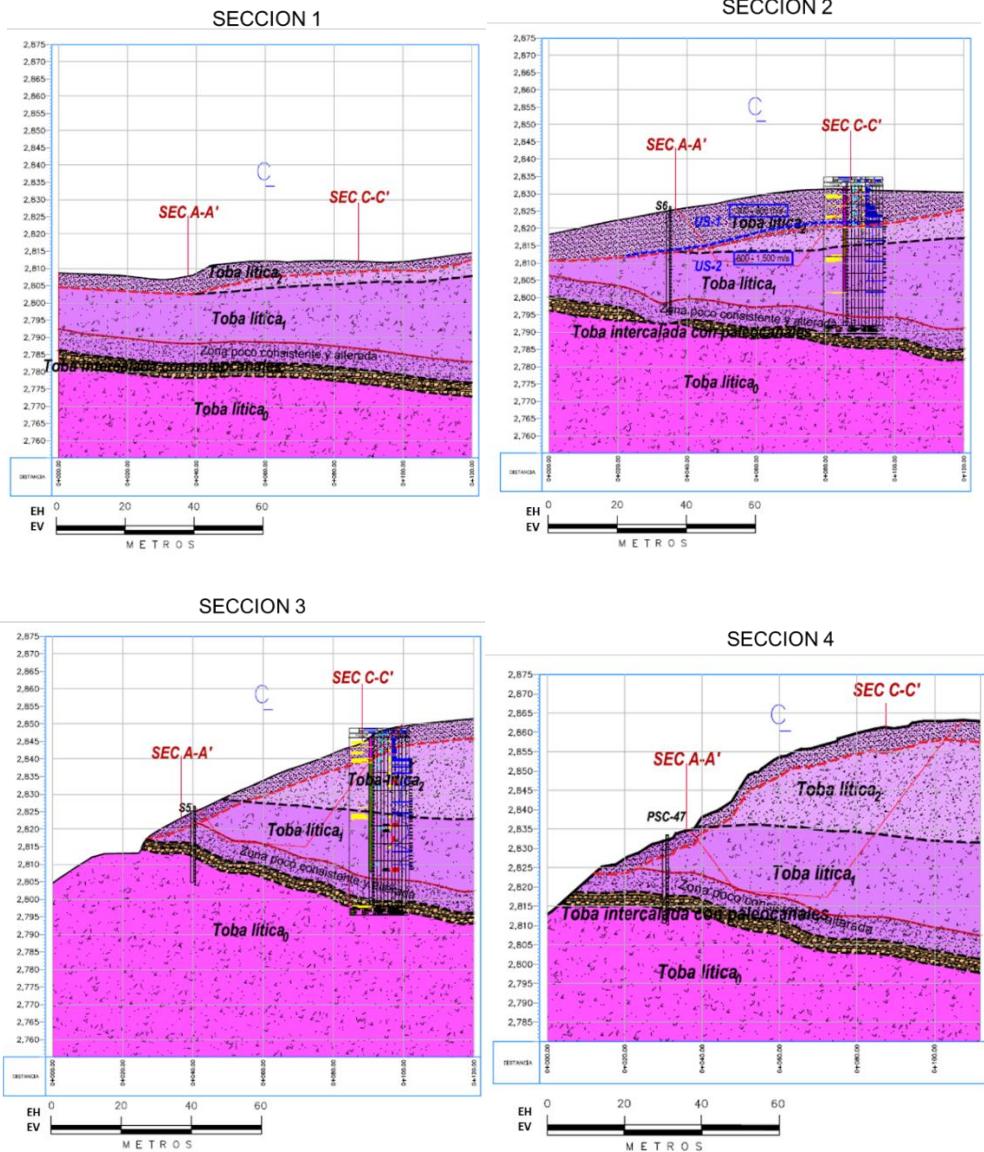


Figura 4.10a. Secciones transversales realizadas en la zona de estudio.



COLUMNA LITOLÓGICA		SIMBOLOGÍA GEOLÓGICA		EXPLORACIONES	
	Depósitos aluviales	Unidad litológica	Toba litica	Fractura	
	Toba limo arenosa	Contacto litológico		Sondeo exploratorio adicionales	
	Toba litica <sub>2</sub>	Contacto litológico inferido		Línea de sección sísmica	
	Toba litica <sub>1</sub>	Contacto de zona limosa alterada			
	Toba con paleocanales	Perfil geológico longitudinal			
	Toba litica <sub>0</sub>	Sección geológica transversal			
		Línea de sección transversal			

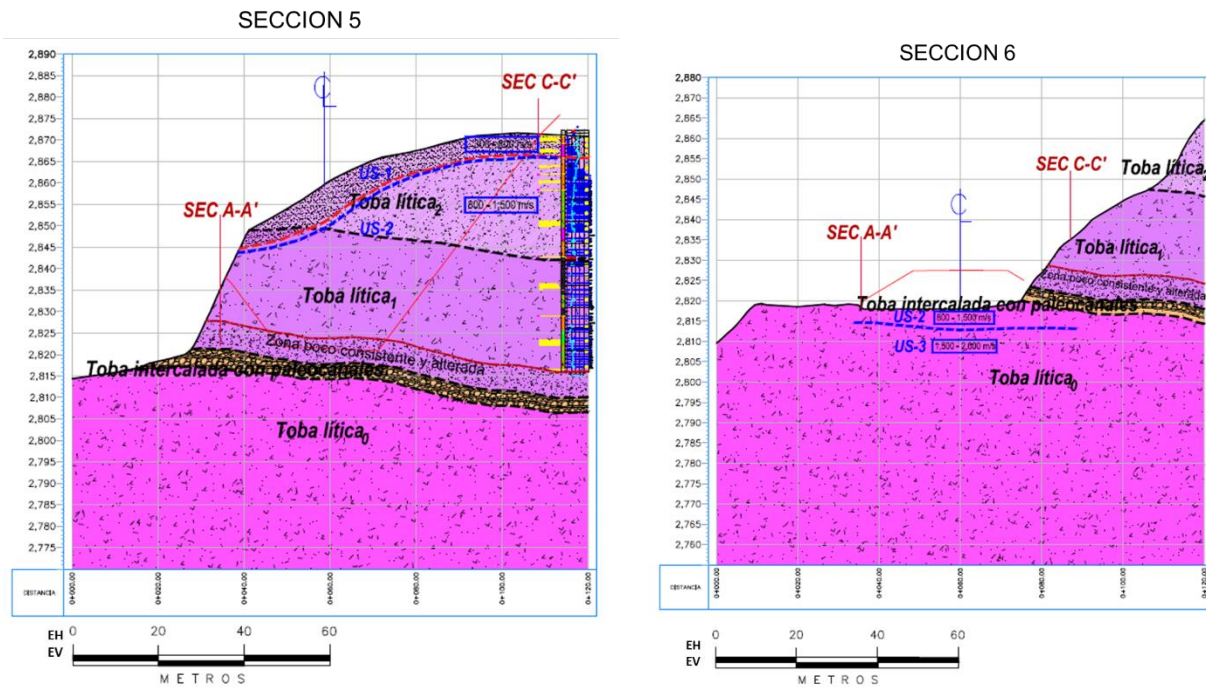
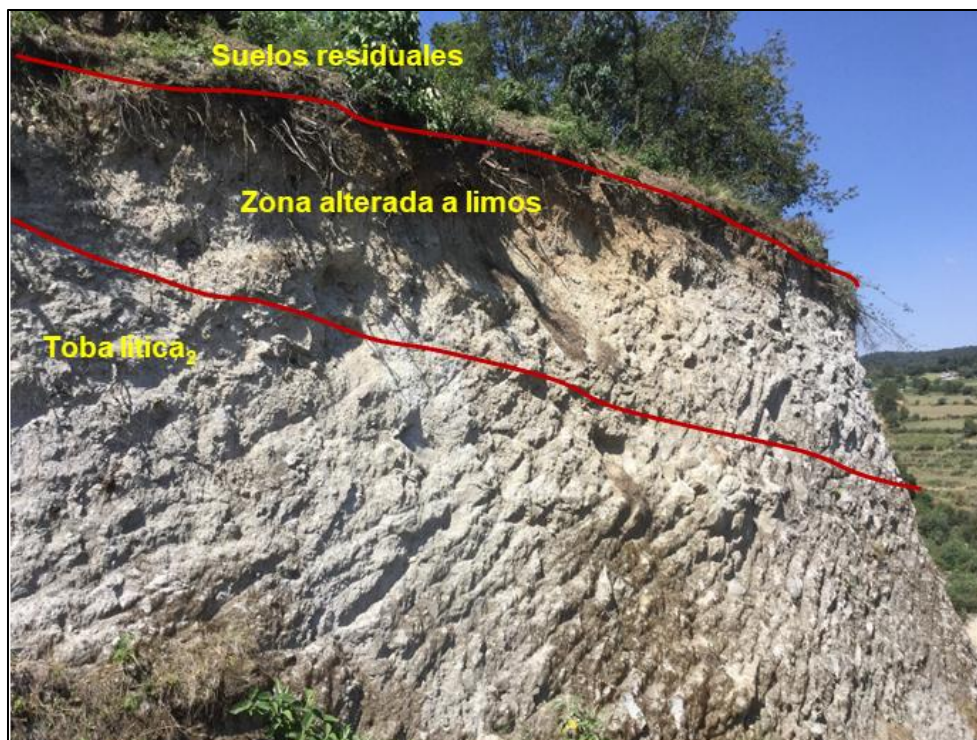


Figura 4.10b. Secciones transversales realizadas en la zona de estudio

### Unidad de secuencia de tobas

Constituida por una secuencia de tobas de diferente composición litológica y características texturales, en donde varía la granulometría de la matriz, la proporción y tamaño de líticos. La identificación de las subunidades se realizó a partir del levantamiento geológico de campo, reinterpretación de sondeos e información geofísica obtenida en el sitio. Dentro del área de excavación del corte, se identificaron las subunidades Toba limo-arenosa, Toba lítica<sub>0</sub>, Toba lítica<sub>1</sub>, Toba lítica<sub>2</sub>, y Tobas intercaladas con paleocanales.

Sobre la porción superior de la Toba lítica<sub>2</sub> se identificó una zona alterada a limos. Este horizonte se encuentra esencialmente compuesto por limos, sin embargo, de acuerdo al análisis de los sondeos, en menor proporción también comprende arenas. Su origen se debe a la alteración superficial de la roca, de acuerdo con esto, puede afectar a las subunidades Toba lítica<sub>0</sub>, Toba lítica<sub>1</sub> y Toba lítica<sub>2</sub>. Esta zona de alteración presenta espesores variables de 1 a 6 m y en algunas zonas su espesor llega hasta los 12 m, distribuido sobre las laderas (fotografías 4.11 y 4.12).



Fotografía 4.11. Horizonte alterado compuesto por limos, o en la parte alta de la cantera.



Fotografía 4.12. Horizonte alterado compuesto por matriz limosa y líticos altamente alterados. Sondeo 49+800 (de los 3.80 a 4.80).

#### *Subunidad Toba lítica<sub>0</sub>*

Estratigráficamente es la subunidad más antigua, originada a partir de eventos volcánicos explosivos y depositada en pseudoestratos. Se identificó a través de los sondeos elaborados en el sitio y mediante el levantamiento geológico. Presenta una matriz arenosa con resistencia de blanda a media y líticos angulosos a subangulosos, con tamaños del orden de 3 a 15 cm de diámetro y un espesor mayor a 10 m (fotografía 4.13 a 4.15). Se encuentra moderadamente consistente y ligeramente meteorizada, sin presencia de agua.





Fotografía 4.13. Toba lítica<sub>0</sub> identificada sobre la carretera.



Fotografía 4.14. Toba lítica<sub>0</sub> identificada sobre la carretera.



Fotografía 4.15. Toba lítica<sub>0</sub> en las inmediaciones del arroyo Santa María cercano al sitio.

#### *Subunidad Toba intercalada con paleocanales*

Formada por tobas limo-arenosas, depositada en pseudoestratos y horizontes arcillosos intercalados con depósitos aluviales, formados a partir de paleocorrientes, los cuales presentan una matriz limo arenosa parda-rojiza y clastos grisáceos subredondeados a redondeados con tamaños del orden de 4 a 8 cm de diámetro. Estos paleocanales no presentan una continuidad uniforme en el sitio, ya que su contacto con las demás subunidades es de tipo erosivo (fotografía 4.16). Se presenta en pseudoestratos (fotografía 4.17), no exhibe fracturamiento, la resistencia de la matriz rocosa es de blanda a media y se encuentra ligera a moderadamente meteorizada (M1-M2).

En la fotografía 4.16 se presenta el detalle del paleocanal, donde se puede observar los boleos que lo constituye, embebidos en una matriz arenosa y arcillosa de baja consistencia, lo que hace fácilmente erosionable este material al estar expuesto a la intemperie. Además, la permeabilidad de este horizonte es considerablemente mayor que la correspondiente a las tobas líticas, así como su capacidad de almacenamiento de agua que igualmente es mayor que las tobas confinantes.



Fotografía 4.16. Tobas intercaladas con paleocanales. En rojo se distingue el contacto erosivo de la subunidad y horizontes arcillosos.

En el contacto superior de esta subunidad se identificó un horizonte arcilloso característico que define un horizonte de menor permeabilidad respecto al material que le sobreyace generando alteración de la subunidad de tobas líticas. En algunos sitios se identificaron escurrimientos de agua provenientes de esta subunidad, que funcionan como capas impermeables permitiendo la saturación y el brote de agua (figura 4.17).



Fotografía 4.17. Acercamiento a la Toba intercalada con paleocanales, a orillas de la carretera Las vigas-El varal.

#### *Subunidad Toba lítica<sub>1</sub>*

Se encuentra sobreyaciendo a la subunidad Tobas intercalada con paleocanales. Esta unidad se originó a partir de eventos volcánicos explosivos y se presenta pseudoestratificada. Se distingue por una matriz limo-arenosa y un alto contenido de líticos con tamaños del orden de 2 a 15 cm de diámetro, angulosos a subangulosos, sin embargo, también se encontraron en menor proporción bloques con tamaño de hasta 1.30 m de diámetro, angulosos a subangulosos. No presenta fracturamiento, la resistencia de la matriz es de blanda a media y expone un grado de alteración de moderado a intensamente (M3-M4). No se identificó presencia de agua y llega a tener un espesor promedio de 25 m (fotografía 4.18).

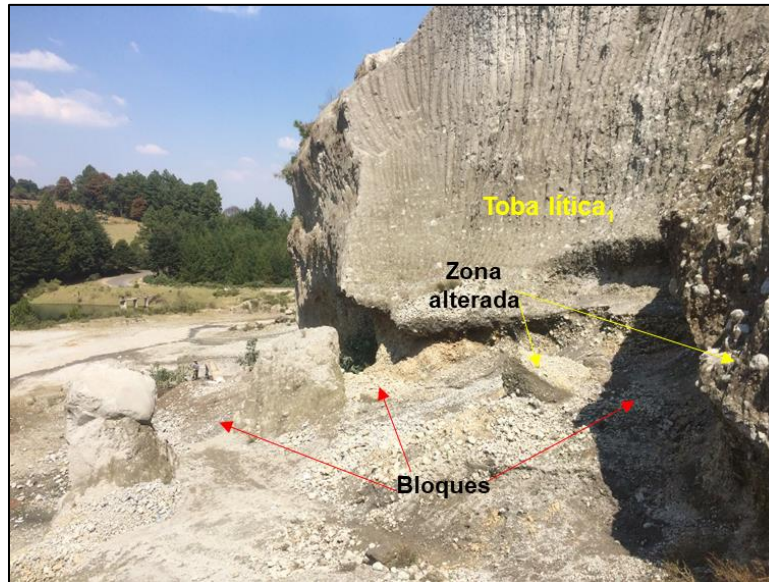
Cabe destacar que, dentro de esta subunidad, se identificó una zona de alteración amarillenta de 4 a 8 m de espesor aproximadamente, se encuentra lítico-soportado con una matriz limo-arenosa, sin embargo, esta alteración se presenta de manera local y en algunas zonas. No obstante, puede verse enmascarada por una capa superficial grisácea que, al momento de escarbar más a fondo, se percibe la alteración (fotografía 4.19 y 4.20).



Fotografía 4.18. Toba lítica<sub>1</sub> sobreyaciendo a la Toba intercalada con paleocanales y englobando a la zona poco consistente y alterada.

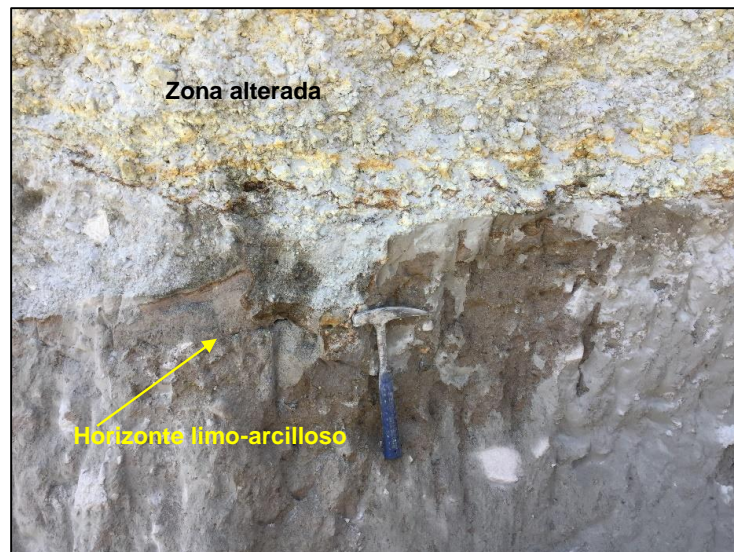


Fotografía 4.19. Acercamiento a la zona alterada dentro de la subunidad Toba lítica<sub>1</sub>.



Fotografía 4.20. Toba lítica<sub>1</sub> con bloques de tamaño promedio de 1m de diámetro.

Asimismo, se identificó un horizonte limo-arcilloso producto de la zona alterada y poco consistente el cual presenta una coloración parda clara y amarillenta, y se encuentra subyaciendo a esta zona (fotografía 4.21 y 4.22). Estos horizontes se presentan ligeramente húmedos en algunos sitios, la resistencia de la matriz de estos horizontes es de extremadamente blanda a muy blanda y presenta un comportamiento plástico.



Fotografía 4.21. Acercamiento a la zona alterada dentro de la Toba lítica<sub>1</sub>. Nótese el incremento en la presencia de líticos y el contacto con el horizonte limo-arcilloso.

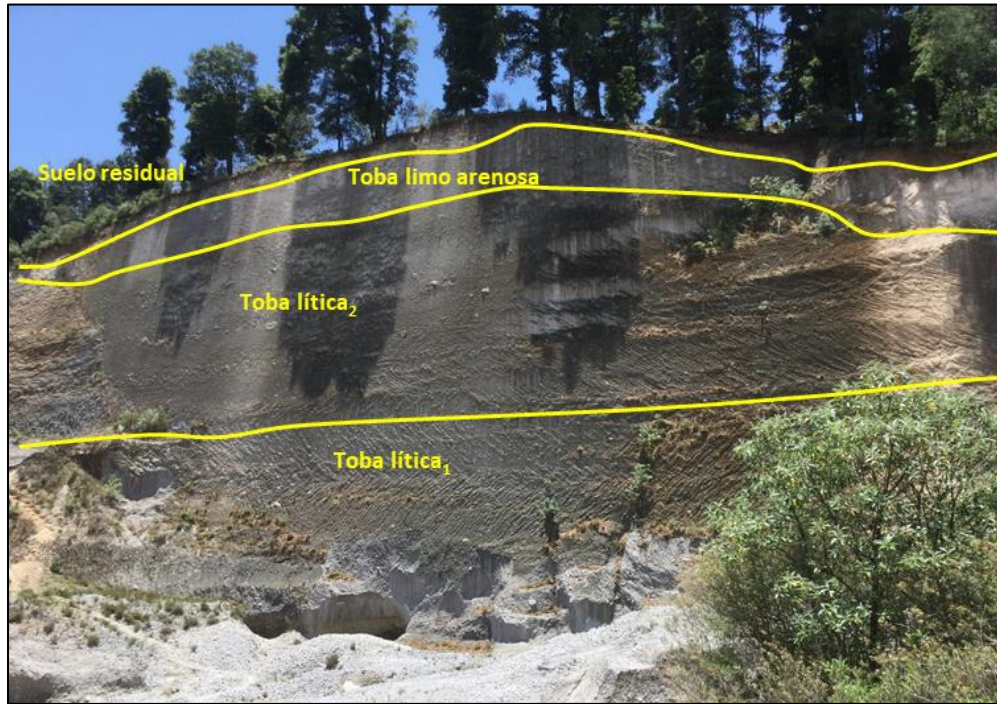


Fotografía 4.22. Horizonte arcilloso en contacto con la toba lítica<sub>1</sub>.

#### *Subunidad Toba lítica<sub>2</sub>*

Presenta espesores de varias decenas de metros y se encuentra sobreyaciendo a la Toba lítica<sub>1</sub>. Originada a partir de eventos volcánicos explosivos y depositada en pseudoestratos. Está compuesta por una matriz arenosa con abundante contenido de líticos con tamaños del orden de 3 a 15 cm de diámetro y en menor proporción bloques grisáceos con tamaño promedio de 60 cm de diámetro (fotografía 4.23 y 4.24).

Esta subunidad se encuentra poco fracturada a fracturada (F2-F3). La resistencia de la matriz rocosa es de blanda a media, presenta un grado de meteorización de ligero a moderado (M2 –M3) y no se observó presencia de agua. Sin embargo, al examinar los testigos de los sondeos, se percibió que, algunos de los líticos presentaban una delgada capa de óxido, producto de las infiltraciones de agua del sitio (fotografía 4.25).



Fotografía 4.23. Toba lítica<sub>2</sub> subyaciendo a la Toba limo arenosa.





Fotografía 4.24. Identificación de Toba lítica<sub>2</sub>,



Fotografía 4.25. Testigos recuperados del sondeo km 49+700 (de los 15.90 a 18.00 m), donde se observa líticos alterados y con presencia de óxidos.

#### *Subunidad Toba limo-arenosa*

Se encuentra sobreyaciendo a la Toba lítica<sub>2</sub>. Esta unidad se originó a partir de eventos volcánicos explosivos y se presenta pseudoestratificada. Exhibe una matriz parda clara a grisácea limo-arenosa con bajo contenido de líticos. Presenta planos de fracturamiento que funcionan como zonas de debilidad dando origen a desprendimientos de la subunidad (fotografía 4.26)



No expone ningún patrón de fracturamiento significativo, se encuentra poco consistente y la resistencia que presenta la matriz rocosa es de blanda a muy blanda, con un grado de alteración de ligero a moderado (M2-M3) y no se identificó presencia de agua proveniente de la subunidad.



Fotografía 4.26. Toba limo-arenosa sobreyaciendo a la subunidad Toba lítica<sub>2</sub>.



Tabla 4.3. Descripción de las características de la unidad Intercalación de tobas observadas en campo.

Características	Descripción	Observaciones
Litología	Tobas intercaladas con paleocanales, Toba lítica (1,2 y 3) y Toba limo-arenosa.	Intercalación de espesores tobáceos con diferentes características texturales presentes a lo largo del área del corte.
Textura	Areno- limoso con variación en el tamaño y contenido de líticos	Predominancia de horizontes de textura arenosa y limosa con coloraciones pardas a grisáceas.
Estructura	Pseudoestratificación	Interestratificación de las secuencias tobáceas.
Fracturamiento (ISRM, 1978)	Masivo (Materiales de baja consolidación)	No se identificaron zonas de fracturamiento significativo dentro de esta secuencia.
Resistencia de la Matriz Rocosa al golpe de martillo	Blanda (Con la punta del martillo)	Materiales de baja a mediana consistencia, en donde la resistencia varía dependiendo de la calidad de la matriz y la abundancia y tipo de líticos presentes.
Hidrogeología	Húmedo	La unidad se presentaba seca, sin embargo, se observaron escurrimientos provenientes del horizonte arcilloso perteneciente a la subunidad Ttb-li <sub>1</sub> .

### Suelos residuales

Se presenta en toda el área de construcción del corte coronando a la secuencia estratigráfica local como consecuencia de la alteración y meteorización de la roca superficial. Su espesor promedio es menor a 1 m, variando normalmente a lo largo del sitio. Su coloración varía de parda rojiza a parda amarillenta, con baja consistencia y huellas (fotografía 4.27).



*Fotografía 4.27. Suelo residual en el área del talud.*

#### Depósitos Aluviales

Se identificaron depósitos aluviales constituidos por materiales transportados y depositados por arroyos y corrientes de agua, presentes en el sitio. Presentan una variación de tamaños promedio de 2 a 6 cm de diámetro, subangulosos a subredondeados, así como arenas y limos (fotografía 4.28).



Fotografía 4.28. Depósitos aluviales provenientes del arroyo Santa María.

#### 4.2 Morfoestructura del sitio

Como se observa en las secciones longitudinales del sitio (a, b y c) expuestas al inicio del capítulo, los depósitos piroclásticos que conforman el sitio, presentan una pseudoestratificación con una inclinación de aproximadamente  $10^\circ$  esto podría asociarse a la morfoestructura que presenta la Sierra de las Cruces (SC). Como ya se mencionó, la sierra se divide en tres bloques principales (Norte, Centro y Sur), esta diferenciación la hace García-Palomo (2008) de acuerdo a las diferencias en altitud, pendientes, densidad de fracturamiento, patrones de drenaje, etc., aunado al complejo arreglo de fallas que la afectan, con una edad contemporánea a la Sierra de Las Cruces y las cuales presentan un movimiento normal a partir del Pleistoceno, formando una serie de pilares y fosas tectónicas.

La influencia de fallas y fracturas se refleja claramente en la topografía actual, y el grado de evolución alcanzado se ve determinado en los escarpes que se generan. Asimismo, la interrelación de estos sistemas de fallas y su carácter de tipo normal a partir del Pleistoceno, provoca levantamiento, hundimiento, escalonamiento y basculamiento de los bloques. Estos arreglos morfoestructurales que caracterizan a la SC están principalmente controlados en la parte norte y centro de la sierra a través de las fallas N-S y NE-SW (figura 4.29). Lo que da lugar al ligero basculamiento que presentan los depósitos volcánicos del sitio.

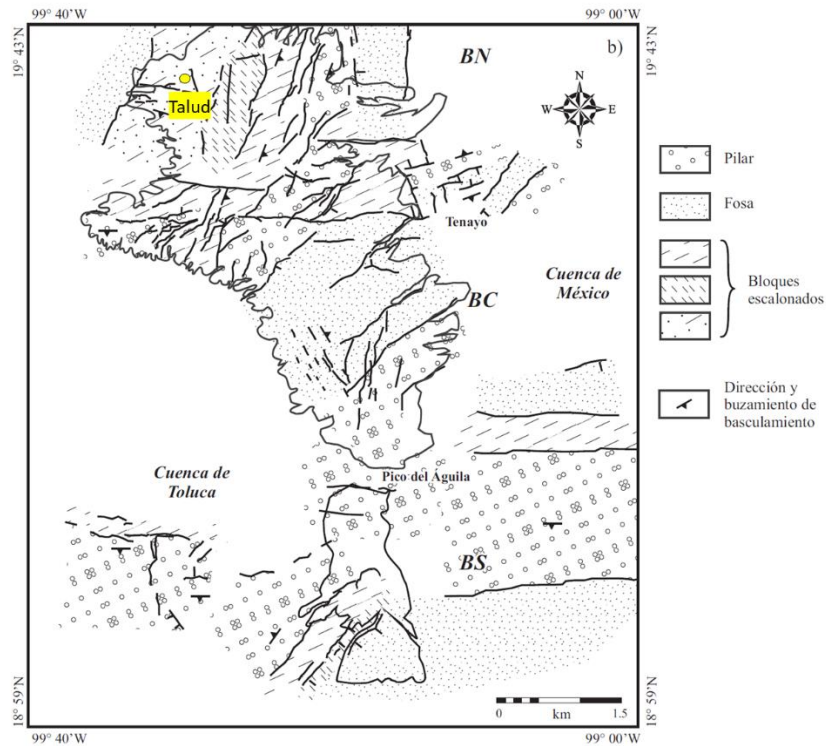


Figura 4.29. Ubicación de la zona de estudio en el bloque norte de la SC, en el área de bloques escalonados (Tomado de García-Palomo 2005).

### 4.3. Geología estructural

La zona del corte km 50+000 de la autopista Atizapán-Atlacomulco se sitúa en el denominado bloque norte de la Sierra de las Cruces (García-Palomo, et al.,2008). Por medio de la fotointerpretación de imágenes aéreas y satelitales, se identificaron dos lineamientos regionales. El primero de ellos se reporta como fractura según la carta geológica E14A28 (INEGI), escala 1:50 000 y presenta una dirección NE-SW que se asemeja a la dirección que presenta la zona de fallas La Catedral, que de acuerdo con García-Palomo (2008), presenta más de 40 km de longitud con dirección NNE-SSW y buzamiento al NW (figura 4.30). El segundo lineamiento, presenta una dirección NW-SE con echado hacia el NE y se identificó mediante fotogeología, que debido a la cercanía y su actitud puede generar inestabilidad en el talud derecho, sin embargo, durante el levantamiento de campo, no se encontraron evidencias superficiales que lo puedan asociar a una falla o fractura (figura 4.30).



*Figura 4.30. En verde se identifica los lineamientos 1 y 2. El primero se asocia a una fractura con dirección NE-SW, reportado en la carta geológica (INEGI E14A28), escala 1:50,000, el cual se asemeja a la dirección que presenta la zona de fallas La Catedral. El segundo presenta una dirección NW-SE identificado fotogeológicamente.*

De manera local, dentro del área del talud se realizaron tres estaciones estructurales, sin embargo, debido al poco fracturamiento de la roca, solo se midieron y caracterizaron las discontinuidades expuestas en la estación E1. Estas discontinuidades corresponden principalmente a fracturas las cuales, se describieron de acuerdo a la caracterización geotécnica (ISRM) presentada en la tabla 4.4.



Tabla 4.4. Descripción y caracterización geotécnica de las discontinuidades basada en el ISRM.

Características	Descripción						
<b>Tipo de continuidad</b>	Estrato (E), Contacto (C), Falla (F), Discordancia (D), fractura (fr).						
<b>Espaciamiento (cm)</b>	Extrem. Juntas (E1) <2	Muy juntas (E2) 2 a 6	Juntas (E3) 6 a 20	Moderad. Juntas (E4) 20 a 60	Separada (E5) 60 a 200	Muy separada (E6) 200 a 600	Ext. Separada (E7) >600
<b>Continuidad (m)</b>	C = Continua						
	SB= Subcontinua						
	NC = No continua						
	Muy baja (C1) <1	Baja (C2) 1 a 3	Moderada (C3) 3 a 10	Alta (C4) 10 a 20	Muy Alta (C5) >20		
<b>Apertura (mm)</b>	Muy cerrada (A11) <0.1		Cerrada (A12) 0.1 a 0.25			Parcial Abierta (A13) 0.25 a 0.50	Abierta (A14) 0.50 a 2.5
<b>Rugosidad</b>	Escalonada	Rugosa (Er), Lisa (El), Pulida (EP)					
	Ondulada	Rugosa (Or), Lisa (Ol), Pulida (Op)					
	Plana	Rugosa (Pr), Lisa (Pl), Pulida (Pp)					
<b>Relleno (en discontinuidad)</b>	Composición	limo (lm); arcilla (ar); carbonato (cb); óxido (o); cuarzo (qz)					
	Meteorización	(I) Sana	Filtraciones			(S) Seco	
		(II) Algo Meteorizada				(H) Húmedo	
		(III) Media Meteorizada				(G) Goteo	
		(IV) Muy Meteorizada				(F) Flujo	
		(V) Complet. Meteorizada					
(VI) Suelo Residual							

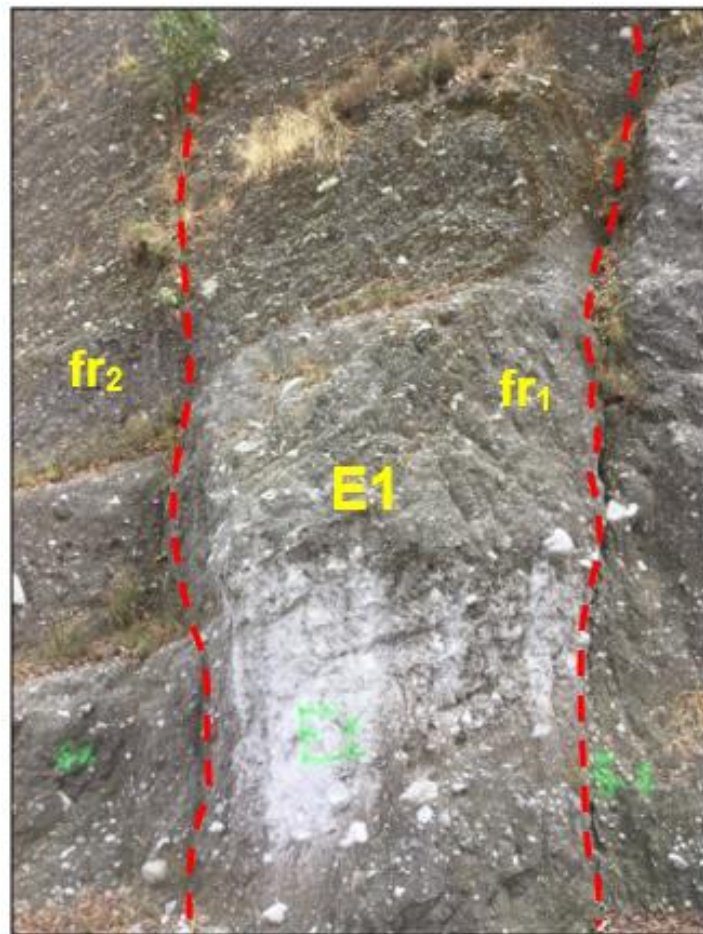
En la estación E1 se caracterizaron las fracturas  $fr_1$  y  $fr_2$ , ambas se identificaron sobre la Toba lítica<sub>2</sub>. La fractura  $fr_1$  presenta una dirección de inclinación de  $50^\circ$  y un echado de  $80^\circ$ . Muestra ondulado, así como una superficie rugosa. Se encuentra rellena de limo (lm), exhibe un espaciamiento de 2 a 6 m (muy separada) y una continuidad alta de 10 a 20 m. Expone una apertura parcial de 0.25 a 0.50 mm, meteorización de II a III (algo a medianamente meteorizada) y no manifiesta presencia de agua (fotografía 4.31). La fractura  $fr_2$  presenta una dirección de inclinación de  $42^\circ$  y un echado de  $85^\circ$ . Presenta un espaciamiento de 2 a 6 m, una continuidad moderada de 3 a 10 m y expone una apertura de 0.50 a 2.5 mm (fotografía 4.32). Exhibe





ondulamiento y una superficie rugosa, se encuentra rellena de limo (lm) y expone meteorización de II a III (algo a medianamente meteorizada).

Las fracturas caracterizadas en el sitio presentan en general un rumbo NW-SE de 40 a 50° con echados muy verticales de 80 a 85° al NE, debido a que el trazo de la carretera presenta una tendencia general E – W, estas fracturas cortaran de manera oblicua al corte con un ángulo de inclinación casi vertical, además de presentar un espaciamiento de 2 a 6 m y paredes de discontinuidad onduladas rugosas y medianamente alteradas (fotografía 4.33), por lo que se considera que no presentaran incidencia en los taludes excavados, si las condiciones de las fracturas permanecen.



Fotografía 4.31. Zona de la estación (E1) donde se caracterizaron las fracturas fr1 y fr2 en el área del corte.



Fotografía 4.32. Fractura ( $fr_2$ )  
nótese que se encuentra abierta y  
rellena por limo



Fotografía 4.33. Fractura ( $fr_1$ )  
parcialmente abierta y rellena por  
limo.

Otras discontinuidades relevantes en la zona de estudio corresponden a los contactos de pseudoestratificación de las diferentes subunidades tobáceas, los cuales se encuentran en contacto principalmente por discordancia erosiva. Las subunidades tobáceas muestran un patrón de pseudoestratificación. Para el caso de la subunidad de Tobas intercaladas con depósitos aluviales presenta un contacto de tipo erosivo, e intercalada con horizontes arcillosos y limo arenosos que provoca una variación en su espesor a lo largo del sitio (fotografía 4.34 y 4.35).



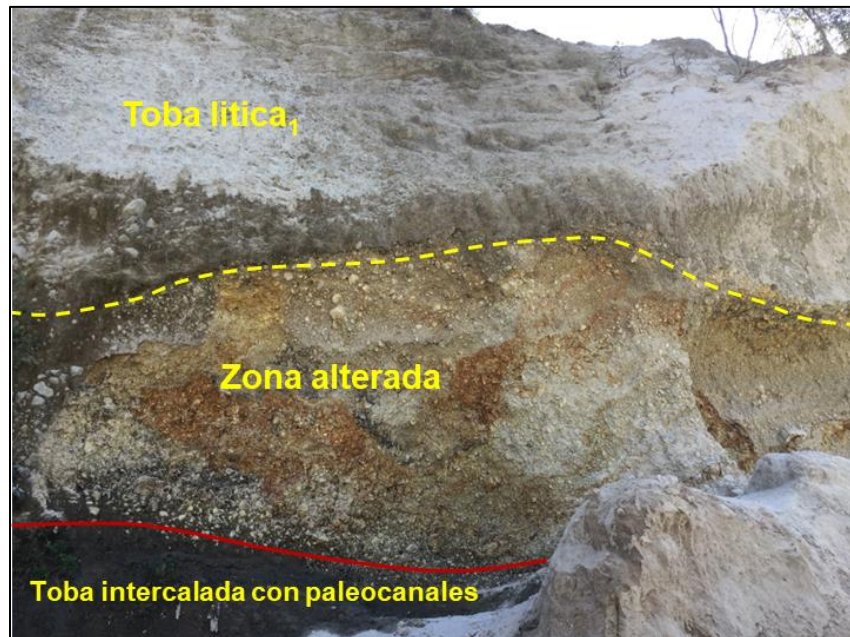
Fotografía 4.34. Contactos erosivos en la Toba intercalada con paleocanales.



. Fotografía 4.35. Horizonte erosivo (en rojo) de la Toba intercalada con paleocanales, en contacto con el horizonte alterado de la Toba lítica<sub>1</sub>.

El contacto entre la Toba intercalada con paleocanales y Toba lítica<sub>1</sub> es de tipo erosivo, se observa continuo a lo largo de la cantera y en algunas porciones cambia drásticamente su inclinación; de manera general presenta una dirección de inclinación al SE con echado 5 a 15°. Comprende un horizonte arcilloso de espesor variable de 1 a 20 cm de la Toba intercalada con paleocanales y la zona alterada de la Toba lítica<sub>1</sub>, que presenta espesor promedio de 6 m resultado de las infiltraciones del agua de lluvia, lo que provoca que presente una coloración amarillenta parda.

Dichos horizontes alterados poseen alto contenido de líticos angulosos a subangulosos y matriz limo-arenosa. Así mismo, estas zonas exhiben desprendimientos pequeños producto de la inestabilidad provocada por la alteración de la subunidad (fotografía 4.36 y 4.37). Como ya se mencionó previamente, dentro de la zona alterada se encuentra una capa alterada que genera un material arcilloso con comportamiento plástico y coloraciones amarillentas y pardas. Este horizonte exhibe una variación en su espesor de 20 cm hasta 1 m.



Fotografía 4.36. Zona alterada dentro de la Toba lítica<sub>1</sub> con coloraciones amarillas y pardas, resultado de infiltración de agua.



Fotografía 4.37. Contacto de tipo erosivo entre la Toba intercalada con paleocanales y el horizonte arcilloso producto de la zona alterada.



#### 4.4. Análisis e integración de las exploraciones realizadas

En este capítulo se describen, analizan e integran los resultados obtenidos de los sondeos exploratorios y del estudio geofísico a través de Tendidos de Refracción Sísmica (TRS) y Tendidos de Ondas Superficiales (TDOS), ejecutados en la zona del talud.

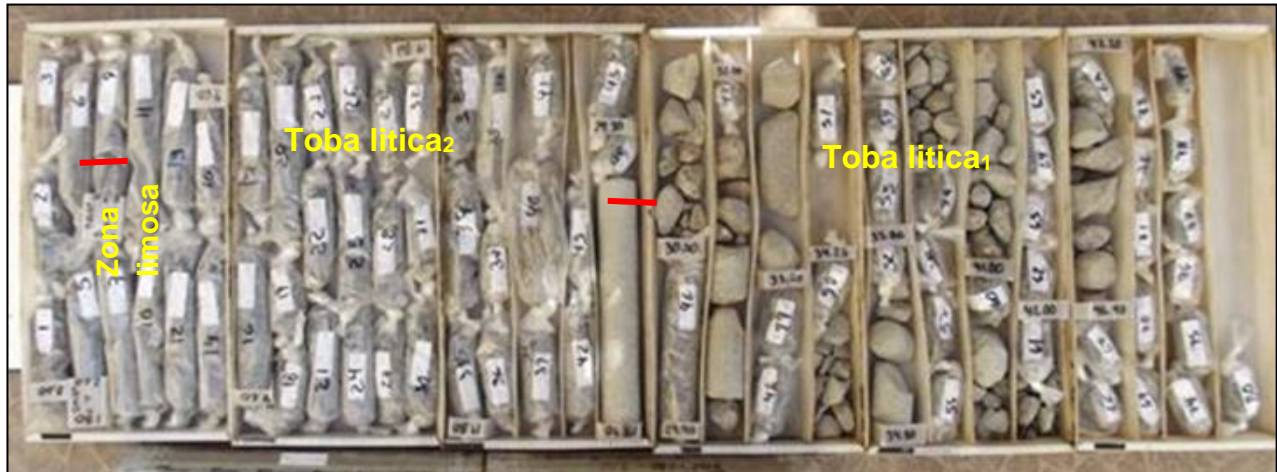
Esta información se revisó, analizó y reinterpretó, con el objetivo de detallar y complementar el modelo geológico elaborado a partir del levantamiento superficial de campo. A continuación, se describe cada uno de los sondeos y en la tabla 4.5, se muestra las profundidades de los sondeos.

Tabla 4.5. Profundidad de sondeos

Sondeo	Profundidad (m)
S1	54.40
S2	38.00
S3	30.44
S4	21.64
S5	20.5
S6	30.00

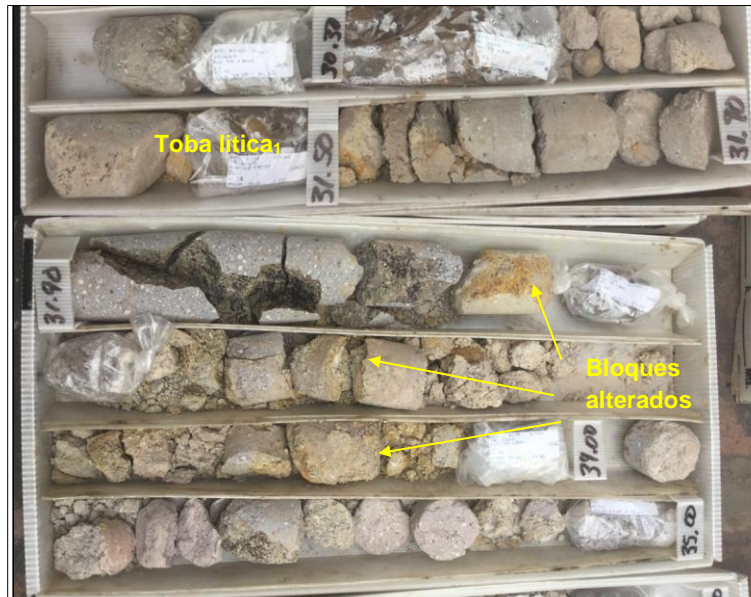
##### 4.4.1. Sondeos exploratorios

El sondeo S1 en los primeros 5.20 m se registraron limos de alta plasticidad, con arenas de consistencia blanda y coloraciones pardas, reinterpretada como la zona limosa alterada de la Toba lítica<sub>2</sub>. De acuerdo con la información proporcionada de los sondeos, se registró un número de, se identificaron tobas arenosas, con presencia de limos y arcillas, así como líticos de tamaños de gravas, que se identificaron como la toba lítica<sub>2</sub>. Este tramo presenta un número de golpes Posteriormente de los 30 al final del sondeo se registraron tobas con presencia de líticos de tamaños de bloques y gravas, inmersos en una matriz limo-arenosa, considerada como la toba lítica<sub>1</sub> (fotografía 4.38).



Fotografía 4.38. Testigos recuperados al final del sondeo 1. Identificación de la zona limosa y las subunidades Toba lítica<sub>2</sub> y Toba lítica<sub>1</sub>.

En el sondeo 2 se registraron de los 0.00 a los 6.00 m, limos de coloraciones pardas y grisáceas, que se consideran como la zona limosa alterada de la Toba lítica<sub>2</sub>, posteriormente de los 6.00 a los 21.00 m, se registran limos y arenas de coloración parda y grisácea, reinterpretados como Toba lítica<sub>2</sub>. De los 21.00 a los 35.00 m se registran tobas, con líticos de tamaños de gravas y gravillas grisáceos, inmersos en matriz limo arenosa, reinterpretado como toba lítica<sub>1</sub>. Finalmente, de los 31 a donde termina el sondeo, se identificaron líticos moderadamente alterados con coloraciones amarillentas, y matriz limo arenosa, que se puede asociar a la zona alterada, de la subunidad Toba lítica<sub>1</sub> (fotografía 4.39).



Fotografía 4.39. Testigos recuperados del sondeo 2 (de los 30.30 a 35.00 m) considerados como la zona alterada de la Toba lítica<sub>1</sub>.

El sondeo 3 en los primeros 12 m, se identificaron limos de consistencia de media a rígida, de coloraciones pardas, amarillentas y grisáceas, que se consideran como la zona limosa alterada (fotografía 4.40). De los 12.00 a los 17.00 se observan líticos de tamaños de gravas y gravillas, inmersos en una matriz limo-arenosa, reinterpretado como la toba lítica<sub>2</sub>. Por último, de los 17.00 a donde finaliza el sondeo se identificaron tobas de matriz limo-arenosa, con presencia de líticos grisáceos de tamaños de bloques, reinterpretado como la toba lítica<sub>1</sub> (fotografía 4.41).





Fotografía 4.40. Muestra recuperada del sondeo 3 (de los 8.20 a 8.80 m), reinterpretada como la zona limosa.



Fotografía 4.41. Testigos recuperados al final del sondeo 3.

En el sondeo 4 de los 0.00 a los 3.00 m se identificaron limos y arenas de consistencia media a rígida de coloraciones pardas, consideradas como la zona limosa. Posteriormente de los 3.00 a los 8.00 m se identificaron líticos grisáceos de tamaños de gravas y gravillas, inmersos en una matriz limo-arenosa, que se reinterpretó como Toba lítica<sub>1</sub>, de los 8 a los 14.00 m, se identificaron líticos de tamaños de gravas, gravillas y bloques, ligeramente alterados, reinterpretados como la

zona poco consistente y alterada. De los 14 a los 18 m, se identificaron limos y arcillas pardas claras y oscuras, con escaso contenido de líticos, reinterpretados como la subunidad Toba intercalada con paleocanales y el horizonte arcilloso producto de la zona poco consistente y alterada (fotografía 4.42). Finalmente, de los 18.00 hasta donde termina el sondeo, se identificaron líticos grisáceos de tamaños de gravas y gravillas, inmersos en matriz limo arenosa, considerada como la toba lítica<sub>0</sub> (fotografía 4.43).



Fotografía 4.42. Testigo recuperado de los 14.40 a los 15.00 m, donde se identifica la subunidad Toba intercalada con paleocanales y el horizonte arcilloso.



Fotografía 4.43 Testigos recuperados del sondeo 4 (de los 18.60m a los 21.60m) donde se muestran los bloques de la Toba lítica<sub>0</sub>.

En el sondeo 5 de los 0.00 a los 4.00 m se identificaron limos y arenas de consistencia media, grisáceos y pardos, considerados como la zona limosa alterada (fotografía 4.44). De los 4.00 a los 9.40 m se, observaron líticos grisáceos de tamaños de bloques, gravas y gravillas, inmersos en

una matriz limo-arenosa reinterpretado como la toba lítica<sub>1</sub>. Posteriormente de los 9.40 a los 15.00 m se identificaron limos y arcillas pardas claras y oscuras, con escaso contenido de líticos, reinterpretados como la subunidad Toba intercalada con paleocanales y el horizonte arcilloso producto de la zona poco consistente y alterada (fotografía 4.45. Finalmente, de los 15.00 hasta donde termina el sondeo, se observan líticos de coloraciones pardas y grisáceas de tamaños de bloques y gravas, considerados como la toba lítica<sub>0</sub> (fotografía 4.46).



Fotografía 4.44. Testigos recuperados de los 0.00 a los 9.80 m, considerados como la zona alterada de la Toba lítica<sub>1</sub>.



Fotografía 4.45 Testigo recuperado del sondeo 5, donde se identifica el contacto entre Toba intercalada con paleocanales y el horizonte arcilloso de la zona alterada de la Toba lítica<sub>1</sub>.



Fotografía 4.46. Testigos recuperados de los 38.80m a los 44.00 m, identificados como la Toba lítica<sub>0</sub>.

En el sondeo 6 de los 0.00 a los 11.00 m se identificaron limos y arcillas, medianamente consistentes de coloraciones pardas, que se considera como la zona limosa alterada (fotografía 4.47). De los 11.00 a los 26.00 m se registran limos, arenas y arcillas, de coloraciones, pardas, grises y verdosas con líticos de tamaños de gravas y gravillas, reinterpretado como Toba lítica<sub>1</sub>. Finalmente, de los 26 hasta donde termina el sondeo, se registran arenas y limos de coloraciones pardas y grisáceas, con líticos de tamaños de boleos que pueden asociarse a la zona alterada de la Toba lítica<sub>1</sub> (fotografía 4.48).



Fotografía 4.47. Muestra recuperada de los 2.60 a los 3.20 m, considerada como la zona limosa alterada.



Fotografía 4.48. Testigos recuperados de los 18.20 a los 28 m del sondeo 6.

#### 4.4.2. Pruebas de laboratorio

Para este estudio se realizaron distintas pruebas de laboratorio en las que se incluyeron algunas pruebas índice y de mecánica de rocas. Cabe destacar que estas pruebas se realizaron considerando al macizo rocoso como suelo, ya que, como hemos mencionado, para su correcto estudio, se debe tomar en cuenta como un macizo rocoso y no como tal debido a su génesis. Cabe destacar que, las distintas pruebas índice se realizaron en la matriz y las propiedades mecánicas se obtuvieron a partir de los líticos o bloques que contiene el macizo rocoso. Las pruebas índice que se realizaron, consisten en la obtención de Densidad de sólidos, Granulometría, Límites de consistencia, Clasificación SUCS y Contenido de agua (w%) (Tabla 4.6).



Tabla 4.6. Resultados de las pruebas índice de laboratorio.

Subunidad	DENSIDAD DE SOLIDOS Ss	GRANULOMETRÍA			LÍMITES DE CONSISTENCIA			CLASIF. SUCS	w %
		Grava %	Arena %	Finos %	Límite Líquido %	Límite Plástico %	Índice Plástico %		
Toba limo arenosa	2.6	1%	10-30%	60-90%	40-70%	30-50%	10-30%	ML-MH	38%
Toba lítica <sub>2</sub>		5-30%	30-50%	20-60%	30-50%	25-40%	6-10%	SM-ML	25%
Toba lítica <sub>1</sub>	5.561	20-40%	25-60%	20-60%	30-60%	20-40%	5-28%	SM-GM	23%
Toba intercalada con paleocanales									
Toba lítica <sub>0</sub>									

De acuerdo a la tabla de resultados, en primera instancia se observa que la unidad Toba limo-arenosa presenta mayor cantidad de finos (60-90%) en comparación con las demás subunidades, aunado a esto, cuanto mayor sea el contenido de finos, mayor es el contenido de agua. Corroborando este resultado con el obtenido en laboratorio del de contenido de agua ( $w=38\%$ ), así mismo el índice de plasticidad de la matriz de esta subunidad nos arroja valores entre 30 y 50%, lo que podría experimentar ligeramente un mayor grado de deformación plástica en comparación con las demás subunidades.

En cuanto a los ensayos de resistencia en suelo se obtuvieron datos únicamente de la unidad Toba limo arenosa (Ttb-limar), lo cuales consistieron en la obtención de Cohesión (C), Ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), Peso específico de la muestra ( $\gamma_m$ ), Grado de saturación (Gw) y módulo de elasticidad (Es), mientras que para los ensayos de mecánica de rocas se realizaron en los clastos y/o líticos embebidos en la matriz. Estos ensayos consistieron en la obtención de la Resistencia a la compresión simple ( $\sigma_c$ ), Resistencia a la tensión indirecta ( $\sigma_t$ ), Peso específico de la muestra ( $\gamma_m$ ) y Módulo de elasticidad (E) (Tabla 4.7). Cabe destacar que no se obtuvieron datos de todas las pruebas de laboratorio en todas las subunidades. De acuerdo con los valores de clasificación de las rocas a partir de su resistencia a la compresión simple, los líticos embebidos en la matriz se clasifican como Duros a Moderadamente duros (Tabla 4.8).



Tabla 4.7 Resultados de las pruebas de mecánica de suelos y mecánica de rocas.

Subunidad	ENSAYES DE RESISTENCIA EN SUELO						ENSAYES DE RESISTENCIA EN ROCA				
	C Kp/cm <sup>2</sup>	C t/m <sup>2</sup>	$\phi$ grados	$\gamma_m$ t/m <sup>3</sup>	Gw %	Es t/m <sup>2</sup>	$\sigma_c$ MPa	$\sigma_c$ t/m <sup>2</sup>	$\sigma_t$ t/m <sup>2</sup>	$\gamma_m$ t/m <sup>3</sup>	E t/m <sup>2</sup>
Toba limo arenosa	38.7	3.87492	35.5	1.55	85.44	2334.946184					
	24.4	2.44732	29.1	1.49	84.85	1176.75251					
Toba litica <sub>2</sub>							30.95	3106.21403	267	1.984	
							69.81	7006.72382		2.3747	
Toba litica <sub>1</sub>							58.91	5912.5742		2.4139	
							58.03	5824.63351		2.1733	
							41.1	4125.66		2.0489	791704.4771
Toba intercalada con paleocanales											
Toba litica <sub>0</sub>											

Tabla 4.8. Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple (tomada de González de Vallejo, 2002)

Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Ejemplos
< 1	Suelos			
1-5	Muy blanda	Blanda > 1,25	Muy baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón.
5-12,5	Blanda	Moderadamente blanda		
12,5-25		Moderadamente dura		
25-50	Moderadamente dura	Dura	Baja	Esquisto, pizarra.
50-100	Dura	Dura	Media	Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100-200	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía.
> 200		Extremadamente dura	Muy alta	Cuarcita, gabro, basalto.
> 250	Extremadamente dura			

#### 4.4.3 Exploración geofísica

Se ejecutaron un total de 7 tendidos de refracción sísmica (TRS) con longitudes de alrededor de 75 m y un total de 12 tendidos de dispersión de ondas superficiales (TDOS), con profundidades de investigación de 22 a 34 m.

Ambos métodos tienen como objetivo efectuar la caracterización de los materiales del subsuelo con base en los valores de velocidad de onda primaria o longitudinal (TRS) y con valores de



velocidad de onda secundaria o cortantes (TDOS), que ayudaron a definir y detallar el modelo geológico del sitio.

De acuerdo con los resultados de la exploración geofísica, se lograron diferenciar tres unidades sísmicas (US-1, US-2 y US-3) cuyas características generales se muestran en resumen en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Unidades sísmicas asociadas a las velocidades  $V_p$ .

Unidad Sísmica		Velocidad de Onda P (m/s)	Velocidad de Onda S (m/s)	Espesor (m)	Unidades Geológicas	Tipo y condiciones de los materiales
US-1		300 a 800	93 a 299	4-10	Suelos residuales y zona limosa.	Horizontes de material intemperizado y depósitos de toba lítica altamente alterado con matriz limosa.
US-2	US-2a	800 a 1,500	300 a 399	8-12	Toba lítica <sub>2</sub> ,	Depósitos de tobas poco alteradas, con predominio de matriz limo-arenosa y alto contenido de líticos de tamaños de 3 a 20 cm.
	US2b		400 a 499	9-20	Toba lítica <sub>1</sub> y depósitos de paleocanal.	Depósitos de tobas poco alteradas, con predominio de líticos de tamaños de hasta un metro con matriz limo-arenosa y horizontes de paleocanal.
US-3		1,500 a 2,000	500 a 687	--	Toba lítica <sub>0</sub>	Porción más profunda compuesta por toba lítica <sub>0</sub> y alto contenido de líticos.

**Unidad US-1.** Presenta los valores más bajos de  $V_p$  de entre 300 y 800 m/s y de  $V_s$  que se encuentran en el rango de 93 a 299 m/s. Esta unidad se registra en la parte superficial y se ha correlacionado con la unidad de suelo residual, la zona limosa alterada de la Toba lítica<sub>2</sub> que está compuesta primordialmente por matriz limo-arenosa. Los espesores de esta unidad se estiman de 4 a 10 m.

**Unidad US-2.** Se caracteriza por presentar valores de velocidad  $V_p$  bajos a medios de 800 a 1,500 m/s. Sin embargo, al analizar las velocidades de onda  $V_s$  o cortantes se subdividió esta unidad en dos (US-2a y US2b). Esto debido a que las ondas  $V_p$  son más susceptibles a cambio de densidad y fracturamiento, por lo que no se muestra una diferencia entre la Toba lítica<sub>2</sub> y la Toba lítica<sub>1</sub>. Mientras que las ondas  $V_s$  son más susceptibles a la resistencia cortante por lo que si logran diferenciar las unidades litológicas mencionadas, y su diferencia en el tamaño y cantidad de los bloques.





**Unidad US-2a.** Presenta valores medios a bajos de velocidad de onda secundaria (Vs), de 302 m/s a 399 m/s. Esta unidad se correlaciona con la toba lítica<sub>2</sub>, con predominio de matriz limo-arenosa y alto contenido de líticos de tamaños de 3 a 20 cm, con mayor proporción de bloques y líticos, así como horizontes alterados y arcillosos. Presenta espesores de 8 a 12 m.

**Unidad US-2b.** Presenta valores medios de velocidad de onda de corte de 400 a 499 m/s. Se correlaciona con la toba lítica<sub>1</sub> y los depósitos de paleocanal, las cuales consisten de depósitos de tobáceos con zonas alteradas en la parte del contacto entre la Toba intercalada con paleocanales. Presenta espesores de entre 9 a 20 m.

**Unidad US-3.** Presenta valores de onda primaria de entre 1,500 a 2,000 m/s y de onda secundaria entre 501 y 657 m/s. Fue identificada únicamente por el tendido TRS-12, sin embargo, gracias a que las velocidades de onda Vs penetran a mayor profundidad, fue posible su correcta distribución. Se ha correlacionado con materiales densos y compactos de la Toba lítica<sub>0</sub>, la cual presenta abundantes líticos del orden de 3 a 15 cm y en algunas zonas se presentan por debajo de la cota 2,815 msnm. Esta unidad presenta espesores de 3 a más de 11 m.

La sección longitudinal en función de Vp (figura 4.49) está conformada por seis tendidos de refracción sísmica, tiene una longitud de 530 m y se identificaron 3 unidades sísmicas en función de los valores de velocidad de propagación de onda P. La unidad US-1 se identificó en la porción somera de la sección con espesores de entre 4 y 10 m. Se caracteriza por presentar velocidades entre 300 m/s y 800 m/s y se correlaciona con el suelo residual y la zona limosa de la Toba lítica<sub>2</sub>. La unidad US-2 se encuentra subyaciendo a la unidad US-1, la cual presenta espesores de entre 15 y 25 m, así como velocidades de entre 800 a 1,500 m/s, y se correlaciona con la toba lítica<sub>2</sub>, Toba lítica<sub>1</sub> y tobas intercaladas con paleocanales. Por último, la unidad US-3 presenta valores de velocidad altos, de 1,500 a 2,000 m/s y se correlaciona con la Toba lítica<sub>0</sub>.

La sección longitudinal en función de Vs (figura 4.50) está conformada por ocho tendidos de dispersión de ondas superficiales, una longitud de 480 m y en la cual se identificaron 4 unidades sísmicas en función de los valores de velocidad de propagación de onda S. De esta manera, la unidad US-1 se presenta en la porción somera de la sección con espesores entre 4 y 11 m. Se caracteriza por presentar velocidades entre 100 m/s y 300 m/s y se considera como suelo residual y la zona limosa de la de toba lítica<sub>2</sub>. La unidad US-2a se encuentra subyaciendo a la unidad anterior, presenta espesores de alrededor de 11 m y presenta velocidades de entre 300 y 400 m/s. Se correlaciona con la toba lítica<sub>2</sub>. La unidad US-2b presenta espesores de entre 9 a 20 m. Se caracteriza por presentar velocidades de 400 a 500 m/s, y se correlaciona con la toba lítica<sub>1</sub> y con la toba intercalada con paleocanales. Por último, la unidad US-3, presenta los valores de velocidad más altos, los cuales varían de 500 a 700 m/s y se correlacionan con la Toba lítica<sub>0</sub>.

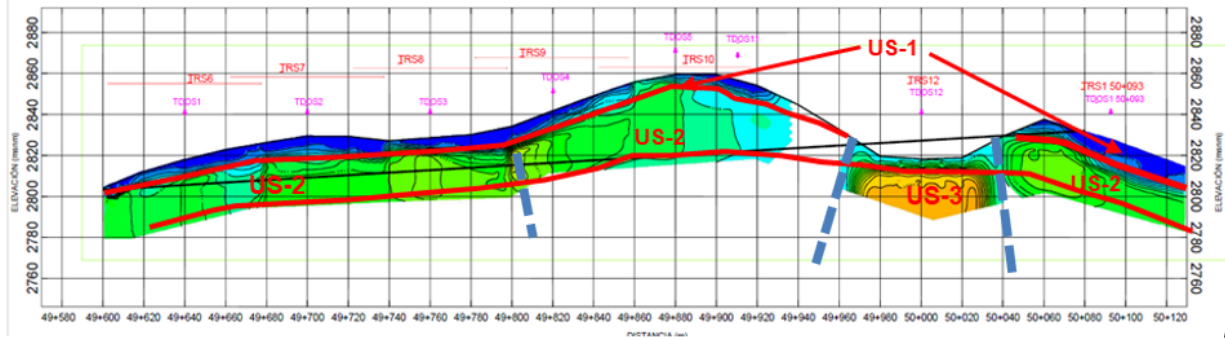


Figura 4.49. Sección sísmica longitudinal con velocidades  $V_p$  y correlación con las unidades geotécnicas.

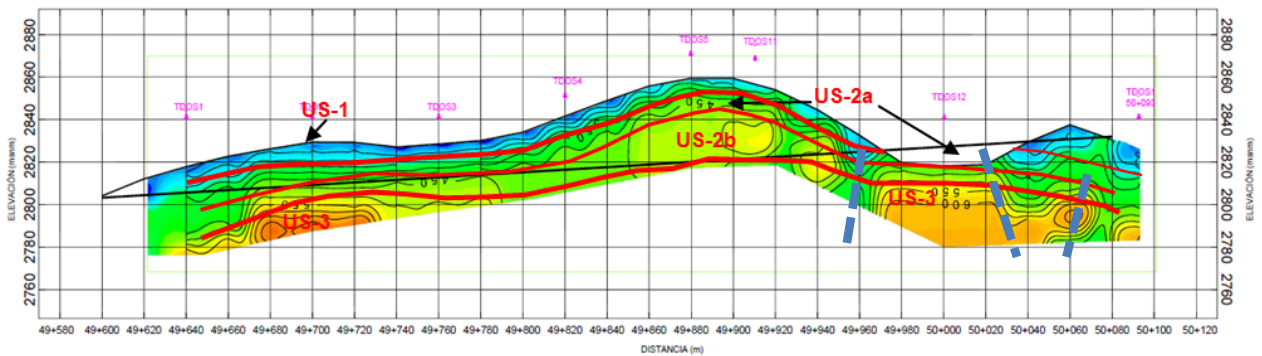


Figura 4.50. Sección sísmica longitudinal con velocidades cortantes  $V_s$ .

A continuación, se describen las secciones sísmicas transversales individuales correspondientes a los TRS ejecutados en el eje del trazo de la autopista.

En la sección transversal 1 se identificaron las unidades sísmicas US-1 y US-2 (figura 4.51). La primera presenta espesores de 6 a 15 m y velocidades de 300 a 800 m/s y se ha correlacionado con la unidad de suelo residual y la zona limosa alterada de la Toba lítica<sub>2</sub>. Subyaciendo se encuentra la unidad US-2, con espesores de más 19 m, y velocidades de 800 a 1000 m/s, que se correlaciona con la Toba lítica<sub>2</sub>, Toba lítica<sub>1</sub> y tobas intercaladas con paleocanales.

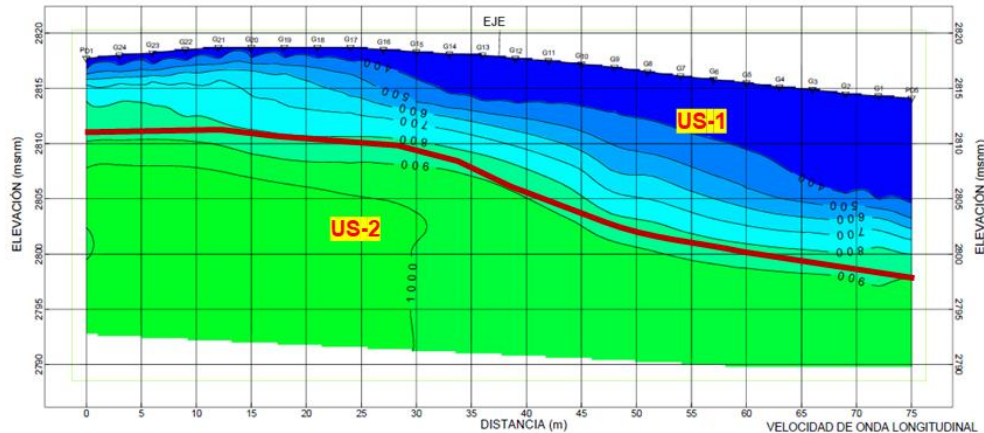


Figura 4.51. Sección sísmica transversal 1.

La sección transversal 2, de los 7 a los 11 m presenta variación de velocidades de 300 a 800 m/s (figura 4.52) que se considera como la unidad de suelo residual, y la zona limosa alterada de la Toba lítica<sub>2</sub>. Subyaciendo se encuentra la unidad US-2 la cual presenta espesores mayores a 19 m, velocidades de entre 800 a 1,200 m/s, y se correlaciona con la Toba lítica<sub>2</sub>, Toba lítica<sub>1</sub> y tobas intercaladas con paleocanales.

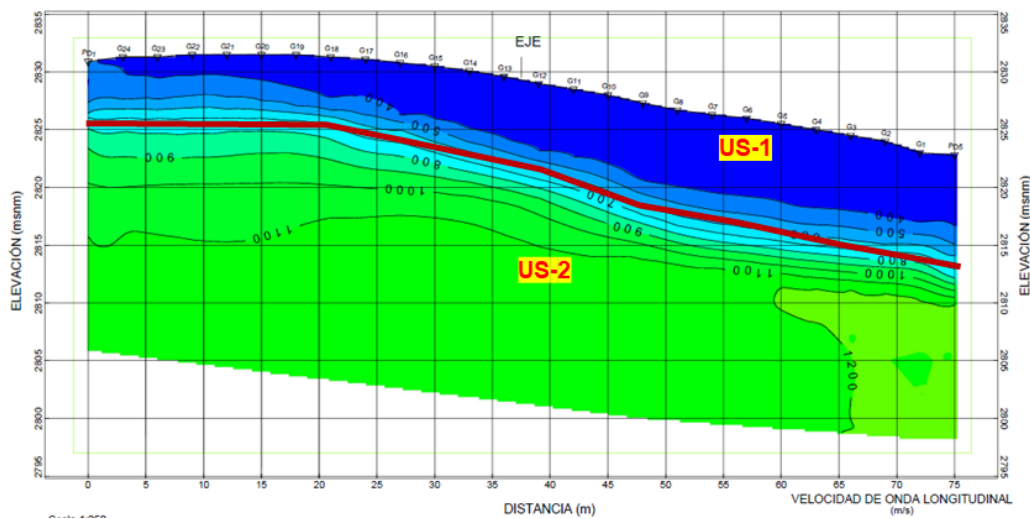


Figura 4.52. Sección sísmica transversal 2.

En la sección transversal 3 se identificaron las unidades sísmicas US-1 y US-2 (figura 4.53). La primera presenta espesores de entre 4 a 7 m, con velocidades de 300 a 800 m/s, que se considera como suelo residual y la zona limosa alterada de la Toba lítica<sub>2</sub>. Subyaciendo se encuentra la



unidad US-2, con espesores de más de 21 m y velocidades de 800 a 1,500 m/s; reinterpretado como la Toba lítica<sub>2</sub>, Toba lítica<sub>1</sub> y las Tobas intercaladas con paleocanales.

En la sección transversal 4 se identificaron las unidades US-1 y US-2 (figura 4.54). La primera presenta espesores de entre 5 y 18 m, con velocidades de 400 a 800 m/s, y se correlaciona con la unidad suelo residual y la zona limosa de la Toba lítica<sub>2</sub>. Subyaciendo se encuentra la unidad US-2 la cual presenta espesores mayores a 25 m, velocidades de entre 800 a 900 m/s, y se ha reinterpretado como la Toba lítica<sub>2</sub>, Toba lítica<sub>1</sub> y tobas intercaladas con paleocanales.

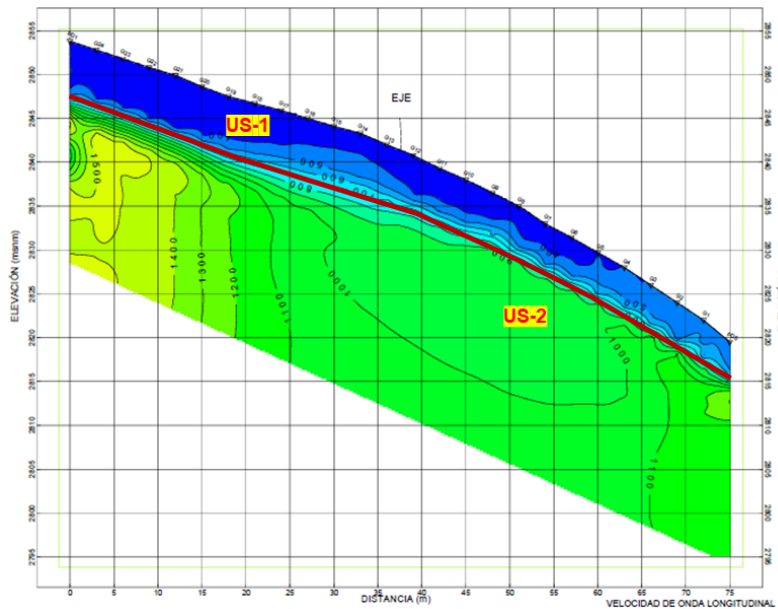


Figura 4.53. Sección sísmica transversal 3.

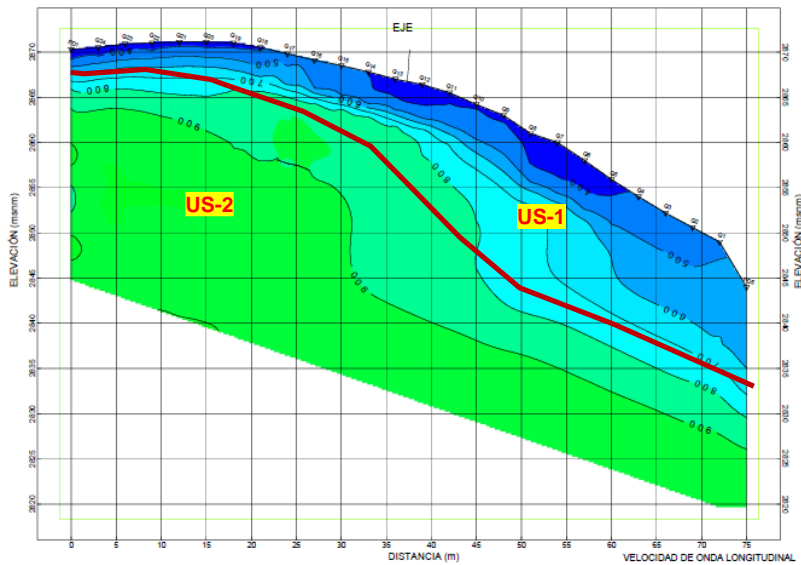


Figura 4.54. Sección sísmica transversal 4.

En la sección sísmica 5, se identificó la unidad US-2 y US-3 (figura 4.55). La primera presenta espesores de 3 a 7 m, velocidades de 700 a 1,500 m/s, y se ha correlacionado con las subunidades Toba lítica<sub>2</sub>, Toba lítica<sub>1</sub> y tobas intercaladas con paleocanales. Subyaciendo se encuentra la unidad US-3, presenta los valores de velocidad más altos de la zona, los cuales varían de 1,500 a 1,900 m/s, con espesores mayores de 22 m y se considera como la subunidad Toba lítica<sub>0</sub>, la cual presenta abundantes líticos con tamaños del orden de 3 a 15 cm de diámetro

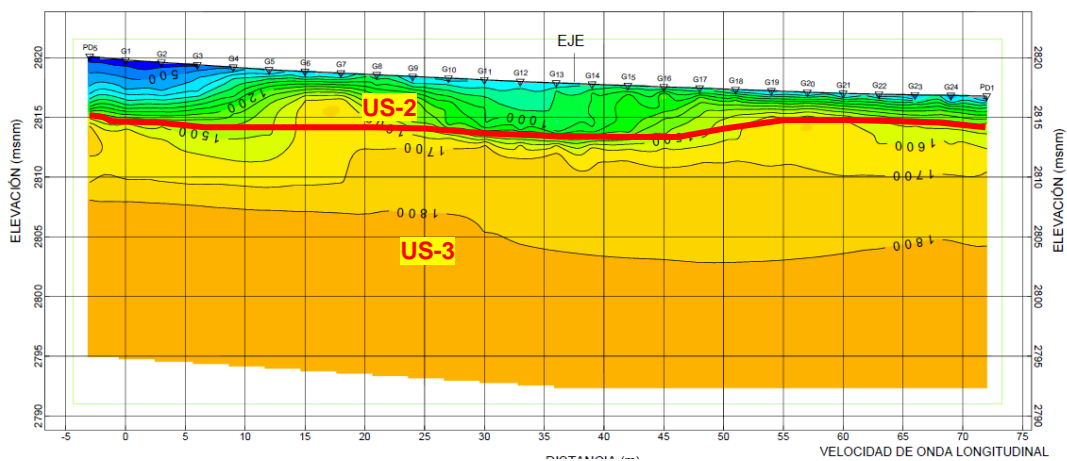


Figura 4.55. Sección sísmica transversal 5.



## 5. RESULTADOS

De acuerdo a los estudios geológicos de campo y a los resultados de los sondeos de exploración, el corte será excavado en su totalidad en el miembro inferior de la Sierra las Cruces, en la unidad geológica denominada Intercalación de tobas y en particular en las subunidades Toba lítica<sub>2</sub> y Toba lítica<sub>1</sub> que corresponden a tobas con matriz de composición limo-arenosa con abundante contenido de líticos, cuyos tamaños varían de 3 cm a 15 cm en la Toba lítica<sub>2</sub> y de 3 cm a 30 cm, con bloques aislados de hasta 1.3 m en la Toba lítica<sub>1</sub>.

En general la matriz limo-arenosa de las unidades tobáceas se observa cualitativamente que presenta cohesión alta, debido a la estabilidad que ha mostrado el corte por varios años y no se ha visto afectado por desconchamientos importantes. El sitio ha sido explotado por varios años y hasta la fecha sigue manteniendo pendientes parcialmente verticales.

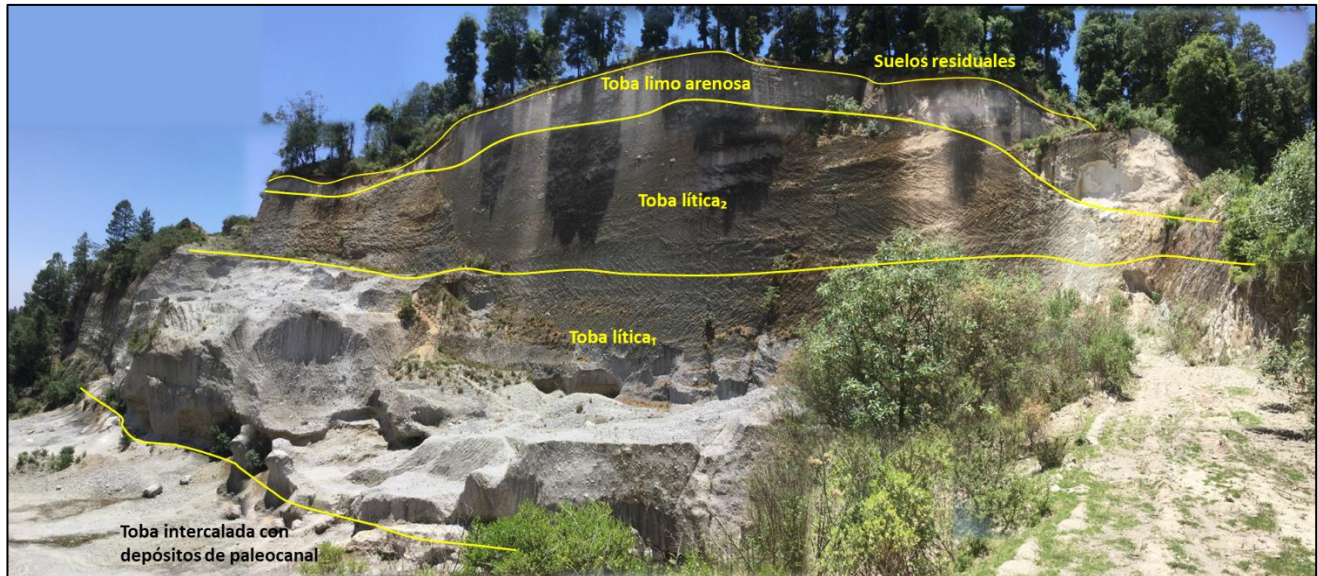
Para poder obtener sus correctas características y propiedades, se recomienda obtener muestras del sitio por barril triple, y de esta manera obtener una muestra intacta del sitio, y así poder realizar las pruebas de laboratorio más convenientes y en las subunidades por las que se realizará el corte. Así mismo, se sugiere obtener una muestra cúbica para realizar pruebas de corte directo y obtener un valor cuantitativo de cohesión y del ángulo de fricción interna, considerando que es un macizo rocoso y no un suelo.

Se puede observar que en dicha cantera se han efectuado cortes de más de 50 m de altura, con taludes de inclinación variable, estimados entre 50° y 70°, carentes de tratamiento y que, en general, se observan estables.

Los cortes de la cantera en su mayor parte corresponden a la Toba lítica<sub>2</sub> y Toba lítica<sub>1</sub> como se indica en la fotografía 5.1, con lo cual se puede tener una panorámica del aspecto que tendría el talud izquierdo del corte.

Tomando en cuenta las consideraciones descritas en los párrafos anteriores, se estima que los taludes del corte no presentarán problemas de inestabilidad general; sin embargo, dadas las características particulares de las unidades geológicas involucradas en el corte, se deberán tomar algunas previsiones para evitar problemas locales de estabilidad y mantener un nivel de servicio adecuado de la autopista a largo plazo. En los siguientes incisos se describen los aspectos geotécnicos que se deberán tomar en cuenta para los análisis de estabilidad, la definición de la geometría de los cortes y el diseño de tratamientos en los mismos.

A continuación, se hace un análisis cualitativo sobre los posibles sitios problemáticos, tomando en cuenta las secciones transversales realizadas en el sitio, en la figura 4.8 se muestra su ubicación en planta y en la figura 4.10a y 4.10b el perfil de cada sección.



Fotografía 5.1. Panorámica del corte de la cantera de más de 50 m de altura. En primer plano se identifica la Toba lítica<sub>1</sub> con bloques grandes de roca y al fondo se distingue la Toba lítica<sub>2</sub> que corresponde a la toba con líticos de menor tamaño. En el piso de la cantera afloran las tobas intercaladas con paleocanales.

## 5.1. TALUD IZQUIERDO

El talud izquierdo del corte tendrá una longitud aproximada de 370 m y podría tener una altura máxima superior a 50 m, dependiendo de la geometría final del talud. Será excavado en su totalidad en la Toba lítica<sub>2</sub> y Toba lítica<sub>1</sub>. Como ya se ha mencionado, se observa una cohesión alta, debido a las pendientes actuales del sitio que se tienen actualmente, por lo que se podrán proyectar taludes con inclinaciones entre 0.75:1 y 0.5:1 (53 a 63°) con algunas medidas pertinentes de sostenimiento y tratamientos del talud.

Cabe destacar que en el estudio geológico se detectaron algunas particularidades litológicas que desde el punto de vista geotécnico pudieran incidir de forma desfavorable en el comportamiento del talud. A continuación, se describen dichas particularidades, su probable incidencia en el talud y se proporcionan algunas recomendaciones para mitigar eventuales problemas derivadas de éstas.



### 5.1.1. SEC-A y SEC-C

En este tramo se efectuó el sondeo de exploración S3 en el que se detectó la subunidad toba limo-arenosa desde la superficie del terreno hasta casi 12 m de profundidad, cuya resistencia a la penetración estándar fue menor a 40 golpes. Este material fue identificado en el estudio geológico como una zona alterada limosa derivada de la Toba lítica<sub>2</sub> de matriz limo-arenosa y no corresponde a la toba limo-arenosa que aflora en la parte alta del cerro y de la cantera.

Con los resultados de ensayos de laboratorio, la zona alterada limosa se divide a su vez en un tramo superficial de limo de alta plasticidad (MH) de consistencia media a rígida (número de golpes  $N: 5 < N < 16$ ) de unos 5.5 m de espesor y un tramo inferior constituido por limo de baja plasticidad (ML) de consistencia muy rígida a dura ( $26 < N < 47$ ) de 5.5 m a 12 m de profundidad. Este material limoso de consistencia media a dura quedará expuesto aproximadamente en la mitad superior del talud como se indica en las figuras 5.2.

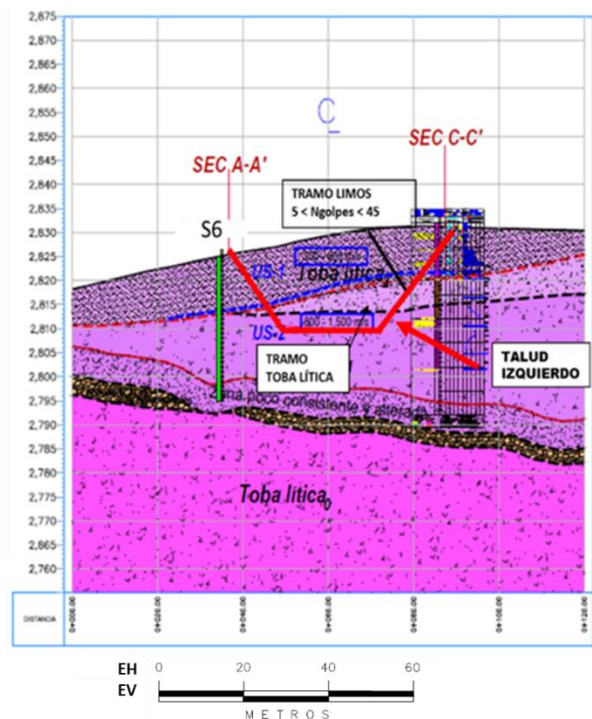
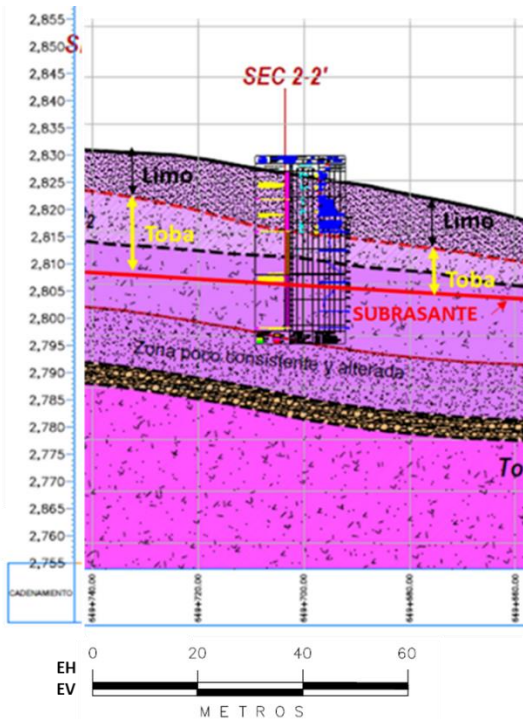
Para estimar cuál pudiera ser el comportamiento del tramo de talud excavado en limos de diversa consistencia, se puede asociar lo observado en la toba limo-arenosa que corona los cortes de la cantera en su porción sur. Aunque dicha toba se identificó como una unidad litológica distinta al material detectado en la parte superior del talud, su composición granulométrica es similar ya que en ambos materiales predominan los limos y los contenidos de arena son muy bajos.

Como se menciona en el capítulo 3, la toba expuesta en la cantera ha tenido desconchamientos posiblemente producidos por esfuerzos de tensión por relajación (fotografía 5.3). Dado que el talud carece de tratamiento, se podría esperar que en el talud izquierdo del corte en estudio pudiese suceder una situación similar a la ocurrida en la Toba limo arenosa, es decir, podrían presentarse desconchamientos de hasta 12 m de altura si el talud no llevara tratamiento alguno y su inclinación fuese del orden de  $60^\circ \sim 70^\circ$ .





LEYENDA		
<b>COLUMNA LITOLÓGICA</b> Depósitos aluviales Depósito aluvial Toba limo arenosa Tobas limo - arenosas Toba lítica <sub>2</sub> Tobas líticas predominio de matriz Toba lítica <sub>1</sub> Tobas líticas predominio de bloques Toba con paleocanales Intercalación de arcillas y depósitos aluviales Toba lítica <sub>0</sub> Tobas líticas matriz - bloques		<b>SIMBOLOGÍA GEOLÓGICA</b> Unidad litológica  Toba lítica Contacto litológico Contacto litológico inferido Contacto de zona limosa alterada Perfil geológico longitudinal Sección geológica transversal Línea de sección transversal
		<b>EXPLORACIONES</b> Fractura Sondeo exploratorio adicionales Línea de sección sísmica



Figuras 5.2 a) Corresponde a un corte longitudinal del talud izquierdo Se indica con doble flecha negra el espesor de los limos MH y ML y con doble flecha amarilla el tramo donde afloraría la toba lítica; b) Sección transversal de el mismo tramo. En ambas figuras se observa que la mitad superior del talud será excavado en limos de consistencia media a dura.



*Fotografía 5.3. En la parte superior se observa el desconchamiento ocurrido en dicho miembro en un corte de 60° ~ 70° de inclinación. En la parte inferior se indica con flecha el material de derrumbe deslavado por las lluvias. Una situación similar se podría esperar en el talud izquierdo, si no se toman las medidas de protección o estabilización pertinentes.*

### 5.1.2. SEC-5

En este tramo del talud izquierdo la altura del corte se incrementa en forma notable y es muy probable que la altura máxima del mismo sea mayor de 50 m.

La mayor parte del talud será excavada en un material competente que corresponde a las tobas líticas, cuya resistencia a la penetración estándar es elevada, aún en su matriz limo-arenosa. Esta situación es favorable puesto que se estima que no se requerirán medidas especiales o muy costosas para proporcionar los niveles de seguridad adecuados a la importancia de la obra.

No obstante, lo anterior, se recomienda realizar análisis de estabilidad de taludes en este tramo en particular, dada la altura del corte.

En la parte superior del talud se estima, de acuerdo al estudio geológico, que también quedará expuesto el material limoso que se identificó como alteración de la toba lítica subyacente. En este

tramo el espesor de dicho material se reduce a unos 5 m en promedio por lo que su influencia en la estabilidad general del talud es poco significativa.

En la figura 5.4 se presenta una sección transversal donde la altura del talud izquierdo es de 50 m. Así mismo, se puede observar que en la base del talud quedará expuesto un material que se identificó como una zona de tobas alteradas de baja consistencia. Las implicaciones de esta situación se comentan en el siguiente sub inciso.

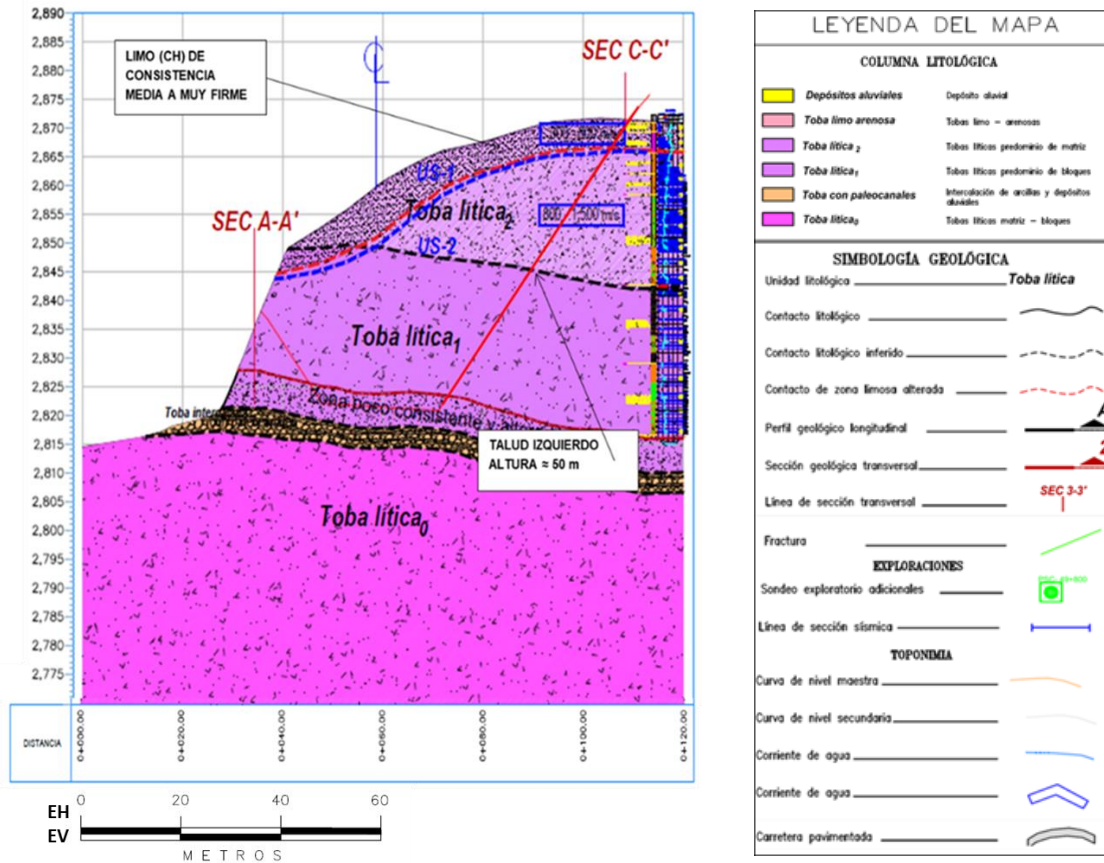


Figura 5.4. Sección transversal en el tramo de mayor altura del talud izquierdo. La mayor parte del corte se efectuará en tobas líticas competentes (Toba litica<sub>2</sub> y <sub>1</sub>).

### 5.1.3. Tramo de la SEC C-C'

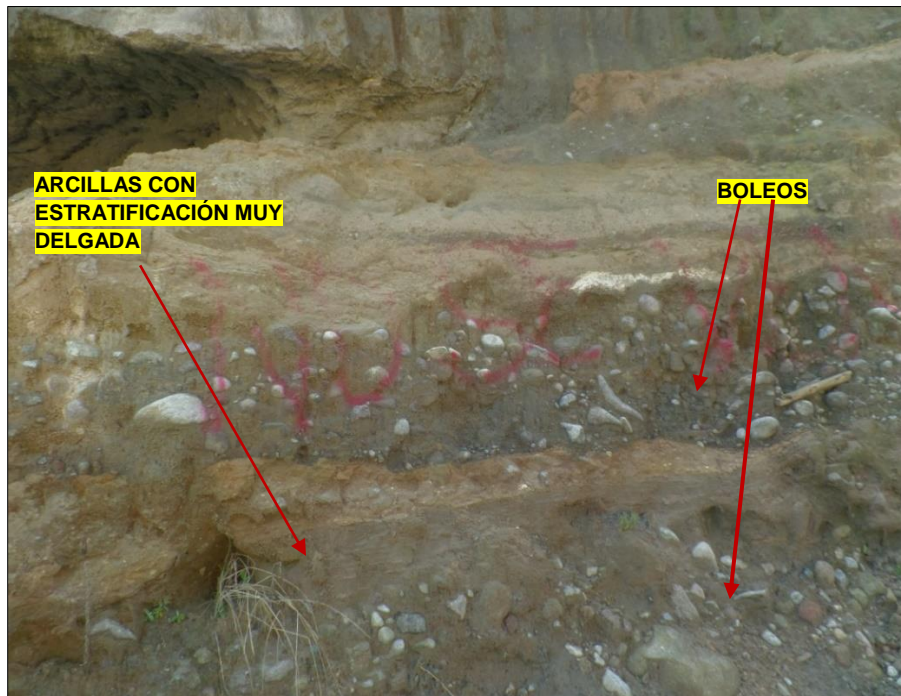
Como se indica previamente, en la base de la subunidad Toba litica<sub>1</sub> se detectaron algunas condiciones geológico-geotécnicas diferentes, que en general reducen la calidad de dicha subunidad. Esta zona corresponde a un horizonte tobáceo de matriz limo-arenosa que está



intercalado con horizontes de arcilla y con lentes de material aluvial que constituían cauces actualmente sepultados (paleocauces). Las características de estos materiales se describen en el apartado de la geología del sitio, por lo que sólo se comentan algunos aspectos geotécnicos a continuación.

En la fotografía 5.5 se presenta un detalle de un paleocauce, donde se puede observar que los boleos que lo constituye están embebidos en una matriz arenosa y arcillosa de baja consistencia, lo que hace fácilmente erosionable a este material al estar expuesto a la intemperie.

Otra característica particular de este horizonte es su permeabilidad que es considerablemente mayor que la correspondiente a las tobas líticas, así como su capacidad de almacenamiento de agua que igualmente es mayor que las tobas confinantes.



*Fotografía 5.5. Detalle de uno de los paleocanales detectados en el corte de la cantera. Se observa que los materiales son fácilmente erosionables.*

La diferencia de permeabilidades y capacidad de almacenamiento de agua resulta patente en la cantera puesto que el piso de la misma se encuentra actualmente al nivel del horizonte de los depósitos aluviales y, dada esta condición, se observan emanaciones de agua en la parte inferior del corte, así como en el piso de la cantera.



Las condiciones hidrogeológicas que se observan en la cantera, se estima que prevalecerán en la parte inferior del talud izquierdo en el tramo comprendido en la figura 5.6 que corresponde a un corte longitudinal por el talud izquierdo. Aunque su contacto quedará probablemente por debajo de la subrasante, la cercanía del mismo pudiera generar problemas de subpresiones o saturación por capilaridad de las capas inferiores del pavimento.

De la misma figura, la parte indicada como zona poco consistente y alterada se espera que aflore en la base del talud. Esta situación se considera que tendrá poca relevancia en la estabilidad general del talud, puesto que en dicha capa no se notó una disminución de resistencia muy drástica en los sondeos de exploración.

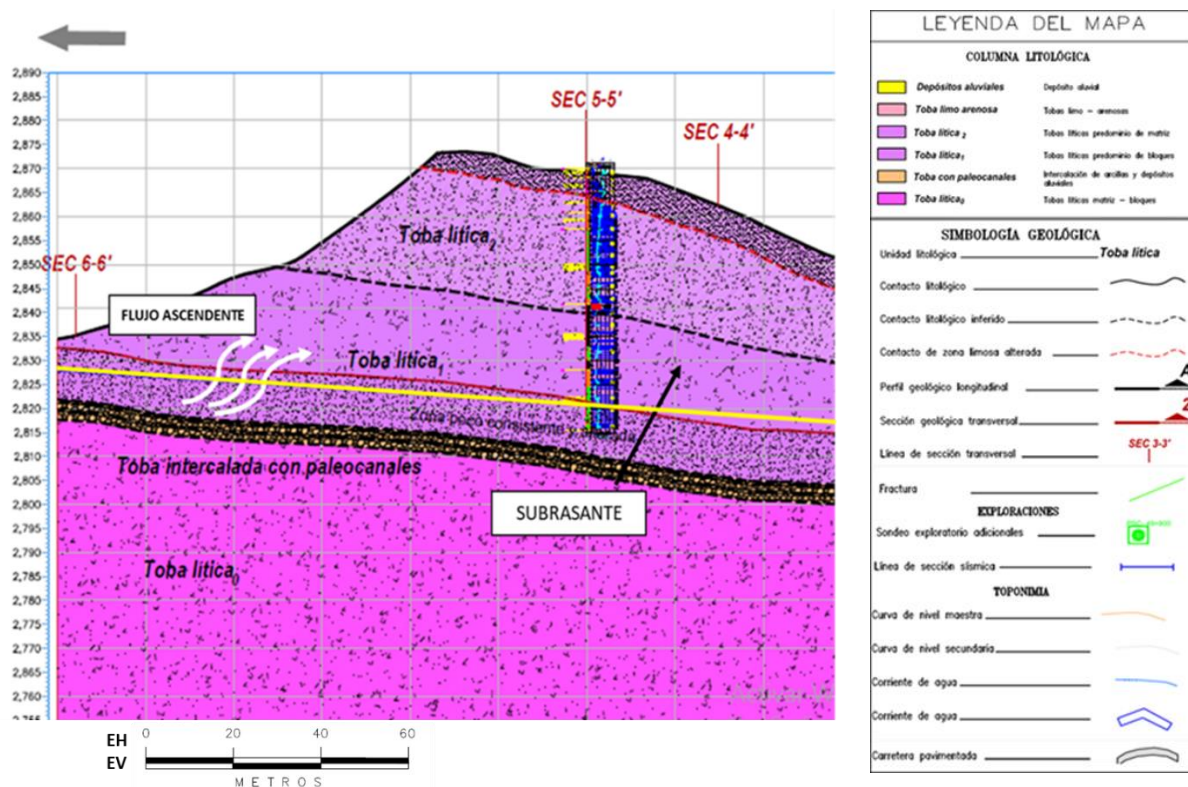


Figura 5.6. Sección longitudinal por el talud izquierdo en el tramo donde se interceptará un material de menor resistencia a la erosión y que probablemente será un conducto de aportación de agua subterránea.



## 5.2. TALUD DERECHO

El talud derecho tiene una longitud alrededor de 300 m y su altura será sensiblemente menor a la del talud izquierdo, con alturas máximas de entre 16 y 18 m.

La parte inicial del talud será excavado en la Toba lítica<sub>1</sub>, con valores de resistencia o cohesión relativamente altos desde el punto de vista de la mecánica de suelos. En la parte final del talud se espera que aflore la subunidad denominada Tobas intercaladas con paleocanales y arcilla, cuya resistencia se considera más baja que la subunidad sobreyacente.

De manera preliminar y de acuerdo con la información plasmada en *Planta y secciones geológicas* del talud, el tramo inicial tendrá una condición geotécnica desfavorable en su parte media superior, ya que se espera que en ese tramo queden expuestos los limos MH y ML que se consideran producto de la alteración de la toba subyacente y cuya resistencia es sensiblemente menor a esta última subunidad.

En el tramo final del talud se estima que en la parte inferior del corte aflore el horizonte o subunidad Tobas intercaladas con paleocanales y arcilla (Ttb-pl) cuyas características geotécnicas se describen en el inciso anterior.

Es probable que las condiciones del agua subterránea de las Tobas intercaladas con paleocanales en el talud derecho se modifiquen de manera significativa una vez realizado el tajo de la carretera, puesto que esta zona quedará aislada de la zona de recarga de la parte alta de la ladera, por lo que se espera que no se presenten condiciones desfavorables en el talud derivadas de esta condición hidrogeológica.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La zona del corte se sitúa en el bloque norte de la Sierra de las Cruces, (García-Palomo, et al.,2008). El área de construcción se realizará en tobas del Plioceno, en las que se identifican espesores con diferentes características texturales y composicionales y con patrón de pseudoestratificación hacia el SE. Dentro de la secuencia tobácea, las rocas estratigráficamente más antiguas que se identificaron en la zona, es la subunidad Toba lítica<sub>0</sub>. Posteriormente se distinguieron las Tobas con intercalación de paleocanales, Toba lítica<sub>1</sub> y Toba lítica<sub>2</sub>. Por otra parte, se observaron horizontes de suelo residual, zonas limosas alteradas producto de su alteración y depósitos aluviales, resultado de los sedimentos provenientes del arroyo Santa María.



2. La subunidad Tobas intercaladas con paleocanales no se presenta uniformemente a lo largo del sitio y exponen un contacto de tipo erosivo, que permiten la saturación y en algunos sitios afloramientos de agua por horizontes arcillosos que subyacen y fungen como capa impermeable.
3. Dentro de la Toba lítica<sub>1</sub> se identificó una zona de alteración amarillenta de 4 a 8 m de espesor, este horizonte se encuentra lítico-soportado con una matriz limo-arenosa. Comienza en la base donde se genera un horizonte de 30 a 60 cm de mala calidad y alta plasticidad. Por encima de este horizonte, la alteración provoca desprendimientos y socavamiento. Esta alteración se presenta de manera local y en algunas zonas se enmascara por una capa superficial menos alterada.
4. El macizo rocoso de manera local presenta poco fracturamiento. Regionalmente se identificaron dos lineamientos, el primero de ellos presenta dirección similar a la zona de fallas La Catedral con dirección NE-SW y el segundo lineamiento, presenta una dirección NW-SE con echado hacia el NE y se identificó mediante fotogeología, que debido a la cercanía y su actitud puede generar inestabilidad en el talud derecho, sin embargo, durante el levantamiento de campo, no se encontraron evidencias superficiales que lo puedan asociar a una falla o fractura.
5. Así mismo, se identificó una familia de fracturas F1 en los miembros Toba lítica<sub>1</sub>, y Toba lítica<sub>2</sub>, con actitud 260°/85°. Presenta un espaciamiento de 2 a 6 m (muy separada) y una continuidad alta de 10 a 20 m sin flujo de agua.
6. Se revisó, analizó, reinterpreto y complementó la información de los sondeos logrando identificar los contactos de interés entre las subunidades, así como las zonas de alteración del modelo geológico definido.
7. Se revisó, analizó y reinterpreto, la información obtenida a partir de los estudios geofísicos (TRS) y (TDOS) realizados en la zona de estudio, logrando detallar los contactos entre subunidades previamente obtenidos durante el levantamiento geológico de campo. A partir de la información geofísica, se identificaron tres unidades sísmicas.
8. Para el tramo comprendido de la sección 2-2' del talud izquierdo se recomienda realizar un estudio y análisis de estabilidad particular para definir la geometría más adecuada para el talud y el diseño del sostenimiento y/o tratamiento pertinente, tomando en cuenta la prevalencia de los limos de consistencia media a muy firme.
9. El tramo comprendido donde se realizaron las secciones 5-5', 4-4' y 3-3' del talud izquierdo tendrá una altura probablemente mayor a 50 m, lo cual es poco usual en los proyectos carreteros recientes. A pesar de que la excavación se realizará en materiales competentes,



se recomienda incluir un sostenimiento y tratamiento al talud a fin de conseguir niveles de seguridad altos y asimismo tener un nivel de servicio de la autopista adecuado a la importancia de esta obra. En particular para este tramo del talud, se recomienda considerar un abatimiento del mismo en los 4 m ó 5 m superiores, que corresponde a la zona de limos de mediana a muy firme consistencia; esto para evitar eventuales problemas locales de estabilidad en la parte alta del corte.

10. Para el tramo del talud izquierdo comprendido donde se realizaron las secciones 5-5', 4-4' y 3-3', dadas las condiciones de agua subterránea que se esperan encontrar, se recomienda monitorearlas, ya que se considera importante los escurrimientos de agua que se encontraron dentro del área de estudio y podrían afectar a la estabilidad de la obra.
11. Se recomienda obtener muestras del sitio por barril triple, y así obtener una muestra intacta del sitio, y poder realizar las pruebas de laboratorio más convenientes en las subunidades por las que se realizará el corte. Así mismo, se sugiere obtener una muestra cubica para realizar pruebas de corte directo y obtener un valor cuantitativo de cohesión y del ángulo de fricción interna, considerando que es un macizo rocoso y no suelo. Finalmente, se recomienda realizar análisis de estabilidad de talud en los sitios más problemáticos y un análisis más detallado del sitio considerando el talud como un bimrock (block-in-matrix-rocks).
12. Durante la participación en este proyecto, considero que desempeñé la diferentes habilidades y conocimientos adquiridos durante la carrera de ingeniería geológica, como son la petrología, geología estructural, estratigrafía, etc., sin embargo, día a día sigo reforzando y adquiriendo nuevos conocimientos que me ayudan a seguir creciendo profesionalmente.





## BIBLIOGRAFÍA

BARTON, NICK (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International Society for Rock Mechanics. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr. 15. 319-368

DEMANT A, (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, 2(2), 172-187.

GARCÍA-PALOMO A., ZAMORANO J.J., LÓPEZ-MIGUEL C., GALVÁN-GARCÍA A., CARLOS-VALERIO V., ORTEGA R., MACÍAS J.L, (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de las Cruces, México central. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Volumen 25, Núm. 1,2008, p158-178

GOMEZ-TUENA A., OROZCO-ESQUIVEL M.T., FERRARI L, (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 57, Núm. 3, 2005.

GONZÁLEZ DE VALLEJO L., FERRER, M., ORTUNO, L., OTEO, C., 2002, Ingeniería Geológica: Madrid, Pearson Educación, 715 p.

INEGI, (2009), Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Villa del Carbón, México.

INEGI, (1980), Carta Geológica – Minera E14-A28 “Villa del Carbón”, ESCALA 1:50 000 (1975), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

ISRM (1981). Rock characterization. Testing and monitoring. ISRM suggested methods. Brown, E. T. Ed. Commission on testing and monitoring. International Society for Rock Mechanics. Pergamon Press.

PASQUARÉ, G., GARDUÑO, V., TIBALDI, A., FERRARI, M., 1988, Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt: Tectonophysics, 146, 353-364.

SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, (1997), Carta Geológica – Minera E14-2 “Ciudad De México”, ESCALA 1: 250 000 (1997), Servicio Geológico Mexicano.